

УДК 519.6: 531

Валяшек В.Б., к.ф.-м.н., Каплун А. В. д.ф.-м.н.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль

Юзевич В.М., д.п.н.

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

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛУ У ВЕРШИНІ ТРІЩИНИ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТУ ЗМІЦНЕННЯ

Валяшек В.Б., Каплун А.В., Юзевич В.М. Математичне та комп'ютерне моделювання фізичних характеристик матеріалу у вершині тріщини з урахуванням ефекту зміцнення. На основі співвідношень механіки деформованого твердого тіла, фізики поверхневих явищ та електрохімії побудовано математичну модель для визначення енергетичних та електрохімічних характеристик механічно навантаженого елемента конструкції на межі з водним електролітом. Розглядається трубопровід із сталі 20 у 3 % розчині хлориду натрію (NaCl). Розроблено алгоритм та реалізовано обчислювальну процедуру щодо розрахунку поверхневої енергії пластичного деформування і перенапруження реакції розчинення металу для ювенільної поверхні у вершині тріщини при механічному навантаженні об'єкту (труби) в межах від границі текучості матеріалу σ_T до границі $1,246 \cdot \sigma_T$, встановленої нормативним документом. Проведено оцінювання ресурсу навантаженого внутрішнім тиском трубопроводу з пітингом на зовнішній поверхні, у вершині якого знаходиться корозійна тріщина.

Ключові слова: тріщина, ювенільна поверхня, коефіцієнт інтенсивності напружень, перенапруження, поверхнева енергія пластичного деформування, корозійний струм.

Валяшек В.Б., Каплун А.В., Юзевич В.М. Математическое та компьютерное моделирование физических характеристик материала в вершине трещины с учетом эффекта упрочнения. На основе соотношений механики деформируемого твёрдого тела, физики поверхностных явлений и электрохимии построена математическая модель для определения энергетических и электрохимических характеристик механически нагруженного элемента конструкции на границе с водным электролитом. Рассматривается трубопровод из стали 20 в 3 % растворе хлорида натрия (NaCl). Разработан алгоритм и реализована вычислительная процедура расчета поверхностной энергии пластического деформирования и перенапряжения реакции растворения металла для ювенильной поверхности в вершине трещины при механическом нагружении объекта (трубы) в пределах от границы текучести материала σ_T до границы $1,246 \cdot \sigma_T$, установленной нормативным документом. Проведена оценка ресурса нагруженного внутренним давлением трубопровода с питингом на внешней поверхности, в вершине которого находится коррозийная трещина.

Ключевые слова: трещина, ювенильная поверхность, коэффициент интенсивности напряжений, перенапряжение, поверхностная энергия пластического деформирования, коррозионный ток.

V. Valiashek, A. Kaplun, V. Yuzevych Mathematical and computer modeling of physical characteristics of material in top of crack taking into account effect of strengthening. On the basis of correlations of mechanics of deformable solid, physics of the surface phenomena and electrochemistry a mathematical model is created for determination of energetic and electrochemical characteristics of the mechanically loaded element of construction on a interface with a water electrolyte. An algorithm is worked out and calculable procedure is realized in relation to the calculation of surface energy of flowage and overstrain of dissolution reaction of metal for a juvenile surface in the top of crack at the mechanical loading of object (pipes) in limits from the limit of fluidity of material σ_T to the limit $1,246 \cdot \sigma_T$, set by a normative document. The estimation of resource of the pipeline loaded with intrinsic pressure is conducted with pitting on an external surface. It is taken into account that a corrosive crack is in the top of pitting.

Keywords: Cracks, juvenile surface, coefficient of intensity of tensions, overstrain, surface energy of flowage, corrosive current.

Постановка наукової проблеми. Розглядаємо метал в розчині електроліту з поверхневим дефектом у вигляді пітинга, у вершині якого знаходиться тріщина (рис. 1, зображено проєкцію на площину xOy). Зовнішнє корозійне середовище (в пітингу та тріщині) – водний розчин електроліту. Під дією механічного навантаження на метал (відбувається розтяг в напрямку осі Oy , якому відповідають напруження σ_{yy}) у вершині тріщини відбувається руйнування пасивних плівок і утворюється ювенільна поверхня (ЮП) шириною δ (довжиною L), проєкція якої є півколо πr , а також область пластичних деформацій при $\sigma_{yy} = \sigma_T$ (σ_T – границя текучості матеріалу) [1,2]. Відстань δ у першому наближенні можна трактувати як розкриття вершини тріщини δ_{1c} . Під впливом механічного навантаження і корозійного середовища вершина тріщини i , відповідно, ЮП поширюється в глибину тіла практично перпендикулярно до межі в напрямку осі x [2]. В околі вершини тріщини проходять катодні та анодні електрохімічні реакції, які характеризують корозійний процес розчинення металу. Вершину тріщини (ЮП) – трактуємо як анод (А), за її межами на бокових поверхнях – катодна область (К) [1,2]. Система «А – К» являє собою електрохімічну пару (рис. 1).

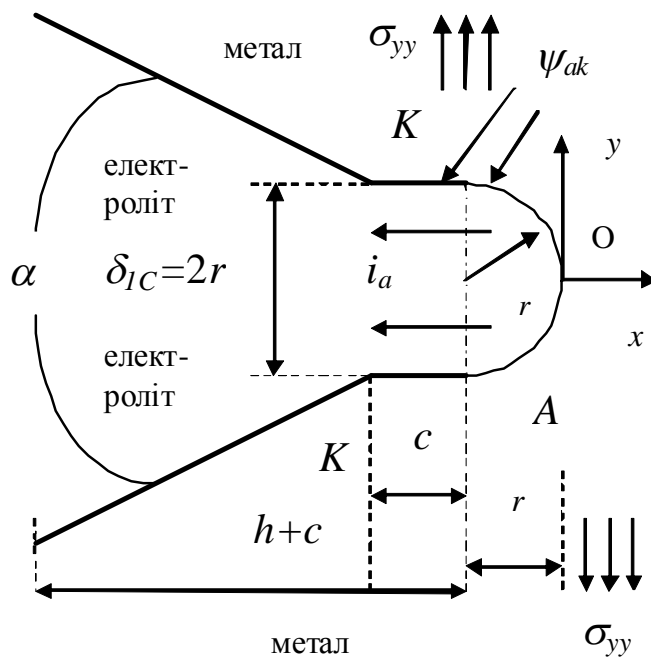


Рис. 1. Пітинг (h) з тріщиною (c) у трубі з відзначенням катодної (K) та анодної (A) ділянок. Загальна глибина дефекту $h+c+r$; α , δ_{IC} – кут і розкриття у вершині тріщини; $\Delta\psi_{ak}$ – різниця потенціалів між анодною і катодною частинами; I_a – густина анодного корозійного струму.

Fig. 1. A pitting (h) with a crack (c) in a pipe with marking of cathode (K) and anodic (A) areas. Total depth of defect $h+c+r$; α , δ_{IC} – the angle and the opening in the top of crack; $\Delta\psi_{ak}$ – a difference of potentials between anodic and cathode parts; I_a – density of anodic corrosive current.

В даній праці потрібно аналітично описати і дослідити сумісний вплив зовнішнього корозійного середовища та механічного навантаження на поверхневу енергію пластичного деформування, перенапруження реакції розчинення металу і анодний корозійний струм для ювенільної поверхні у вершині тріщини при механічному навантаженні об'єкту (трубопроводу) в межах від межі текучості матеріалу σ_T до межі міцності σ_B ($\sigma_{yy}/\sigma_T = \sigma/\sigma_T = 1 \div \sigma_B/\sigma_T$). Вказаний діапазон навантажень вибрано тому, що при σ_T починається пластичне деформування матеріалу, а при σ_B деформування завершується утворенням магістральної тріщини. Дана задача розглядається для аналізу умов деформування металу в корозійному середовищі з подальшим прогнозуванням ресурсу елементів конструкцій, які використовуються у трубопроводах і парогенераторах атомних електростанцій (АЕС) [3].

Ювенільна поверхня – поверхня металу у вершині тріщини, вільна від оксидів та інших забруднень [1]. В даній задачі (на рис. 1) її площа фактично πrL , але потік корозійних частинок проходить через площадку площею $2rL = \delta L$.

Предметом даного дослідження є макроскопічні співвідношення механіки деформівного твердого тіла, фізики поверхневих явищ тіла та електрохімії для визначення взаємозв'язків енергії пластичного деформування поверхні та перенапруження анодної реакції для ЮП шириною δ у вершині тріщини на границі між металом і зовнішнім корозійним середовищем.

Аналіз останніх досліджень. Для оцінювання змін енергетичних характеристик міжфазних шарів доцільно використати експериментальні дані щодо зв'язку між коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН) K_{IC} (Па· $\sqrt{м}$) та розкриттям δ_{IC} у вершині тріщини для сталі 20 у 3 % розчині NaCl (табл. 1) [2] при розтягуючих напруженнях ($\sigma/\sigma_T = 1 \div \sigma_B/\sigma_T$).

Таблиця 1

Числові значення розкриття δ_{1C} і густини корозійного струму I_a у вершині тріщини для сталі 20 в корозійному середовищі при механічних розтягуючих напруженнях σ/σ_T

Розкриття δ_{1C} , мкм	15,09	22,76	34,33	51,79
Густина корозійного струму I_a , $\frac{мМ}{рік}$	0,275	0,327	0,379	0,437
Відносне механічне напруження σ/σ_T	1,0	1,082	1,164	1,246

K_1 зв'язаний з розкриттям тріщини δ_{1C} та перенапруженням ζ реакції розчинення металу на основі відомих співвідношень [1,4,5]

$$K_1 = \sqrt{\frac{E}{1-\vartheta^2} \cdot \left(WPL - Z_{si} F \rho \delta \frac{\zeta}{M} \right)}, \quad K_1 = K_{1SCC} = \sqrt{E \cdot \sigma_T \cdot \delta_{1C}}. \quad (1)$$

Тут Z_{si} – формальний заряд сольватованих (гідратованих) іонів; $F = 96500$ Кл/моль – постійна Фарадея; $\delta = 2r$ – ширина фронту мікротріщини, що насувається, м (довжина фронту L перпендикулярна проекції на рис. 1); M – молекулярна маса металу, кг/моль ($M = 0,0558$ кг/моль – для сталі); K_{1SCC} – порогове значення КІН, тобто мінімальне значення, що відповідає початку поширення тріщини під впливом сумісної дії механічного навантаження і корозійного середовища; WPL – поверхнева енергія пластичного деформування; E, ϑ – модуль поздовжньої пружності матеріалу та коефіцієнт Пуассона відповідно; ζ – електрохімічне перенапруження (В), тобто відхилення електродного потенціалу від його рівноважного (по відношенню до приелектродного складу розчину) термодинамічного значення при поляризації електроду під струмом [6]. Необхідно відзначити, що друге співвідношення (1) впливає з КРТ критерію міцності (критичного розкриття тріщини), який визначає гранично рівноважний стан пружнопластичного тіла з тріщиною на момент досягнення в її вершині розкриття δ_{1C} і виконується для напруження $\sigma/\sigma_T=1$ [1]. Методика розрахунку K_1 для діапазону $1 < \sigma/\sigma_T \leq \sigma_B/\sigma_T$ наведена у праці [7] і ґрунтується на використанні підходів механіки деформівного твердого тіла. Фізична величина WPL входить у відому формулу (критерій міцності) Гріфітса-Орована [1].

За результатами контактного деформування різних марок сталі (17ГС, 17ГС-У, 06Г2НАБ, 10Г2ФБ, 10Г2ФБ-У, 10ЧГНМАЮ) встановлено емпіричне співвідношення, яке зв'язує КІН K_1 з WPL [8]:

$$K_1 = a_1 \cdot \sqrt{WPL} - a_2; \quad a_1 = 226 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{Н}}{м}; \quad a_2 = 6,98 \text{ МПа} \cdot \sqrt{м}. \quad (2)$$

У співвідношенні (2) необхідно підставляти числові значення $a_1=226, a_2=6,98, K_1$ виражати в $\text{МПа} \cdot \sqrt{м}$, тоді WPL отримаємо в $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^2}$.

Оскільки сталь 20 за своїми механічними властивостями не значно відрізняється від тих марок сталі, для яких наведено апроксимацію (2) у праці [8], то припускаємо, що лінійна залежність (2) наближено виконується і для сталі 20.

Співвідношення для густини струму I_a у вершині тріщини [9,10] наступне:

$$I_a = \frac{\alpha \cdot \chi \cdot \Delta\psi_{ak}}{\delta \cdot \ln\left(\frac{h+c+r}{\delta}\right)}, \quad (3)$$

де α – кут у вершині тріщини; χ – електропровідність електроліту; $\Delta\psi_{ak}$ – омична зміна електричного потенціалу між анодною і катодною частинами; h, c – глибина пітинга та тріщини, r

– радіус кривизни проекції ювенільної поверхні (рис. 1). Співвідношення (3) записано для вершини тріщини – аноду А, тобто для ділянки, яка відповідає півколу πr на рисунку. Бокові відрізки тріщини (c) і пітинга ($h/\cos(\alpha/2)$) є проекціями катодної К області дефекту, яка покрита слабо провідними окислами (пасивними плівками). Аналогічний рисунок наведено у праці [11] та відзначено, що вказаний дефект (пітинг з тріщиною) заповнений корозійним середовищем і знаходиться на поверхні труби діаметра D з товщиною стінки d ($h+c+r<d$).

В реальних умовах експлуатації елементів конструкцій, зокрема, в трубопроводах чи парогенераторах, необхідно враховувати явище стрес-корозії [2,3,12]. Тому співвідношення (3) доцільно узагальнити, тобто доповнити інформацією про зміни механічних параметрів та фізичних характеристик матеріалу. Метою роботи є дослідження впливу зовнішнього корозійного середовища та механічного навантаження на поверхневу енергію пластичного деформування і перенапруження реакції розчинення металу для ювенільної поверхні у вершині тріщини при механічному навантаженні об'єкту в межах від межі текучості матеріалу σ_T до межі міцності σ_B ($\sigma/\sigma_T=1\div\sigma_B/\sigma_T$). Поставлена задача розглядається для аналізу умов деформування металу в корозійному середовищі з подальшим прогнозуванням ресурсу елементів конструкцій, які використовуються у магістральних трубопроводах та парогенераторах атомних електростанцій (АЕС).

Основні допущення та рівняння. У першому наближенні приймаємо до уваги емпіричне співвідношення між розкриттям тріщини δ_{1C} і геометричним параметром δ , який характеризує ширину ювенільної поверхні, а також відповідне значення емпіричної константи ξ_δ [13]:

$$\delta_{1C} = \xi_\delta \cdot \delta; \quad \xi_\delta = 1. \quad (4)$$

для сталі 20 (гомогенного металу у твердому стані при температурі $T=20^0C$ і атмосферному тиску $p = 100$ кПа). Таким чином, у запропонованій для розгляду задачі $\delta=15,1\div 51,8$ мкм (табл. 1). Довжина (фронт) тріщини L перпендикулярна до рис. 1 і в даному підході не розглядається та не враховується. В реальних ситуаціях може бути $L \gg \delta$.

Деякі фізико-механічні характеристики сталі 20 наступні [14,15]:

$$Z_{\text{ст}} = 2; \quad E = 213 \text{ ГПа}; \quad \sigma_T = 245 \text{ МПа}; \quad \sigma_B = 470 \text{ МПа}; \quad \nu = 0,3; \quad \rho = 7860 \text{ кг/м}^3 \quad (5)$$

З урахуванням другого співвідношення (1), числових даних (5) і $\delta_{1C} = 15,1$ мкм (табл. 1) отримано:

$$K_{\text{ISCC}} = 28,1 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}} \quad (6)$$

Для аналізу граничного (пластичного) стану матеріалу у вершині тріщини, який відповідає умові деформування циліндричної труби, використовуємо критерій пластичності Губера-Мізеса і відповідні вирази для механічних напружень σ_y, σ_z [11]:

$$\sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_y \cdot \sigma_z = \frac{1}{3} \sigma_T^2, \quad \sigma_y = \frac{pD}{2d}; \quad \sigma_z = 9 \frac{pD}{2d}, \quad (7)$$

де σ_T – границя текучості матеріалу труби (x, y, z – прямокутні декартові координати); p – внутрішній тиск усередині труби. У співвідношеннях (7) для σ_y, σ_z враховано, що товщина стінки труби d значно менша діаметра D .

Для тіла (циліндричної труби), ослабленого дефектом типу пітинга з тріщиною у вершині, запишемо співвідношення для коефіцієнта концентрації напружень K_t і внутрішнього критичного тиску $p = p_{cr}$, аналогічні до тих, які подано у [11]:

$$K_t = \left(2,021 - 1,301 \cdot \beta + 0,727 \cdot \beta^2 - 0,147 \cdot \beta^3 \right) \cdot \frac{d}{d_1 - c};$$

$$p_{cr} = \frac{2\sqrt{2} \cdot d \cdot \sigma_T}{3K_t \cdot D} \cdot \frac{(1,5 + K_z) \cdot (r_0 + c)^4}{(r_0 + c)^4 + 0,5 \cdot r_0^2 (r_0 + c)^2 + r_0^4}, \quad (8)$$

$$\text{де } K_z = \left(\frac{d_1 - c}{2} \cdot \frac{2(d_1 - c) + 3r_0}{d_1 - c + r_0} - \frac{3d}{2K_t} \right) / \left(\frac{d}{K_t} + \frac{r_0}{3} \cdot \left(\frac{r_0^3}{(d_1 - c + r_0)^3} - 1 \right) \right); \beta = \frac{r_0}{d_1 - c};$$

критичний тиск p_{cr} (8) відповідає умові досягнення у вершині тріщини граничного (пластичного) стану згідно з критерієм Губера-Мізеса (7). Вираз для p_{cr} отримано аналітично із розв'язку задачі механіки деформівного твердого тіла [11].

Щоб оцінити фізичні величини у (8), використано наступні числові дані для циліндричної труби:

$$\begin{aligned} d &= 16 \text{ мм}; D = 0,71 \text{ м}; d_1 = 15,8 \text{ мм}; \\ h &= d - d_1 = 0,2 \text{ мм}; c = c_0 = 0,5 \text{ мм}; r_0 = 7,5 \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тут c_0, h відповідають відносному механічному напруженню $\sigma/\sigma_T = 1$ (табл. 1).

Необхідно відзначити, що концентратор напружень (пітинг) з короткою корозійною тріщиною ($c_0 = 0,5$ мм) – це система, де активна зона (окіл вершини тріщини) знаходиться на малій відстані від поверхні пітинга [2]. Тому проходить достатньо легка доставка продуктів розчинення металу (іонів заліза) з активної зони в загальний об'єм розчину електроліту [2]. При збільшенні довжини c тріщини доставка розчинених внаслідок корозії іонів заліза з активної зони в загальний об'єм розчину електроліту сповільнюється [2,12].

Критеріальним співвідношенням щодо оцінювання ресурсу трубопроводу буде задане значення внутрішнього тиску p_{cr} , яке знаходиться в межах $5,0 \div 5,5$ МПа і повинно відповідати нормативним документам [15]. Для прикладу вибираємо:

$$p_{cr} = 5,0 \text{ МПа}. \quad (10)$$

Використовуючи (8)–(10) і дані в табл. 1, числовим методом послідовно визначаємо глибину тріщини c для кожної пари значень $\delta_{1C}, \sigma/\sigma_T$ (табл. 2).

Таблиця 2. Глибина тріщини c для сталі 20 в корозійному середовищі при механічних розтягуючих напруженнях σ/σ_T

Глибина тріщини c , мм	0,5	1,6	2,66	3,55
Відносне механічне напруження σ/σ_T	1,0	1,082	1,164	1,246

При цьому вважаємо, що розміри каверни змінюються незначно, тобто змінами параметра h нехтуємо.

Відносна зміна густини струму I_a^*/I_{a0} для сталі 20 у корозійному середовищі (в глинистих ґрунтах з помірною вологістю) отримана експериментально для трубопроводу в залежності від терміну експлуатації [16], відповідає рівномірній корозії на зовнішній поверхні, перерахована на глибину тріщини c , оскільки c змінюється з часом, і подана у таблиці 3:

Таблиця 3. Відносна зміна густини струму I_a^*/I_{a0} для сталі 20 у корозійному середовищі при різних значеннях глибини c тріщини

Відносна зміна густини корозійного струму I_a^*/I_{a0}	1,0	0,429	0,229	0,171
Глибина тріщини c , мм	0,5	1,6	2,66	3,55

З (1), (2) для кожного набору ($\sigma/\sigma_T, \delta_{1C}, c$) з урахуванням (4)–(10) і даних в табл. 1-3 числовим методом визначено поверхневу енергію пластичного деформування WPL і електрохімічне перенапруження ζ . (рис. 2).

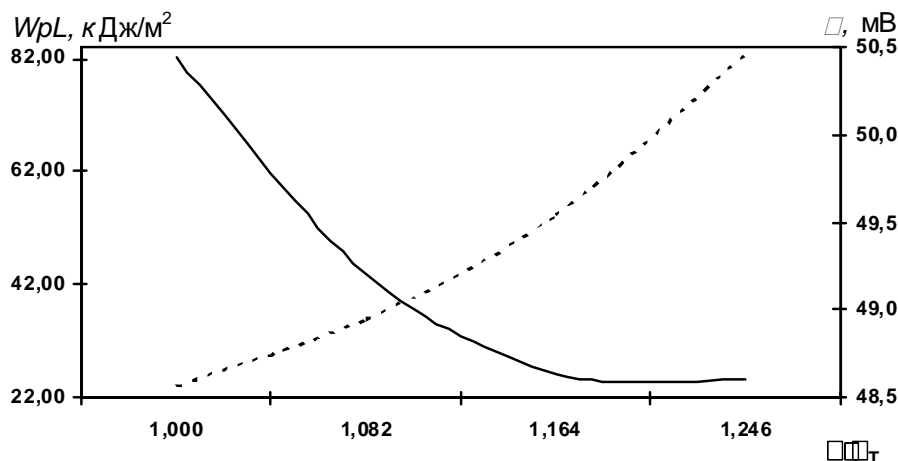


Рис. 2. Залежності поверхневої енергії пластичного деформування $W_{pL}(\sigma/\sigma_T)$ (кДж/м²) (пунктирна лінія) і перенапруження $\zeta(\sigma/\sigma_T)$ (мВ) (суцільна лінія) у діапазоні механічних розтягуючих напружень $\sigma/\sigma_T=1\div 1,246$ для сталі 20, що знаходиться в 3 % розчині NaCl.

Густину струму I_a в діапазоні $\sigma/\sigma_T=1\div 1,246$ апроксимуємо аналітичною залежністю:

$$I_a = I_{as} \cdot \left(1 + \beta_w \cdot \left(\frac{W_{pL} - W_{pL0}}{W_{pL0}} \right)^S \right), \quad (11)$$

де $I_{as} = 0,275 \frac{мм}{рік} = 0,237 \frac{А}{м^2}$; $\beta_w = 0,3669$; $S = 0,4406$; $W_{pL0} = 24,1 \frac{кДж}{м^2}$ ($\zeta = 50,4\div 48,6$ мВ;

$W_{pL} = 24,1\div 82,75 \frac{кДж}{м^2}$). В результаті розрахунків встановлено, що непевність (похибка) отриманих числових значень β_w, S не перевищує 5 %.

З урахуванням апроксимації (11), яка містить скалярну енергетичну характеристику поверхневого шару W_{pL} , узагальнимо відоме співвідношення (3) для густини струму у вершині тріщини:

$$I_a = \frac{\alpha \cdot \chi \cdot \Delta \psi_{ak}}{\delta \cdot \ln \left(\frac{h+c+r}{\delta} \right)} \cdot \left(1 + \beta_w \cdot \left(\frac{W_{pL} - W_{pL0}}{W_{pL0}} \right)^S \right). \quad (12)$$

З табл. 2 і (9) отримано $W_{cd} = \frac{c}{d} = \frac{3,55}{16} = 0,222$. Відповідна відносна глибина тріщини згідно з нормативними документами [15] вважається критичною ($(W_{cd})_{cr}=20\div 22$ %). Тут враховується запас міцності.

Для оцінювання ресурсу трубопроводу потрібно визначити час проходження тріщиною максимальної допустимої віддалі $c=3,55$ мм (табл. 2). Якщо б початкова густина корозійного струму $I_{as} = 0,275 \frac{мм}{рік}$ не змінювалась, то ресурс трубопроводу становив би 12,9 років. Але при цьому слід врахувати два реальні механізми зміни густини корозійного струму. Перший механізм характеризується зростанням густини струму корозії і пов'язаний з поверхневою енергією пластичного деформування (12) (табл. 1, рис. 2). Другий механізм супроводжується зменшенням густини струму корозії і його характер встановлено експериментально (табл. 3) [16]. Побудовано відповідний алгоритм, який враховує узагальнене співвідношення (12), два механізми змін густини струму анодного розчинення (корозії) і числовим методом отримано час росту корозійної тріщини, тобто ресурс трубопроводу:

T=18,7 роки,

який відповідає внутрішньому тиску $p_{cr}=5$ МПа і відносній глибині тріщини $W_{cd}=0,222$. При цьому крок обчислювальної процедури вибрано 1 рік ($\Delta T=1$ рік).

В корозійному процесі для трубопроводу із сталі 20 в 3 % розчині NaCl при $\sigma/\sigma_T=1\div 1,246$ зміни фізичних величин WPL, ζ такі (рис. 2):

$$\frac{(WPL)_{\max}}{WPL0} = \frac{82,75}{24,1} = 3,52; \quad \frac{(\zeta)_{\max} - (\zeta)_{\min}}{(\zeta)_{\max}} = \frac{50,4 - 48,6}{50,4} = 0,036.$$

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі підходів механіки деформівного твердого тіла, фізики поверхневих явищ та електрохімії сформульовано співвідношення математичної моделі для оцінювання поверхневої енергії пластичного деформування та перенапруження реакції розчинення металу у вершині тріщини для навантаженого металу, який знаходиться у водному розчині електроліту. Дана модель враховує коефіцієнт інтенсивності напружень (K₁), коефіцієнт концентрації напружень, поверхневу енергію пластичного деформування і стосується діапазону механічних навантажень металу від межі текучості матеріалу до межі, яка встановлена нормативними документами для елемента конструкції.

Проведено оцінювання значення K₁ для напруження, яке відповідає границі текучості матеріалу (металу). Це значення $K_{1SCC}=28,07$ МПа· $\sqrt{м}$ можна вважати граничною умовою і тестовим варіантом для визначення K₁ в діапазоні $\sigma/\sigma_T=1\div\sigma_B/\sigma_T$.

На основі аналізу залежностей між поверхневою енергією пластичного деформування (WPL) і навантаженням, що діє на трубопровід з пітингом, у вершині якого знаходиться тріщина, встановлено, що в діапазоні зміни розтягуючих механічних напружень від межі текучості σ_T до $1,246\cdot\sigma_T$ (межі, встановленої нормативними документами) для сталі 20 у 3 % розчині NaCl WPL зростає в 3,53 рази, а перенапруження ζ електродної реакції (розчинення заліза) зменшується на 3,6 %.

Узагальнено співвідношення густини струму у вершині тріщини для навантаженого металу (відбувається розтяг у напрямках осей y і z) з урахуванням скалярної енергетичної характеристики – поверхневої енергії пластичного деформування WPL.

Відповідно до запропонованої математичної моделі розроблено та реалізовано алгоритм числового розрахунку параметрів задачі, етапи якого наступні:

– визначення глибини тріщини c для пари значень розкриття δ_{1C} та відносного механічного напруження σ/σ_T з урахуванням критерію пластичності Губера-Мізеса і заданого значення тиску всередині труби;

– розрахунок поверхневої енергії пластичного деформування WPL та електрохімічного перенапруження ζ для заданої низки значень: глибини тріщини c, δ_{1C} , σ/σ_T ;

– з урахуванням узагальненого співвідношення (12), яке зв'язує густину корозійного струму I_a з шириною ювенільної поверхні і поверхневою енергією пластичного деформування WPL, двох механізмів зміни густини струму анодного розчинення (корозії), числовим методом розраховано час росту корозійної тріщини в навантаженій внутрішнім тиском трубі, тобто проведено оцінювання ресурсу трубопроводу.

Необхідно відзначити, що в даній праці вперше встановлено взаємозв'язок між такими фізичними величинами як внутрішній тиск p_{cr} трубопроводу, поверхнева енергія WPL пластичного деформування, коефіцієнти інтенсивності K₁ та концентрації K_c напружень, густина струму I_a та перенапруження ζ електродної реакції розчинення металу у вершині тріщини, ресурс трубопроводу і розроблено алгоритм оцінювання їх відносних змін з урахуванням критерію пластичності Губера Мізеса у вершині заповненої розчином електроліту тріщини, яка знаходиться на зовнішній поверхні труби.

Дослідження енергетичних та електрохімічних параметрів напружено-деформованого стану металевих елементів конструкцій і їх впливу на інтенсивність корозійних процесів у дефектах допоможуть оцінити час поширення корозійної тріщини і, відповідно, на основі катодного захисту оптимізувати заходи, які дозволять продовжити ресурс трубопроводу чи паропроводу атомної електростанції.

1. *Панасюк В. В.* Основы механики разрушения / *В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон.* – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
2. *Дмитрах І. М.* Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / *І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк.* – Львів: ФМІ, 1999. – 341 с.
3. *Карзов Г. П.* Зарождение и развитие коррозионного растрескивания в металле теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ-1000 в стояночных и нестационарных режимах эксплуатации / *Г. П. Карзов, С. А. Суворов, В. А. Федорова* // Материалы 8-го международного семинара по горизонтальным парогенераторам. – Подольск (Россия): ОКБ "Гидропресс", 2010. – С. 1-11.
4. *Джала Р.* Параметри та критерії для дослідження руйнування сталі в сірководневих середовищах / *Р. Джала, В. Юзевич* // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2012. – № 73. – Р. 148-151.
5. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия // Редактор *С. А. Симанова* – Санкт-Петербург: АНО НПО "Профессионал", 2004. – 838 с.
6. *Антропов Л. И.* Теоретическая электрохимия. Учеб. для хим.-технолог. спец. вузов / *Л. И. Антропов.* 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 519 с.
7. *Покровский В. В.* Прогнозирование влияния предварительного термомеханического нагружения на повышение сопротивления хрупкому разрушению конструкционных теплоустойчивых сталей с трещинами. Сообщение 1. Модель и методика расчета эффекта предварительного термомеханического нагружения / *В. В. Покровский, А. Г. Иванченко* // Проблемы прочности. – 2002. – № 6. – С. 96-106
8. *Бахрачева Ю. С.* Оценка вязкости разрушения сталей по результатам контактного деформирования / *Ю. С. Бахрачева* // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. – 2012. – Выпуск № 7. – С. 53-56.
9. *Kaeshe H.* Die Korrosion der Metalle. Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme / *H. Kaeshe.* – 1979. – Berlin-Heidenberg-New York: Springer-Verlag. – 400 p.
10. *Панасюк В. В.* Механика квазихрупкого разрушения / *В. В. Панасюк.* – К.: Наукова думка, 1991. – 416 с.
11. *Джала Р.* Оцінювання параметрів напруженого стану металу трубопроводу з корозійною каверною / *Р. Джала, В. Юзевич* // Матеріали 5-ї Міжнародної конференції «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій». – Львів: 24-27 червня 2014 р. – С. 675-680.
12. *Крижанівський Є. І.* Особливості стрес-корозії сталі магістральних трубопроводів у кислих електролітах / *Є. І. Крижанівський, Л. Я. Побережний* // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – № 4 (13). – С. 70-74.
13. *Сакара А.* Розрахункова модель докритичного росту корозійно-механічних тріщин у металевих пластинах / *А. Сакара, Ю. Банахевич* // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів: Фізико-механічний інститут НАН України, 2010. – № 3. – С. 23-29.
14. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. *И. К. Кикоина.* – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
15. *Анучкин М. П.* Трубы для магистральных трубопроводов / *М. П. Анучкин, В. Н. Горицкий, Б. И. Мирошниченко.* – М.: Недра, 1986. – 231 с.
16. *Ждек А. Я.* Визначення залишкового ресурсу тривало експлуатованих нафтопроводів із врахуванням наявних корозійних дефектів та умов експлуатації / *А. Я. Ждек, В. Я. Грудз* // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2012. – № 2 (32). – С. 134-142.