

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  $\sigma_T$  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  $\sigma_T$  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  $\sigma_T$  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  $\sigma_{yy}$ ) у вершині тріщини відбувається руйнування пасивних плівок і утворюється ювенільна поверхня (ЮП) шириною  $\delta$  (довжиною  $L$ ), проєкція якої є півколо  $\pi r$ , а також область пластичних деформацій при  $\sigma_{yy} = \sigma_T$  ( $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу) [1,2]. Відстань  $\delta$  у першому наближенні можна трактувати як розкриття вершини тріщини  $\delta_{1c}$ . 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).

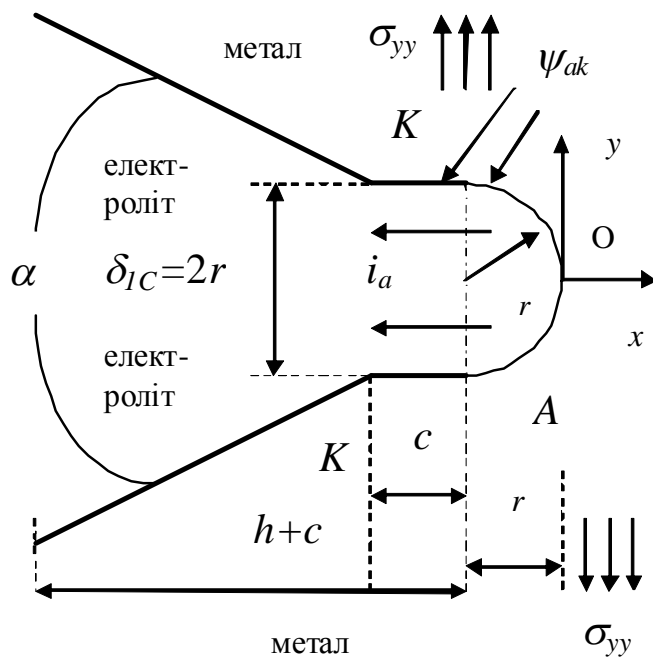


Рис. 1. Пітинг (h) з тріщиною (c) у трубі з відзначенням катодної (K) та анодної (A) ділянок. Загальна глибина дефекту h+c+r; α, δ<sub>1C</sub> – кут і розкриття у вершині тріщини; Δψ<sub>ak</sub> – різниця потенціалів між анодною і катодною частинами; I<sub>a</sub> – густина анодного корозійного струму.

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<sub>1C</sub> – the angle and the opening in the top of crack; Δψ<sub>ak</sub> – a difference of potentials between anodic and cathode parts; I<sub>a</sub> – 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<sub>T</sub> до межі міцності σ<sub>B</sub> (σ<sub>yy</sub>/σ<sub>T</sub>=σ/σ<sub>T</sub>=1÷σ<sub>B</sub>/σ<sub>T</sub>). Вказаний діапазон навантажень вибрано тому, що при σ<sub>T</sub> починається пластичне деформування матеріалу, а при σ<sub>B</sub> 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 = δL.

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<sub>1C</sub> (Па·√м) та розкриттям δ<sub>1C</sub> у вершині тріщини для сталі 20 у 3 % розчині NaCl (табл. 1) [2] при розтягуючих напруженнях (σ/σ<sub>T</sub>=1÷σ<sub>B</sub>/σ<sub>T</sub>).

**Таблиця 1**

**Числові значення розкриття  $\delta_{1C}$  і густини корозійного струму  $I_a$  у вершині тріщини для сталі 20 в корозійному середовищі при механічних розтягуючих напруженнях  $\sigma/\sigma_T$**

Розкриття $\delta_{1C}$ , 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 $\sigma/\sigma_T$	1,0	1,082	1,164	1,246

$K_1$  зв'язаний з розкриттям тріщини  $\delta_{1C}$  та перенапруженням  $\zeta$  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;  $E, \vartheta$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу та коефіцієнт Пуассона відповідно;  $\zeta$  – 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  $\delta_{1C}$  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  $\alpha$  – кут у вершині тріщини;  $\chi$  – 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  $\pi r$  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  $\sigma_T$  до межі міцності  $\sigma_B$  ( $\sigma/\sigma_T=1\div\sigma_B/\sigma_T$ ). 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  $\delta_{1C}$  і геометричним параметром  $\delta$ , який характеризує ширину ювенільної поверхні, а також відповідне значення емпіричної константи  $\xi_\delta$  [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  $\sigma_y, \sigma_z$  [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  $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу труби ( $x, y, z$  – прямокутні декартові координати);  $p$  – внутрішній тиск усередині труби. У співвідношеннях (7) для  $\sigma_y, \sigma_z$  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  $\sigma/\sigma_T$**

Глибина тріщини $c$ , мм	0,5	1,6	2,66	3,55
Відносне механічне напруження $\sigma/\sigma_T$	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  $\zeta$ . (рис. 2).

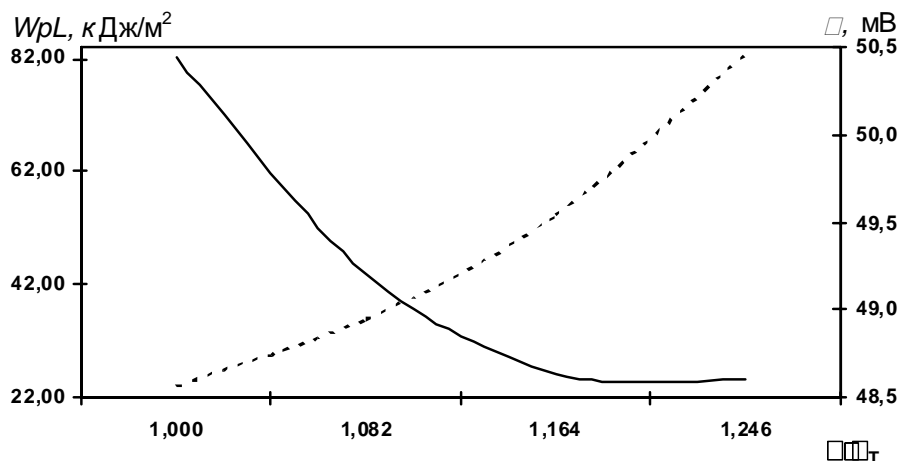


Рис. 2. Залежності поверхневої енергії пластичного деформування  $W_{pL}(\sigma/\sigma_T)$  (кДж/м<sup>2</sup>) (пунктирна лінія) і перенапруження  $\zeta(\sigma/\sigma_T)$  (мВ) (суцільна лінія) у діапазоні механічних розтягуючих напружень  $\sigma/\sigma_T=1\div 1,246$  для сталі 20, що знаходиться 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  $\beta_w, S$  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  $s=3,55$  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,  $\zeta$  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 (K<sub>1</sub>), 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 K<sub>1</sub> 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 K<sub>1</sub> 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  $\sigma_T$  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  $\zeta$  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  $\delta_{1C}$  та відносного механічного напруження  $\sigma/\sigma_T$  з урахуванням критерію пластичності Губера-Мізеса і заданого значення тиску всередині труби;

– розрахунок поверхневої енергії пластичного деформування WPL та електрохімічного перенапруження  $\zeta$  для заданої низки значень: глибини тріщини  $c$ ,  $\delta_{1C}$ ,  $\sigma/\sigma_T$ ;

– 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 K<sub>1</sub> та концентрації K<sub>c</sub> напружень, густина струму  $I_a$  та перенапруження  $\zeta$  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.