

СИСТЕМА ЗБАЛАНСОВАНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНИХ ДЕФЕКТІВ

Обджала Роман, Юзевич Володимир, Мельник Мар'ян, Семенюк Оксана, 2011

Фізико-механічний інститут імені Г.В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, 79060, Львів, Україна

Запропоновано збалансовані показники для діагностування корозійних дефектів на поверхні металу з урахуванням параметрів міжфазного шару.

Предложены сбалансированные показатели для диагностирования коррозионных дефектов на поверхности металла с учетом параметров межфазного слоя.

The balanced indexes of diagnosticating of corrosive defects on the metal surface taking into account parameters of interface layers are offered.

Вплив дефектів магістральних газопроводів, нафтопроводів і резервуарів на їхні експлуатаційні характеристики оцінюють, використовуючи низку нормативно-технічних документів (НТД) [1]. До першої групи НТД належать ті, які регламентують якість виготовлення труб і конструкцій та виконання робіт під час будівництва. Вони, як правило, містять суб'єктивні і дуже консервативні вимоги до розмірів дефектів, які віддалено пов'язані з реальним станом матеріалу і умовами експлуатації. І якщо впровадження їх на етапі підготовки доцільне, щоб забезпечити достатню якість виконання зварювальних робіт, то під час експлуатації трубопроводів це призводить до невиправданих витрат на ремонтні роботи, які часто пов'язані з виникненням додаткових, зокрема, корозійних дефектів чи збільшенням рівня навантаження [1].

Зв'язок проблеми з науковими та практичними завданнями. Практичне завдання: доцільно доповнити чинну нормативну документацію інформацією про корозійні дефекти та умови їх еволюції в процесі експлуатації трубопроводів і резервуарів.

Наукове завдання. З метою удосконалення наявної науково-технічної документації необхідно розробляти нові методики і засоби моніторингу дефектів у трубопроводах і конструкціях для встановлення допустимих меж змін параметрів, які характеризують динаміку корозійних дефектів в умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з цієї проблеми. Елементи методології оцінювання змін параметрів стану поблизу вершини тріщини у дефор-

мованому металі, заповненої корозійним середовищем, розглянуто у працях [2, 3]. У [2] на основі чіткої математичної постановки отримано розв'язок задачі математичної фізики для еліптичного отвору в електропровідному середовищі (інтенсивність зовнішнього навантаження $p=30$ МПа; модуль Юнга – $E = 2 \cdot 10^{11}$ МПа; коефіцієнт Пуассона – $\nu=0,3$), за результатами якої (в стаціонарному стані) встановлено, що для середовища, характеристики якого відповідають 1 % NaCl, зміна електродного потенціалу E_p на вершині еліпса порівняно з коловим отвором перевищує п'ять разів. У [3] задекларовано моделювання процесів руйнування металевих матеріалів за механічного навантаження і дії водневих та корозійних середовищ, але запропонований варіант моделі переобтяжений великою кількістю припущень і констант, можливості й методика визначення яких не цілком зрозумілі. Крім того, вважається, що область металу поблизу вершини тріщини заповнена острівцями пасивувального шару (катодними), розміри яких змінюються (невідомо як), а сама вершина тріщини поширюється стрибками малої довжини [3]. Якщо вершина тріщини поширюється стрибками, то значення всіх параметрів стану і процесів, а також фізичних характеристик матеріалу можуть змінюватись (а може, деякі з них і не будуть змінюватись). На основі запропонованої моделі [3] невідомо, як отримати відповіді на такого типу запитання.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, розглянутої у статті. Не розроблено достатньо обґрунтованих методик експериментальних досліджень для аналізу корозійних

процесів поблизу вершини тріщини в металах (типу заліза). Тому основним завданням є застосування низки теоретичних положень фізики поверхневих явищ для опису явищ, які характеризують ситуацію поблизу заповненої корозійним середовищем вершини каверни металу.

Об’єкт досліджень – приповерхневі шари металу в області, близькій до вершини каверни, в яку проникає рідке корозійноактивне середовище із ґрунту. Середовище моделюємо водним розчином (ґрунтовим електролітом), в якому розчинений кисень і водень.

Предмет досліджень – електричні та механічні параметри, що характеризують метал і корозійне середовище (розчин електроліту) біля вершини каверни.

Формулювання задачі. Розглядаємо двовимірну задачу. Область металу ($x > x_0$, ззовні еліпса, рисунок) контактує з ґрунтовим електролітом ($x < x_0$, внутрішня частина еліпса). В околі межі розділу середовищ (якщо $x = x_0$) розподілені електричні заряди і механічні напруження.

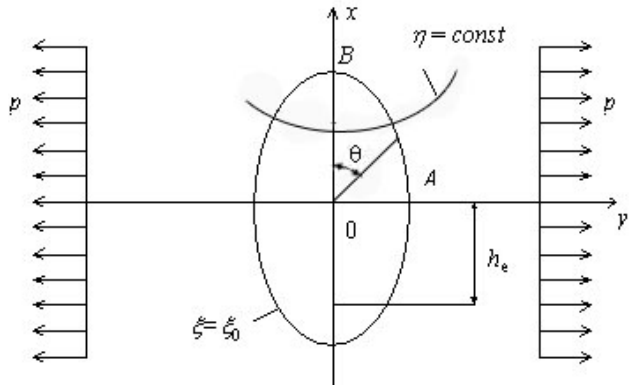
Кінетика перенесення активних частинок контролюється електрохімічною окисно-відновною реакцією ($Ox \Rightarrow Red$) в області ґрунтового електроліту:

$$Ox + n_e \cdot q_0 = Red, \tag{1}$$

де Ox , Red – початковий реагент і кінцевий продукт реакції; $q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – елементарний заряд (електрона); n_e – кількість електронів, які беруть участь в одиничному акті реакції.

В основу досліджень системи «метал–електроліт» покладено макроскопічний підхід, якому відповідають співвідношення нерівноважної термодинаміки та фізики поверхні твердого тіла [4]. Для опису закономірностей механічних, дифузійних та електричних процесів, зокрема корозійних струмів і змін енергетичних та міжфазних параметрів, використаємо систему рівнянь і граничних умов, що характеризують термодинамічний стан системи «метал–електроліт» під час електрохімічної корозії поблизу вершини каверни, у лінійному наближенні залежності між густиною струму та потенціалом поверхні металу (електрода) [3, 4].

Надалі вважаємо, що в площині xOy (y металі) є еліптичний отвір (нескінченний по осі z з центром у початку координат), заповнений ґрунтовим електролітом (рисунок). Отвір у першому наближенні моделює каверну.



Розглянемо рисунок. Площина xOy з отвором еліптичного перерізу під дією одновісного (y напрямі осі y) розтягу напруженнями p на нескінченності: h_e – параметр еліпса ($2h_e$ – відстань між фокусами еліпса); x, h – еліптичні координати. Кут θ відраховується від позитивного напрямку осі x , тобто від точки B за годинниковою стрілкою, і в точці A набуває значення $\pi/2$.

Розглядатимемо площину металу з отвором ($x = x_0$) в умовах плоскої задачі (плоска деформація) й умови на нескінченності такі [5]:

$$S_{yy} = -p; \quad S_{xx} = S_{xy} = S_{zz} = 0, \tag{2}$$

де p – задана інтенсивність зовнішнього навантаження; $S_{yy}, S_{xx}, S_{xy}, S_{zz}$ – компоненти тензора механічних напружень.

Основна частина. Поверхневий натяг вздовж контуру еліпса визначається за допомогою співвідношення [5]

$$s_s(h) = \int_{x_0}^{x_m} (s_{hh} + s_q^p) dn_e, \tag{3}$$

де n_e – нормаль до поверхні у конкретній точці еліптичного отвору, наприклад, при $h = 0 - dn_e = dx = h_e \cdot sh \xi \cdot d\xi$; $x = x_m$ – поверхня, що обмежує поверхневий шар твердого тіла; $s_{xx} + s_{yy} = s_{xx} + s_{hh}$;

$$s_q^p = p \cdot \frac{1 - m^2 - 2 \cdot m + 2 \cdot \cos(2 \cdot q)}{1 + m^2 - 2 \cdot m \cdot \cos(2 \cdot q)}, \tag{4}$$

$m = (a_e - b_e) / (a_e + b_e)$ – безрозмірний параметр еліпса; a_e, b_e – півосі еліпса по x та y відповідно; кут θ подано на рисунку; s_{xx}, s_{hh} – компоненти тензора механічних напружень в еліптичних координатах. Товщина поверхневого шару в області металу в точці B (якщо $\theta = 0$) визначатиметься наближеним співвідношенням $h_B = h_e \cdot |\xi_m \cdot sh \xi_m - \xi_0 \cdot sh \xi_0|$ згідно з інформацією, викладеною у праці [6].

Енергетичний баланс у процесі поширення корозійної каверни (тріщини) в металі можна подати аналогічно, як у ситуації корозійного розтріскування: робота пластичної деформації – P_{PL} , зміна початкового запасу енергії W_{zp} , виділення енергії у процесі електрохімічної реакції W_{ec} [7]:

$$P_{PL} = W_{zp} + W_{ec} = \frac{K_I^2(1-n^2)}{E} + \frac{zFr}{z} \cdot \frac{d}{M}, \quad (5)$$

де K_I — коефіцієнт інтенсивності напружень; n — коефіцієнт Пуассона; E — модуль Юнга; z — формальний заряд сольватованих іонів; F — стала Фарадея; r — густина матеріалу; δ — висота фронту каверни, що насувається; M — молекулярна маса металу; z — перенапруження анодної реакції. Великою поверхневою енергією в (5) можна нехтувати, оскільки вона мала порівняно з роботою пластичної деформації P_{PL} [7].

За порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I_{SCC}}$, тобто за мінімального значення K_I , що відповідає початку поширенню корозійної каверни, рівняння (5) набуває такого вигляду [7]:

$$K_{I_{SCC}} = \sqrt{\frac{E}{1-n^2} \cdot \left(\frac{P_{PL} - zFrdz}{M} \right)} = \sqrt{k_1(P_{PL} - k_2 \cdot z)}. \quad (6)$$

Із виразу (6) видно, що P_{PL} , z — основні величини, від яких залежить $K_{I_{SCC}}$. Значення роботи пластичної деформації P_{PL} зменшуватиметься в результаті збільшення або межі текучості металу, або швидкості механічного зміцнення у вершині каверни. В результаті кожен з цих чинників при постійному значенні z зменшуватиме величину $K_{I_{SCC}}$ і, отже, знижуватиме ступінь опору щодо поширення корозійної каверни (тріщини). Збільшення перенапруження анодної реакції z (в цьому випадку потенціал металу стає електропозитивнішим) за певного значення роботи пластичної деформації P_{PL} , згідно із співвідношенням (6), приводитиме до пониження опору поширення каверни (тріщини). Величина анодного перенапруження z є функцією електрохімічних умов усередині каверни (тріщини) і, відповідно, умови поширення корозійного дефекту залежатимуть від pH (водневого показника) розчину електроліту, активності аніонів, електродного потенціалу, хімічного складу металу, поверхневого натягу і поверхневої енергії поблизу вершини каверни (тріщини), а також умов формування пасивувального шару [7].

Напруження, що виникають в металі, і швидкість росту корозійного дефекту зв'язують за допомогою співвідношень нерівноважної термодинаміки [7].

Деформація металу e (e — перший інваріант тензора деформації) розглядається на стадії лінійного зміцнення, коли дислокації шикуються і рухаються в системі паралельних площин ковзання за відсутності поперечного ковзання. З математичних міркувань впливає ряд феноменологічних рівнянь, що відображають взаємозв'язок процесів пластичної деформації і стрес-корозії у металах. Такі рівняння за одночасного процесу деформування і електрохімічної корозії набувають такого вигляду [7]:

$$J_d = L_A A + L_B z; \quad I_k = L_C e + L_d z, \quad (7)$$

де J_d — густина потоку дислокацій (дислокаційний струм); I — густина електричного струму при корозії; A — узагальнена сила (хімічна спорідненість процесів створення і руху дислокацій); феноменологічні коефіцієнти: L_A — коефіцієнт, що характеризує провідність; L_d — характеризує поляризованість електрода; $L_C = L_B$ регулюють ступінь взаємного впливу деформації та електрохімічної корозії і виражають кількісно явище механохімічного ефекту. Фізичний сенс цього коефіцієнта (L_C) полягає у зміні хімічного потенціалу металу в результаті його пластичної деформації, яка пов'язана з ослабленням міжатомних зв'язків у місцях скупчення дислокацій.

Використаємо базову концепцію механіки корозійного руйнування конструкційних матеріалів. Згідно з нею стан зони передруйнування матеріалу в околі вершини каверни можна описати такими групами параметрів [8]: $P_f(s)$ — параметри, що характеризують напружено-деформований стан матеріалу і є функціями прикладених до тіла зовнішніх зусиль, яким відповідають напруження s (s — перший інваріант тензора механічних напружень); $L_n(t)$ — параметри, які визначають у часі t фізико-хімічні процеси, що проходять між деформованим металом і корозійним середовищем; $B_m(s)$ — параметри, що характеризують стан поверхонь матеріалу « s », які є до руйнування і утворюються під час руйнування (новоутворену поверхню називають ювенільною [8,9]). Швидкість локального корозійного руйнування матеріалу (тобто швидкість розвитку корозійної каверни) подамо аналогічно, як для корозійно-втомної тріщини [8]:

$$\frac{da}{dt} = f(C_i, e, P_f(s), L_n(t), B_m(s)), \quad (8)$$

де a — характерний лінійний розмір каверни (тріщини) у напрямку її поширення; C_i — константи, що характеризують систему «матеріал (метал) – корозійне

середовище»; $i, j, n, m - 1, 2, 3, \dots$ Наближено для зони передруйнування металу (сталі) співвідношення (8) подамо у вигляді:

$$\frac{da}{dt} = f(E, n, e, K_1, pH, E_p, W_s, S_s, g_s), \quad (8)$$

де $E, n, K_1, pH, E_p, W_s, S_s, g_s$ – параметри; W_s, S_s – поверхневі енергія та натяг; g_s – питома робота пластичної деформації в розрахунку на одиницю поверхні каверни (тріщини) при утворенні нової деформаційно активованої (ювенільної) поверхні. Параметр g_s входить у відому формулу Гріфітса-Орована [9]:

$$S_* = \sqrt{\frac{2E(W_s + g_s)}{p \cdot a(1-n^2)}}, \quad S_* = \sqrt{\frac{2E(W_s + g_s)}{p \cdot a}}, \quad (9)$$

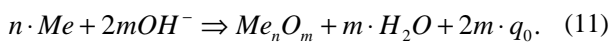
де перша формула записана для плоскої деформації, друга – для плоского напруженого стану; S_* – критичне напруження ($S_* = S_T, S_T$ – межа текучості).

Аналогічно, як у [9], подамо довжину пластичних зон в околі вершини каверни (тріщини):

$$d = 0,578 \frac{K_1^2}{p \cdot S_T^2}, \quad d_* = \frac{p \cdot K_1^2}{8 \cdot S_T^2}, \quad (10)$$

де d, d_* – характерні розміри для плоскої деформації і плоского напруженого стану відповідно.

Утворення окислу в околі вершини каверни (тріщини) можливе внаслідок взаємодії металу (Me) з іонами OH^- [8]:



де n, m – натуральні числа.

Рівноважний потенціал утворення окислу E_p^{Me} залежить від рівноважного потенціалу (електродного) процесу E_p і кислотності pH середовища [8]:

$$E_p^{Me} = E_p + 0,826 - 0,059 \cdot pH, \quad (12)$$

де значення потенціалів E_p^{Me}, E_p виражені у вольтах.

Між металом і окислом, який утворює пасивувальний шар, виникне адгезійний зв'язок. Роботу адгезії A_{ad} системи метал – окисел визначимо на основі співвідношення [5]:

$$A_{ad} = S_{s+} + S_{s-} - S_m, \quad (13)$$

де складові S_{s+} і S_{s-} – поверхневі натяги, які визначаються для систем метал – повітря (S_{s+}), окисел – повітря (S_{s-}). Міжфазний натяг S_m (між металом (провідником) та окислом (діелектриком)) визначається за допомогою співвідношень праці [5] і за величиною становить приблизно третю частину поверхневого натягу металу [5], тобто $S_m \approx S_{s+}/3, S_{s-} \approx S_{s+}/10$. Тоді $A_{ad} \approx 23S_{s+}/30$.

Запишемо енергію адгезійних зв'язків W_{ad} , уведену в праці [5]:

$$W_{ad} = W_{s+} + W_{s-} - W_m, \quad (14)$$

де, зокрема, W_{s+} – поверхнева енергія металу (для системи метал – повітря); W_{s-} – поверхнева енергія окислу (для системи окисел – повітря); W_m – міжфазна енергія на границі розділу між металом і окислом.

Вирази для A_{ad}, W_{ad} дають змогу враховувати деформацію e металу в процесі механічного навантаження [5].

Результати і висновки. Запропоновано низку фізико-хімічних параметрів і відповідні співвідношення імітаційної моделі, які описують розвиток каверни (тріщини) механічно навантаженого металу з позиції механохімії з урахуванням енергетичних характеристик поверхневих шарів. *Основна увага зосереджена* на потоках дислокацій та корозійних струмах, від яких залежить зміна форми каверни та швидкість її просування у разі дії механічного навантаження.

У перспективі з використанням *накопичених на основі експериментальних досліджень даних* можна оцінити зміни розподілу механічних напружень поблизу вершини корозійної каверни в процесі електрохімічної реакції на межі між металом і ґрунтовим електролітом у трубопроводах, резервуарах та інших металевих конструкціях.

1. Ориняк І. В. Оцінювання дефектів у трубопроводах / Механіка руйнування та міцність матеріалів: довід. посібник / І. В. Ориняк // під заг. ред. В. В. Панасюка. Том 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватюк та ін.; під. ред. Г. М. Никифорчина. – Львів: Сполом, 2009. – С. 357–392. 2. Стацук М. Розрахунок зміщення електродного потенціалу, зініційованого пружним полем, на межі еліптичного отвору із середовищем / М. Стацук, Л. Журавчак, М. Дорош // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: в 2-х т. / Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». – Львів: Фізико-механічний інститут НАН України, 2010. – № 8, Т. 1. – С. 49–54. 3. Сакара А. Математичне моделювання процесів руйнування металевих матеріалів за механічного навантаження і дії водневих і корозійних середовищ / А. Сакара, Ю. Банашевич, І. Лохман // Проблеми корозії та протикоро-

зійного захисту матеріалів: в 2-х т. / Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». – Львів: Фізико-механічний інститут НАН України, 2010. – № 8, Т. 1. – С. 120–124.4. Юзевич В. Моделювання корозійних процесів у системі «метал-електроліт» з урахуванням дифузійного імпедансу / В. Юзевич, І. Огірко, Р. Джала // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2011. – Вип. 13. – С. 173–181. 5. Юзевич В. М. Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів / В. М. Юзевич, П. М. Сопрунок. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, вид-во «СПОЛОМ». – 2005. – 292 с. 6. Мак-Лахлан Н. Теорія

и приложения функций Матъе / Н. Мак-Лахлан. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 476 с. 7. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия // Ред. С. А. Симанова – Санкт-Петербург: АНО НПО "Профессионал", 2004. – 838 с. 8. Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 1999. – 342 с. 9. Панасюк В. В. Основы механики разрушения / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.

УДК 621.317.39

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ОХОРОННИХ СИСТЕМ

© Погребенник Володимир, Політило Роман, 2011

Національний університет «Львівська політехніка», кафедра захисту інформації,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Подано рекомендації щодо вибору параметрів комп'ютеризованих ультразвукових охоронних систем.

Даны рекомендации, касающиеся выбора параметров компьютеризированных ультразвуковых охранных систем.

Recommendations in for choosing the parameters of ultrasonic computerized security systems is filed.

Вступ. Під час розроблення комп'ютеризованих ультразвукових охоронних систем важливих об'єктів необхідно розв'язати низку складних науково-технічних задач: 1) побудувати моделі взаємодії ультразвукових імпульсних коливань з об'єктами контролю; 2) оформити відповідно до цих моделей достатньо ефективні (з метою реалізації їх за допомогою мікропроцесорних засобів) алгоритми перетворення вимірювальних даних на характеристики неоднорідних середовищ тощо); 3) розробити математичне, алгоритмічне і програмне забезпечення та створити зразки мікропроцесорних вимірально-інформаційних систем (ВІС); 4) розробити методики оптимізації мікропроцесорних ВІС за сукупністю показників якості та синтезу їх структур; 5) експериментально дослідити тонку структуру фізичних полів у неоднорідних середовищах; 6) розробити методи та засоби метрологічного забезпечення мікропроцесорних ВІС.

Оптимізація параметрів комп'ютеризованих ультразвукових охоронних систем дасть змогу значно поліпшити якість контролю.

У [1] розглянуто методи та засоби покращення метрологічних характеристик первинних вимірвальних перетворювачів, а у праці [2] – метод підвищення надійності ультразвукових засобів охоронної сигналізації, в яких виявлення сигналу не залежить від зміни температури повітряного середовища.

Метод охоронної сигналізації [2] полягає у випромінюванні імпульсного ультразвукового сигналу в напрямку до охоронного об'єкта, розміщеного на відстані L , прийнятті відбитого сигналу від об'єкта та вимірюванні часу поширення ультразвукового сигналу у прямому і зворотному напрямках до об'єкта та порівняння часу поширення сигналу у декількох послідовних тактах зондування. Для того, щоб підвищити надійність охоронної сигналізації, додатково