

УДК 504.75:681.2.543

Р.М.Джала, В.М.Юзевич, М.І.Мельник, О.М.Семенюк

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

## ЕНЕРГІЯ АКТИВАЦІЇ ДЕФОРМОВАНОГО МЕТАЛУ ПОБЛИЗУ ВЕРШИНИ КОРОЗІЙНОЇ КАВЕРНИ

*Запропонована математична модель для оцінювання енергії активації анодного і катодного процесів в системі «метал – електроліт». Модель описує корозійне розчинення сталі поблизу вершини корозійної заглибини (каверни) в умовах пластичного деформування з урахуванням характеристик міжфазного шару.*

Ключові слова: *корозійні каверни, сталь, електрохімічні процеси, моделювання, енергія активації, механічне навантаження.*

Поверхневі корозійні дефекти (мікротріщини) магістральних трубопроводів в умовах експлуатації часто заповнені ґрунтовим електролітом (рідиною). В умовах механічного навантаження внутрішнім тиском дефекти змінюють розміри і в кінцевому варіанті можуть бути причиною виникнення магістральної тріщини. Розглядаючи поширення мікротріщини з позицій механіки руйнування, в основному використовують концепцію квазікрихкого руйнування [1] не концентруючи увагу на кінетичній природі процесу, яка проявляється не тільки в умовах циклічних навантажень. Багаточисельні систематичні експериментальні та теоретичні дослідження показали, що руйнування не є критичною подією, яка проходить при певних значеннях напружень чи деформацій [2]. В процесі дії, зокрема, статичного навантаження проявляються мікропластичні деформації, які мають ймовірнісний характер. Тому для більш об'єктивного трактування фізико-хімічних процесів у магістральних трубопроводах, які контактують з корозійним середовищем, при розгляді пластичних ефектів доцільно звернути увагу на характер елементарних актів деформування.

*Зв'язок проблеми з науковими та практичними завданнями:*

Практичне завдання. Необхідно існуючу інформацію про умови квазікрихкого руйнування металу поблизу вершини тріщини доповнити інформацією про мікропластичні деформації в умовах дії статичного навантаження для того, щоб більш точно прогнозувати поведінку дефектів магістральних трубопроводів в умовах дії механічних навантажень і корозійних середовищ.

Наукове завдання. Процеси пластичного деформування у міжфазному шарі на межі розділу «метал–електроліт» поблизу вершини тріщини вивчено недостатньо. Існують лише загальні модельні уявлення щодо механізмів виникнення відповідних механічних напружень і їх зв'язки з корозійними процесами [1,3-5]. Необхідно з допомогою методів фізики поверхневих явищ і фізики руйнування розкрити характер перерозподілу електричних зарядів і механічних напружень на межі розділу «метал–електроліт» і оцінити їх вплив на умови пластичного деформування, що приводять до змін профілю тріщини.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій з даної проблеми:*

Елементи методології оцінювання змін параметрів стану у деформованому металі поблизу вершини тріщини, заповненої корозійним середовищем, розглядались у працях [1,3-5]. У [5] на основі чіткої математичної постановки отримано розв'язок задачі математичної фізики для еліптичного отвору в електропровідному середовищі (металі) (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 корозійного середовища (всередині отвору), характеристики якого відповідають 1 % NaCl, перевищення електродного потенціалу  $E_p$  у вершині еліпса в порівнянні з коловим отвором сягає більше 5 разів. Еліптичний отвір можна розглядати як модель тріщини. У [6] 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, методика визначення яких не цілком зрозуміла. 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 [6]. Оцінювання тривалості тих стрибків не представлено. У [6] інформація про елементарні акти пластичного деформування не розглядається.

© Р.М.Джала, В.М.Юзевич, М.І.Мельник, О.М.Семенюк

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Не розроблено достатньо обґрунтованих методик аналізу пластичних деформацій поблизу вершин заглибин (тріщин) в металах (типу сталі), заповнених корозійним середовищем в умовах дії механічного навантаження. Тому основним завданням є застосування низки теоретичних положень фізики поверхневих явищ та термодинаміки нерівноважних процесів для спрощення опису пластичних ефектів, які характеризують ситуацію поблизу вершини заглибини (тріщини) в металі, в умовах дії механічного навантаження і впливу корозійного середовища.

Об'єкт досліджень – приповерхневі шари металу (магістрального трубопроводу) і рідке середовище, яке проникає із ґрунту в область, близьку до вершини заглибини (каверни). Дане рідке середовище моделюємо водним розчином (ґрунтовим електролітом), в якому можливе проходження корозійних процесів.

Предмет досліджень – електричні та механічні параметри, що характеризують пластичне деформування та корозійне розчинення металу (сталі) поблизу вершини корозійної каверни, заповненої корозійним середовищем (ґрунтовим електролітом).

**Формулювання задачі.** Розглядаємо задачу деформування металу (сталі) біля локального поверхневого кругового в плані дефекту труби за умови пружної деформації (рисунок). Постановка задачі аналогічна як у праці [7].

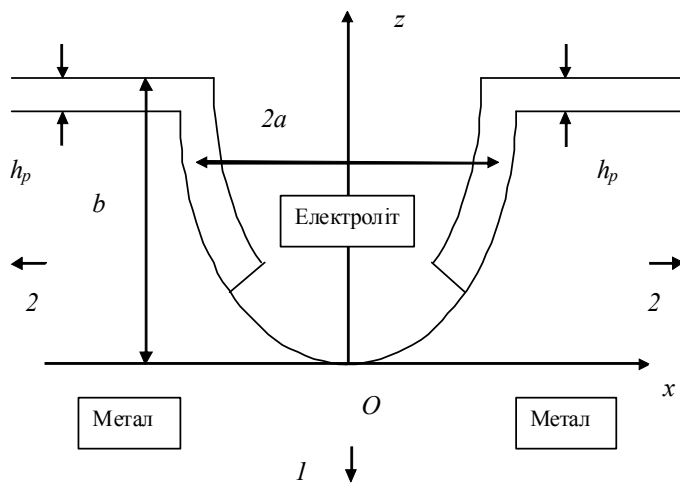


Рисунок. Схема поверхневої заглибини (каверни), заповненої ґрунтовим електролітом:

$l$  – напрям поширення тріщини;  $2$  – напрям дії напружень  $\sigma_{xx}$ ;  $h_p$  – товщина пасивної плівки;  $d=2a$  і  $b$  – діаметр та глибина каверни;  $a/R < 0,1$ ;  $H/R < 0,05$ ;  $H$  – товщина труби ( $b \ll H$ ).

Позначимо  $D=2R$ ,  $H$  – діаметр і товщина труби;  $d=2a$ ,  $b$  – діаметр та глибина заглибини;  $p$  – тиск у трубопроводі;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона,  $E$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу (сталі);  $\Delta T$  – зміна температури. Вважаємо, що труба не може переміщатися вздовж осі  $y$  [7]. Наближено знаходять напруження  $\sigma_1 = \sigma_{xx}$  у поперечному напрямку, а в поздовжньому  $\sigma_2 = \sigma_{yy}$  [7]:

$$\sigma_1 = \sigma_{xx} = pR / H; \quad \sigma_2 = \sigma_{yy} = \nu pR / H - \alpha E \Delta T. \quad (2)$$

В основі досліджень системи «метал–електроліт» приймаємо макроскопічний підхід, якому відповідають співвідношення нерівноважної термодинаміки та фізики поверхні твердого тіла [8]. Розглянемо концентрацію напружень біля локального поверхневого кругового в плані дефекту (розміщеного на зовнішній поверхні труби) за умови пружної деформації, викликаной внутрішнім гідростатичним тиском  $p$ , в початковий момент часу. Вважаємо, що вісь труби, радіус якої  $R$ , спрямована по осі  $y$ ,  $x$  – впоперек труби,  $z$  – перпендикулярна до поверхні труби; початок координат ( $O$ ) розміщений у вершині каверни і в цьому місці як показують експерименти буде пластичне деформування металу [3]. В результаті під дією зовнішнього механічного навантаження в околі точки  $O$  поверхня каверни буде зростати, а також цілком ймовірно, що в тому місці виникне тріщина, яка буде поширюватись в напрямку  $l$  (тобто, по осі  $z$ ) (рисунок).

Прийmemo, що труба із заглибиною у формі півеліпсоїда обертанннн знаходиться в умовах двовісного розтягу на безмежності, якому відповідають напруження  $\sigma_1 = \sigma_{xx}$ ,  $\sigma_2 = \sigma_{yy}$  (2). Крайові умови записуємо в циліндричній системі координат  $(r, \theta, z)$  для круглого шару достатньо великого радіуса  $r=r_2$  [7]:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 + (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta) / 2 = F_r, & \sigma_{r\theta} &= -(\sigma_1 - \sigma_2) \sin(2\theta) / 2 = F_\theta, \\ \sigma_{rz} &= F_z = 0, & (r=r_2, & 0 < z < H, \quad 0 < \theta < 2\pi). \end{aligned} \quad (3)$$

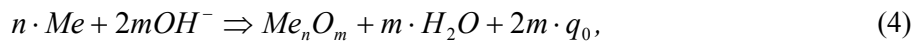
Тут  $F_r, F_\theta, F_z$  – компоненти вектора зовнішніх зусиль, заданих на поверхні заглибини

$$S_r = \{(r, \theta, z) | r = r_2, 0 < z < H, 0 < \theta < 2\pi\}.$$

Симетрія задачі визначення компонент механічних напружень відносно осей  $OX$  і  $OY$  та її лінійність спрощують побудову загального розв'язку [7].

#### Основна частина

Утворення окислу в околі вершини каверни (тріщини) можливе внаслідок взаємодії металу ( $Me$ ) з іонами  $OH^-$  [4]:



де  $q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$  С – елементарний заряд (заряд електрона);  $n, m$  – натуральні числа.

Рівноважний потенціал утворення окислу  $E_p^{MeO}$  залежить від рівноважного потенціалу (електродного) процесу  $E_p$  і кислотності  $pH$  середовища [4]:

$$E_p^{MeO} = E_p + 0,826 - 0,059 \cdot pH. \quad (5)$$

Тут значення потенціалів виражені у вольтах.

В результаті розв'язання в циліндричних координатах  $(r, \theta, z)$  задачі розподілу механічних напружень в області каверни отримано наближене співвідношення для нормованих напружень [7]:

$$\alpha_1 = \max(\bar{\sigma}_1) = \max(\sigma_{\theta\theta}(r, z, \pi/2) / \sigma_1) = 1 + 2 \cdot \bar{b}^{\bar{a}/(\bar{a}+0,25)}, \quad (6)$$

де  $\bar{a} = a/H$ ,  $\bar{b} = b/H$ ;  $\theta = \pi/2$  у вершині каверни (в початку координат (див. рисунок)).

Енергетичний баланс в процесі поширення корозійної тріщини можна представити аналогічно як у ситуації корозійного розтріскування: робота пластичної деформації –  $P_{PL}$ , зміна початкового запасу енергії  $W_{zp}$ , виділення енергії в процесі електрохімічної реакції  $W_{ec}$  [3]:

$$P_{PL} = W_{zp} + W_{ec} = \frac{K_1^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{z_{si} F \rho \cdot \delta}{\zeta \cdot M}, \quad (7)$$

де  $K_1$  — коефіцієнт інтенсивності напружень;  $\rho$  – густина матеріалу;  $z_{si}$  – формальний заряд сольватованих іонів;  $F = 96500$  С/гр-мол – постійна Фарадея;  $\delta$  – висота фронту тріщини, що насувається;  $M$  – молекулярна маса металу;  $\zeta$  – перенапруження анодної реакції. Величиною поверхневої енергії в (7) можна нехтувати, оскільки вона мала в порівнянні з роботою пластичної деформації  $P_{PL}$  [3].

При пороговому значенні коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{1SCC}$ , тобто при мінімальному значенні  $K_1$ , що відповідає початку поширенню корозійної тріщини, рівняння (7) набуває наступного вигляду [3]:

$$K_{1SCC} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left( \frac{P_{PL} - z_{si} F \rho \delta \zeta}{M} \right)} = \sqrt{C_{k1} (P_{PL} - C_{k2} \cdot \zeta)}, \quad (8)$$

$$\text{де } C_{k1} = \frac{E}{M(1-\nu^2)}; \quad C_{k2} = \frac{z_{si} F \rho \delta E}{M(1-\nu^2)}.$$

Із виразу (8) видно, що  $P_{PL}$ ,  $\zeta$  – основні величини, від яких залежить  $K_{1SCC}$ . Зменшення значення роботи пластичної деформації  $P_{PL}$  відбуватиметься в результаті збільшення або межі текучості, або швидкості механічного зміцнення у вершині тріщини. В результаті кожен з цих чинників при постійному значенні  $\zeta$  знижуватиме величину  $K_{1SCC}$  і, отже, знижуватиме ступінь опору щодо поширення корозійної тріщини [3]. Збільшення перенапруження анодної реакції  $\zeta$  (потенціал металу стає більш електропозитивним) при певному значенні роботи пластичної деформації  $P_{PL}$ , згідно співвідношення (8), приводить до пониження опору поширенню тріщини. Величина анодного перенапруження  $\zeta$  є функцією електрохімічних умов усередині тріщини і, відповідно, умови поширення корозійної тріщини будуть залежати від  $pH$  (водневого показника) розчину електроліту, активності аніонів, електродного потенціалу  $E_p$ , хімічного складу металу, поверхневого натягу і поверхневої енергії поблизу вершини тріщини, а також умов формування пасивувального шару [3].

Напруження, що виникають в металі, і швидкість росту корозійного дефекту зв'язують за допомогою співвідношень нерівноважної термодинаміки [3]. Деформація металу  $\varepsilon$  ( $\varepsilon$  – перший інваріант тензора деформацій) розглядається на стадії лінійного зміцнення, коли дислокації шикуються і рухаються в системі паралельних площин ковзання за відсутності поперечного ковзання. З математичних міркувань випливає ряд феноменологічних рівнянь, що відображають взаємозв'язок процесів пластичної деформації і стресс-корозії в металах. Такі рівняння при одночасному процесі деформування і електрохімічної корозії приймають наступний вигляд [3]:

$$J_d = L_A A + L_B \zeta; \quad I_C = L_C \varepsilon + L_d \zeta; \quad (9)$$

де  $J_d$  – густина потоку дислокацій (дислокаційний струм);  $I_C$  – 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 електроду;  $L_C = L_B$  регулюють ступінь взаємного впливу деформації та електрохімічної корозії і виражають кількісно явище механохімічного ефекту. Фізичний сенс цього коефіцієнта ( $L_C$ ) полягає в зміні хімічного потенціалу металу в результаті його пластичної деформації, яка пов'язана з ослабленням міжатомних зв'язків в місцях скупчення дислокацій.

Використаємо базову концепцію механіки корозійного руйнування конструкційних матеріалів. Згідно цієї концепції стан зони передруйнування матеріалу в околі вершини тріщини можна описати такими групами параметрів [4]:  $P_j(\sigma)$  – параметри, що характеризують напружено-деформований стан матеріалу і є функціями прикладених до тіла зовнішніх зусиль, яким відповідають напруження  $\sigma$  ( $\sigma$  – перший інваріант тензора механічних напружень);  $L_n(\tau)$  – параметри, які визначають у часі  $\tau$  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. Швидкість локального корозійного руйнування матеріалу (тобто швидкість розвитку корозійної тріщини, яка виникне у вершині каверни) подамо аналогічно як для корозійно-втомної тріщини [4]:

$$\frac{da}{d\tau} = f(C_i, P_j(\sigma), L_n(\tau), B_m(s)), \quad (10)$$

де  $a$  – характерний лінійний розмір тріщини в 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 (10) подамо у вигляді:

$$\frac{da}{d\tau} = f(E, \nu, K_1, pH, E_p, W_s, \sigma_s, \gamma_s), \quad (11)$$

де  $E, \nu, K_1, pH, E_p, W_s, \sigma_s, \gamma_s$  – параметри;  $W_s, \sigma_s$  – поверхневі енергія та натяг;  $\gamma_s = \gamma_s(W_s)$  – питома робота пластичної деформації на одиницю поверхні тріщини при утворенні нової деформаційно активованої поверхні. Параметр  $\gamma_s$  входить у відому формулу Гріфітса-Орована [1]:

$$\sigma_* = \sqrt{\frac{2E(W_s + \gamma_s)}{\pi \cdot a(1-\nu^2)}}, \quad \sigma_* = \sqrt{\frac{2E(W_s + \gamma_s)}{\pi \cdot a}}, \quad (12)$$

Тут перша формула записана для плоскої деформації, друга – для плоского напруженого стану;  $\sigma_*$  – критичне напруження ( $\sigma_* = \sigma_T$ ,  $\sigma_T$  – границя текучості).

Аналогічно як у [1] подамо оцінки довжин пластичних зон в околі вершини тріщини:

$$d = 0,578 \frac{K_1^2}{\pi \cdot \sigma_T^2}, \quad d_* = \frac{\pi \cdot K_1^2}{8 \cdot \sigma_T^2}, \quad (13)$$

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

Для оцінювання граничного стану матеріалу (сталі) поблизу вершини каверни (тріщини) в умовах складного напруженого стану використовуємо критерій Губера-Мізеса (для  $\sigma_i$  – інтенсивності напружень) або Кулона-Треска (для  $\sigma_\tau$  – максимального дотичного напруження) [9]:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} = const, \quad \sigma_\tau = \tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = const, \quad (14)$$

в яких  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = \sigma_{zz}$  – головні напруження.

Для моделювання особливостей пластичного деформування у вершині каверни (тріщини) використаємо інтегральну характеристику швидкості процесу, що веде до розриву тіла, тобто “довговічність” ( $\tau_d$ ) – час між моментом прикладання навантаження і моментом розриву тіла. Цей час обернено пропорційний середній швидкості процесу руйнування [2]:

$$\tau_d(\sigma, T) = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma_d \cdot \sigma}{kT}, \quad (15)$$

де  $k$  – постійна Больцмана;  $\tau_0 \sim 10^{-13}$  с – час, за порядком величини близький до періоду коливань атомів у твердих тілах (періоду коливань максимальної частоти в дебаєвському спектрі);  $U_0$  характеризує енергію активації розриву міжатомних зв'язків і практично співпадає з енергією дисоціації речовини (металу);  $\gamma = q \cdot V_a$ , де  $V_a$  – активаційний об'єм у елементарному акті дисоціації,  $q$  коефіцієнт (безрозмірний) локальних механічних перенапружень (досягає за рахунок мікроефектів в реальних тілах значень  $10 \div 100$  і вище, що і характеризує відмінність

експериментальної величини міцності від теоретичної) [2]. Зокрема, для сталі (заліза)  $U_0 = 4,4$  еВ,  $V_a = 1,2 \cdot 10^{-2}$  нм<sup>-3</sup> [2]. Необхідно відзначити, що  $U_0$  близька до енергії сублімації  $W_{subl}$  більшості металів, яка для заліза приймає значення  $W_{subl}(Fe) = 4,2$  еВ.

Пластичне деформування металу супроводжується послідовними елементарними актами розриву напружених міжатомних зв'язків в результаті флуктуацій теплової енергії атомів. Залежність (15) увійшла до науки про міцність (руйнування) як формула Журкова [2].

Процесу електрохімічної (корозійної) реакції в системі «метал – електроліт» відповідають густини анодного  $i_a$  і катодного  $i_k$  струмів, які характеризують швидкості окислення та відновлення [10]:

$$i_a = k_1 \exp(-w_a / (RT)), \quad i_k = k_2 C \exp(-w_k / (RT)). \quad (16)$$

Тут  $k_1, k_2$  – константи швидкостей анодної та катодної реакцій;  $C$  – концентрація (активність) іонів металу (окислювача) в приелектродному шарі електроліту;  $w_a, w_k$  – енергії активації анодної та катодної реакцій;  $R = 8,31$  J/(g·mol·K) – універсальна газова стала;  $T$  – абсолютна температура. У вираз для  $i_a$  (16) у явному вигляді не входить концентрація атомів металу, бо вона під час реакції практично не змінюється і включена в константу  $k_1$ .

Енергії активації електрохімічного процесу з урахуванням стрибка потенціалу напруженості електричного поля в подвійному електричному шарі  $\Delta\psi_e$ , змін, викликаних кривизною поверхні, електродного потенціалу  $\Delta\psi_s$  і механічним навантаженням  $\Delta\psi_p$ , запишемо у вигляді:

$$w_a = w_{0a} - \alpha z F (\Delta\psi_e + \Delta\psi_s + \Delta\psi_p), \quad w_k = w_{0k} + (1 - \alpha) z F (\Delta\psi_e + \Delta\psi_s), \quad (17)$$

де  $\alpha, (1 - \alpha)$  – коефіцієнти переносу;  $z$  – валентність іона;  $w_{0a}, w_{0k}$  – постійні величини для конкретних умов системи «метал – корозійне середовище (електроліт)». Зв'язок  $w_a, w_k$  з параметром  $\Delta\psi_e$  подано у монографії [11], але в ній відзначено, що експериментально визначити  $\Delta\psi_e$  неможливо. У [12] наведена методика теоретичного оцінювання  $\Delta\psi_e$  для металів. Зокрема, для сталі (заліза)  $\Delta\psi_e = 5,3$  В. В [10] у виразі для  $w_a$  наведено  $\Delta\psi_p$ , а у виразах для  $w_a, w_k$  фігурує рівноважний електродний потенціал  $E_{p*}$ . Таким чином вирази для  $w_a, w_k$  (17) більш загальні і конкретизовані порівняно із аналогічними співвідношеннями у (11), (12). Методика оцінювання зміни електродного потенціалу  $\Delta\psi_s$ , викликаного кривизною поверхні, і відповідний конкретний приклад для металевого тіла з порожниною еліптичного перерізу наведено у праці [5]. На основі числових розрахунків встановлено, що перевищення електродного потенціалу у вершині еліпса в порівнянні з коловим отвором сягає більше 5 разів [5].

Як відзначено у монографії [4], поверхня, заповнена пасивною плівкою, має властивості катодної області, а ювенільна поверхня поблизу вершини каверни (тріщини) є анодною. Як відомо [6,13], корозійна тріщина поширюється стрибками малої довжини. Для оцінювання ефективного часу цих стрибків доцільно використати співвідношення типу (15), розглянувши умови дислокаційної релаксації ( $J_d$ ), на які впливають точкові дефекти і міжвузлові атоми [8].

На основі співвідношень (1)–(17) можна буде оцінити енергетичні характеристики міжфазних шарів та активаційних процесів, які характеризують метал, середовище і динаміку корозійних (анодного та катодного) процесів поблизу вершини каверни в навантаженій трубі. Результати і висновки.

Проведено узагальнення енергій активації анодного та катодного електрохімічних процесів в системі «метал – електроліт» з урахуванням стрибка потенціалу напруженості електричного поля в подвійному електричному шарі, а також змін електродного потенціалу, викликаних кривизною поверхні і механічним навантаженням.

Запропоновано низку фізико-хімічних параметрів і співвідношень (1)–(17), які характеризують метал і середовище поблизу вершини корозійної каверни (тріщини). З їх допомогою можна провести оцінювання електричних та механічних енергетичних величин, а також фізико-хімічних характеристик матеріалів в системі «метал – електроліт». Основна увага зосереджена на потоках дислокацій та корозійних струмах, від яких залежить зміна форми каверни (тріщини) та швидкість її просування в умовах пластичного деформування.

У перспективі з використанням накопичених на основі експериментальних досліджень даних можна буде оцінити зміни енергій активації катодного та анодного процесів між металом (залізом) і ґрунтовим електролітом поблизу вершини корозійної каверни (тріщини) в магістральному трубопроводі, підданого дії механічного навантаження.

1. Панасюк В. В. Основы механики разрушения / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
2. Слуцкер А. И. Характеристики элементарных актов в кинетике разрушения металлов / А. И. Слуцкер // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 9, № 46. – С. 1606-1613.
3. 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.
4. 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.
5. Стащук М. Розрахунок зміщення електродного потенціалу, зніційованого пружним полем, на межі еліптичного отвору із середовищем / М. Стащук, 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. – Т. 1, № 8. – С. 49-54.
6. Сакара А. Математичне моделювання процесів руйнування металевих матеріалів за механічного навантаження і дії водневих і корозійних середовищ / А. Сакара, Ю. Банахевич, І. Лохман // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: в 2-х т. / Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». – Львів: Фізико-механічний інститут НАН України, 2010. – Т. 1, № 8. – С. 120-124.
7. Осадчук В. А. Концентрація напружень у трубопроводі з поверхневою заглибиною у формі півеліпсоїда обертання / В. А. Осадчук, Ю. В. Банахевич // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – № 2. – С. 37-42.
8. 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.
9. Писаренко Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – К.: Наук. Думка, 1976. – 416 с.
10. Колодій Б. І. Вплив енергії деформації металу на його взаємодію з корозійним середовищем / Б. І. Колодій // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – № 2. – С. 71-75.
11. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия / Л. И. Антропов. – М.: Высшая школа, 1975. – 560 с.
12. 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.
13. Андрейків О. Є. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара. – Київ: Наукова думка, 2008. – 344 с.