

УДК 504.75:681.2.543

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РЕСУРСУ ТРУБОПРОВОДУ З КОРОЗІЙНОЮ ТРІЩИНОЮ ПРИ НАВАНТАЖЕННІ ВНУТРІШНІМ ТИСКОМ****Р. М. Джала<sup>1</sup>, С. Ф. Савула<sup>2</sup>, В. М. Юзевич<sup>1</sup>**

1 – Фізико-механічний інститут ім. Г. Карпенка НАН України,  
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, тел. (032)2296709, e-mail: dzhala@ipm.lviv.ua

2 – УМГ „Львівтрансгаз” ПАТ „Укртрансгаз”, вул. Рубчака, 3, м. Львів, 79000

*Розглянуто аспекти моделювання поширення тріщини в циліндричній трубі при корозійному розчиненні сталі з урахуванням внутрішнього тиску. Узагальнено відоме електрохімічне співвідношення (Кеше), що описує корозійний струм у вершині тріщини для сталі з урахуванням часу поширення тріщини до її критичної глибини, яка визначається з механічної моделі. Наведено приклад оцінювання ресурсу трубопроводу із сталі X-70.*

*Ключові слова: математична модель, ресурс, трубопровід, корозійна тріщина, внутрішній тиск, надійність, механічне навантаження.*

*Rассмотрены аспекты моделирования распространения трещины в цилиндрической трубе при коррозионном растворении стали с учетом внутреннего давления. Обобщенно известное электрохимическое соотношение (Кеше), которое описывает коррозионный ток в вершине трещины для стали с учетом времени распространения трещины к ее критической глубине, которая определяется из механической модели. Приведен пример оценивания ресурса трубопровода из стали X-70.*

*Ключевые слова: математическая модель, ресурс, трубопровод, коррозионная трещина, внутреннее давление, надежность, механическая нагрузка.*

*The aspects of modeling of distribution of crack are considered in a cylindrical pipe at corrosive dissolution of steel taking into account intrinsic pressure. Electrochemical correlation (Kaeshe), that describes a corrosive current in the top of crack for steel taking into account time of distribution of crack to her critical depth, that is determined from a mechanical model, is generalized known. An example of evaluation of resource of pipeline is made from steel of X-70.*

*Keywords: mathematical model, resource, pipeline, corrosion crack, internal pressure, reliability, mechanical loading.*

**Вступ.** Проблема забезпечення надійності і продовження безаварійної експлуатації трубопровідного транспорту вимагає розв'язання низки питань, пов'язаних з оцінюванням міцності металевих конструкцій в умовах корозії та механічного навантаження. В експлуатаційних умовах відбувається старіння матеріалу, зменшення несучої здатності елементів конструкцій і необхідно оцінювати швидкість розвитку тріщин, що утворюються з мікродефектів. Математичний опис умов росту тріщин дає змогу прогнозувати довговічність та оцінити залишковий ресурс трубопроводу. Актуальність цього питання зростає з часом використання трубопроводів та інших металоконструкцій.

**Аналіз сучасних досліджень і публікацій.** Для адекватних оцінок ресурсу металевих конструкцій в умовах корозійного середовища

потрібно розвивати відповідні математичні моделі. У праці [1] проведено аналіз основних закономірностей стрес-корозійного руйнування трубопроводів і описані елементи моделі деформування трубопроводу, яка базується на підходах механіки руйнування. Це дає змогу якісно і кількісно описувати процес росту втомної тріщини у металі. Порівняння отриманих даних при випробуваннях на розтяг, ударну в'язкість, тріщиностійкість і фрактографічних досліджень свідчить, що у процесі експлуатації досліджуваній основний метал газопроводу (сталь X70) на ділянці, де відбулася аварія, перетерпів істотну деградацію. Це видно з підвищення границь текучості і міцності (6-8%), зниженні утяжки зразків Шарпі (50%), падінні ударної в'язкості (37%), зменшенні критичного розкриття тріщини (52%), зниженні тріщиностійкості  $K_{Ic}$  (майже на 30 %) і у низки фрактографічних ознак.

Проведені дослідження швидкості росту втомної тріщини на різних трубопровідних сталях показали, що універсальним контролюючим швидкість тріщини параметром може бути комбінація відомих параметрів механіки руйнування.

У праці [2] була запропонована математична модель, що базується на узагальненій теорії механіки руйнування, яка дозволяє якісно і кількісно описувати процес росту тріщини в металі з урахуванням зовнішнього навантаження, повзучості та корозії. Ця модель дозволяє визначити максимальний допустимий тиск трубопроводів і гранично допустимі розміри корозійних ушкоджень, що забезпечують необхідний рівень їх експлуатаційної безпеки.

У [3] розглянуто ймовірнісний підхід щодо залишкового ресурсу магістральних трубопроводів (МТ). Відзначено, що тривалість безвідмовного функціонування МТ залежить від якості проектних рішень, якості проектно-монтажних робіт, особливостей експлуатації, умов механічного, температурного, сейсмічного навантаження конструкцій, характеру корозійного впливу середовища внаслідок ґрунтової корозії. Враховано ефективність «пасивного» захисту металу від блукаючих струмів.

У [4] подано результати корозійно-механічних випробовувань матеріалу МТ. Проведені дослідження дають змогу коректніше оцінювати залишковий ресурс безпечної експлуатації та прогнозувати деформаційну поведінку матеріалу МТ у основних типах ґрунтових електродів.

У [5] на основі фундаментальних фізичних підходів розглянуто ефективні шляхи розв'язання технологічних проблем, пов'язаних з розкриттям мікромеханізмів та взаємозв'язку технологічних процесів старіння і водневого окрихчування металевих матеріалів водневої енергетики і магістральних газопроводів (МГП). Аналізується роль цих механізмів і процесів у деградації експлуатаційних властивостей і технологічному ресурсі матеріалів і конструкцій. Розглядається супутній фундаментальний процес утворення наносегрегацій на дислокаціях і межах зерен, а також вплив таких наносегрегацій на процеси старіння, водневого окрихчування, стрес-корозію і руйнування та фізико-механічні властивості металевих матеріалів.

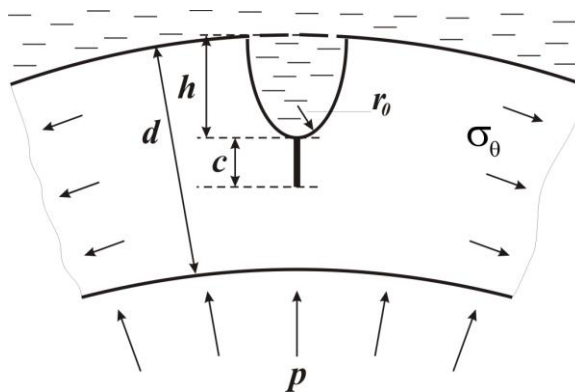
Ефективні шляхи розв'язання фізичної і технологічної комплексної проблеми старіння, водневого окрихчування і руйнування металевих матеріалів слід шукати з урахуванням

накопиченого за останні декілька десятиліть значного обсягу емпіричної інформації щодо різноманітних аспектів поведінки великої кількості систем метал-середовище у широкому діапазоні зовнішніх умов.

**Постановка задачі.** У даній роботі розраховано параметрів напружено-деформованого стану (НДС) трубопровідних конструкцій запропоновано здійснювати з урахуванням методів опору матеріалів та механіки руйнування [6, 7]. В той же час уточнення НДС конструкції бажано доповнити підходами, які враховують енергетичні та корозійні характеристики навантажених конструкцій з дефектами та їх зміни у процесі експлуатації.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо рівноважний стан однорідного металу труби у зовнішньому корозивному середовищі з діаметром труби  $D$ , товщиною стінки  $d$ . Труба ослаблена корозійною каверною глибиною  $h$ , у вершині каверни знаходиться тріщина глибиною  $c$  (рис. 1) [6, 7]. З середини на трубу діє гідродинамічний тиск  $p$ , який може досягати 7,5 МПа (рис. 1).

Вважаємо, що тріщина поширюється у напрямку радіуса до центра труби.



**Рисунок 1 – Елемент труби з каверною  $h$  і тріщиною  $c$  під дією внутрішнього тиску  $p$  у корозивному середовищі**

Для тіла, ослабленого дефектом типу каверни з тріщиною у вершині запишемо вираз критичного значення внутрішнього тиску  $p_{cr}$ , при якому у вершині тріщини виникають пластичні деформації [6]:

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

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

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $K_1, K_t$  – коефіцієнти інтенсивності та концентрації напружень відповідно;  $r_0, r_c$  – радіуси криволінійної поверхні у вершині каверни і тріщини;  $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу труби.

Для густини струму  $i_a$  у вершині тріщини відоме співвідношення (Кеше) [6, 8]:

$$i_a = \frac{\alpha \cdot \chi \cdot \Delta\psi_{ak}}{\delta \cdot \ln(h+c)/\delta}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – кут у вершині тріщини;  $\chi$  – електропровідність електроліту;  $\Delta\psi_{ak}$  – омична зміна потенціалу між анодною і катодною частинами;  $h$  – глибина каверни, у вершині якої знаходиться тріщина;  $\delta$  – ширина ювенільної поверхні.

Як приклад, для оцінювання фізичних та геометричних величин у (1) і (2) використаємо дані [6 - 9]. Для сталі X-70 при

$$d=9,5 \text{ мм}, d_1=5,5 \text{ мм}, h=4 \text{ мм}, D=2R=0,76 \text{ м}, \sigma_T=435 \text{ МПа}, r_c=0,135 \text{ мм}, \delta=2r_c=0,27 \text{ мм}. \quad (3)$$

Відомо [9], що критична глибина дефекту (каверни з тріщиною)  $h+c_{cr}=0,6d$  і для заданих параметрів задачі (3) відповідає  $c_{cr}=1,70$  мм. Час досягнення тріщиною критичного значення  $c_{cr}$  залежить від початкових умов, характеристик металу та корозійного середовища.

З урахуванням даних експерименту [9], границі міцності сталі  $\sigma_b = 622$  МПа, даних (3) і співвідношення (1), а також з урахуванням критерію Мізеса-Треска [7] для трубної сталі X-70 отримуємо критичне значення тиску

$$p_{cr} = 9,3 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Це значення свідчить про запас міцності, оскільки згідно з нормативними вимогами максимальний допустимий тиск у трубі не повинен перевищувати  $p_{cr} = 5,5$  МПа [10].

Для мікротріщини з глибиною  $c_0=0,01$  мм початкове значення струму (швидкості корозії), як впливає з (2) за даними праці [6] є таким:

$$i_{a0} \approx \frac{0,05225 \text{ (мм}^2 \text{ / рік)}}{0,01 \text{ (мм)} \cdot \ln(4 + c_0)/0,01} \approx 1,01 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}. \quad (5)$$

Швидкість корозійного процесу із збільшенням глибини тріщини  $c$  з однієї сторони

збільшується, оскільки зростають механічні напруження у вершині тріщини. Зокрема, експериментально встановлено [11], що при збільшенні  $\sigma_0 / \sigma_T$  на 16%  $i_a$  також зростає на 16%.

З другої сторони слід враховувати старіння матеріалу, що супроводжується зменшенням швидкосту корозії, яке у праці [12] для відповідної складової описується формулою

$$i_{as} = \alpha \cdot \tau^{-\beta} = 0,563 \cdot \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-0,76}, \quad (6)$$

де  $\tau_0=1$  рік, а константи  $\alpha=0,563$  мм/рік,  $\beta=0,76$  встановлені експериментально.

Розрахунок залишкового ресурсу щодо часу експлуатації  $\tau$  проводимо за співвідношеннями (1) – (6) з використанням методу послідовних наближень. За цим побудовано алгоритм розв'язування задачі.

Оскільки швидкість корозійного процесу із збільшенням глибини тріщини  $c$  з часом зменшується, то час поширення тріщини до критичного значення  $t_c$ , тобто ресурс, знаходимо за допомогою (2), (5) і (6) шляхом покрокових обчислень через 0,1 року. В результаті отримуємо такі кінцеві значення:

$$i_{az} \approx 0,94 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}, t_c=1,4 \text{ роки}. \quad (7)$$

Графічну залежність корозійного струму  $i_a$  від довжини  $c$  тріщини подано на рис. 2. Як видно з рис. 2, залежність  $i_a(c)$  – нелінійна. Проте в деяких випадках цю нелінійність можна не враховувати.

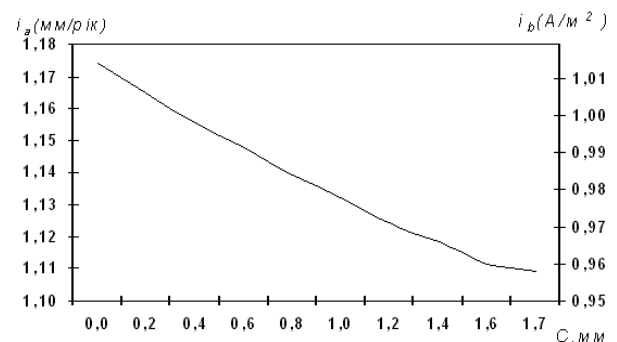


Рисунок 2 – Залежність корозійного струму  $i_a$  (мм/рік) і  $i_b$  (А/м<sup>2</sup>) від глибини  $c$  (мм) тріщини

Розраховані за розробленим алгоритмом числові значення часу поширення тріщини до її критичного значення та відповідні кінцеві швидкості корозії за різних початкових її

значень подано у табл. 1.

**Таблиця 1 – Ресурс трубопроводу при різних швидкостях корозії**

№ п/п	Початкова швидкість корозії, мм/рік	Кінцева швидкість корозії, мм/рік	Час досягнення тріщиною критичної глибини 0,6d, роки
1	0,3	0,28	5,42
2	1,16	1,09	1,40
3	1,5	1,41	1,08

З урахуванням отриманих результатів узагальнюємо співвідношення (2) для сталі:

$$i_a = \frac{\alpha \cdot \chi \cdot \Delta \psi_{ak}}{\delta \cdot \ln(h+c)/\delta} \left( 1 - k \cdot \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^\gamma \right), \quad (8)$$

де  $\tau$  – час поширення тріщини (ресурс трубопроводу, роки);  $\tau_0 = 1$  рік – задана константа.

У результаті апроксимації з урахуванням початкового значення (5) отримано значення параметрів у співвідношенні (8) для сталі X-70:

$$k = 0,0338; \gamma = 1,153. \quad (9)$$

## ВИСНОВКИ

Побудована математична модель елемента труби з тріщиною на дні каверни на зовнішній поверхні корозійних середовищ.

Узагальнено відоме електрохімічне співвідношення (Кеше) для корозійного струму у вершині тріщини для сталі з додатковим урахуванням часу  $\tau$  поширення тріщини до її критичної глибини, яка визначається з механічної моделі.

Наведено приклад оцінювання ресурсу трубопроводу із сталі X-70.

У перспективі, з використанням накопичених на основі експериментальних досліджень даних можна буде оцінювати зміни параметрів електрохімічних процесів корозійно-механічного руйнування елементів металоконструкцій.

1. Красовський А. Я. Оцінка залишкового ресурсу трубопроводу, ушкодженого стрес-корозією / А. Я. Красовський, І. В. Ориняк, І. В. Лохман // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 2 (68). – С. 18-21. 2. Заркеш М. А. Прогнозирование роста трещин по моделям ползучести и коррозии: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 01.02.06 “Динамика, прочность машин,

приборов и аппаратуры” / М. А. Заркеш. – Москва, 2011. – 20 с. 3. Завойчинский Б. И. Вероятностная оценка сроков безопасной эксплуатации протяжных конструкций / Б. И. Завойчинский, Э. Б. Завойчинская, А. В. Волчанин // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – № 7. – С. 41-46. 4. Побережний Л. Я. Закономірності низькотемпературної корозійної повзучості матеріалу газон афто-проводів / Л. Я. Побережний // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – № 1 (27). – С. 91-99. 5. Нечаев Ю. С. Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов / Ю. С. Нечаев // Успехи физических наук. – 2008. – Т.178, № 7. – С. 709-726. 6. 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. 7. Бородачев Н. М. Предельное состояние трубопровода, подверженного питтинг-коррозии / Н. М. Бородачев // Проблемы прочности. – 2002. – № 6. – С. 89-95. 8. Kaeshe H. Die Korrosion der Metalle. Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme / H. Kaeshe. – 1979. – Berlin – Heidenberg – New York: Springer-Verlag. – 400 p. 9. Остсемин А., Уткин П. Упруго-пластическое разрушение труб с поверхностной трещиной. / Вестн. ЮУрГУ. №7, 2006. – С. 130-136. 10. Анучкин М. П. Трубы для магистральных трубопроводов / М. П. Анучкин, В. Н. Горицкий, Б. И. Мирошниченко. – М.: Недра, 1986. – 231 с. 11. Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів: ФМІ, 1999. – 341 с. 12. 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.

Поступила в редакцію 01.12.2014р.

Рекомендували до друку: Оргкомітет 7-ої МНТК з НК і ТД обладнання (25 – 28.11.2014р., ІФНТУНГ) та докт. техн. наук, проф. Кісіль І.С.