

Чисельне дослідження міцності трубопроводу з урахуванням потенційного розвитку наявних корозійних тріщиноподібних дефектів

Лужецький В. С.

email: vaslu@ukr.net

Кафедра машинознавства та основ технологій
Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка
вул. Стрийська, 3, Дрогобич, 82100

Наведено результати чисельного оцінювання кінетики та зміни форми корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів при їх розвитку в стінці трубопроводу для різних систем “матеріал – середовище”. Показано, що початкова форма дефекту завжди впливає на кінетику його подальшого поширення в глибину стінки труби.

Ключові слова: корозійно-механічний дефект, тріщиноподібний дефект, кінетика росту тріщини, коефіцієнт інтенсивності напружень.

ВСТУП

Вивчення проблеми корозійно-втомного руйнування металів займає в механіці руйнування особливе місце. Численні дослідження та дані технічної діагностики [1 – 5] свідчать, що головними чинниками, які найбільше впливають на безпеку експлуатації магістральних трубопроводів, є високий рівень напружень і деформацій, викривлення лінійної частини внаслідок дії різних факторів, деградація матеріалу, утворення тріщин. Саме розміри тріщиноподібних дефектів характеризують технічний стан трубопроводів. Тому, у сучасній інженерній практиці аналіз геометричних параметрів та форми дефектів з позиції механіки руйнування розглядається як найбільш адекватна основа для оцінювання конструктивної міцності та ресурсу роботи трубопровідних систем.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ

Відомі в літературі методи оцінки пошкоджених трубопроводів ґрунтуються здебільш на гранично-рівноважному стані труби із дефектами відповідного типу (корозійні виразки або тріщини). Такі підходи дають можливість прогнозувати і оцінювати моменти катастрофічного руйнування труби, однак,

не розглядають стадії руйнування, які передують досягненню цього граничного стану.

Дослідженням різних аспектів цієї проблеми займалися як вітчизняні, так і зарубіжні вчені. Перш за все слід відмітити праці В. Панасюка [1 – 3], Є. Крижанівського [5] та інших, в яких теоретично вивчено розподіл пружних та пружно-пластичних напружень біля тріщин у циліндричних оболонках. У працях Ю. Мураками [6], А. Красовського [7] запропоновані чисельно-аналітичні методи обчислення коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщин різної форми в циліндричних тілах під дією навантажень, що моделюють експлуатаційні навантаження на трубу. Проблеми корозійної втоми трубопровідних сталей розглянуто в працях В. Похмурського і Р. Мелехова [8, 9], В. Троценка [10], Р. Паркінса [11] та П. Маркуса [12, 13], де наведені фізико-хімічні та електрохімічні основи, пов'язані з цією проблемою.

Водночас необхідно взяти до уваги той факт, що руйнування матеріалу за довготривалої дії експлуатаційних чинників є багата-стадійним процесом і вплив кожної стадії й визначає довговічність елемента труби в заданих експлуатаційних умовах. Тому, принципово важливий є субкритичний ріст дефектів, зумовлений сумісною дією експлуатаційних навантажень та середовищ. В

існуючих підходах ці процеси ще недостатньо вивчені та їх не враховують під час прогнозування роботоздатності трубопроводів.

Отже, розроблення методів оцінювання міцності тривало експлуатованих трубопроводів різного призначення із урахуванням субкритичного росту корозійно-механічних дефектів – актуальна науково-технічна задача. Така оцінка необхідна для оперативного прийняття обґрунтованого рішення щодо можливості продовження експлуатації трубопроводу або його зупинки для ремонту.

ОБ'ЄКТ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Тріщиноподібний дефект у стінці трубопроводу (із внутрішнім діаметром d і товщиною стінки t) моделювали півеліптичною тріщиною із розмірами півосей c та a (рис. 1).

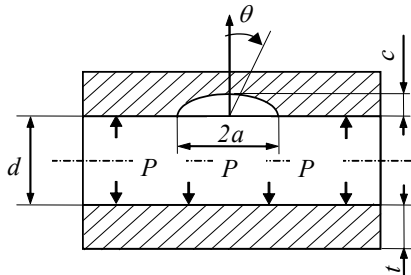


Рисунок 1. Схематизація дефекта у стінці труби

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi c} \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1.12 - 0.48\beta + 0.13 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2 \cdot \beta(3\beta - 2 - \alpha)}{1 - \alpha(1 - 0.75\beta)} + \right. \\ \left. + 1.13k_f \left[\beta \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2 \cdot (\alpha - 0.4 + 0.6\beta) + \beta(1 - 1.4\alpha) + 0.62\lambda(1 - \beta) \cdot \psi(\alpha) \right] \right\} \quad (2)$$

де: $\Delta \sigma$ – розмах розтягувальних напружень за цикл навантаження: $\Delta \sigma = (\Delta p \cdot d)/2t$; Δp – зміна тиску робочого середовища в трубопроводі за цикл навантаження; d – внутрішній діаметр труби; t – товщина стінки труби; c – глибина тріщини; a – довжина тріщини; $\beta = c/a$ ($0 \leq \beta \leq 1$; $0 \leq \alpha \leq 0,4$); θ – кут від малої осі півеліптичної тріщини; $\alpha = c/t$; k_f – коефіцієнт, що враховує відхилення поперечного перерізу труби від колового;

$$\psi(\alpha) = (\alpha)^{-1/2} \cdot \sqrt{(1 - \alpha)^{-3} - (1 - \alpha)^3}, \\ \lambda = \begin{cases} 1.0; & \alpha \geq 1/20 \\ 1.15 - 60(\alpha)^2; & 0 \leq \alpha \leq 1/20 \end{cases}$$

Досліджували особливості впливу форми одиночних та множинних корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів, що визначається співвідношенням (c/a) , на потенційно

Вважали, що: 1) дефект розвивається з числом циклів навантаження N , зберігаючи півеліптичну форму. Однак співвідношення півосей c та a є змінне: $c/a = f(C_m, N)$, і залежить від системи “матеріал – середовище”, що характеризується сталими C та m ; 2) опір поширенню тріщини у напрямку півосей c та a повністю визначає діаграма циклічної корозійної тріщиностійкості металу труби (діаграма швидкостей росту втомної макротріщини), яку одержали з урахуванням заданих експериментальних умов. Середньоамплітудні ділянки цих діаграм у діапазоні зміни швидкостей росту тріщини $dc/dN = 10^{-8} \div 10^{-6}$ м/цикл описали аналітично степеневою залежністю Періса

$$dc/dN = da/dN = C(\Delta K)^n, \quad (1)$$

де C та n – константи системи “матеріал – середовище”.

Окрім цього, для кожної із систем “матеріал – середовище” визначали відповідні значення порогового (K_{th}) та критичного (K_{fc}) коефіцієнтів інтенсивності напружень.

Для підрахунку значень коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I використовували відому залежність Б. Бейзермана

небезпечні розміри корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів у стінці труби заданих розмірів. Під потенційно небезпечним розміром дефекта вважали тріщину глибиною $c = c_{th}$, у вершині якої значення коефіцієнта інтенсивності напружень рівне пороговому ($K_I = K_{th}$). Ця умова визначає початок розвитку макротріщини глибиною c_{th} .

За методикою чисельної оцінки кінетики розвитку тріщиноподібних дефектів у стінці труби [14], що полягає у покроковому розрахунку траєкторії поширення півеліптичної тріщини на основі діаграм циклічної тріщиностійкості матеріалу труби [2] та залежності коефіцієнта інтенсивності напружень від форми тріщини (c/a), здійснено розрахунок кінетики розвитку тріщиноподібних дефектів для трубопроводів, виготовлених із сталі

16ГС ($\sigma_{0,2} = 250$ МПа), що експлуатувалися за максимального тиску $P = 35$ МПа та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження $R \approx 0,7$.

У таблиці 1 наведено значення констант степеневі залежності Періса (1), яка аналі-

тично описує відповідні діаграми циклічної тріщиноустійкості металу трубопроводу при заданих експлуатаційних умовах.

Таблиця 1. Значення констант у степеневій залежності Періса (1) для сталі 16ГС

Система “матеріал – середовище”	n	C , м/цикл $\times$ (МПа $\sqrt{м}$) $^{-n}$	ΔK_{th} , МПа $\sqrt{м}$
Новий метал – повітря	5,14	$2,00 \cdot 10^{-14}$	8,78
Експлуатований метал – повітря	4,73	$1,00 \cdot 10^{-13}$	7,64
Новий метал – середовище	11,21	$8,71 \cdot 10^{-19}$	6,32
Експлуатований метал – середовище	32,87	$1,66 \cdot 10^{-36}$	6,83

При розрахунку кінетики розвитку тріщини за базу вибирали її ріст в глибину стінки, тобто в напрямку півосі c , вважаючи, що пороговий розмір тріщини c_{th} визначається пороговим значенням коефіцієнта інтенсивності напружень K_{th} з формули (2).

Розрахунок проводили припускаючи, що тріщина розвивається стрибкоподібно з деяким постійним кроком $\Delta c_i = 0,5$ мм. При цьому вважали, що початковий розмір (глибина) тріщини є однаковий для всіх розглянутих випадків c/a : $c_0 = 1,0$ мм. При розрахунку діапазон зміни глибини тріщини складав: $c_{th} \leq c \leq 0,8 t$. За пороговий розмір тріщини вважали величину c_{th} , яку визначали з формули (2) при умові, що $\Delta K_I = \Delta K_{th}$ в напрямку осі c при $\theta = 0^\circ$ із заданою півеліптичною формою c_{th}/a_0 можливого фронту тріщини. Число циклів навантаження N_{th} , яке відповідало пороговим розмірам корозійної тріщини c_{th}/a_0 , вважали пороговим.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліджували трубу з внутрішнім діаметром $d = 325$ мм та товщиною стінки $t = 40$ мм. Розглядали два найхарактерніші випадки форми початкових тріщин. Перший при

$(c/a)_0 = 1/3$, що відтворює тріщиноподібний дефект у вигляді корозійної виразки. Другий при $(c/a)_0 = 1/20$, що відповідає корозійному пошкодженню типу борізки. Характеристики кінетики поширення півеліптичної тріщини у стінці труби наведено у таблиці 2. Результати розрахунків подано у вигляді графічних залежностей зміни форми тріщини (c/a) від числа циклів навантаження N та від її відносної глибини (c/t) (рис. 2).

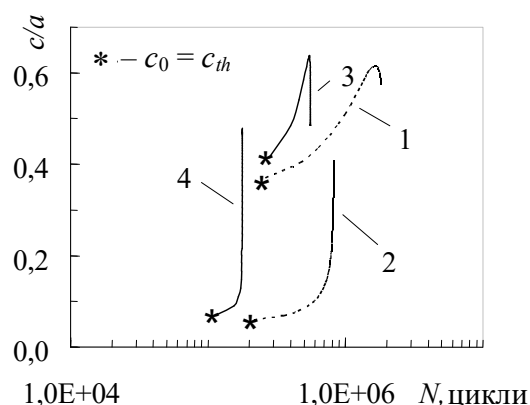


Рисунок 2. Зміна форми тріщини (c/a) від числа циклів навантаження N у стінці нової труби при випробуваннях на повітрі (1, 2) та у дистильованій воді (3, 4): 1, 3 – $(c/a)_0 = 1/3$; 2, 4 – $1/20$.

Таблиця 2. Характеристики кінетики поширення півеліптичної тріщини у стінці труби

Система “матеріал – середовище”	$(c/a)_0 = 1/3$		$(c/a)_0 = 1/20$	
	c_{th} , м	N^* , цикли	c_{th} , м	N^* , цикли
Новий метал – повітря	$3,11 \cdot 10^{-3}$	$1,81 \cdot 10^6$	$2,41 \cdot 10^{-3}$	$8,20 \cdot 10^5$
Експлуатований метал – повітря	$2,37 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^6$	$1,77 \cdot 10^{-3}$	$7,48 \cdot 10^5$
Новий метал – середовище	$1,50 \cdot 10^{-3}$	$5,58 \cdot 10^5$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,77 \cdot 10^5$
Експлуатований метал – середовище	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^4$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^3$

ВИСНОВКИ

Порівняльний аналіз одержаних даних, що здійснено за пороговою глибиною півеліптичної тріщини c_{th} на основі її взаємозв'язку з пороговими значеннями коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{th} , дає можливість зробити такі висновки (табл. 2, рис. 2).

Початкова форма тріщини суттєво впливає на кількість циклів N^* до руйнування експлуатованої труби у корозійному середовищі. Зокрема, для тріщини у формі корозійної виразки ($c/a = 1/3$) вона у 6 разів більша, ніж для корозійної боріздки ($c/a = 1/20$), а для нової труби – втричі.

Для експлуатованого металу вплив середовища на порогову глибину тріщини c_{th} суттєво менший, ніж початкової форми тріщини та типу середовища. Зокрема, порогова глибина тріщини у формі корозійної виразки на 30% більша ніж корозійної боріздки.

Незалежно від форми початкового дефекта труба руйнується за певної характеристичної форми тріщини, яка залежить від системи “матеріал – середовище”. Запропонована чисельна оцінка корозійно-механічних дефектів дає змогу передбачити потенційну можливість поширення таких дефектів у процесі подальшої експлуатації труби.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Механіка руйнування і міцність матеріалів: [довідн. посіб. у 12 т.] / за заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 7.: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / під ред. І. М. Дмитраха. – К.: Академперіодика, 2005. – 378 с.
- [2] Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів: ФМІ ім. Г. Карпенка НАН України, 1999. – 341 с.
- [3] Панасюк В. В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів / В. В. Панасюк. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
- [4] Chen Liang. Failure pressure analysis of corroded moderate-to-high strength pipelines / Chen Liang, Xin Li, Jing Zhou // International Journal of China Ocean Engineering. – 2016. Vol. 30. – P. 69 – 82.
- [5] Kryzhanivskyi E. I. Estimation of the serviceability of oil and gas pipelines after long-term operation according to the parameters of their defectiveness / E. I. Kryzhanivskyi, R. S. Hrabovskyi, O. M. Mandryk // International Journal of Materials Science. – 2013. – № 49. – P. 117 – 123.
- [6] Murakami Yu. Handbook of stress intensity factors / Yu. Murakami // Pergamon Press, Oxford (UK). – 1987. – 1011 p.
- [7] Красовський А. Я. Методологія і експертна система для поточного моніторингу реального стану і забезпечення цілісності трубопроводів з метою подовження їх ресурсу // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / А. Я. Красовський, І. В. Ориняк, В. М. Тороп, [та ін.]; за заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Інститут електрозварки ім. Є. О. Патона НАН України. – 2006. – С. 309 – 314.
- [8] Похмурский В. И. Коррозионная усталость металлов / В. И. Похмурский. – М.: Металлургия, 1985. – 206 с.
- [9] Мелехов Р. К. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання / Р. К. Мелехов, В. І. Похмурський. – К.: Наук. думка, 2003. – 374 с.
- [10] Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В. Т. Трощенко. – К.: Наук. думка, 1981. – 344 с.
- [11] Parkins R. N. The application of stress corrosion crack growth kinetics to predicting lifetimes of structures / R. N. Parkins // Corrosion Science, Vol. 29. – 1989. – P. 1019 – 1038.
- [12] Marcus P. On some fundamental factors in the effect of alloying elements on passivation of alloys / P. Marcus // Corrosion Science, Vol. 36. – 1994. – P. 2155 – 2158.
- [13] Marcus P. Localized corrosion (pitting): A model of passivity breakdown including the role of the oxide layer nanostructure / P. Marcus, V. Maurice, H. Strehblow // Corrosion Science, Vol. 50. – 2008. – P. 2698 – 2704.
- [14] Грабовський Р. До оцінки кінетики росту втомних тріщин в стінках трубопроводів / Р. Грабовський, В. Лужецький, Т. Горб'як // Машинознавство. – 2005. – № 4. – С. 7 – 10.