УДК 620.191.33
В.С.Лужецький
Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

ЧИСЕЛЬНА ОЦІНКА КІНЕТИКИ РОСТУ ВТОМНИХ ТРІЩИН У СТІНКАХ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Наведено результати чисельної оцінки 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: *тривало експлуатований трубопровід, корозійно-механічний дефект, тріщиноподібний дефект, кінетика росту тріщини, коефіцієнт інтенсивності напружень.*

Постановка проблеми

Вивчення проблеми корозійно-втомного руйнування металів займає в механіці руйнування особливе місце. Численні дослідження та дані технічної діагностики [1, 2] свідчать, що довговічність тривало експлуатованих трубопроводів визначається закономірностями розвитку в їхніх стінках корозійно-механічних дефектів тріщиноподібного типу в умовах сумісної дії експлуатаційних циклічних навантажень, температур та агресивних робочих середовищ. 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 останніх 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.В. Панасюка [1 – 3], М.П. Саврука [4], О.Є. Андрейківа [5] та інших, в яких теоретично вивчено розподіл пружних та пружно-пластичних напружень біля тріщин у циліндричних оболонках. У працях Ю. Муракамі [6], А.Я. Красовського та І.В. Ориняка [7, 8] запропоновані чисельно-аналітичні методи обчислення коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщин різної форми та розташування в циліндричних тілах під дією навантажень, що моделюють експлуатаційні навантаження на трубопровід.

Проблеми корозії та корозійної втоми трубопровідних сталей розглянуто в працях В.І. Похмурського [9], Р.К. Мелехова [10], В.Т Трощенка [11], Р. Паркінса [12], П. Маркуса [13, 14], де наведені фізико-хімічні та електрохімічні основи, пов'язані з цією проблемою.

Водночас необхідно взяти до уваги той факт, що руйнування матеріалу під довготривалою дією експлуатаційних чинників є багатостадійним процесом і вплив кожної стадії, врешті-решт, і визначає довговічність елемента труби в заданих експлуатаційних умовах. Тому принципово важливий є субкритичний ріст корозійних чи тріщиноподібних 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, зокрема деградацію фізико-механічних властивостей експлуатованого металу.

Отже, розроблення методів оцінювання міцності та довговічності тривало експлуатованих трубопровідних систем різного призначення із урахуванням субкритичного росту корозійно-механічних дефектів – актуальна науково-технічна задача.

Мета дослідження

Чисельна оцінка потенційно небезпечних розмірів тріщиноподібних дефектів у стінці трубопроводу для різних систем "матеріал – середовище".

Об'єкт і методи дослідження

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

©В.С.Лужецький

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.

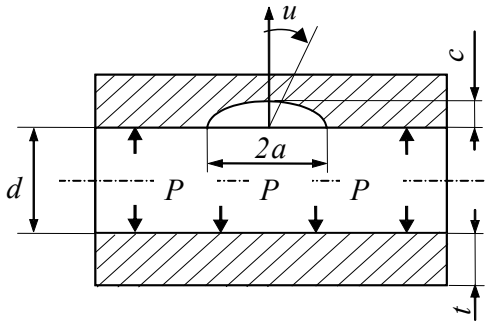

Рис. 1. Схематизація дефекта у стінці труби

Вважали, що опір поширенню тріщини як у напрямку півосі c, так і півосей 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 $dc/dN=10^{-8}\div10^{-6}$ м/цикл описали аналітично за допомогою степеневої залежності Періса

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

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

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

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;

$\beta = c/a$ ($0 \le \beta \le 1$; $0 \le \alpha \le 0{,}4$);

a – довжина тріщини;

θ – кут від малої осі півеліптичної тріщини (рис. 1);

$\alpha = c/t$;

k_f – коефіцієнт, що враховує відхилення поперечного перерізу труби від колового;

$$\lambda = \begin{cases} 1.0; & \alpha \ge 1/20 \\ 1.15-60(\alpha)^2; & 0 \le \alpha \le 1/20 \end{cases},$$

$$\psi(\alpha) = (\alpha)^{-1/2}\cdot\sqrt{(1-\alpha)^{-3}-(1-\alpha)^3}.$$

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

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

За методикою чисельної оцінки кінетики розвитку тріщиноподібних дефектів у стінці труби [15], 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 степеневої залежності Періса (1), яка аналітично описує відповідні діаграми циклічної тріщиностійкості металу трубопроводу при заданих експлуатаційних умовах.

Таблиця1

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

Система „матеріал – середовище”	n	C, м/цикл×(МПа·м^{½})$^{-n}$	ΔK_{th}, МПа·м^{½}
Новий метал – повітря	5,14	$2{,}00\cdot10^{-14}$	8,78
Експлуатований метал – повітря	4,73	$1{,}00\cdot10^{-13}$	7,64
Новий метал – середовище	11,21	$8{,}71\cdot10^{-19}$	6,32
Експлуатований метал – середовище	32,87	$1{,}66\cdot10^{-36}$	6,83

При розрахунку кінетики розвитку тріщини (рис. 1) 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 Δc_i = 0,5 мм. При цьому вважали, що початковий розмір (глибина) тріщини є однаковий для всіх розглядуваних випадків c/a: c_0=1,0 мм. При розрахунку діапазон зміни глибини тріщини складав: $c_{th} \le c \le 0{,}8\,t$, де t - товщина стінки труби. Тут 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 $\theta = 0°$ 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, які виявляють методами неруйнівного контролю під час діагностичного огляду трубопроводів. 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 боріздки. 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).

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	$3{,}11\cdot10^{-3}$	$1{,}81\cdot10^{6}$	$2{,}41\cdot10^{-3}$	$8{,}20\cdot10^{5}$
Експлуатований метал – повітря	$2{,}37\cdot10^{-3}$	$1{,}53\cdot10^{6}$	$1{,}77\cdot10^{-3}$	$7{,}48\cdot10^{5}$
Новий метал – середовище	$1{,}50\cdot10^{-3}$	$5{,}58\cdot10^{5}$	$1{,}12\cdot10^{-3}$	$1{,}77\cdot10^{5}$
Експлуатований метал – середовище	$1{,}86\cdot10^{-3}$	$1{,}35\cdot10^{4}$	$1{,}33\cdot10^{-3}$	$2{,}25\cdot10^{3}$

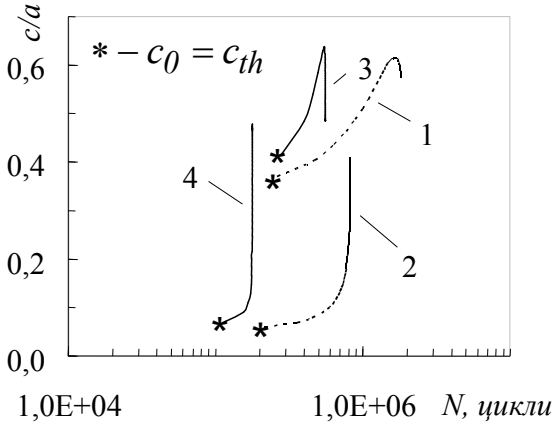

Рис. 2. Зміна форми тріщини (c/a) від числа циклів навантаження N у стінці нової труби при випробовуваннях на повітрі (1, 2) та у дистильованій воді (3, 4): 1, 3 – $(c/a)_0$=1/3; 2, 4 – $(c/a)_0$=1/20

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 дефекту труба руйнується за певної характеристичної форми тріщини, яка залежить від системи „матеріал – середовище".

Запропонована чисельна оцінка корозійно-механічних дефектів за критерієм порогової глибини c_{th} та форми c_{th}/a_0 півеліптичної тріщини, на основі взаємозв'язку із пороговим значенням коефіцієнта інтенсивності напружень K_{th}, враховуючи дані діагностики трубопроводів дає змогу передбачити потенційну можливість поширення таких дефектів у процесі подальшої експлуатації труб.

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: [довідн. посібн. у 12 т.] / під заг. ред. В.В.Панасюка. Т. 7.: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / під ред. І.М.Дмитраха. – К.: ВД "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: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 1999. – 341 с.
3. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В.В.Панасюк. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
4. Саврук М.П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами / М.П.Саврук. – К.: Наук. думка, 1981. – 324 с.
5. Андрейкив А.Е. Пространственные задачи теории трещин / А.Е.Андрейкив. – К.: Наук. думка, 1982. – 345 с.
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 / Красовський А.Я., Ориняк І.В., Тороп В.М., Радченко С.А. [та ін.]; під заг. ред. Б.Є. Патона. – К.: Інститут електрозварки ім. Є.О.Патона НАН України. – 2006. – С.309-314.

8. Ориняк І.В. Ресурс, довговічність і надійність трубопроводів. Огляд сучасних підходів і проблем нормативного забезпечення в Україні / Ориняк І.В., Розгонюк В.В., Тороп В.М., Білик С.Ф. // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С.54 –57.
9. Похмурский В.И. Коррозионная усталость металлов / В.И.Похмурский. – М.: Металлургия, 1985. – 206 с.
10. Мелехов Р.К. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання / Р.К.Мелехов, В.І.Похмурський. – К.: Наук. думка, 2003. – 374 с.
11. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Т.Трощенко. – К.: Наук. думка, 1981. – 344 с.
12. Parkins R.N. The application of stress corrosion crack growth kinetics to predicting lifetimes of structures / R.N.Parkins // Corrosion Science, Volume 29, Issue 8. – 1989. – P.1019-1038.
13. Marcus P. On some fundamental factors in the effect of alloying elements on passivation of alloys / P.Marcus // Corrosion Science, Volume 36, Issue 12, December. – 1994. – P.2155-2158.
14. 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, Volume 50, Issue 9, September. – 2008. – P.2698-2704.
15. Грабовський Р. До оцінки кінетики росту втомних тріщин в стінках трубопроводів / Р.Грабовський, В.Лужецький, Т.Горб'як // Машинознавство. – 2005. – № 4. – С. 7-10.