

Оцінка довговічності трубопровідних систем із дефектами за наявності техногенних домішок у робочому середовищі*

О. Л. Білий, І. М. Дмитрах, А. М. Сиротюк

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

Оцінено та спрогнозовано довговічність елементів трубопроводів з урахуванням експлуатаційних умов. Базуючись на підходах механіки руйнування, зроблено прогнозовану оцінку залишкової довговічності трубопровідних систем із дефектами теплоенергетичного призначення. Показано негативний вплив наявності техногенних домішок у робочому середовищі на довговічність трубопроводу.

Ключові слова: елементи трубопроводів, тріщиноподібні дефекти, швидкість росту тріщини, коефіцієнти інтенсивності напружень, показник опірності матеріалу росту тріщини.

Вступ. На сьогодні в інженерній практиці за експлуатації відповідальних конструкцій набула актуальності проблема, яка пов'язана із забрудненням довкілля. Наявність в експлуатаційному робочому середовищі нерегламентованих техногенних домішок зумовлює додаткову (неочікувану) пошкоджуваність матеріалів, що призводить до суттєвого зниження планованих термінів експлуатації відповідальних конструкцій [1, 2].

Урахування впливу реального експлуатаційного середовища, наявність нерегламентованих домішок в якому може значно змінити характеристики опору матеріалу втомному руйнуванню, має принципове значення для достовірної оцінки залишкового ресурсу елементів конструкцій основного устаткування теплоелектростанцій (ТЕС) [3, 4].

Дана проблема тісно пов'язана насамперед [5] із погіршенням якості води природних джерел водопостачання ТЕС, що зумовлено неблагополучною екологічною ситуацією, найбільш відчутною поблизу великих промислових регіонів через комплексний вплив на середовище наявності різних відходів виробництва: промислових і господарсько-побутових стоків; пило- та газоподібних викидів в атмосферу, що осідають на поверхні водойм і прилеглих до них земель; стічних вод і відстійників, що забруднюють підземні водоносії. Численні дослідження свідчать про значне підвищення загального рівня мінералізації і концентрації органічних речовин, що визначаються значеннями перманганатної окислювальності і хімічним споживанням кисню.

При цьому відзначається істотне збільшення вмісту в природних водах органічних сполук промислового походження. Із використанням уніфікованих методів досліджень встановлено [5], що в природних джерелах можуть знаходитись різноманітні класи органічних сполук промислового походження, серед яких можна виділити карбонові кислоти (мурашина, оцтова, пропіонова, масляна, валеріанова, капронова, нонанова, деканова, ундеканова, додеканова, тетрадеканова, пентадеканова, пальмітинова, стеаринова).

Дослідженнями встановлено [5], що підвищений вміст органіки призводить до "отруєння" іонітів у фільтрах вітчизняних водопідготовчих установок та істотного ускладнення роботи таких фільтрів. Розроблення цілеспрямованої програми заходів для забезпечення високої якості робочого середовища ТЕС у частині мінімального

* Доповідь на Міжнародній науково-технічній конференції "Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций" (Київ, 2013).

вмісту в ньому органічних домішок вимагає насамперед детального вивчення й оцінки особливостей кожної стадії обробки води в схемі вітчизняних водопідготовчих установок.

Об'єкт досліджень. Враховуючи вищезазначане, на прикладі трубопроводів типорозміру 159×16 мм живильної води енергоблоків закритичного тиску теплових електростанцій, виготовлених зі сталі 16ГС, за наявності в них втомних тріщиноподібних дефектів (рис. 1) вивчено вплив техногенних органічних домішок ($C_{\text{HCOOH}} = 0; 3; 5; 10; 100$ мг/кг) у теплоносії на їх безпечну експлуатацію [2].

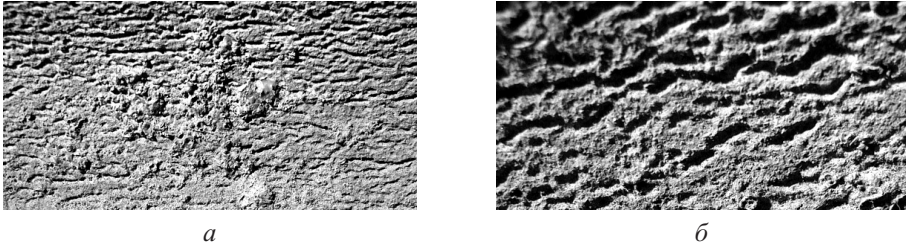


Рис. 1. Корозійна пошкоджуваність внутрішньої поверхні живильного трубопроводу при експлуатації протягом 145 тис. годин: *а* – зародження локальної корозії; *б* – утворення корозійних борозенок і виразок.

Із застосуванням підходів механіки руйнування матеріалів і наведеного нижче критерію оцінено роботоздатність та ризик руйнування живильного трубопроводу з дефектами Ладжинської ТЕС з урахуванням характеристик тріщиностійкості металу і концентрації техногенних органічних домішок у робочому середовищі.

Критерії та методика оцінки роботоздатності і ризику руйнування трубопроводу з дефектами. В основу розрахунку покладено параметри механіки руйнування матеріалів, а саме: характеристики циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу [6].

Розглядалися найбільш типові дефекти, які виявляються методами неруйнівного контролю при профілактичному огляді трубопроводів [7] в експлуатаційних умовах: корозійні борозенка і виразка. Дефект у стінці трубопроводу, що має внутрішній діаметр d і товщину стінки t , моделювався напівеліптичною тріщиною з розмірами півосей a і c (рис. 2). Для дефектів типу корозійної борозенки відношення півосей змінювалось у діапазоні $c/a = 0,01...0,2$, для корозійної виразки – $c/a = 0,4...0,8$.

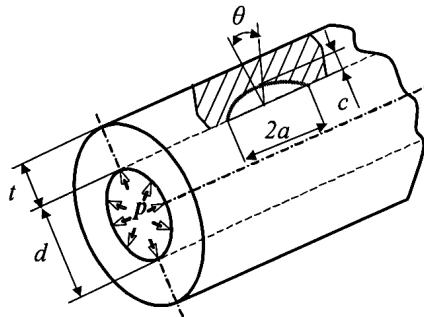


Рис. 2. Модельне представлення корозійних дефектів у стінці труби.

Для підрахунку значень коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK_I по контуру напівеліптичної тріщини на внутрішній поверхні труби (рис. 2) використовували залежність [2]

$$\Delta K_I = \Delta\sigma\sqrt{\pi c} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1,12 - 0,48\beta + 0,13\left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^2 \beta(3\beta - 2 - \alpha)}{1 - \alpha(1 - 0,75\beta)} + \right. \\ \left. + \frac{1,13}{k_f} \left[\beta\left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^2 (\alpha - 0,4 + 0,6\beta) + \beta(1 - 1,4\alpha) + 0,62\eta(1 - \beta)\psi(\alpha) \right] \right\}, \quad (1)$$

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

$$\eta = \begin{cases} 1 & \text{при } \alpha \geq 1/20; \\ 1,15 - 60(\alpha)^2 & \text{при } 0 \leq \alpha \leq 1/20; \end{cases} \quad \psi(\alpha) = \alpha^{-1/2} \sqrt{(1-\alpha)^{-3} - (1-\alpha)^3}.$$

Як відомо, базові діаграми циклічної тріщиностійкості металу трубопроводу (залежності швидкості росту корозійно-втомної тріщини від розмаху КІН) розміщені між двома граничними значеннями: нижнім пороговим ΔK_{th} , яке відповідає значенню ΔK_I , за якого не відбувається росту корозійно-втомної тріщини, і верхнім ΔK_{fc} , яке відповідає значенню ΔK_I , за якого настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини [6].

При оцінці потенційного розвитку корозійно-втомних дефектів вважалося, що тріщиноподібний дефект розвивається з числом циклів навантаження N , зберігаючи напівеліптичну форму. Однак співвідношення півосей a та c є величиною змінною:

$$c/a = f(C_m, N) \quad (2)$$

і залежить від системи матеріал–середовище, що характеризується деякими сталими C_m .

При цьому прийнято, що опір поширенню тріщини як в напрямку півосі c , так і a повністю визначається діаграмою циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу, що одержана при заданих умовах випробування. В аналітичному вигляді це було представлено за допомогою відомої степеневі залежності Паріса [1]:

$$da/dN = f(\Delta K), \quad (3)$$

де C і n – константи, що характеризують систему матеріал–середовище.

Безпечну експлуатацію трубопроводу з дефектами оцінювали за критерієм порогової глибини тріщини c_{th} на основі її взаємозв'язку з пороговими значеннями КІН ΔK_{th} . Це дає можливість, враховуючи експериментальні дані про циклічну тріщиностійкість матеріалу труби та дані діагностики стану трубопроводу, тобто розміри та форму тріщин, оцінити потенційну можливість розвитку тріщин у процесі подальшої його експлуатації та ступінь ризику руйнування.

Тут за пороговий розмір тріщини приймається напівеліптична тріщина фіксованої форми (c/a) глибиною $c = c_{th}$, у вершині якої значення коефіцієнта інтенсивності напружень рівне пороговому: $K_I = K_{th}$. Таким чином, критерієм визначення безпечного тріщиноподібного дефекту буде умова [8]:

$$c \leq c_{th}(\Delta K_{th}) \quad \text{при} \quad (c/a) = \text{const}, \quad (4)$$

тобто всі виявлені при діагностичному огляді дефекти глибиною $c \leq c_{th}$ вважаються безпечними, оскільки не мають потенційної здатності до подальшого розвитку.

Оцінка ризику крихкого катастрофічного руйнування здійснювалась за відомим критерієм механіки крихкого руйнування:

$$\Delta K_I \leq \Delta K_{fc}, \quad (5)$$

де ΔK_{fc} – циклічна в'язкість руйнування [6].

Тут за критичний розмір тріщини приймається напівеліптична тріщина фіксованої форми (c/a) глибиною $c = c_{fc}$, у вершині якої значення коефіцієнта інтенсивності напружень рівне критичному: $K_I = K_{fc}$. Таким чином, критерієм визначення критичного тріщиноподібного дефекту буде умова:

$$c = c_{fc}(\Delta K_{fc}) \quad \text{при} \quad (c/a) = \text{const}. \quad (6)$$

Всі виявлені при діагностичному огляді дефекти глибиною, близькою до значення c_{fc} , є критично небезпечними, оскільки мають потенційну здатність до спонтанного поширення, що призведе до катастрофічного руйнування трубопроводу.

Значення ΔK_{th} і ΔK_{fc} для досліджуваних систем матеріал–середовище приведено в табл. 1.

Т а б л и ц я 1

Значення ΔK_{th} і ΔK_{fc} для середовищ із різним вмістом мурашиної кислоти та параметри системи матеріал–середовище

Середовище	n	$C,$ $\frac{\text{мм/цикл}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^n}$	$\Delta K_{th},$ $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$\Delta K_{fc},$ $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
Номінальне (H ₂ O)	4,25	$4,00 \cdot 10^{-10}$	10,80	31,88
Номінальне + HCOOH (3 мг/кг)	4,56	$1,83 \cdot 10^{-10}$	10,90	29,88
Номінальне + HCOOH (5 мг/кг)	5,56	$9,49 \cdot 10^{-12}$	12,13	27,78
Номінальне + HCOOH (10 мг/кг)	5,78	$8,41 \cdot 10^{-12}$	11,25	24,95
Номінальне + HCOOH (100 мг/кг)	5,83	$7,82 \cdot 10^{-12}$	11,07	24,34

Значення глибини тріщини, за яких виконуються умови $c = c_{th}(\Delta K_{th})$ і $c = c_{fc}(\Delta K_{fc})$, було взято як основні параметри визначення довговічності досліджуваних елементів конструкцій.

Поряд із цим у роботі сформульовано критерій оцінки міцності та надійності конструкцій з тріщиноподібними дефектами на основі запропонованого параметра “опірності елемента конструкції росту тріщини” [1], який є характеристикою швидкості зміни КІН K_I біля вершини тріщини глибиною c під час її росту у даному конструктивному елементі:

$$\lambda = \frac{dK_I}{dc}. \quad (7)$$

Загальна схема визначення параметра λ для квазістатичного навантаження елемента конструкції показана на рис. 3. Тут на залежності $dK_I/dc = F(c)$ існує деяке значення розміру дефекту c_* , починаючи з якого швидкість зміни КІН K_I різко зростає. Це значення є характеристичним для оцінки міцності та надійності елементів конструкцій з тріщиноподібними дефектами.

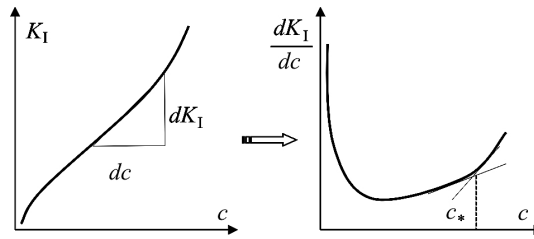


Рис. 3. Схема визначення показника опірності елемента конструкції росту тріщини під час квазістатичного навантаження.

Таким чином, за зміною параметра λ в залежності від геометрії конструктивного елемента і способу його навантажування, виду та місцеположення тріщиноподібного дефекту можна зробити порівняльну оцінку ризику руйнування конструкцій чи їх компонентів, а також сформулювати вимоги до процедури їх технічної діагностики під час експлуатації.

Результати та їх обговорення. Викладену вище концепцію можна застосувати для циклічного (втомного) навантаження конструктивних елементів. При цьому характеристичне значення розміру дефекту c_* можна вибрати як граничне для підрахунку залишкової довговічності N_* дефектного елемента конструкції:

$$N_* = \int_{c_{th}}^{c_*} \frac{da}{F(\Delta K_I)} \quad (8)$$

Аналогічно розраховували залишкову довговічність N_{fc} , яка передбачає досягнення умов спонтанного (катастрофічного) руйнування конструктивного елемента:

$$N_{fc} = \int_{c_{th}}^{c_{fc}} \frac{da}{F(\Delta K_I)} \quad (9)$$

Слід зазначити, що у випадку $c_{fc} > c_*$ доцільно розраховувати величину N_* , яка і буде братися за базову оцінку довговічності. У протилежному випадку ($c_{fc} < c_*$) потреби в розрахунку N_* немає, і довговічність буде визначатися за значеннями N_{fc} .

Розглядали елементи трубопроводу (159×16 мм) за експлуатаційного середовища з різним вмістом мурашиної кислоти [2]. При цьому моделювали напівеліптичні дефекти на внутрішній поверхні такого трубопроводу за різного співвідношення півосей, що відповідали вищезгаданим випадкам корозійних борозенок і виразок. Для опису швидкості росту тріщини в співвідношеннях було взято відповідні параметри системи матеріал–експлуатаційне середовище (табл. 1).

Характеристичні глибини тріщини c_{th} , c_* , c_{fc} та розраховані значення довговічності N_* , N_{fc} представлено в табл. 2.

Отримані результати показують, що найбільш небезпечним для цієї труби є випадок наявності напівеліптичної тріщини зі співвідношенням півосей 0,01 для всіх розглянутих середовищ. У свою чергу, довговічність сягає найменших значень за наявності в середовищі домішок мурашиної кислоти HCOOH (10 мг/кг).

Т а б л и ц я 2

**Розрахунок довговічності дефектних елементів труби (159×16 мм)
для середовищ із різним вмістом мурашиної кислоти**

c/a	c_{th} , мм	c_{fc} , мм	N_{fc} , тис. цикл	c_* , мм	N_* , тис. цикл
Номінальне (H ₂ O)					
0,01	2,674	8,158	72,725	10,36437	–
0,05	2,77	8,35	74,931	10,37476	–
0,10	2,902	8,602	77,720	10,45705	–
0,20	3,202	9,13	84,150	10,48648	–
0,40	4,042	10,306	99,678	10,72632	–
0,60	5,566	11,578	114,566	11,04769	114,044
0,80	9,106	11,998	84,405	11,52687	81,027
Номінальне + HCOOH (3 мг/кг)					
0,01	2,710	7,846	65,997	10,36437	–
0,05	2,806	8,050	68,115	10,37476	–
0,10	2,938	8,302	70,784	10,45705	–
0,20	3,250	8,842	76,215	10,48648	–
0,40	4,102	10,042	90,563	10,72632	–
0,60	5,638	11,398	104,822	11,04769	104,532
0,80	9,19	11,998	76,364	11,52687	73,449
Номінальне + HCOOH (5 мг/кг)					
0,01	3,178	7,498	50,117	10,36437	–
0,05	3,298	7,690	51,245	10,37476	–
0,10	3,454	7,954	53,079	10,45705	–
0,20	3,814	8,494	57,020	10,48648	–
0,40	4,810	9,742	66,259	10,72632	–
0,60	6,562	11,170	71,561	11,04769	71,486
0,80	9,982	11,998	45,868	11,52687	43,062
Номінальне + HCOOH (10 мг/кг)					
0,01	2,842	6,958	45,450	10,36437	–
0,05	2,950	7,150	46,568	10,37476	–
0,10	3,082	7,402	48,822	10,45705	–
0,20	3,406	7,954	52,795	10,48648	–
0,40	4,306	9,250	62,840	10,72632	–
0,60	5,914	10,798	72,755	11,04769	–
0,80	9,454	11,998	51,985	11,52687	50,347
Номінальне + HCOOH (100 мг/кг)					
0,01	2,770	6,826	46,582	10,36437	–
0,05	2,878	7,018	47,596	10,37476	–
0,10	3,010	7,282	49,752	10,45705	–
0,20	3,322	7,834	54,135	10,48648	–
0,40	4,198	9,130	64,897	10,72632	–
0,60	5,770	10,702	76,252	11,04769	–
0,80	9,322	11,998	56,122	11,52687	54,605

Також необхідно зауважити, що зі зростанням співвідношення півосей до 0,8 спостерігається різке зниження довговічності елемента конструкції, що пояснюється досить великими значеннями (близько 9 мм) безпечної глибини тріщини c_{th} .

Висновок. Одержані дані дозволяють здійснити експрес-оцінку ризику руйнування і залишкової довговічності трубопровідних систем із дефектами за циклічних навантажень у робочому середовищі з органічними домішками.

Резюме

Оценена и спрогнозирована долговечность элементов трубопроводов с учетом эксплуатационных условий. Базируясь на подходах механики разрушения, осуществлена прогнозируемая оценка остаточной долговечности трубопроводных систем с дефектами теплоэнергетического назначения. Показано негативное влияние наличия техногенных добавок в рабочей среде на долговечность трубопровода.

1. *Дмитрах І. М., Тот Л., Білий О. Л., Сиротюк А. М.* Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Сполом, 2012. – 316 с.
2. *Білий О. Л., Дмитрах І. М., Барна Р. А.* Оцінка роботоздатності та ризику руйнування живильного трубопроводу з корозійними дефектами // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – № 2. – С. 85 – 92.
3. *Вайнман А. Б.* О влиянии качества теплоносителя на водородную коррозию металла пароводяного тракта энергоблоков СКД // Тр. III Междунар. конф. “ВОМ-98” (2–4 июня 1998). – Донецк. – С. 176.
4. *Вайнман А. Б., Мартынова О. И., Смян О. Д.* О влиянии среды на металл пароводяного тракта энергоблоков СКД // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1995. – № 5. – С. 95 – 104.
5. *Механіка руйнування і міцність матеріалів / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 7. Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман, М. Г. Стащук, Л. Тот / Під ред. І. М. Дмитраха. – Київ: Академперіодика, 2005. – 378 с.*
6. *Дмитрах І. М., Панасюк В. В.* Влияние коррозийных средовых факторов на локальное разрушение металлов вблизи концентраторов напряжений. – Львів: Вид. Фіз.-мех. ін-та ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1999. – 341 с.
7. *Панасюк В. В., Дмитрах І. М., Вайнман А. Б. та ін.* Характеристики корозійної тріщиностійкості матеріалів та їх значення в проблемі забезпечення експлуатаційної надійності теплоенергетичного обладнання. Ч. I // Енергетика та електрифікація. – 1998. – № 6. – С. 29 – 35.
8. *Dmytrakh I. M.* Corrosion fatigue cracking and failure risk assessment of pipelines // Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines / G. Pluvinage and M. H. Elwany (Eds.). – Springer, 2008. – P. 99 – 113.

Поступила 14. 11. 2013