

УДК 620.191.33

ОЦІНЮВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТРУБОПРОВОДУ З ВНУТРІШНІМ ДЕФЕКТОМ ЗА ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДЕНЬВМІСНОГО СЕРЕДОВИЩА

О. Л. БІЛИЙ

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

Запропоновано метод оцінювання довговічності трубопровідних систем з еліптичним внутрішнім дефектом за транспортування воденьвмісного середовища. Використано критерії механіки руйнування для аналізу дефектів, що базуються на визначенні безпечної та недопустимої глибин тріщиноподібного дефекту, а також на основі показника опірності елемента конструкції росту тріщини, який характеризується швидкістю зміни коефіцієнта інтенсивності напружень біля вершини тріщини під час її росту в конструктивному елементі. Наведено приклади оцінювання довговічності живильних трубопровідних систем за внутрішнього тріщиноподібного дефекту.

Ключові слова: *трубопровідні системи, воденьвмісні середовища, тріщиноподібні дефекти, коефіцієнти інтенсивності напружень, показник опірності елемента конструкції росту тріщини, пороговий і критичний розміри тріщини, довговічність елемента конструкції.*

На сьогодні доволі гостро стоїть проблема впливу воденьвмісного середовища на сталеві трубопровідні системи через широке використання таких об'єктів під час транспортування водню та воденьвмісних середовищ. За останнє десятиріччя помітно зросла кількість різноманітних публікацій у міжнародних та й вітчизняних виданнях [1–3] на цю тематику. Під час експлуатації на трубопровідні системи впливає сумісна дія механічних навантажень і воденьвмісних середовищ, що призводить до розвитку пошкоджуваності та виникненню тріщиноподібних дефектів різної форми та геометрії, що збільшує ймовірність руйнування об'єкта. Ці процеси також підсилюються через забруднення довкілля, яке спричиняє появу в робочому середовищі нерегламентованих техногенних домішок та додаткового непрогнозованого утворення тріщиноподібних дефектів у відповідальних конструкціях [4, 5]. Це зумовлено погіршенням якості водопостачання теплоелектростанцій (ТЕС), що найвідчутніше поблизу промислових центрів через потрапляння в середовище різноманітних відходів виробництва, внаслідок чого забруднюються водоносії.

Нижче на прикладі живильних трубопроводів енергоблоків закритичного тиску ТЕС різних типорозмірів (526×50; 467×45; 405×40 mm), виготовлених зі сталі 16ГС, з тріщиноподібними дефектами різної конфігурації, дослідили їх безпечну експлуатацію за впливу техногенних органічних домішок, який моделюється різною об'ємною концентрацією водню в металі $C_{H(v)}$ (1,97; 2,07; 2,20; 2,47 ppm). Науковим інструментарієм для дослідження пошкоджень є механіка руйнування матеріалів [6] поряд з неруйнівними методами моніторингу об'єктів, за допомогою яких можна зареєструвати, а потім шляхом математичного моделювання відтворити конфігурацію існуючих дефектів.

Контактна особа: О. Л. БІЛИЙ, e-mail: bilorestl@gmail.com

Виконано [5, 6] аналіз для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) для трубопровідних систем, на які діє внутрішній тиск. Щоб оцінити їх довговічність, використали насамперед аналітичні залежності для визначення КІН K_I біля вершини тріщини розміром a (глибина тріщиноподібного дефекту) у досліджуваних елементах конструкції. Це дає змогу встановити критеріальні значення глибини тріщини: $a < a_{th}$, за якого не спостерігали подальшого розвитку тріщиноподібного дефекту та $a \geq a_{fc}$, за якого є можливим спонтанне зростання тріщини, що призведе до крихкого руйнування елемента конструкції.

Об'єкт дослідження. Досліджено трубопроводи живильної води з внутрішнім тиском ($p = 11,67$ МПа), у стінках яких трапляються внутрішні центровані еліптичні тріщини (рис. 1).

Варто зазначити, що внаслідок сумісної дії воденьвмісного середовища та зовнішніх чинників КІН може різко зростати, досягаючи критичного значення суттєво швидше від очікуваного терміну, а отже, достовірно визначити перехід з відносно безпечної глибини тріщини на потенційно небезпечну стає все складніше. Тому тут пропонується поряд з a_{th} та a_{fc} визначити ще деяке a_* , згідно з описаним раніше [6] алгоритмом та співвідношенням

$$(\sqrt{t/\sigma}) \cdot (dK_I/da) = F(a/t). \quad (1)$$

Особливість такого методу полягає в тому, що існує конкретне значення $(a/t)_*$, починаючи з якого різко зростає швидкість зміни КІН. Значення a_* , яке відповідає $(a/t)_*$ розглядатимемо як характеристичне для оцінювання довговічності трубопровідних систем із потенційними тріщиноподібними дефектами.

Аналітичні співвідношення. Розглядали кільцеву еліптичну тріщину в стінці пустотілого циліндра (рис. 1). КІН визначали за такими співвідношеннями [7]:

$$K_{Ia} = F\sigma\sqrt{\pi a}, \quad (2)$$

де

$$\sigma = \frac{p}{\left(\frac{R_a}{R_i}\right)^2 - 1}; \quad R_a = R_i + \frac{t}{2}; \quad F = \frac{M_1 + M_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3\left(\frac{a}{t}\right)^4}{\sqrt{Q}};$$

$$Q = 1 + 1,464\left(\frac{a}{c}\right)^{1,65}; \quad M_1 = 1; \quad M_2 = \frac{0,05}{0,11 + \left(\frac{a}{c}\right)^2}; \quad M_3 = \frac{0,29}{0,23 + \left(\frac{a}{c}\right)^2}.$$

Результати та їх обговорення. Згідно з експериментальними результатами, визначені [8] константи n , C системи “матеріал–середовище”, а саме “сталь 16ГС–воденьвмісне середовище” та K_{th} , K_{fc} , які далі будуть використані у розрахунках (табл. 1). Тут також наведено критеріальні значення КІН для визначення безпечної та недопустимої глибини тріщиноподібного дефекту.

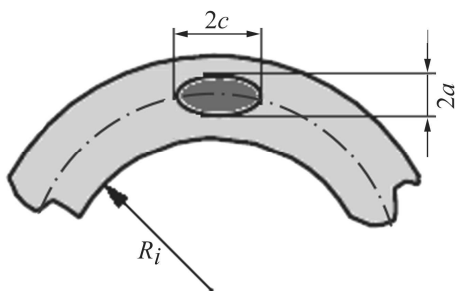


Рис. 1. Внутрішня центрована еліптична тріщина в стінці труби: $2a$ – глибина тріщини; $2c$ – ширина тріщини; R_i – внутрішній радіус.

Fig. 1. An internal embedded elliptical crack in a pipeline wall: $2a$ – crack depth; $2c$ – crack thickness; R_i – internal radius.

Таблиця 1. Параметри циклічної тріщиностійкості експлуатованого металу живильних трубопроводів за різної об'ємної концентрації водню в робочому середовищі

Середовище, вміст водню в ppm	n	$C, \frac{\text{mm/cycle}}{(\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}})^n}$	ΔK_{th}	ΔK_{fc}
			MPa $\sqrt{\text{m}}$	
1,97	4,25	$4,00 \cdot 10^{-10}$	10,80	31,88
2,07	4,56	$1,83 \cdot 10^{-10}$	10,90	29,88
2,20	5,56	$9,49 \cdot 10^{-12}$	12,13	27,78
2,47	5,78	$8,41 \cdot 10^{-12}$	11,25	24,95

Згідно з цими даними і запропонованими аналітичними співвідношеннями, для кожної з розглянутих трубопровідних систем з тріщиноподібним дефектом $a/c = 0,2$, розраховані значення a_{th} та a_{fc} , (табл. 2).

Таблиця 2. Характеристичні глибини еліптичного тріщиноподібного дефекту в стінках трубопроводів за різної об'ємної концентрації водню

Трубопровід	$C_{H(v)}$, ppm	a_{th}	a_*	a_{fc}
		mm		
526×50 mm	1,97	17,1	27,22598	40,00
	2,07	17,3	27,22598	40,00
	2,20	20,5	27,22598	40,00
	2,47	18,2	27,22598	40,00
467×45 mm	1,97	17,19	24,50338	40,00
	2,07	17,46	24,50338	40,00
	2,20	20,43	24,50338	40,00
	2,47	18,27	24,50338	37,98
405×40 mm	1,97	17,52	22,09281	39,6
	2,07	17,76	22,09281	38,56
	2,20	20,4	22,09281	37,28
	2,47	18,48	22,09281	35,44

На рис. 2 зображено визначене значення $(a/t)_*$ за поданим [6] алгоритмом.

На побудованій кривій залежності $\left(\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \cdot \frac{dK_I}{da} \right)$ від a/t проводять дві дотичні. На їх

перетині, спроектованому на вісь, на яку накладено a/t , і буде шукане характеристичне значення $(a/t)_*$. Тут слід відмітити, що якщо числові значення a_* (табл. 2) для досліджуваних трубопровідних систем відрізняються, то значення $(a/t)_*$ для трубопроводів 526×50; 467×45 та 405×40 mm становлять відповідно 0,54245; 0,54452; 0,55232, тобто є дуже близькі. З цього можна зробити висновок, що параметр a_* для наведених тріщиноподібних еліптичних дефектів у стінці трубопроводу суттєво залежить від співвідношення R/t .

У досліджуваному випадку добре проглядається тенденція, що якщо встановлювати довговічність трубопроводу за кількістю циклів навантаження N , а саме:

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

або

$$N_* = \int_{a_{th}}^{a_*} \frac{da}{F(\Delta K_I)}, \quad (3)$$

граничами інтегрування яких є раніше визначені характеристичні глибини тріщиноподібного дефекту, то необхідно визначити граничне значення кількості циклів навантаження $N = N_{fc}$ та $N = N_*$. Досягається глибина тріщиноподібного дефекту, внаслідок якої може зруйнуватися конструктивний елемент, за характеристичного значення глибини a_* , оскільки воно суттєво менше від a_{fc} , а отже, визначити довговічність конструктивного елемента будемо за $N = N_*$.

На рис. 3 зображено залежності кількості циклів навантаження, які можуть призвести до початку руйнування конструктивного елемента, від об'ємної концентрації водню в металі $C_{H(v)}$.

Рис. 3. Залежність кількості циклів навантаження N_* від об'ємної концентрації водню в металі для різних трубопроводів: 1 – 526×50; 2 – 467×45; 3 – 405×40 mm.
Fig. 3. Dependence of a number of loading cycles N_* on volume concentration of hydrogen in metal for various pipelines: 1 – 526×50; 2 – 467×45; 3 – 405×40 mm.

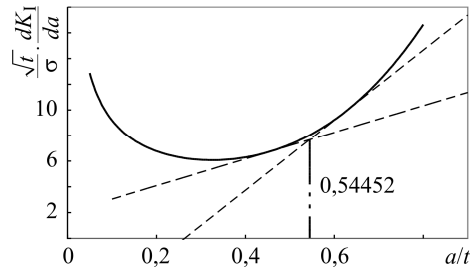
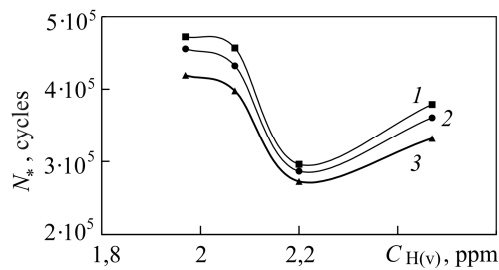


Рис. 2. Визначення характеристичного розміру тріщиноподібного дефекту $(a/t)_*$.

Fig. 2. Determination of characteristic size of a crack-like defect $(a/t)_*$.



Як бачимо, найнесприятливішим для досліджуваних трубопровідних систем є середовище з об'ємною концентрацією водню в металі $C_{H(v)} = 2,2$ ppm. Також спостерігали, коли зі зростанням об'ємної концентрації водню до цього значення характеристична кількість циклів навантаження N_* спадає до мінімального значення, а потім помітний незначний ріст цього параметра в усіх розглядуваних випадках. Таким чином, можна стверджувати, що під час транспортування водню за його об'ємної концентрації в металі $C_{H(v)} = 2,2$ ppm необхідний посилений контроль за еліптичними тріщиноподібними дефектами в стінці трубопроводу.

ВИСНОВКИ

Запропоновано методику оцінювання довговічності трубопровідних систем з тріщиноподібним дефектом у стінці трубопроводу за транспортування воденьвмісних середовищ. Для оцінки довговічності визначено три характеристичні значення глибини тріщини, причому два з них встановлено з експериментальних результатів, а третє – з розрахункової моделі. Показано суттєву залежність параметра a_* від співвідношення R/t для наведених тріщиноподібних еліптичних дефектів у стінці трубопроводу. За результатами оцінки довговічності досліджуваного елемента конструкції визначено найнесприятливіше воденьвмісне середовище для системи “сталь 16ГС–воденьвмісне середовище”.

РЕЗЮМЕ. Предложен метод оценки долговечности трубопроводных систем с эллиптическим внутренним дефектом при транспортировке водородсодержащей среды. Используются критерии механики разрушения для анализа существующих дефектов, которые базируются на определении безопасной и недопустимой глубин трещиноподобного дефекта, а также на основе показателя сопротивляемости элемента конструкции росту трещины, который характеризуется скоростью изменения коэффициента интенсивности напряжений у вершины трещины при ее росте в конструктивном элементе. Приведены примеры оценивания долговечности питательных трубопроводных систем при наличии внутреннего трещиноподобного дефекта.

SUMMARY. The method of the assessment of the durability of pipeline systems with an elliptical internal defect for transportation of hydrogen environment is proposed. The fracture mechanics criteria are used for analyzing existing defects, based on determination of the safe and inadmissible crack-like depths, and also on the index of structural element resistance to crack growth that is characterized by the rate variation of the stress intensity factor at the crack tip during its growth in a structural element. Examples of life time assessment of supplying pipeline systems in the presence of internal crack defect are presented.

1. *Meng G. Z., Zhang C., and Cheng Y. F.* Effects of corrosion product deposit on the subsequent cathodic and anodic reactions of X-70 steel in near-neutral pH solution // *Corrosion Science*. – 2008. – **50**. – P. 3116–3122.
2. *Effects of dissolved hydrogen and elastic and plastic deformation on active dissolution of pipeline steel in anaerobic groundwater of near-neutral pH / B. T. Lu, J. L. Luo, P. R. Norton, H.Y. Ma* // *Acta Materialia*. – 2009. – **57**. – P. 41–49.
3. *Li M. C. and Cheng Y. F.* Mechanistic investigation of hydrogen-enhanced anodic dissolution of X-70 pipe steel and its implication on near-neutral pH SCC of pipelines // *Electrochimica Acta*. – 2007. – **52**. – P. 8111–8117.
4. *Дмитрах І. М., Панасюк В. В.* Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 342 с.
5. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / 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.* – К.: Академперіодика, 2005. – 378 с.
6. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий, А. М. Сиротюк.* – Львів: Сполом, 2012. – 316 с.
7. *Newman J. C. and Raju I. S.* Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies // *Fracture Mechanics: Fourteenth Symp.: Vol. I: Theory and Analysis (STP 791) / Eds.: J. C. Lewis, G. Sines.* – ASTM, 1983. – P. 238–265.
8. *Relationship between fatigue crack growth behaviour and local hydrogen concentration near crack tip in pipeline steel / I. M. Dmytrakh, O. D. Smiyan, A. M., Syrotyuk, and O. L. Bilyy* // *Int. J. of Fatig.* – 2013. – **50**. – P. 26–32.

Одержано 20.04.2015