

УДК 620.191.33: 620.193

**Р.Грабовський, канд.техн.наук; І.Фартушок, канд.техн.наук; О.Касій;
В.Лужецький***Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка***ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТЕПЛОНОСІЯ НА ХАРАКТЕР
РОЗВИТКУ КОРОЗІЙНО-ВТОМНИХ ТРІЩИН
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ТРУБОПРОВОДІВ**

Проведено порівняльну оцінку впливу хімічного складу теплоносія на характер розвитку корозійно-втомних тріщин у живильному трубопроводі енергоблоків ТЕС. Визначено найбільш небезпечний та безпечний водні режими для живильного трубопроводу, виготовленого із низьковуглецевої сталі 12X1МФ. Показано вплив хімічного складу теплоносія на кінетику розвитку корозійних тріщиноподібних дефектів типу пітинга, виразки та борозни. Встановлено характер руйнування живильного трубопроводу в залежності від наявного початкового тріщиноподібного дефекту.

Умовні позначення

- K_I - коефіцієнт інтенсивності напружень;
 K_{th} - пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень;
 K_{fc} - критичний коефіцієнт інтенсивності напружень в умовах циклічного навантаження;
 d - внутрішній діаметр труби;
 t - товщина стінки труби;
 c - глибина тріщини;
 $(c/a)_0$ - початкове співвідношення півосей можливого фронту тріщини;
 $(c/a)_*$ - критичне співвідношення півосей можливого фронту тріщини;
 $2a_*$ - критична ширина руйнівної тріщини;
 N_* - критичне число циклів навантаження.

Тривала експлуатація елементів паропроводів ТЕС в умовах високих напружень, температур та агресивних середовищ [1, 2] сприяє утворенню на внутрішніх поверхнях труб корозійних пітингів, виразок та борозен. При цьому відомо [3], що пошкоджуваність трубопроводів залежить від якості живильної води, особливо наявності в ній органічних домішок. Корозійні дефекти є потенційним джерелом зародження і подальшого поширення тріщин у трубопровідних системах енергетичного обладнання, довговічність яких визначається закономірностями розвитку корозійних тріщин під впливом втомних навантажень [4], які представляють у вигляді діаграм циклічної корозійної тріщиностійкості, що є залежностями швидкості росту тріщини від коефіцієнта інтенсивності напружень K_I . Такі діаграми розміщені між двома його граничними значеннями: нижнім пороговим значенням K_{th} , яке відповідає значенню K_I , при якому не відбувається ріст корозійно-втомної тріщини, і верхнім K_{fc} , яке відповідає значенню K_I , при якому настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини.

У роботі, ґрунтуючись на діаграмах циклічної корозійної тріщиностійкості металу труб [3] та запропонованій методиці чисельної оцінки кінетики та зміни форми тріщиноподібних дефектів при їх розвитку в стінці трубопроводів [5], дано порівняльну оцінку впливу характеру типорозмірів початкових дефектів та хімічного складу водних режимів живильних трубопроводів на тенденції кінетики розвитку втомних тріщин в стінках трубопроводів теплоенергетичного призначення для різних систем “матеріал – середовище”.

Метою даної роботи є експертна оцінка кінетики та можливого характеру руйнування трубопроводу, який знаходиться під дією пульсуючого тиску теплоносія (водного робочого середовища різного хімічного складу, див. табл. 1), на основі даних про типові початкові дефекти (табл. 2), що виникають на його внутрішній поверхні в експлуатаційних умовах [1, 3].

Таблиця 1 - Водні робочі режими та їх хімічний склад

Номер середовища	Назва водного режиму	Хімічний склад середовища
1	Аміачний	Дистильована вода +NH ₃ до pH9
2	Гідразинно-аміачний (I)	H ₂ O+NH ₃ до pH9+100 мкг/кг N ₂ H ₄
3	Гідразинно-аміачний (II)	H ₂ O+NH ₃ до pH9+100 мкг/кг N ₂ H ₄
4	Аміачний з відхиленням за хлоридами	H ₂ O+NH ₃ до pH9+10 мкг/кг Cl ⁻ (16,5 мг/кг NaCl)
5	Аміачний з домішками соляної кислоти	H ₂ O+NH ₃ до pH9+10 мкг/кг Cl ⁻ (HCl); pH3,95

Таблиця 2 - Типові початкові дефекти на внутрішній поверхні трубопроводу

№	Тип дефекту	(c/a) ₀
I	Корозійний пітинг	0,5
II	Корозійна виразка	0,1
III	Корозійна борозна	0,01

Об'єктом розгляду є труба (рис. 1) з внутрішнім діаметром d та товщиною стінки t , яка містить тріщиноподібні дефекти, розташовані паралельно до її осі. При цьому в основу чисельної оцінки кінетики розвитку тріщиноподібних дефектів в стінці труби покладені наступні припущення.

1. Початковий розмір (глибина) тріщини становить $c_0=1$ мм і є однаковим для всіх розглядуваних типів корозійних пошкоджень, наведених в табл. 1. Тріщина розвивається стрибкоподібно з постійним кроком $\Delta c_i=0,5$ мм.
2. Діапазон зміни глибини тріщини: $c_0 \leq c \leq 0,8t$.

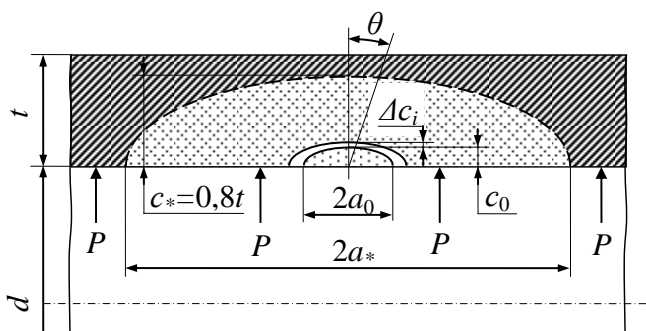


Рисунок 1 - Схематичне представлення розвитку тріщиноподібного дефекту в стінці труби

3. За базу обрано ріст тріщини вглиб стінки, тобто у напрямку півосі c .
4. Тріщиноподібний дефект розвивається із числом циклів навантаження N , зберігаючи напівеліптичну форму із змінною величиною співвідношення півосей c та a , тобто:

$$c/a = f(C_m, N) \tag{1}$$

і залежить від системи “матеріал-середовище”, яка характеризується деякими сталими C_m ($m=1, 2, \dots$), що визначають вплив фізико-хімічних факторів та умов випробування.

5. Процес поширення тріщини як у напрямку півосі c , так і у напрямку півосей a повністю визначається діаграмою циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу для заданої системи "матеріал – середовище", яка аналітично описується степеневою залежністю Паріса [1]

$$dc/dN = da/dN = C(\Delta K)^n, \tag{2}$$

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

6. Значення коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I обчислювали за наступною залежністю [3]:

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

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

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; $\alpha = c/t$; $\beta = c/a$; ($0 \leq \beta \leq 1$; $0 \leq \alpha \leq 0,4$); a – півдовжина тріщини; θ – кут від малої осі напівеліптичної тріщини (рис. 1); k_f – коефіцієнт, що враховує відхилення поперечного перерізу труби від колового.

За результатами обчислень визначалися руйнівні розміри напівеліптичної тріщини $(c/a)_*$ в залежності від її початкової форми $(c/a)_0$ і умов експлуатації та число циклів навантаження до досягнення катастрофічного руйнування (N_*) труби, враховуючи особливості розвитку тріщини у заданому робочому середовищі.

Розрахунок кінетики розвитку тріщиноподібних дефектів здійснювався для трубопроводу живильної води, виготовленому із низьковуглецевої сталі 12Х1МФ з внутрішнім діаметром $d=0,219$ м та товщиною стінки $t=0,042$ м, експлуатація якого відбувалася при максимальному тиску теплоносія $p_{max}=35$ МПа, що при коефіцієнті асиметрії циклу навантаження $R=0,7$ призводить до пульсацій тиску $\Delta p \approx 10,5$ МПа.

Таблиця 3 - Значення констант у степеневій залежності (2) для сталі 12Х1МФ

Номер середовища	C	n
1	$2 \cdot 10^{-16}$	7,13
2	$3 \cdot 10^{-16}$	7,15
3	$1 \cdot 10^{-14}$	5,79
4	$7 \cdot 10^{-21}$	10,26
5	$2 \cdot 10^{-14}$	5,50

Примітка. Номер середовища відповідає табл. 1.

Діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості сталі 12Х1МФ [3] у робочих середовищах різного складу (табл. 1) одержані експериментально з випробовувань балкових зразків перерізом 10×20 мм² при чистому згині та синусоїдальній формі циклу навантаження. Частота циклічного навантаження становила 1 Гц, температура середовища була постійною $T=80^\circ\text{C}$.

В таблиці 3 наведено значення констант степеневій залежності (2), що аналітично описує відповідні діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу при заданих експлуатаційних умовах.

Результати досліджень та їх обговорення

Досліджували кінетику розвитку тріщини в стінках трубопроводу в залежності від початкової форми утвореного дефекту та експлуатаційного середовища, а також визначали критичне число циклів навантаження та кінцеві розміри руйнівної тріщини.

Початковим розміром тріщини вважали величину $c_0=1$ мм (рис. 1).

Руйнівним розміром напівеліптичної тріщини вважали величину $c^* = 0,8 t$ і відповідну заданому початковому співвідношенню півосей $(c/a)_0$ можливого фронту тріщини величину $2a^*$. Число циклів навантаження N^* , яке відповідало розмірам руйнівної тріщини $(c/a)^*$, вважали критичним.

Розглядали три найбільш характерні форми початкових тріщин, які виявляються методами неруйнівного контролю при діагностичному огляді даних трубопроводів [1, 3]. Перший, при $(c/a)_0=1/2$, що відповідає корозійному пошкодженню типу пітинг. Другий, при $(c/a)_0=1/10$, що відтворює тріщиноподібний дефект у вигляді корозійної виразки. Третій, при $(c/a)_0=1/100$, – характерний для корозійної борозни.

Результати обчислень для трубопроводу представлено у табл. 4.

Таблиця 4 - Характеристики кінетики поширення напівеліптичної тріщини в стінках трубопроводу

Номер середовища	$(c/a)_0=1/2$			$(c/a)_0=1/10$			$(c/a)_0=1/100$		
	N^* , цикли	$(c/a)^*$	$2a^*$, м	N^* , цикли	$(c/a)^*$	$2a^*$, м	N^* , цикли	$(c/a)^*$	$2a^*$, м
1	$1,16 \cdot 10^9$	0,541	0,127	$1,46 \cdot 10^8$	0,539	0,128	$8,03 \cdot 10^7$	0,266	0,257
2	$5,42 \cdot 10^8$	0,540	0,128	$9,43 \cdot 10^7$	0,539	0,128	$5,18 \cdot 10^7$	0,266	0,257
3	$1,08 \cdot 10^8$	0,565	0,122	$2,72 \cdot 10^7$	0,563	0,122	$1,53 \cdot 10^7$	0,266	0,257
4	$3,80 \cdot 10^{11}$	0,499	0,138	$2,86 \cdot 10^{10}$	0,498	0,138	$1,40 \cdot 10^{10}$	0,265	0,257
5	$8,21 \cdot 10^7$	0,571	0,121	$2,23 \cdot 10^7$	0,568	0,121	$1,26 \cdot 10^7$	0,266	0,257

Примітка. Номер середовища відповідає табл. 1.

Закономірності впливу кількості циклів навантаження на кінетику зміни напівеліптичної форми тріщини.

На основі запропонованої методики оцінки кінетики росту втомних з напівеліптичною формою тріщин [5] визначали число циклів навантаження до досягнення катастрофічного руйнування (N^*) труби, враховуючи особливості розвитку тріщини в заданому робочому середовищі. Вони представлені у вигляді графічних залежностей відношення c/a від числа циклів навантаження N (рис. 2). Тут вертикальні ділянки на кривих відображають процес поширення тріщини, який призводить до катастрофічного руйнування труби. Час досягнення цього стану характеризується числом циклів навантаження N^* . Представлені на рис. 2 залежності відображають характер руйнування труби, який має свої особливості в залежності від форми початкових дефектів. Так, при дефекті у вигляді корозійного пітингу поширення тріщини на першому етапі є домінуючим у глибину стінки труби. Другий етап характеризується визначальним розвитком тріщини вздовж твірної труби. У випадку наявних початкових дефектів у вигляді корозійної виразки та борозни має місце переважаючий розвиток тріщини в глибину стінки труби.

Порівняльний аналіз розвитку тріщини по глибині стінки труби від числа циклів навантаження до досягнення катастрофічного руйнування показує, що не залежно від типу початкового дефекту труб мають місце аналогічні тенденції впливу хімічного складу робочого середовища (рис. 2) на характер руйнування розглядуваної труби. Так, найбільш небезпечними є водні режими 5 і 3 (див табл. 1), оскільки число циклів навантаження до досягнення катастрофічного руйнування (табл. 4) є найменшим. Значну небезпеку для експлуатації живильних трубопроводів, виготовлених зі сталі 12Х1МФ, становлять водні режими 2 і 1, а аміачний водний режим з відхиленням за хлоридами (середовище 4) є найоптимальнішим для експлуатації живильних трубопроводів. Це пояснюється тим [3], що іони Cl^- стимулюють локальне анодне розчинення металу, що спричиняє зменшення ефективної концентрації напружень у вершині тріщини. Слід звернути увагу на те, що труба з наявним дефектом у вигляді корозійної борозни зазнає катастрофічного руйнування при найменшому числі циклів

навантаження, а труба з наявним дефектом у вигляді корозійного пітинга – при найбільшому числі циклів навантаження. Склад середовища не змінює цієї тенденції.

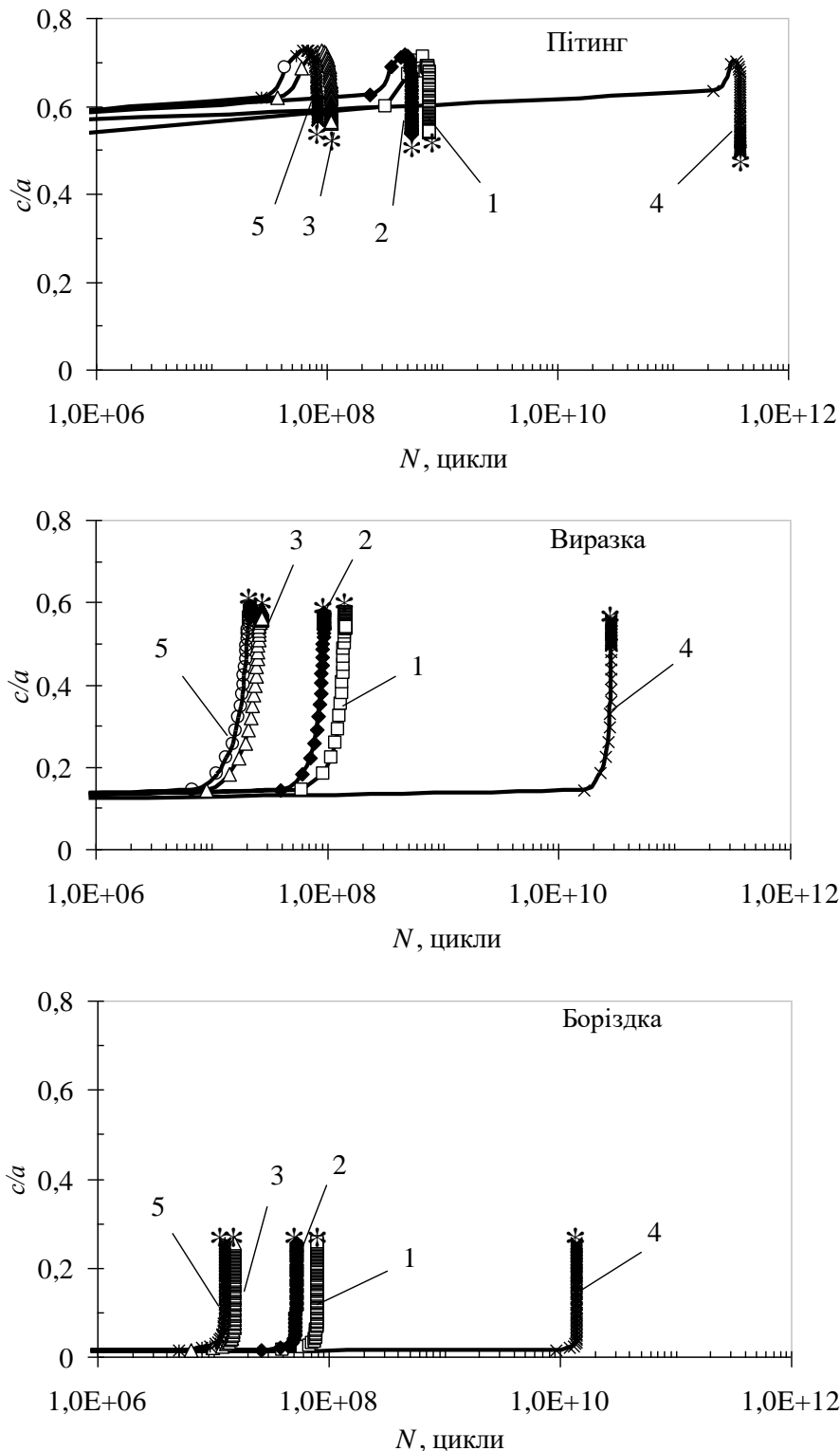


Рисунок 2 - Зміна форми тріщини (c/a) при її розвитку по глибині стінки труби від числа циклів навантаження N при випробуваннях в робочих середовищах різного складу 1-5 (табл. 1)) в залежності від початкових дефектів: пітинга – $(c/a)_0 = 1/2$, виразки – $(c/a)_0 = 1/10$ і боріздка – $(c/a)_0 = 1/100$. * – катастрофічне руйнування труби

Таким чином, найбільш небезпечними при експлуатації живильних трубопроводів, виготовлених з низьковуглецевої сталі 12Х1МФ, є водні режими 5 і 3. В той же час водний режим 4 можна вважати найоптимальнішим для їх експлуатації. Вплив одного робочого режиму та хімічного складу середовища не залежить від форми

дефекту, розміщеного на внутрішній поверхні трубопроводу. Найбільш небезпечними при експлуатації живильних трубопроводів є початкові дефекти у вигляді корозійної борозни, при наявності яких число циклів навантаження до досягнення катастрофічного руйнування є найменшим.

Закономірності кінетики зміни напівеліптичної форми тріщини при її розвитку по товщині стінки трубопроводу. На основі прийнятих типових форм корозійних дефектів розглянемо кінетику зміни тріщини напівеліптичної форми по товщині стінки труби для розглядуваних видів водних робочих середовищ.

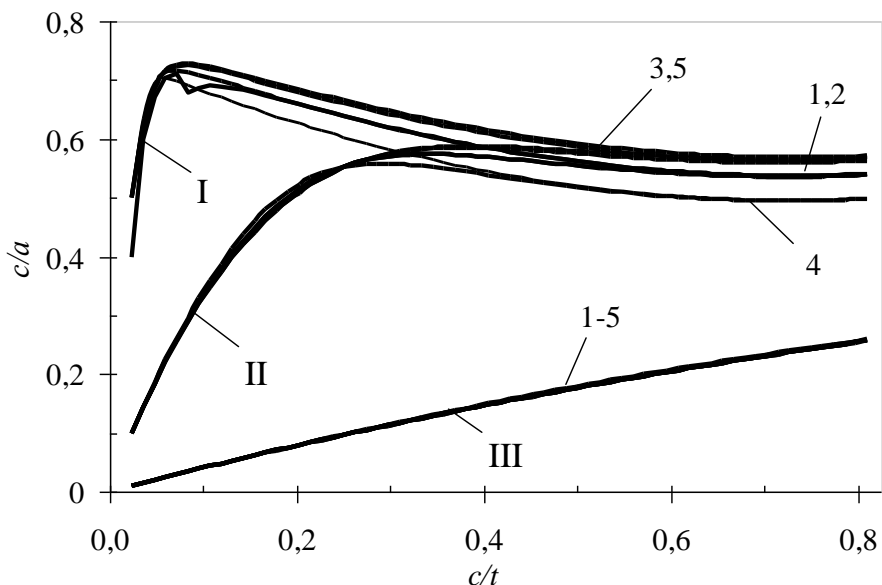


Рисунок 3 - Зміна форми тріщини (c/a) при її розвитку по глибині (c/t) стінки труби при випробуваннях в робочих середовищах різного складу 1-5 (табл. 1)) в залежності від початкових дефектів: I – пітинга ($(c/a)_0 = 1/2$), II – виразки ($(c/a)_0 = 1/10$) і III – борозни ($(c/a)_0 = 1/100$)

З представлених на рис. 3 результатів досліджень трубопроводу при випробуваннях в робочих середовищах різного складу (див. табл. 1) впливає, що має місце вплив як хімічного складу водного середовища, так і типу наявного дефекту на кінетику розвитку корозійної тріщини в стінці труби. Розглянемо вищесказане детальніше.

Для початкових дефектів з I-го ($(c/a)_0 = 1/2$) та II-го ($(c/a)_0 = 1/10$) типорозмірів (табл. 2) спостерігаються дві стадії (рис. 3) розвитку корозійної тріщини. Перша, незначна стадія, характерна переважанням розвитком тріщини в глибину стінки труби, що зумовлено умовою $K_{I(\theta=0^\circ)} > K_{I(\theta=90^\circ)}$. Друга, домінуюча стадія, зумовлена $K_{I(\theta=0^\circ)} < K_{I(\theta=90^\circ)}$. Вона характерна переважанням та стабільним розвитком тріщини вздовж твірної труби аж до її кінцевого руйнування. Відмінність розвитку корозійної тріщини для початкових дефектів I-го та II-го типорозмірів полягає лише в тривалості першого етапу. Так, у випадку корозійного пітингу перший етап поширення тріщини у глибину стінки труби суттєво коротший, ніж у випадку корозійної виразки.

В той же час фронт поширення тріщини в стінці дослідженої труби суттєво залежить від хімічного складу водних режимів розглядуваних середовищ. Так, для водних режимів 5 і 3 (див. табл. 1 і 4) він набуває практично однакової напівеліптичної форми. Його критична ширина змінюється незначно і становить $121 \text{ мм} < 2a^* < 122 \text{ мм}$. Для водних режимів 1 і 2 вона дещо більша: $127 \text{ мм} < 2a^* < 128 \text{ мм}$. В той же час особливістю впливу аміачного водного режиму з відхиленням за хлоридами (середовище 4) на розвиток корозійної тріщини в стінці труби є її домінуюче поширення вздовж твірної труби. Критична ширина тріщини при цьому зростає і становить $2a^* = 138 \text{ мм}$. Вищеописані тенденції характерні для початкових дефектів I-го та II-го типорозмірів. Слід зазначити, що на другій стадії розвитку корозійної тріщини нівелюється вплив

початкової форми тріщиноподібного дефекту і визначальним є вплив хімічного складу корозійного середовища.

Розвиток тріщини в стінці розглядуваної труби при випробуваннях в робочих середовищах різного складу з початковим дефектом у вигляді корозійної борозни розміром $(c/a)_0 = 1/100$ характеризується стійким, однотипним та стабільним поширенням як в глибину, так і вздовж твірної труби аж до її кінцевого руйнування. В цьому випадку нівелюється вплив хімічного складу розглядуваних водних режимів і визначальною в процесі руйнування живильного трубопроводу є початкова форма корозійного тріщиноподібного дефекту (рис. 3, криві III). Критична ширина напівеліптичної за формою тріщини при цьому залишається незмінною і дорівнює $2a^* = 257$ мм. Отже, початкова форма напівеліптичної тріщини у вигляді борозни, не залежно від виду середовища, є домінуючою і визначає кінетику поширення та характер руйнування труби.

Таким чином, вплив хімічного складу водних режимів розглядуваних середовищ характерний для трубопроводів із корозійними пошкодженнями двох типів – пітингу та виразки. У випадку корозійного пошкодження третього типу – початкова форма напівеліптичної тріщини, не залежно від виду середовища, є домінуючою і визначає кінетику поширення та характер руйнування живильного трубопроводу ТЕС.

Висновки

Одержані результати досліджень вказують на те, що середовище та початкова форма тріщиноподібних дефектів, які виникають в живильному трубопроводі ТЕС, суттєво впливають як на кінетику поширення, так і на критичні розміри корозійно-втомних тріщин. Окрім цього, кінетика їх розвитку має свої особливості в залежності від початкової форми тріщин та хімічного складу робочого середовища.

Встановлено, що найбільш небезпечними при експлуатації живильних трубопроводів, виготовлених з низьковуглецевої сталі 12Х1МФ, є водні режими 5 і 3. Виявлено, що найоптимальнішим для експлуатації живильного трубопроводу є аміачний водний режим з відхиленням за хлоридами (середовище 4).

Виявлено суттєвий вплив хімічного складу робочого середовища у випадку наявних на внутрішній стінці трубопроводу корозійних дефектів двох типів – пітингу та виразки. У випадку наявних корозійних пошкоджень третього типу спостерігається визначальний вплив початкової форми дефекту на характер руйнування живильних трубопроводів, при наявності яких критичне число циклів навантаження є найменшим.

Influences of the chemical composition of an aqueous heat carrier on the corrosion fatigue crack growth behaviour in power plant pipelines have been studied. The tubes (low alloyed steel 12X1MФ) with initial crack-like defects of different type, namely corrosion pit, corrosion ulcer and corrosion furrow were considered. The significant variables of kinetics and initial defect shape have been shown under environmental influence. Here, the initial furrow-type defect can be classified as most critical from the view of residual durability forecasting of the damaged pipelines.

Література

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Том 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: ВД "Академперіодика", 2005. – 378 с.
2. Мелехов Р.К., Похмурський В.І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. – К.: Наук. думка, 2003. – 374 с.
3. Дмитрах І.М., Панасюк В.В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. - Львів: Національна академія наук України. Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка, - 1999. - 341 с.
4. Панасюк В.В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
5. Грабовський Р.С., Лужецький В.С., Горб'як Т.М. До оцінки кінетики росту втомних тріщин в стінках трубопроводів // Машинознавство. - 2005. - №4. – С.7-10.

Одержано 28.03.2006 р.