

УДК 620.191.33

А. М. Сиротюк, Р. А. Барна, О. Л. Білий

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

### ОЦІНЮВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА РИЗИКУ РУЙНУВАННЯ ДЕФЕКТНОГО ТРУБОПРОВОДУ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ

*Розглянута проблема корозійно-втомної пошкоджуваності трубопроводів теплоенергетичного устаткування за тривалої експлуатації в умовах дії техногенних домішок. За критеріями механіки руйнування зроблено розрахункові оцінки допустимих розмірів тріщиноподібних дефектів у стінках живильних трубопроводів ТЕС залежно від їх форми та концентрації органічних домішок у робочому середовищі  $C_{HCOOH}$ . Зокрема, запропоновано діаграми оцінювання роботоздатності і ризику руйнування трубопроводів з дефектами, що базуються на концепції порогової та критичної глибини тріщини, а також на параметрах росту корозійно-втомних дефектів.*

*Ключові слова:* техногенні органічні домішки; корозійні пошкодження металу; тріщиноподібні дефекти; швидкість росту тріщини; порогова і критична глибини тріщини; діаграми оцінювання роботоздатності і ризику руйнування трубопроводів з дефектами.

*Рис. 2. Форм. 8. Табл. 2. Літ. 14.*

А. М. Сыротюк, Р. А. Барна, О. Л. Билый

### ОЦЕНИВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И РИСКА РАЗРУШЕНИЯ ДЕФЕКТНОГО ТРУБОПРОВОДА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Рассмотрена проблема коррозионно-усталостной повреждаемости трубопроводов теплоэнергетического оборудования при длительной эксплуатации в условиях воздействия техногенных примесей. По критериям механики разрушения сделано расчетные оценки допустимых размеров трещиноподобных дефектов в стенках питательных трубопроводов ТЭС в зависимости от их формы и концентрации органических примесей в рабочей среде  $C_{HCOOH}$ . В частности, предложены диаграммы оценки работоспособности и риска разрушения трубопроводов с дефектами, базирующиеся на концепции пороговой и критической глубины трещины, а также на параметрах роста коррозионно-усталостных дефектов.*

*Ключевые слова:* водные среды; техногенные органические примеси; коррозионные повреждения металла; трещиноподобные дефекты; скорость роста трещины; пороговая и критическая глубины трещины; диаграммы оценки работоспособности и риска разрушения трубопроводов с дефектами.

A. M. Syrotyuk, R. A. Barna, O. L. Bilyy

### ASSESSMENT OF SERVICEABILITY AND FRACTURE RISK OF DEFECTIVE PIPELINE OF HEAT-AND-POWER EQUIPMENT

*The problem of corrosion fatigue damaging of pipelines for heat-and power equipment under long-term operation in the presence of man-caused admixtures was considered. Based on fracture mechanics criteria the calculation assessments of admissible size of crack-like defects in pipe wall of the feeding pipelines of HPP have been made depending on the defects shape and the concentration of organic admixtures  $C_{HCOOH}$  in operating environment. In particular, the diagrams for evaluation of serviceability and fracture risk of pipelines that based on concept of threshold and critical crack depth and parameters of corrosion fatigue defects growth were proposed.*

*Keywords:* man-caused organic admixtures; corrosion damaging of metal; crack-like defects; crack growth rate; threshold and critical crack depth; diagram for assessment of serviceability and fracture risk of pipelines with defects.

**Постановка проблеми.** Проблема надійної та безпечної роботи теплоенергетичного обладнання – актуальна і для України, і для високорозвинутих індустріальних країн [1]. Це пов'язано з двома основними чинниками. По-перше, обладнання поступово вичерпує свій плановий ресурс і в останні роки виявлено значну кількість його пошкоджень, переважно корозійно-втомного характеру [2]. По-друге, існує проблема присутності техногенних органічних домішок в теплоносії парогенеруючих систем енергоблоків ТЕС [3, 4]. У результаті забруднення експлуатаційного середовища утворюються корозійні та корозійно-механічні пошкодження на внутрішніх поверхнях обладнання. Досвід експлуатації електростанцій [1, 3] свідчить, що такі пошкодження можуть становити значний відсоток від загальної кількості (біля 40% [1]) і спричинити появу тріщиноподібних дефектів, подальший розвиток яких приводить до руйнування конструкцій в цілому або її окремих елементів.

*Зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.* Електроенергетика – базова галузь економіки, яка забезпечує потреби країни в електричній енергії і може виробляти значний її обсяг для експорту. До 2030 р. основою електроенергетичної системи України залишатимуться теплові електростанції (ТЕС), тому вирішальне значення має технічний стан та безпечна експлуатація діючого теплоенергетичного устаткування [6].

На сьогодні 92,1% енергоблоків ТЕС відпрацювали свій розрахунковий ресурс (100 тис. год), а 63,8% перетнули визнану в світовій енергетичній практиці межу граничного ресурсу та межу фізичного зносу – відповідно, 170 тис. та 200 тис. год і потребують модернізації чи заміни [6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Технічна діагностика та інженерний досвід експлуатації відповідальних конструкцій і технологічного обладнання засвідчують [11, 12], що в таких об'єктах зростає кількість так званих нетрадиційних пошкоджень, які не прогнозують нормативні інструкції та документи і виникають внаслідок тривалої роботи устаткування або різноманітних відхилень від експлуатаційних режимів. Такі пошкодження, в основному, мають корозійно-механічну природу [4] і утворюються, в першу чергу, в місцях підвищеної концентрації напружень, що спричинена конструктивними особливостями або технологією виготовлення деталі чи вузла.

Експлуатаційна практика засвідчує [5], що власне в цих місцях і виникають основні поломки та руйнування конструктивних елементів. При цьому за фізичною природою таке руйнування є багатостадійним локалізованим процесом зародження та розвитку тріщиноподібних дефектів (гострокінцевих концентраторів напружень) до критичних розмірів [7]. Вирішальне значення тут мають фізико-хімічні чинники локальної взаємодії напруженого металу та робочого середовища, які принципово змінюють кінетику пошкоджуваності матеріалу та суттєво пришвидшують його руйнування.

**Формулювання цілей статті.** За критеріями механіки руйнування здійснити розрахункове оцінювання допустимих розмірів тріщиноподібних дефектів у стінках живильних трубопроводів ТЕС залежно від їх форми та концентрації техногенних органічних домішок у робочому середовищі.

*Об'єкт дослідження* – фізико-хімічні процеси руйнування конструкційних металів та сплавів теплоенергетичного призначення в умовах сумісної дії механічних навантажень та робочих середовищ.

*Мета роботи* – розрахункове оцінювання допустимих розмірів тріщиноподібних дефектів у стінках трубопроводів теплоенергетичного устаткування залежно від їх форми та концентрації техногенних органічних домішок у робочому середовищі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Нижче, ґрунтуючись на підходах механіки руйнування матеріалів, пропонуємо методіку та експертні оцінки працездатності та ризику руйнування дефектних живильних трубопроводів із урахуванням характеристик тріщиностійкості експлуатованого металу та концентрації техногенних органічних домішок у робочому середовищі.

**Критерії оцінки працездатності та ризику руйнування дефектних трубопроводів.** В основу було покладено параметри механіки руйнування матеріалів, а саме – характеристики циклічної корозійної тріщиностійкості експлуатованого металу трубопроводу [5]. Розглядалися найбільш типові випадки форми дефектів, які виявляють методами неруйнівного контролю при профілактичному огляді трубопроводів [6, 7] в експлуатаційних умовах: корозійна боріздка та корозійна виразка (пітинг). Дефект у стінці трубопроводу з внутрішнім діаметром  $d$  та товщиною стінки  $t$  моделювався півеліптичною тріщиною із розмірами півосей  $a$  та  $c$ . При цьому, для дефектів типу корозійної боріздки відношення півосей змінювалось у діапазоні  $c/a = 0,01...0,2$ , а для корозійної виразки  $c/a = 0,4...0,8$ .

Для підрахунку значень коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН)  $\Delta K_I$  по контуру півеліптичної тріщини на внутрішній поверхні труби використовували залежність [5]:

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

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

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

Основою для чисельних оцінок міцності та довговічності були базові діаграми [5] циклічної тріщиностійкості експлуатованого металу трубопроводу. Такі діаграми (залежності швидкості росту корозійно-втомної тріщини від розмаху КІН) розміщені між двома граничними значеннями: нижнім пороговим значенням  $\Delta K_{th}$ , яке відповідає значенню  $\Delta K_I$  за якого корозійно-втомна тріщини не росте і верхнім  $\Delta K_{fc}$ , яке відповідає значенню  $\Delta K_I$ , за якого настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини.

При оцінюванні потенційного розвитку корозійно-втомних дефектів вважалось, що тріщиноподібний дефект розвивається з числом циклів навантаження  $N$  зберігаючи півеліптичну форму. Однак співвідношення півосей  $a$  та  $c$  є величиною змінною, тобто:

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

і залежить від системи «матеріал–середовище», що характеризується деякими сталими  $C_m$ . Прийнято, що опір поширенню тріщини, як в напрямку півосі  $c$ , так і в напрямку півосей  $a$ , повністю визначається діаграмою циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу, що одержана за заданих умовах випробування. В аналітичному вигляді це представлено за допомогою відомої степеневі залежності Паріса:

$$dc/dN = C(\Delta K_{I(\theta=0)})^n \quad \text{та} \quad da/dN = C(\Delta K_{I(\theta=\pi/2)})^n, \quad (3)$$

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

Оцінку безпечної експлуатації дефектного трубопроводу здійснювали за критерієм порогової глибини тріщини  $c_{th}$  на основі її взаємозв'язку із пороговими значеннями КІН  $\Delta K_{th}$ . Це дає змогу, враховуючи експериментальні дані про циклічну тріщиностійкість матеріалу труби та дані діагностики стану трубопроводів (тобто розміри та форму тріщин), оцінити потенційну можливість розвитку тріщин при подальшій експлуатації, а також ступінь ризику руйнування трубопроводу. Тут під пороговим розміром тріщини вважається напівеліптична тріщина фіксованої форми ( $c/a$ ) та глибиною  $c = c_{th}$  у вершині якої значення КІН рівне пороговому:  $K_I = \Delta K_{th}$ . Таким чином, критерієм 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.

Розглянуто також випадок розрахунку допустимої глибини  $c^*$  тріщини, для забезпечення безаварійної роботи трубопроводу між двома черговими профілактичними оглядами. Його пропонується здійснювати за критерієм приросту  $\Delta c$  виявленого тріщиноподібного дефекту глибиною  $c_0$ , тобто

$$\Delta c \leq \Delta c^* \quad \text{при} \quad \Delta N = \Delta N^*, \quad (5)$$

де  $\Delta c^*$  – допустимий приріст тріщини в глибину;  $\Delta N^*$  – планове число циклів навантаження впродовж експлуатації трубопроводу між двома профілактичними оглядами. Фізично це означає оцінку за деякою граничною швидкістю розвитку корозійно-втомної тріщини впродовж запланованого терміну експлуатації трубопроводу  $(dc/dN)^*$ :

$$dc/dN \leq (dc/dN)^*. \quad (6)$$

Так, наприклад, якщо ми виберемо значення  $(dc/dN)^* = 10^{-4}$  мм/цикл, то це означає, що наявні в трубопроводі тріщини глибиною  $c_i$  можуть максимально розвинути на 1 мм впродовж 10000 циклів навантаження [8]. Вибір значень  $\Delta N^*$  здійснюється із урахуванням статистичних даних про експлуатацію енергоблоків на ТЕС України [1].

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

$$\Delta K_I \leq \Delta K_{fc}, \quad (7)$$

де  $\Delta K_{fc}$  – циклічна в'язкість руйнування [5]. Тут під критичним розміром тріщини вважається напівеліптична тріщина фіксованої форми ( $c/a$ ) та глибиною  $c = c_{fc}$ , у вершині якої значення КІН рівне критичному:  $K_I = \Delta K_{fc}$ . Таким чином, критерієм критичного тріщиноподібного дефекту буде умова:

$$c = c_{fc}(\Delta K_{fc}) \quad \text{при} \quad (c/a) = \text{const}. \quad (8)$$

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.

**Циклічна тріщиностійкість експлуатованого металу трубопроводу при різній концентрації техногенних органічних домішок в робочому середовищі.** Дослідження проведено в середовищах різного складу. За основу було взято робоче середовище номінального складу, згідно норм експлуатації ТЕС [1]: вода високого ступеня очистки з рН  $7 \pm 0,5$  та провідністю  $\chi \leq 3$  мС/м. Як органічні домішки використано розчин мурашиної кислоти різної концентрації  $C_{HCOOH}$  (мг/кг) у номінальному середовищі. Це зроблено на підставі результатів досліджень [1], які показали, що вона є найбільш корозійно агресивною відносно металу трубопроводу, порівняно із іншими домішками виявленими у водозаборі даної ТЕС.

При дослідженнях використано спеціальну методику [5], яка забезпечувала постійність складу та рН середовища у порожнині втомної тріщини, що розвивається. Експерименти проведено на балкових зразках прямокутного поперечного перерізу ( $10 \times 20$  мм) з початковою крайовою тріщиною однакової довжини  $c_0 \approx 4$  мм та при приблизно однаковому початковому рівні навантаження, що характеризувався значенням розмаху КІН  $\Delta K_0$  (табл. 1). Температура середовища становила  $25^\circ\text{C}$ , коефіцієнт асиметрії циклу навантаження –  $R = 0$ , частота  $f = 1$  Гц. Загалом, було проведено п'ять серій випробувань за різних концентрацій домішок у робочому середовищі (табл. 1).

Таблиця 1. Умови випробування на циклічну корозійну тріщиностійкість експлуатованого металу живильних трубопроводів за чистого згину

Середовище	$f$ , Гц	$R$	$c_0$ , мм	$\Delta K_0$ , МПа $\cdot\sqrt{\text{м}}$
Номінальне (H <sub>2</sub> O)	1,0	0	3,95	11,58
Номінальне + $C_{HCOOH}$ (3 мг/кг)	1,0	0	3,90	11,59
Номінальне + $C_{HCOOH}$ (5 мг/кг)	1,0	0	4,06	10,92
Номінальне + $C_{HCOOH}$ (10 мг/кг)	1,0	0	4,03	13,73
Номінальне + $C_{HCOOH}$ (100 мг/кг)	1,0	0	4,05	13,71

Первинні дані випробувань представлені як масив експериментальних точок швидкості росту корозійно-втомної тріщини  $dc/dN$  від її довжини  $c$  за різних концентраціях органічних домішок, які засвідчили їх помітний вплив на розвиток тріщиноподібних дефектів. На основі одержаних експериментальних даних були визначені значення порогових  $\Delta K_{th}$  та критичних  $\Delta K_{fc}$  КІН, а також константи  $n$  та  $C$  степеневі залежності Паріса (3), що описують середньоамплітудні ділянки діаграм циклічної тріщиностійкості матеріалу (табл. 2).

Аналіз одержаних результатів свідчить про наступне. У цілому, присутність техногенних органічних домішок змінює характеристики циклічної корозійної тріщиностійкості експлуатованого металу живильних трубопроводів, порівняно із випробуваннями в робочому середовищі номінального складу. Найбільш помітні зміни відбуваються в діапазоні  $0 \leq C_{HCOOH} \leq 10$  мг/кг. При цьому, зростає крутизна діаграм, що відбивається зростанням значення параметра  $n$  степеневі залежності Паріса (див. табл. 2), а також помітно знижується циклічна в'язкість руйнування  $\Delta K_{fc}$  при практично незмінному рівні порогового значення КІН  $\Delta K_{th}$ . Цей факт повинен враховуватись при експертних оцінках роботоздатності та ризику руйнування експлуатованих живильних трубопроводів із тріщиноподібними дефектами.

Таблиця 2. Параметри циклічної корозійної тріщиностійкості експлуатованого металу живильних трубопроводів при різній концентрації техногенних органічних домішок у робочому середовищі

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

Діаграми для оцінювання працездатності та ризику руйнування живильного трубопроводу з корозійними дефектами. На основі викладених вище критеріїв (4), (6) та (8) були побудовані спеціальні діаграми [9, 10] у координатах «характеристична глибина дефекту – форма дефекту» (рис. 1).

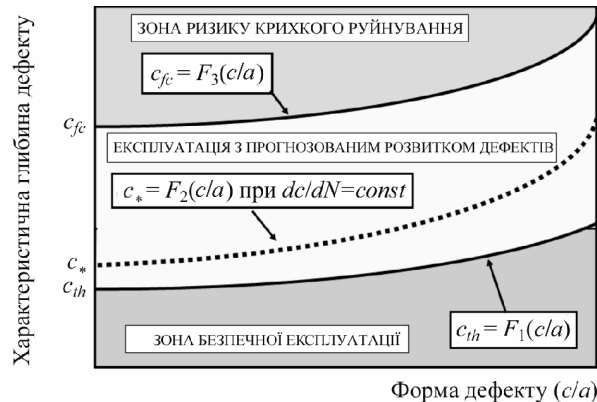


Рис. 1. Схематичний вигляд діаграми для оцінювання працездатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами

Така діаграма містить три характерні зони. По-перше це зона безпечної експлуатації трубопроводу, що знаходиться нижче кривої  $c_{th} = F_1(a/c)$ . Це стосується випадку коли глибина всіх виявлених при діагностичному огляді дефектів є меншою за порогове значення, тобто  $c = c_{th}$ . Такі дефекти вважаються безпечними, оскільки не мають потенційної здатності до подальшого розвитку.

Друга зона – це зона експлуатації з прогнозованим розвитком наявних тріщиноподібних дефектів. Це означає, що впродовж певного запланованого терміну експлуатації трубопроводу допускається розвиток існуючих тріщин з швидкістю, що не перевищує деяку встановлену граничну, тобто  $dc/dN \leq (dc/dN)^*$ . Значення  $(dc/dN)^*$  вибирається залежно до вимог та норм експлуатації трубопроводу, а також конкретної виробничої ситуації на ТЕС. За вибраним значенням граничної швидкості  $(dc/dN)^*$  розраховують криву  $c_* = F_2(a/c)$ . Всі наявні в трубопроводі тріщиноподібні дефекти глибиною  $c_i \leq c_*$  будуть розвиватись із швидкістю нижче граничної і можуть вважатись умовно безпечними для даного випадку.

Третя зона – зона ризику крихкого руйнування, яка знаходиться вище кривої  $c_{fc} = F_3(a/c)$ . Тобто для всіх виявлених при діагностичному огляді дефектів глибиною  $c_i \geq c_{fc}$  реалізується критерій катастрофічного руйнування і експлуатація трубопроводу з такими дефектами недопустима.

Нижче наведені діаграми оцінки роботоздатності та ризику руйнування розраховані для експлуатованого живильного трубопроводу з діаметром 526 мм та товщиною стінки 50 мм при максимальному робочому тиску теплоносія  $p_{max} = 35$  МПа та можливій пульсації тиску при експлуатації  $\Delta p = 10,5$  МПа (рис. 2).

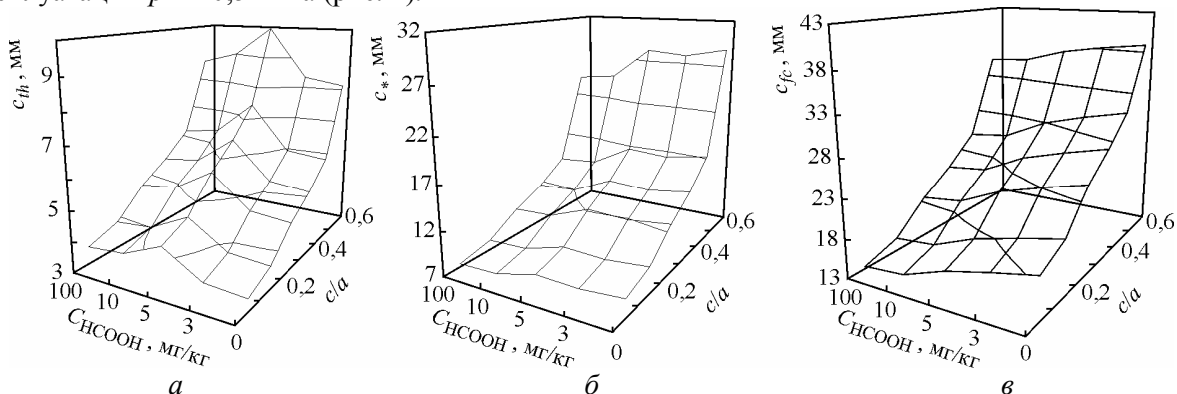


Рис. 2. Діаграми для оцінювання працездатності та ризику руйнування живильного трубопроводу з дефектами (труба 526×50 мм з ТЕС «Л», термін експлуатації 145 тис. год.).

Допустима глибина тріщини за критеріями: а –  $c_{th}$ ; б –  $c_*$ ; в –  $c_{fc}$

Тут були враховані одержані експериментальні дані про базові характеристики циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу, концентрації техногенних органічних домішок у теплоносії  $C_{НСООН}$ , а також зміну форми тріщиноподібних дефектів, що враховувалось

параметром  $c/a$ . Для зони експлуатації з прогнозованим розвитком наявних тріщиноподібних дефектів крива  $c_* = F_2(a/c)$  розрахована за значення граничної швидкості розвитку корозійно-втомної тріщини  $(dc/dN)_* = 10^{-4}$  мм/цикл [10].

Одержані результати (рис. 2) вказують на зниження допустимих розмірів дефектів із зростанням концентрації органічних домішок у робочому середовищі, тобто їх негативний вплив на експлуатаційну міцність та довговічність розглянутих живильних трубопроводів енергоблоків ТЕС.

*Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.* За критеріями механіки руйнування зроблено розрахункові оцінки допустимих розмірів тріщиноподібних дефектів у стінках живильних трубопроводів ТЕС залежно від їх форми та концентрації техногенних органічних домішок у робочому середовищі. Виявлено зниження допустимих розмірів дефектів із зростанням їх концентрації. Побудовані діаграми оцінки роботоздатності та ризику руйнування можна розглядати як основу для експертних висновків про можливість подальшої експлуатації живильних трубопроводів з дефектами, виявленими під час профілактичних оглядів.

1. Білий О. Критерії оцінки ризику корозійно-втомного руйнування живильних трубопроводів енергоблоків ТЕС / О. Білий, А. Сиротюк // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – № 32. – С. 14–18.
2. Вайнман А. Современное состояние проблемы коррозии металла пароводяного тракта энергоблоков СКД ТЭС Украины / Аркадій Вайнман // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія–2002): у 2-х т. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – Спец. вип. № 3. – Т. 1. – С. 44–50.
3. Вайнман А. Б. О влиянии среды на металл пароводяного тракта энергетических блоков сверхкритического давления / А. Б. Вайнман, О. И. Мартынова, О. Д. Смиян // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1995. – Т. 31, № 5. – С. 95–104.
4. Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень [Текст] / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 342 с.
5. Энергетична стратегія України на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р., №145 – 16 р.
6. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст]: довідн. посіб. / За 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: [за ред. І.М. Дмитраха]. – К.: ВД „Академперіодика”, 2005. – 378 с.
7. Панасюк В. В. Механика квазирупкого разрушения материалов / В. В. Панасюк. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
8. Поведение органических веществ на разных стадиях водоподготовки / Б. Н. Ходырев, В. В. Панченко, А. И. Калашников и др. // Энергетик. – 1993. – №3. – С. 16–18.
9. Характеристики корозійної тріщиностійкості матеріалів та їх значення в проблемі забезпечення експлуатаційної надійності теплоенергетичного обладнання. Ч. I / В. В. Панасюк, І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман та ін. // Энергетика та електрифікація. – 1998. – № 6. – С. 29–35.
10. Характеристики корозійної тріщиностійкості матеріалів та їх значення в проблемі забезпечення експлуатаційної надійності теплоенергетичного обладнання. Ч. II / В. В. Панасюк, І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман та ін. // Энергетика та електрифікація. – 1999. – № 1. – С. 34–44.
11. Цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин” // Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. / За заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2006. – 588 с.
12. Цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин” // Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2007–2009 рр. / За заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2009. – 708 с.
13. Dmytrakh I. M. Corrosion fatigue cracking and failure risk assessment of pipelines / I. M. Dmytrakh // Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines: NATO Science for Peace and Security Series. – The Netherlands: Springer, 2008. – P. 99–113.
14. Dmytrakh I.M. Structural Integrity Assessment of Heat-and-Power-Engineering Pipelines with Corrosion Defects [електронний ресурс] / I. M. Dmytrakh, V. V. Panasyuk // Proc. 17th European Conference on Fracture ECF17). – Brno, Czech Republic, September 2-5, 2008.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2014.

Рецензенти:

Студент О. З. – д.т.н., проф., провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України;

Ткачук Ю. М. – к.т.н., доцент Луцького національного технічного університету.