

позволяет устанавливать до 28 различных частот для каналов передачи информации, это позволяет бесперебойно работать нескольким датчикам вблизи друг от друга. Автором статьи для проведения экспериментального исследования было изготовлено два комплекта датчиков. Поломок за все время испытаний выявлено не было.

Список литературы: 1. *Ranganath, R.* A force–torque sensor based on a Stewart Platform in a near-singular configuration / *R. Ranganath* // Mechanism and Machine Theory. – 2004. – №39. – Iss. 9. – P. 971–998. 2. *Whitehead, N.* Torque sensor employing a mechanical resonator / *N. Whitehead* // Sensors and Actuators A: Physical. – 1997. – № 60. – P. 29–31. 3. *Sultan, C.* A force and torque tensegrity sensor / *C. Sultan, E. Skelton* // Sensors and Actuators A: Physical. – 2004. – № 112. – P. 220–231. 4. *Hazelden, R. J.* Optical torque sensor for automotive steering systems / *R. J. Hazelden* // Mechanism and Machine Theory. – 1993. – № 18. – P. 193–197. 5. *Lemarquand, V.* New structure of magnetic torque sensor / *V. Lemarquand, G. Lemarquand* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1992. – № 104. – P. 1109–1110. 6. *Zabler, E.* A non-contact strain-gage torque sensor for automotive servo-driven steering systems / *E. Zabler, A. Dukart* // Sensors and Actuators A: Physical. – 1994. – № 41. – P. 39–46. 7. Немец И. Практическое применение тензорезисторов / И. Немец – М.: Энергия, 1970. – 144 с. 8. Тесленко А. А. Что следует знать о тензорезисторах / А. А. Тесленко // Информационно-технический журнал ПиКАД. – 2006. – №1. – С. 42 – 53. 9. Режим доступа <http://multimera.deal.by/> 10. Режим доступа <http://www.tilkom.com/>

Bibliography (transliterated): 1. *Ranganath, R.* (2004). A force–torque sensor based on a Stewart Platform in a near-singular configuration. Mechanism and Machine Theory, 39, 9, 971–998. 2. *Whitehead, N.* (1997). Torque sensor employing a mechanical resonator. Sensors and Actuators A: Physical, 60, 29–31. 3. *Sultan, C., Skelton, E.* (2004). A force and torque tensegrity. Sensors and Actuators A: Physical, 112, 220–231. 4. *Hazelden, R. J.* (1993). Optical torque sensor for automotive steering systems. Mechanism and Machine Theory, 18, 193–197. 5. *Lemarquand, V., Lemarquand, G.* (1992). New structure of magnetic torque sensor. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 104, 1109–1110. 6. *Zabler, E., Dukart, A.* (1994). A non-contact strain-gage torque sensor for automotive servo-driven steering systems, Sensors and Actuators A: Physical, 41, 39–46. 7. *Nemec, I.* (1970). Practical application of strain gages. Moscow: Energy, 144. 8. *Teslenko, A.* (2006). What you should know about strain gages. Information Technology Journal PiCAD, 1, 42–53. 9. The access mode <http://multimera.deal.by/> 10. The access mode <http://www.tilkom.com/>

Надійшла (received) 08.10.2014

УДК 620.191.33

А. М. СИРОТЮК, канд. техн. наук, ст. наук. співр., Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів;

Р. А. БАРНА, канд. техн. наук, наук. співр., Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів;

Р. Л. ЛЕЩАК, канд. техн. наук, наук. співр., Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів;

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВОДНЮ В МЕТАЛІ НА ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ ТРУБОПРОВОДІВ ТЕС

Розглянуто випадок наявності техногенних органічних домішок у теплоносії парогенеруючих систем енергоблоків, що є потенційним джерелом наводнювання металу живильних трубопроводів.

© А. М. СИРОТЮК, Р. А. БАРНА, Р. Л. ЛЕЩАК 2014

Показано, що прискорений розвиток тріщиноподібних дефектів в металі трубопроводу із зростанням концентрації органічних домішок у робочому середовищі спричинений зростанням ступеня наводнюваності металу. Визначено розподіл локальної концентрації водню біля вершини корозійно-втомної тріщини. Встановлено взаємозв'язок між швидкістю росту тріщини та локальною концентрацією водню біля її вершини. Лл.: 12. Бібліогр.: 13. назв.

Ключові слова: трубопровідна сталь; водні робочі середовища; органічні домішки; циклічне навантаження; корозійно-втомні тріщини; коефіцієнт інтенсивності напружень; швидкість росту тріщини; локальна концентрація водню.

Вступ. Більшість енергетичних блоків закритичного тиску ТЕС України відпрацювали розрахунковий ресурс і вимушені експлуатуватися в складних умовах, що пов'язані з нестабільним графіком електричних навантажень, збільшенням тривалості простоїв блоків, використанням непроектного палива, застосуванням вихідної води з поверхневих джерел, забруднених викидами промислових підприємств, а також гострого дефіциту труб, металу, іонообмінних матеріалів тощо. У цих умовах забезпечення необхідного рівня надійності і продовження ресурсу роботи основного теплоенергетичного обладнання вимагає посиленої уваги до ряду загострених проблем. Найважливішою з них є корозійні та корозійно-механічні пошкодження металу різних елементів пароводяного тракту блоків ЗКТ, спричинені робочим середовищем.

Аналіз останніх досліджень та літератури. Актуальність та практична важливість даної роботи пов'язана з існуючою проблемою наявності техногенних органічних домішок у теплоносії парогенеруючих систем енергоблоків ТЕС [1, 5]. У живильних контурах енергоблоків циркулюють природні води, попередньо ретельно очищені з метою запобігання корозії шляхом підвищення омичної складової електрохімічного процесу та усунення домішок, що містять іоногени. Однак, у робочому середовищі залишається ряд органічних речовин, які є продуктами екологічного забруднення [1, 3, 5, 13]. У результаті забруднення експлуатаційного середовища утворюються корозійні та корозійно-механічні пошкодження на внутрішніх поверхнях обладнання. Досвід експлуатації електростанцій [1–3, 5, 13] свідчить, що такі пошкодження можуть становити значний відсоток від загальної кількості (близько 40 %) і спричинити появу тріщиноподібних дефектів, подальший розвиток яких призводить до руйнування конструкцій в цілому, або їх окремих елементів [12].

Мета роботи. Встановити взаємозв'язок між швидкістю росту втомної тріщини та локальною концентрацією водню біля її вершини.

Постановка проблеми. Досягнення поставленої мети вимагало вирішення наступних задач:

- дослідити вплив локальної концентрації водню в металі трубопроводів ТЕС на їх тріщиноутворення;
- визначити розподіл локальної концентрації водню у металі біля вершини корозійно-втомної тріщини, що розвивається, а також концентрації органічних домішок у робочому середовищі;
- встановити взаємозв'язок між локальною концентрацією водню у металі та ступенем забрудненості робочого середовища органічними домішками;

Об'єктом дослідження було руйнування трубопровідних сталей, що

реалізується шляхом зародження та подальшого розвитку тріщиноподібних дефектів від концентраторів напружень за дії корозивних середовищ з органічними домішками.

Предмет дослідження: локальна концентрація водню у металі трубопроводів ТЕС в умовах забруднення робочого середовища органічними домішками.

Методика експериментів. Досліджували метал живильного трубопроводу з ТЕС «Л» (труба 526 × 50 мм), який експлуатувався впродовж 145 тис. год.

Робочим середовищем для досліджень був теплоносій – вода високого ступеня очистки, згідно з нормами технічної експлуатації електростанцій (рН 7 ± 0,5; провідність 3 мСм/м). Використано також розчини, що містили домішки органічних сполук різного складу та концентрації.

Методологічною основою роботи є одночасне врахування механічних та електрохімічних чинників, що визначають процес руйнування трубопровідних сталей за дії корозивних та воденьвмісних середовищ:

- методами механіки руйнування визначались кінетичні діаграми росту тріщиноподібних дефектів залежно від умов випробувань досліджуваних сталей;
- методами мас-спектрального аналізу з лазерним мікрозондом вимірювали локальну концентрацію водню в околі вершини втомної тріщини.

Обговорення результатів

Визначення циклічної корозійної тріщиностійкості тривало експлуатованого металу живильних трубопроводів енергоблоків ТЕС за різної концентрації техногенних органічних домішок у теплоносії

Експерименти проведено на балкових зразках прямокутного поперечного перерізу (10 × 20 мм) з початковою крайовою тріщиною однакової довжини $a_0 \approx 4$ мм та за однакового початкового рівня навантаження, що характеризувався значенням розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK_0 (табл. 1). Температура середовища становила 25 °С, коефіцієнт асиметрії циклу навантаження – $R = 0$ за частоти $f = 1$ Гц.

Таблиця 1 – Умови випробування на циклічну корозійну тріщиностійкість балкових зразків із експлуатованого металу живильних трубопроводів за чистого згину

Середовище	f , Гц	R	a_0 , мм	ΔK_0 , МПа · $\sqrt{м}$
Номінальне (H_2O)	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

Одержані залежності швидкості росту корозійно-втомної тріщини da/dN в експлуатованому металі живильних трубопроводів від її довжини a (рис. 1) свідчать про відчутний вплив концентрації органічних домішок у теплоносії на прискорення росту тріщиноподібних дефектів.

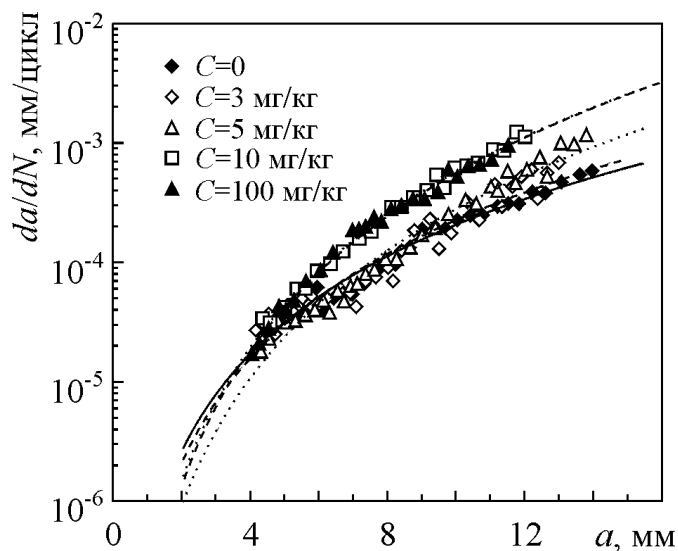


Рис. 1 – Залежність швидкості росту корозійно-втомної тріщини в експлуатованому металі живильних трубопроводів від її довжини за різної концентрації техногенних органічних домішок у робочому середовищі

На основі одержаних експериментальних даних було визначено наступні базові параметри циклічної корозійної тріщиностійкості експлуатованого металу живильних трубопроводів (табл. 2):

1. Константи n та C степеневі залежності Паріса [10, 11] $da/dN = C \cdot (\Delta K)^n$, що описує середньоамплітудну ділянку діаграми циклічної тріщиностійкості матеріалу.

Таблиця 2 – Параметри циклічної корозійної тріщиностійкості експлуатованого металу живильних трубопроводів за різної концентрації техногенних органічних домішок у робочому середовищі

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

2. Порогове значення КІН ΔK_{th} , нижче якого не відбувається розвитку корозійно-втомної тріщини [5, 6, 9].

3. Критичне значення КІН ΔK_{fc} , тобто циклічну в'язкість руйнування [5, 6, 9].

Аналіз одержаних результатів свідчить про наступне (рис. 2). В цілому, присутність техногенних органічних домішок змінює характеристики циклічної корозійної тріщиностійкості експлуатованого металу живильних трубопроводів, порівняно з випробуваннями в робочому середовищі номінального складу. Найбільш помітні зміни відбуваються в діапазоні $0 \leq C_{\text{НСООН}} \leq 10$ мг/кг. При

цьому, зростає крутизна діаграм, що відображається зростанням значення параметра n степеневі залежності Паріса (див. рис. 3), а також помітно знижується циклічна в'язкість руйнування ΔK_{fc} за незмінного рівня порогового значення КІН ΔK_{th} . Подальше збільшення концентрації органічних домішок, тобто при $C_{HCOOH} \geq 10$ мг/кг, практично не спричиняє впливу на характеристики циклічної корозійної тріщиностійкості досліджуваного металу.

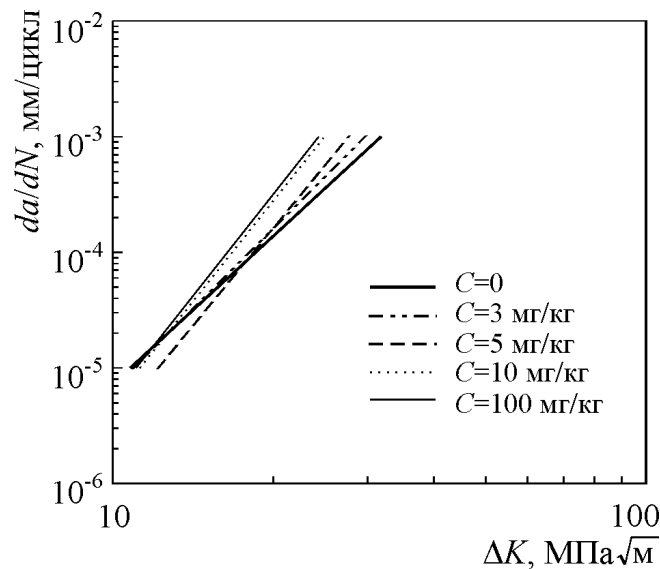


Рис. 2 – Діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості експлуатованого металу живильних трубопроводів за різної концентрації техногенних органічних домішок у робочому середовищі

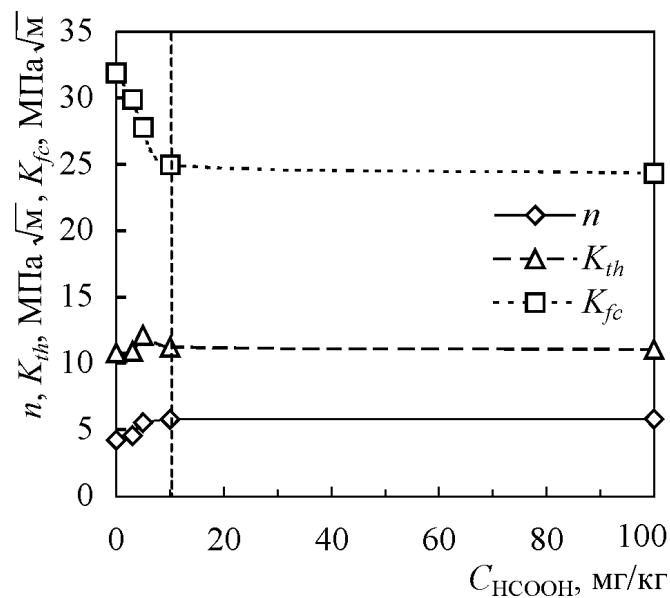


Рис. 3 – Залежність параметрів циклічної корозійної тріщиностійкості експлуатованого металу живильних трубопроводів від концентрації техногенних органічних домішок у робочому середовищі

Таким чином, концентрація техногенних органічних домішок у робочому середовищі в межах $C_{HCOOH} = 3...10$ мг/кг спричиняє найвідчутніше зниження

характеристик циклічної тріщиностійкості експлуатованого металу живильних трубопроводів. Цей факт повинен враховуватись при експертних оцінках роботоздатності та ризику руйнування експлуатованих живильних трубопроводів із тріщиноподібними дефектами.

Визначення локальної концентрації водню біля вершини корозійно-втомної тріщини у металі трубопроводу за наявності органічних домішок у теплоносії

Для таких досліджень був застосований оригінальний метод локальної мас-спектрометрії з лазерним мікрозондом [1, 4]. Цей метод аналізу полягає в локальному розплавленні за допомогою гостро сфокусованого променя твердотільного лазера обмеженої за розміром ділянки поверхні металу зразка (зазвичай це $\theta = 0$, КОД 5 мм), який розташовано у вакуумній камері з $P < 10^{-7}$ тор. Гази та газоутворюючі елементи, які розчинені або сорбовані в металі, після локального розплавлення твердого тіла екстрагуються з металевого розплаву в вакуум. У гомогенному металі розміри мікророзплаву відтворюються з похибкою $< 0,5\%$. У гетерогенних матеріалах на розмір розплаву певний вплив має структура та фазовий склад металу, тому в цих випадках проводиться нормування. Параметри джерела нагріву вибираються такими, щоб метал плавився, а не випаровувався. Джерело нагріву – лазер знаходиться ззовні, його промінь проходить до зразка через вакуумнощільне оптично прозоре скло. Об'єм камери аналізу 50 см^3 . У вакуумній камері знаходиться давач мас-спектрометру, який реєструє зміну парціального тиску даного газу. Якщо проградувати ці показники та знати точно об'єм мікророзплаву, то можна здійснювати кількісний аналіз [4] локальної концентрації водню та інших газів у гетерогенних металевих матеріалах, якими є сталі теплоенергетичного призначення.

У роботі використана установка ЭХО-4М, яка використовує лазер на ніодимовому склі, що працює в режимі хаотичної генерації, та мас-спектрометр. Об'єм мікророзплаву складає $(1,6...3,2) \cdot 10^{-19} \text{ м}^3$. Екстраговані з мікророзплаву металу до вакуумної камери аналізу газу та газоутворюючі елементи реєструються давачем квадрупольного мас-спектрометру. Решта металу зразка залишається холодною, оскільки тривалість імпульсного опромінення складає кілька наносекунд, ширина зони термічного впливу надзвичайно мала ($< 1\%$ площі опромінення), можлива термодесорбція металу цієї ділянки незначна й складає менше ніж $0,5\%$ від загальної кількості. Локальність вимірювань ($100...150 \text{ мкм}$) обмежена пороговою чутливістю мас-спектрометру до наявності даного газу та величиною того мікрооб'єму, який виділяється з металу під час аналізу. Чутливість приладу ЭХО-4М по водню складає $10^{-7}\%$ ($\sim 10^{-3}$ ppm), а по кисню – $10^{-6}\%$ при загальній сумарній похибці $\sim 8\%$, відтворюваність результатів практично повна.

Для проведення локальних вимірювань концентрації водню в металі були підготовлені спеціальні зразки (рис. 4а), які вирізались з балкових зразків після їх корозійно-втомних випробувань [5, 8]. Схему сканування поверхні лазерним мікрозондом наведено на рис. 4б.

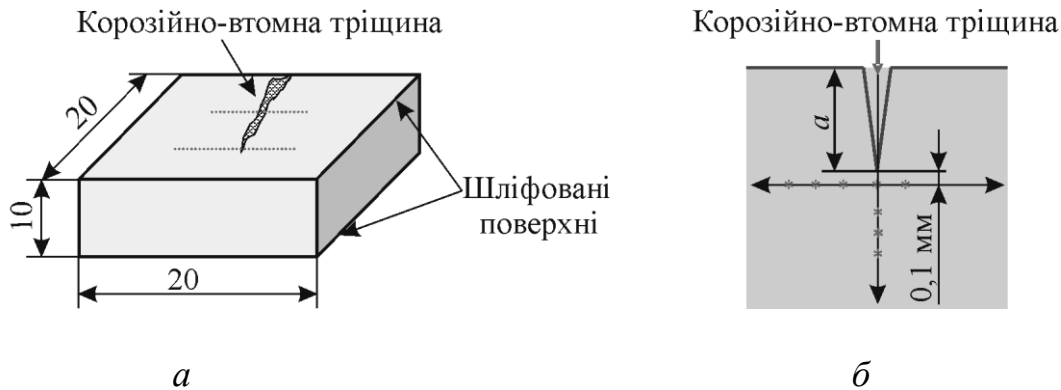


Рис. 4 – Зразок для визначення локальної концентрації водню: *a* – в околі корозійно-втомної тріщини; *б* – напрям сканування поверхні лазерним мікрозондом

Попередніми дослідженнями [1, 5, 7, 8] було показано принципову можливість реалізації механізму водневого окрихчення металу в околі тріщиноподібних дефектів у живильних трубопроводах за присутності в теплоносії органічних домішок.

Нижче наведені результати більш детальних досліджень зміни цього параметра за розвитку корозійно-втомної тріщини в металі. При досягненні тріщиною певної довжини *a*, корозійно-втомні випробування зупинялись і проводилось визначення локальної концентрації водню в околі її вершини. При цьому сканування проводилось починаючи з віддалі 0,1 мм від вершини тріщини, як в напрямку її поширення так і в напрямку перпендикулярному до поширення тріщини (рис. 4б).

Результати вимірювань показали, що для обох напрямків сканування значення концентрації водню в металі різко знижується з віддаленням від вершини тріщини (рис. 5–7) до деякої певної величини, що відповідає значенню концентрації водню в об’ємі металу за даних умов випробувань. Слід також зазначити, що локальна концентрація водню біля вершини тріщини є значно вищою за випробувань у середовищі з органічними домішками (рис. 6), порівняно з аналогічними випробуваннями в середовищі номінального складу (рис. 7).

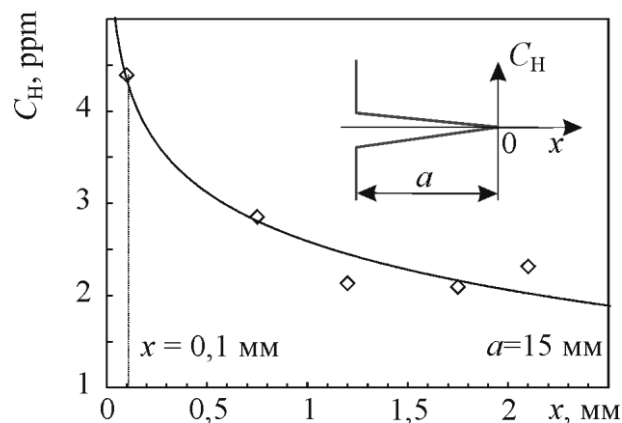


Рис. 5 – Зміна локальної концентрації водню біля вершини втомної тріщини довжиною *a* = 15 мм в сталі 16ГС у середовищі номінального складу (сканування в напрямку поширення тріщини починаючи з віддалі 0,1 мм від її вершини)

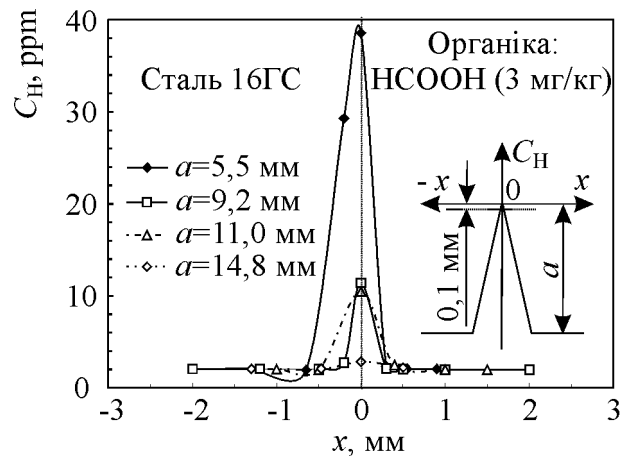


Рис. 6 – Зміна локальної концентрації водню біля вершини втомної тріщини різної довжини a в сталі 16ГС у середовищі з органічними домішками (сканування в напрямку перпендикулярному до поширення тріщини на віддалі 0,1 мм від її вершини)

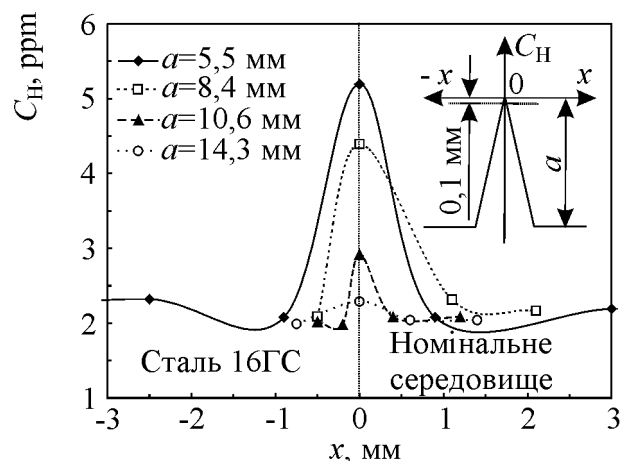


Рис. 7 – Зміна локальної концентрації водню біля вершини втомної тріщини різної довжини a в сталі 16ГС в середовищі номінального складу (сканування в напрямку перпендикулярному до поширення тріщини на віддалі 0,1 мм від її вершини)

Слід зазначити наступну важливу тенденцію – зі зростанням довжини тріщини, локальна концентрація водню в її вершині знижується, як за випробувань у середовищі з органічними домішками, так і за випробувань у середовищі номінального складу (рис. 8). Це пов'язано з відомими кінетичними особливостями розвитку втомної тріщини [5, 7, 8], що визначають умови локального наводнювання металу в околі її вершини. В даних умовах випробувань зі зростанням довжини тріщини зростала і швидкість її поширення, що призводить до зменшення часу наводнювання металу в околі зони передруйнування матеріалу.

У подальшому одержані чисельні дані про локальну концентрацію водню C_H біля вершини тріщини різної довжини було використано для встановлення взаємозв'язку цього параметру зі швидкістю росту втомної тріщини в металі трубопроводу da / dN та розмахом КІН ΔK за випробувань у середовищі номінального складу та з органічними домішками.

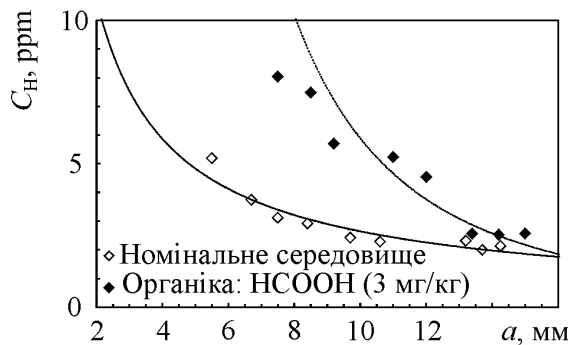


Рис. 8 – Залежність локальної концентрації водню біля вершини втомної тріщини (на віддалі 0,1 мм від її вершини) від її довжини в сталі 16ГС за випробувань у середовищі номінального складу та з органічними домішками

Встановлення взаємозв'язку між швидкістю росту втомної тріщини у металі трубопроводу та локальною концентрацією водню біля її вершини

Для оцінки ризику руйнування та виникнення аварійних ситуацій у парогенеруючих системах енергоблоків закритичного тиску ТЕС за присутності техногенних органічних домішок у теплоносії принципово важливим є встановлення механізму експлуатаційних пошкоджень металу.

Одержані при виконанні проекту результати вказують на принципову можливість реалізації механізму водневого окрихчення металу в околі тріщиноподібних дефектів у трубопроводах за присутності у теплоносії органічних домішок. Оскільки експериментально встановлено, що з однієї сторони присутність органічних домішок в робочому середовищі знижує опірність матеріалу до поширення корозійної тріщини, а з другої сторони, локальна концентрація водню біля вершини тріщини є значно вищою при випробуваннях в середовищі з органічними домішками.

На цій підставі був встановлений взаємозв'язок між швидкістю росту втомної тріщини в металі трубопроводу та локальною концентрацією водню біля її вершини. Це було зроблено на основі аналізу та обробки наступних груп експериментальних даних:

- залежностей між швидкістю росту втомної тріщини da/dN та розмахом КІН ΔK в її вершині (рис. 9);
- залежностей між локальною концентрацією водню біля вершини втомної тріщини C_H та розмахом КІН ΔK (рис. 10);

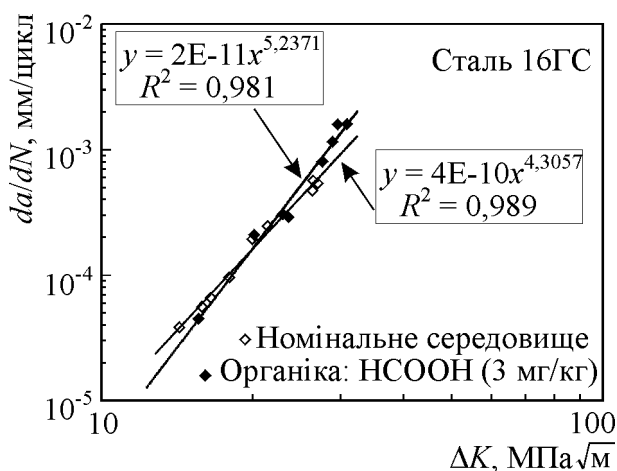


Рис. 9 – Залежність між швидкістю росту втомної тріщини в металі трубопроводу da/dN та розмахом КІН ΔK за випробувань у середовищі номінального складу та з органічними домішками.

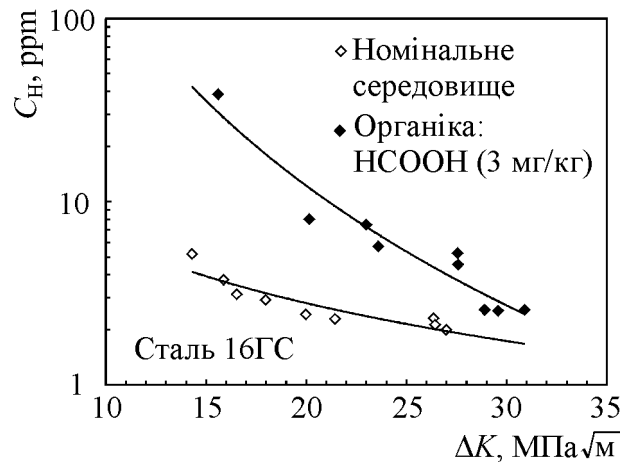


Рис. 10 – Залежність між локальною концентрацією водню біля вершини втомної тріщини C_H та розмахом КІН ΔK та за випробувань у середовищі номінального складу та з органічними домішками.

– залежностей між локальною концентрацією водню біля вершини втомної тріщини C_H та швидкістю її росту в металі трубопроводу da/dN (рис. 11).

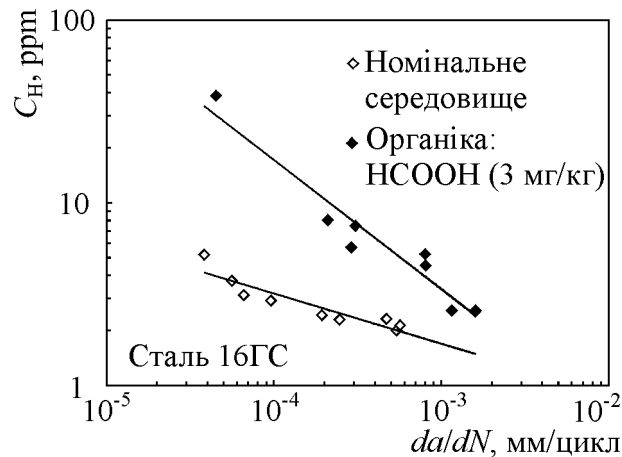


Рис. 11 – Залежність між локальною концентрацією водню біля вершини втомної тріщини C_H та швидкістю її росту в металі трубопроводу da/dN за випробувань у середовищі номінального складу та з органічними домішками

Підсумком цього є узагальнені діаграми, що пов'язують між собою, у подвійній логарифмічній системі координат, параметри $(da/dN)/C_H$ та ΔK (рис. 12). Такі діаграми вказують на існування лінійної залежності між розглядуваними параметрами. При цьому середньоквадратичне відхилення R^2 експериментальних даних від аналітичних кривих становить більше ніж 0,98.

На цій підставі взаємозв'язок між швидкістю росту втомної тріщини da/dN з однієї сторони та локальною концентрацією водню C_H^t і розмахом КІН ΔK у вершині тріщини, з другої сторони, може бути представлений у вигляді наступної степеневі залежності:

$$da/dN = A \cdot (C_H^t / C_H^0) \cdot (\Delta K)^m.$$

де m та A – константи системи „матеріал–середовище” і умов випробувань;
 C_H^0 – концентрація водню в об'ємі металу.

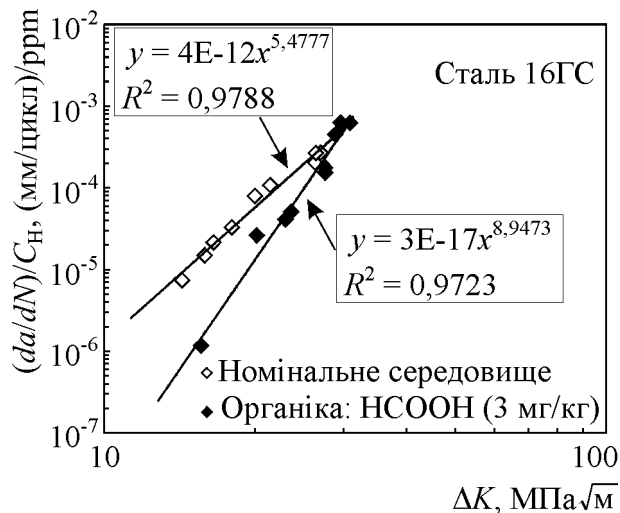


Рис. 12 – Взаємозв’язок між швидкістю росту втомної тріщини в металі трубопроводу da/dN , розмахом КІН ΔK та локальною концентрацією водню біля вершини тріщини C_N за випробувань у середовищі номінального складу та з органічними домішками.

Експериментально встановлено взаємозв’язок між швидкістю росту втомної тріщини та локальною концентрацією водню біля її вершини. Показано, що кожному значенню швидкості росту втомної тріщини відповідає своя критична комбінація локальної концентрації водню біля вершини тріщини та КІН, тобто da/dN пропорційна параметру $[C_N^t \cdot (\Delta K)^m]$.

Висновки. Визначено розподіл локальної концентрації водню у металі біля вершини корозійно-втомної тріщини, що розвивається, а також концентрації органічних домішок у робочому середовищі. Показано взаємозв’язок між цими параметрами, а саме, зростання локального наводнення металу зі зростанням ступеня забрудненості робочого середовища органічними домішками.

Встановлено взаємозв’язок між швидкістю росту втомної тріщини та локальною концентрацією водню біля її вершини. Показано, що кожному значенню швидкості росту втомної тріщини відповідає своя критична комбінація локальної концентрації водню та КІН.

Результати дослідження можуть бути використані для визначення допустимих розмірів тріщиноподібних дефектів у стінках живильних трубопроводів ТЕС залежно від їх форми та концентрації органічних домішок у робочому середовищі C_{HCOOH} .

Список літератури: 1. Вайнман, А. Б. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления [Текст] / А. Б. Вайнман, Р. П. Мелехов, О. Д. Смиян. – К.: Наукова думка, 1990. – 222 с. 2. Гладышев, Г. П. Влияние маневренных режимов на показатели качества воды и пара энергоблоков СКД [Текст] / Г. П. Гладышев, О. И. Мартынова, В. Е. Денисов // Электрические станции. – 1989. – № 3. – С. 15–18. 3. Графова, И. А. Глубокая очистка ионитов, используемых в процессах водоподготовки [Текст] / И. А. Графова, Л. А. Мельник, В. Д. Гребешок [и др.] // Химия и технология воды. – 1992. – № 3. – С. 185–199. 4. Лакомский, В. И. Некоторые особенности проведения локального масс-спектрального анализа методов содержание газовых примесей [Текст] / В. И. Лакомский, О. Д. Смиян // Методы определения газов в металлах и сплавах: науч.-техн. конф., 1971 г. – М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1971. – С. 115–124. 5. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст]: довідн. посіб. / За заг. ред.

В. В. Панасюка. Т. 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / *I. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман, М. Г. Стащук [та ін.]*: [за ред. І. М. Дмитраха]. – К.: ВД „Академперіодика”, 2005. – 378 с. **6.** *Dmytrakh, I. M.* Corrosion fatigue cracking and failure risk assessment of pipelines [Текст] / *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. **7.** *Dmytrakh, I. M.* On corrosion fatigue initiation from notches and the local corrosion fracture approaches [Текст] / *I. M. Dmytrakh* // *Notch Effects in Fatigue and Fracture: NATO Science Series*. – The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. – V. 11. – P. 331–346. **8.** *Dmytrakh, I. M.* Relationship between fatigue crack growth behaviour and local hydrogen concentration near crack tip in pipeline steel [Текст] / *I. M. Dmytrakh, O. D. Smiyan, A. M. Syrotyuk [at all]* // *International Journal of Fatigue*. – 2013. – V. 50. – P. 26–32. **9.** *Panasyuk, V. V.* Fatigue crack growth in corrosive environment [Текст] / *V. V. Panasyuk, L. V. Ratych, I. N. Dmytrakh* // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1984. – V. 7, Is. 1. – P. 1–11. **10.** *Paris, P.* A critical analysis of crack propagation laws [Текст] / *P. Paris, F. Erdogan* // *Journal of Basic Engineering*. – 1963. – V. 85, № 4. – P. 528–533. **11.** *Paris, P. C.* A rational analytic theory of fatigue [Текст] / *P. C. Paris, M. P. Gomez, W. E. Anderson* // *The Trend in Engineering*. – 1961. – V. 13, № 1. – P. 9–14. **12.** *Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines* [Текст]: NATO Science for Peace and Security Series. – The Netherlands: Springer, 2008. – 350 p. **13.** *Vainman, A. B.* On the Influence of the Media on the Metal of Steam-and-Water Systems of Supercritical-Pressure Power Units [Текст] / *A. B. Vainman, O. I. Martynova, and O. D. Smiyan* // *Materials Science*. – 1995. – V. 31, № 5. – P. 624–635.

Bibliography (transliterated): **1.** *Vainman, A. B., Melekhov, R. P., Smiyan, O. D.* (1990) Vodorodnoe okhrupchyvanie elementov kotlov vysokoho davleniya. Kyiv: Naukova dumka. **2.** *Hladyshev, H. P., Martynova, O. Y., Denysov, V. E.* (1989) Vlyyanye manevrennykh rezhymov na pokazately kachestva vody i para enerhoblokov SKD. *Elektrycheskiye stantsyy*, 3, 15–18. **3.** *Hrafova, Y. A., Melnyk, L. A., Hrebeshek V. D.* (1992) Hlubokaya ochystka yonytov, ispolzuemykh v protsessakh vodopodgotovky. *Khymyya y tekhnolohyya vody*, 3, 185–199. **4.** *Lakomskyy, V. Y., Smiyan, O. D.* (1971) Nekotorye osobennosti provedeniya lokalnoho mass-spektralnoho analiza metodov sodержanye hazovykh pryemesey. *Metody opredeleniyya hazov v metallakh i splavakh*, 115–124. **5.** *Fracture mechanics and strength of materials* (2005): Reference manual / Editor-in-Chief V. V. Panasyuk. V. 7: Reliability and durability of structural elements for heat-and-power engineering equipment. *Dmytrakh, I. M., Vainman, A. B., Stashchuk, M. H., [at all]*. Kyiv, PH „Academperiodyka”. **6.** *Dmytrakh, I. M.* (2008). Corrosion fatigue cracking and failure risk assessment of pipelines. *Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines: NATO Science for Peace and Security Series*, 99–113. **7.** *Dmytrakh, I. M.* (2001) On corrosion fatigue initiation from notches and the local corrosion fracture approaches. *Notch Effects in Fatigue and Fracture: NATO Science Series*, V. 11, 331–346. **8.** *Dmytrakh, I. M., Smiyan, O. D., Syrotyuk A. M. [at all]*. (2013) Relationship between fatigue crack growth behaviour and local hydrogen concentration near crack tip in pipeline steel. *International J. of Fatigue*, V. 50, 26–32. **9.** *Panasyuk, V. V., Ratych, L. V., Dmytrakh, I. N.* (1984) Fatigue crack growth in corrosive environment. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. V. 7, 1, 1–11. **10.** *Paris, P., Erdogan, F.* (1963) A critical analysis of crack propagation laws. *J. of Basic Engineering*, V. 85, 4, 528–533. **11.** *Paris, P. C., Gomez, M. P., Anderson W. E.* (1961) A rational analytic theory of fatigue. *The Trend in Engineering*. V. 13, 1, 9–14. **12.** *Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines* (2008): NATO Science for Peace and Security Series. **13.** *Vainman, A. B., Martynova, O. I., and Smiyan, O. D.* (1995) On the Influence of the Media on the Metal of Steam-and-Water Systems of Supercritical-Pressure Power Units. *Materials Science*, V. 31, 5, 624–635.

Надійшла (received) 08.10.2014