

УДК 620.197.5: 669.788

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ПОВЗУЧОСТІ, КОРОЗІЙНОГО РОЗТРІСКУВАННЯ І НАВОДНЮВАННЯ

О. В. ГЕМБАРА^{1,2}, О. Я. ЧЕПІЛЬ^{1,3}

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка";

³ Бидгощська політехніка, Польща

Числово проаналізовано напружено-деформований стан прямолінійної ділянки теплообмінних труб трьох типів парогенераторів, виготовлених із нержавної жароміцної хромонікелевої сталі аустенітного класу 08X18H10T, за умов, що моделюють експлуатаційні, з урахуванням наводнювання стінки та дії корозивного середовища. Спрогнозовано їх довговічність за різних режимів експлуатації.

Ключові слова: *повзучість, довговічність, наводнювання, корозивне середовище.*

A numerical analysis of the stress-strain state of a rectilinear section of heat exchange tubes of three types of steam generators made of stainless chromium-nickel austenitic steel 08X18H10T under conditions simulating operating conditions, taking into account the saturation of the wall with hydrogen and the action of a corrosive medium, was carried out. On this basis their durability was predicted under various operating conditions and geometric dimensions.

Keywords: *creep, durability, hydrogenation, corrosive environment.*

Вступ. Однією з найважливіших характеристик, що визначають надійну і безпечну роботу обладнання і трубопроводів у різних галузях промисловості, є довготривала міцність матеріалу. Випробуванням на тривалу корозійну міцність різних конструкційних сталей за впливу водню присвячено багато праць [1–10]. Тут можна виділити два різних підходи: дослідження циліндричних зразків за всебічного тиску водню і трубчастих під внутрішнім (одностороннім) його тиском. Обидва мають недоліки. За першого підходу для механічних випробовують однорічні зразки, тобто моделюють одновісний напружений стан, а далі, використовуючи відповідні гіпотези, переходять до визначення складного напруженого стану. За другого його моделюють вже під час випробування труб, але тоді за наводнювання тільки внутрішньої стінки труби зумовлює неоднорідність властивостей матеріалу по перерізу зразка (товщині його стінки). Тому тут формули опору матеріалів для розрахунку напружень неприйнятні.

Під час експлуатації парогенераторів (ПГ) атомних електростанцій (АЕС) із водо-водяним енергетичним реактором (ВВЕР) теплообмінні труби (ТОТ), з аустенітної нержавної жароміцної сталі [11, 12], руйнуються внаслідок корозійного розтріскування. Зокрема, виготовлені зі сталі типу 08X18H10T виготовляють різноманітні відповідальні елементи обладнання теплових і ядерних енергоустановок, стійкі до суцільної корозії, але схильні до корозійного розтріскування в хлоридовмісних середовищах. Раніше [13] виявили і проаналізували різні дефекти ТОТ. Пошкоджені ділянки вирізали з ПГ першого і другого енергоблоків Південноукраїнської АЕС. На всіх досліджених ділянках труб зафіксували зони, уражені

пітинговою корозією, які мають вид кратерів діаметром 0,3...1 і глибину 0,2...0,3 mm та є ймовірними місцями зародження дефекту. Враховуючи склад теплоносія та умови експлуатації ПГ, встановили, що воденьвмісне середовище – ще один важливий чинник, який знижує міцність матеріалів. Зокрема [14], за наводнення швидкість корозії стінки трубопроводу збільшується вдвічі.

Тому актуально і важливо побудувати математичні моделі та розробити на їх основі метод розрахунку довговічності елементів конструкцій за тривалої експлуатації з урахуванням впливу наводнення матеріалу та корозивного середовища.

Моделювання впливу хлоридовмісних водних робочих середовищ АЕС на ТОТ ПГ. Склад, температура та інші характеристики таких середовищ і розчинів хлориду магнію, використовуваних для експериментального вивчення корозійного розтріскування досліджуваних сталей, суттєво відрізняються. За результатами випробувань у розчинах хлориду магнію без додаткової експериментальної перевірки можна тільки наближено оцінити час розтріскування ТОТ у хлоридовмісних водних середовищах парогенераторів АЕС з ВВЕР [15]. Природно припустити, що концентрацію хлориду магнію в розчині для корозійно-механічних випробувань зразків можна підібрати так, щоб за однакового напруження час розтріскування в розчині хлориду магнію і в хлоридовмісному водному середовищі парогенераторів АЕС з ВВЕР був однаковий. Тоді відповідний розчин хлориду магнію можна вважати еквівалентом хлоридовмісного середовища ПГ і в ньому оцінювати розтріскування ТОТ, використовуючи відповідний параметр [15, 16].

Тому еквівалентом агресивного робочого середовища другого контуру, в якому експлуатуються теплообмінні труби ПГ, вважали розчини хлориду магнію. Розраховували для ТОТ парогенераторів ПГВ-1000 ($r_1 = 8,5$ mm; $r_2 = 8$ mm; $\alpha = r_1/r_2 = 0,8125$; рис. 1а, крива 1), ПГВ-4 ($r_1 = 6,6$ mm; $r_2 = 8$ mm; $\alpha = r_1/r_2 = 0,8250$; рис. 1а, крива 2) та ПГВ-1 ($r_1 = 9$ mm; $r_2 = 10,5$ mm; $\alpha = r_1/r_2 = 0,8571$; рис. 1а, крива 3) [11].

Для скінченно-елементного моделювання деформування елементів конструкцій в умовах повзучості, корозійного розтріскування і наводнення застосовували тривимірні порожнисті циліндри, розмір яких наближався до реальних розмірів ТОТ парогенераторів (рис. 1), навантажених різними внутрішніми тисками ($P = 10; 13; 16$ та 20 МПа) із урахуванням впливу розчину хлориду магнію (5 та 10%) та концентрації водню, яку визначали згідно зі законом Сівертса. Основні рівняння моделі для визначення напружено-деформованого стану елементів конструкцій за високотемпературної повзучості з урахуванням наводнення матеріалу і дії корозивного середовища подано у працях [17–19].

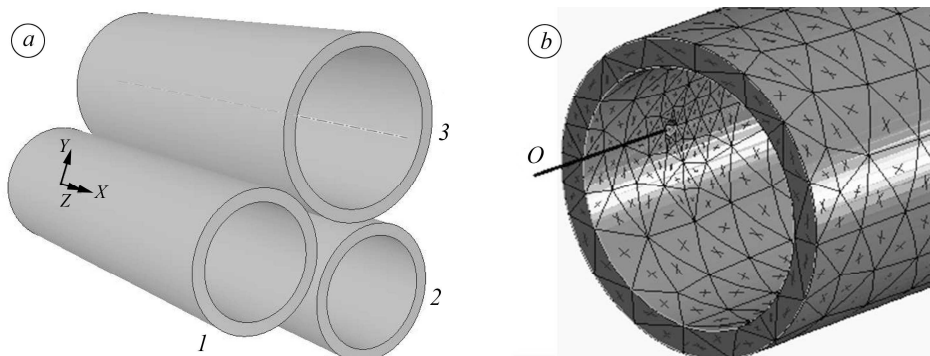


Рис. 1. Фрагменти (а) теплообмінних труб парогенераторів ПГВ-1000 (1), ПГВ-4 (2), ПГВ-1 (3) та розбиття на скінченні елементи труб ПГВ-1 (b).

Fig. 1. Fragments of heat exchange pipes ПГВ-1000 (1), ПГВ-4 (2), ПГВ-1 (3) (a) and division into finite elements of exchange pipes ПГВ-1 (b).

Для моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) використали програмний пакет ANSYS 2019R1 та власні модулі, розроблені на мові Fortran. Фрагменти труб розбивали на 12027 елементів тетраїдоподібної форми зі згущенням сітки в околі концентратора напружень (точка O на рис. 1b), який моделює корозійний пітинг (півсферичний дефект труби $\varnothing 1$ mm), де енергія пружно-пластичного деформування максимальна (рис. 2).

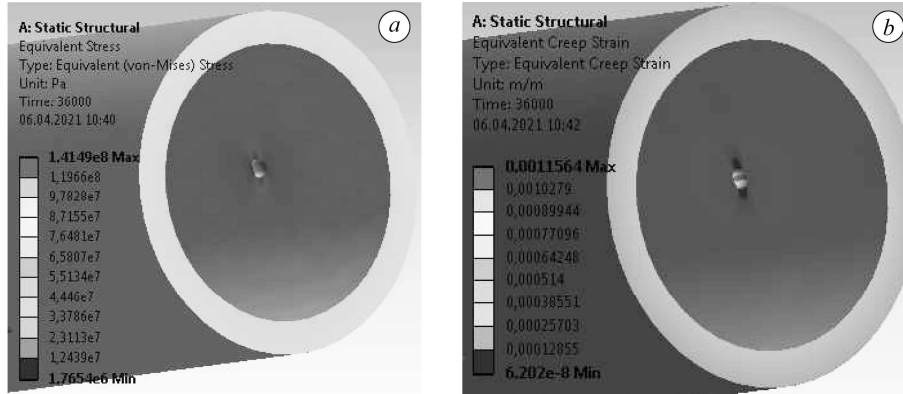


Рис. 2. Розподіл еквівалентних напружень (a) та деформацій повзучості (b) в околі концентратора напружень теплообмінних труб парогенератора ПГВ-1000.

Fig. 2. Distribution of equivalent stresses (a) and creep strains (b) in the vicinity of the stress concentrator of exchange pipes ПГВ-1000.

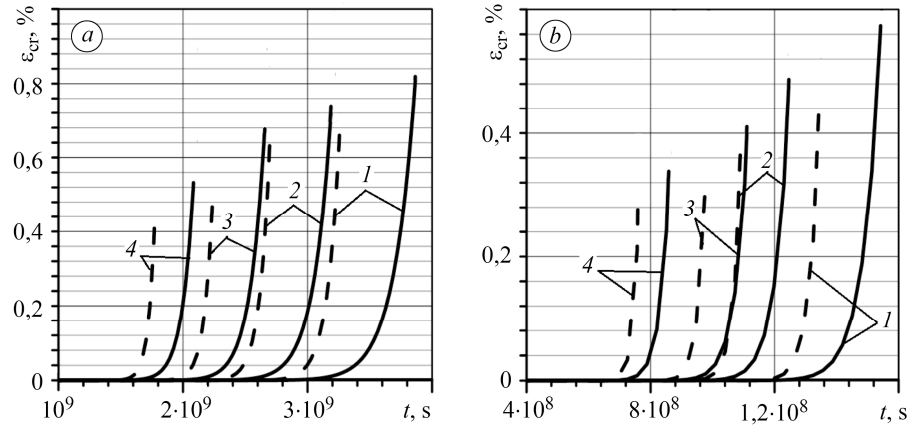


Рис. 3. Зміна деформацій повзучості з часом біля корозійної виразки (точка O , на рис. 1b) без (суцільні лінії) та з урахуванням дії водень-вмісного середовища (штрихові) для внутрішніх тисків: 10 (1); 13 (2); 16 (3) та 20 МПа (4);
 a – без впливу корозивного чинника;
 b, c – в 5%- та 10%-их розчинах $MgCl_2$.

Fig. 3. Change of the creep deformation with time in the vicinity of a corrosion pit (point O , Fig. 1b) without (solid lines) and with the hydrogen-containing medium (dashed line) for the internal pressures of 10 MPa (1); 13 (2); 16 (3) and 20 MPa (4); a – without the influence corrosive factor; b, c – in a 5% - and 10% of $MgCl_2$ solutions.

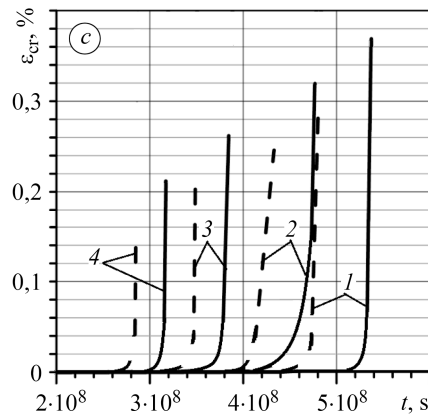


Рис. 3 ілюструє зміну деформацій повзучості з часом в околі корозійної виразки (точка *O*, на рис. 1*b*) без (суцільні лінії) та з урахуванням наводнювання (штрихові) за різних внутрішніх тисків та концентрацій хлориду магнію в розчині.

Подано (див. таблицю) розрахункові максимальні значення деформації повзучості в ТОТ парогенератора ПГВ-4 і проілюстровано вплив на них корозивного середовища та робочого тиску.

Деформації повзучості теплообмінних труб у повітрі та розчині хлориду магнію за різних тисків з (чисельник) та без урахування наводнення матеріалу (знаменник)

Корозивне середовище	<i>P</i> , МПа			
	10	13	16	20
Відсутнє	0,69 / 0,81	0,63 / 0,72	0,48 / 0,62	0,41 / 0,53
5% MgCl ₂	0,47 / 0,57	0,38 / 0,49	0,32 / 0,44	0,29 / 0,36
10% MgCl ₂	0,280,37	0,25 / 0,32	0,20 / 0,26	0,14 / 0,22

Примітка: у чисельнику дані з урахуванням наводнювання.

Як бачимо, за дії воденьвмісного середовища деформації повзучості зменшуються на 15%, за сумісного його впливу 5- та 10%-их розчинів хлориду магнію – на 42 та 65% відповідно.

ВИСНОВКИ

Числово проаналізовано напружено-деформований стан прямолінійної ділянки теплообмінних труб трьох типів парогенераторів, виготовлених із нержавної жароміцної хромонікелевої сталі аустенітного класу 08X18H10T, за умов, що моделюють експлуатаційні, з урахуванням наводнювання стінки та дії корозивного середовища. Спрогнозовано їх довговічність за різних режимів експлуатації та геометричних розмірів. Зокрема, встановлено, що наводнювання сталі зменшує ресурс труб парогенератора ПГВ-4 на 15...16% для всіх досліджуваних значень тисків робочого середовища, а за сумісного впливу водню, 5- та 10%-их розчинів хлориду магнію – відповідно на 60...66 і 85...89%.

Acknowledgement. This work was supported by the National Research Foundation of Ukraine (Project Number: 2020.02/0049).

1. *Experimental and computed stress distribution ahead of a notch in a pressure vessel: Application of T-stress conception / H. Moustabchir, Z. Azari, S. Hariri, and I. Dmytrakh // Comput. Mat. Sci. – 2012. – 58. – P. 59–66.*
2. *Syrotyuk A. M., Dmytrakh I. M. Methods for the evaluation of fracture and strength of pipeline steels and structures under the action of working media. Part 2. Influence of hydrogen-containing media // Materials Science. – 2015. – 50, № 4. – P. 475–487.*
(*Сиротюк А. М., Дмитрах І. М. Методи оцінювання руйнування та міцності трубопровідних сталей і конструкцій за дії робочих середовищ. Ч. II. Вплив водневовмісних середовищ // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 4. – С. 7–17.*)
3. *Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.*
4. *Quantitative analysis of structural changes in steel caused by high-temperature holding in hydrogen / O. Z. Student, B. P. Rusyn, B. V. Kysil, M. I. Kobasyar, T. P. Stakhiv, and A. D. Markov // Materials Science. – 2003. – 39, № 1. – P. 17–24.*
(*Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні / О. З. Студент, Б. П. Русин, Б. В. Кисіль, М. І. Кобасяр, Т. П. Стахів, А. Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – 39, № 1. – С. 22–28.*)
5. *Stashchuk M. and Dorosh M. Analytical evaluation of hydrogen induced stress in metal. Hydrogen Energy. – 2017. – 42, № 9. – P. 6394–6400.*
6. *Pietkun-Greber I. and Janka R. M. The influence of hydrogen on the electrochemical properties of selected types of stainless steel // DOI: 10.2478/cdem-2013-0025 CHEM DIDACT ECOL METROL. 2013;18(1-2):121-128.*
7. *Kryzhaniv's'kyi E. I., Tsyryl'nyk O. T., and Petryna D. Yu. Effect of hydrogenation and plastic pre-deformation of steel on its crack resistance // Materials Science. – 1999. – 35, № 5. – P. 674–677.*

- (Крижанівський Є. І., Цирульник О. Т., Петрина Д. Ю. Вплив наводнювання та попереднього пластичного деформування сталі на її тріщиностійкість // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – **35**, № 5. – С. 67–70.)
8. Petrov L. N., Kalinkov A. Yu., and Magdenko A. N. Action of deformation and hydrogen impregnation on the corrosion of type 12XН steel in a galvanic pair // Soviet Materials Science. – 1986. – **22**, № 3. – P. 252–255.
(Петров Л. Н., Калинин А. Ю., Магденко А. Н. Воздействие деформации и наводороживания на коррозию стали типа 12ХН в гальванопаре // Физ.-хим. механика материалов. – 1986. – **22**, № 3. – С. 34–37.)
 9. Petrov L. N., Soprunyuk N. G., and Babei Yu. I. Effects of electrolytic hydrogenation on the electrochemical parameters of deformed steel // Soviet Materials Science. – 1973. – **9**, № 3. – P. 251–253.
(Петров Л. Н., Сопрунюк Н. Г., Бабей Ю. И. О влиянии электролитического наводороживания на электрохимические свойства деформированной стали // Физ.-хим. механика материалов. – 1973. – **9**, № 3. – С. 11–14.)
 10. Zakharchuk V. H., Tsyruľnyk O. T., and Nykyforchyn H. M. Electrochemical properties of steels in a model hydrogen galvanic couple // Materials Science. – 2005. – **41**, № 2. – P. 223–229.
(Захарчук В. Г., Цирульник О. Т., Никифорчин Г. М. Електрохімічні властивості сталей модельної водневої гальванопари // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – **41**, № 2. – С. 76–82.)
 11. Morachkovskii O. K. and Romashov Yu. V. Continual model of propagation of corrosion cracks for the evaluation of the service life of structures // Materials Science. – 2010. – **46**, № 2. – P. 254–259.
(Морачковский О. К., Ромашов Ю. В. Континуальная модель роста трещин коррозионного растрескивания для расчета ресурса конструкций // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 2. – С. 111–116.)
 12. Morachkovskii O. K. and Romashov Y. V. Edge fixing effect on the life of a vacuum chamber thin spherical cover subjected to creep damage // Strength of Mat. – 2011. – **43**, № 3. – P. 294–301.
 13. Коррозионные повреждения теплообменных труб парогенераторов Южно-украинской АЭС / И. М. Неклюдов, Л. С. Ожигов, А. С. Митрофанов, С. В. Гоженко, В. М. Пышный, Н. А. Феофентов, А. В. Бажуков, П. Е. Мельник // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2003. – № 6. – С. 71–76.
 14. Song W. G., Hembara O. V., and Sapuzhak Y. I. Mathematical modeling of the influence of hydrogen on the corrosion activity of metal structures // Materials Science. – 2020. – **56**, № 1. – P. 66–74.
(Song Wen-Guang, Гембара О. В., Сажужак Я. И. Математичне моделювання впливу водню на корозійну активність металоконструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2020. – **56**, № 1. – С. 68–75.)
 15. Богоявленский В. Л. Коррозия сталей на АЭС с водным теплоносителем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 167 с.
 16. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюрев В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970. – 424 с.
 17. The energy approach to the evaluation of hydrogen effect on the damage accumulation / Ya. Ivanytskyi, Ye. Kharchenko, O. Hembara, O. Chepil, Ya. Sapuzhak, and N. Hembara // Procedia Structural Integrity. – 2019. – **16**. – P. 126–133.
 18. Jiang Q., Hembara O. V., and Chepil' O. Y. Modeling of the influence of hydrogen on the accumulation of defects in steels under high-temperature creep // Materials Science. – 2019. – **55**, № 2. – P. 245–253.
(Jiang Qionqin, Гембара О. В., Чепиль О. Я. Моделювання впливу водню на нагромадження пошкоджень у сталях за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – **55**, № 2. – С. 104–111.)
 19. Shu C., Hembara O. V., and Chepil O. Y. Calculation of the lifetime of heat and power equipment under long-term static loading, high temperature, and the action of hydrogen // Materials Science. – 2018. – **54**, № 1. – P. 107–114.
(Chang Shu, Гембара О. В., Чепиль О. Я. Розрахунок ресурсу теплоенергетичного обладнання за довготривалого статичного навантаження, високої температури та дії водню // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 1. – С. 105–111.)

Одержано 14.04.2021