

УДК 620.197.5:669.788

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ НАВОДНЮВАННЯ МЕТАЛУ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ТЕПЛООБМІННИХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ

О. В. ГЕМБАРА^{1,2}, О. Я. ЧЕПІЛЬ^{1,3}, Н. Т. ГЕМБАРА¹, А. М. СИРОТЮК¹

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

² Національний університет "Львівська політехніка";

³ Бидгоська політехніка, Польща

Числово проаналізовано напружено-деформований стан гину теплообмінних труб парогенераторів, виготовлених із нержавної жароміцної хромонікелевої сталі аустенітного класу 08X18H10T, за умов, що моделюють експлуатаційні, з урахуванням наводнювання металу труби. Встановлено, що через попереднє деформування металу в гині довговічність труби зменшується на 19% порівняно з прямолінійною ділянкою, а за впливу водневмісного середовища – ще додатково на 12%.

Ключові слова: наводнювання металу, повзучість, енергія деформування, пошкодження, довговічність, водневмісне середовище.

The stress-strain state of bending of heat-exchange tubes of steam generators made of stainless heat-resistant chromium-nickel 08X18H10T steel is analyzed numerically under simulating operating conditions, taking into account the saturation of the tube metal with hydrogen. It has been established that the preliminary deformation of the metal in the heat exchange tube bend reduces the pipe durability by 19% compared to the straight section; when exposed to a hydrogen-containing medium, under the influence of hydrogen-containing environment the durability in the pipe bend decreases by an additional 12%.

Keywords: hydrogenation of metal, creep, deformation energy, damage, durability, hydrogen-containing medium.

Вступ. Сьогодні однією з основних проблем, що обмежують ресурс парогенераторів (ПГ) АЕС, є дефектність теплообмінних трубок (ТОТ) на українських АЕС [1, 2]. Це стосується також і ПГ західних АЕС типу PWR. Механізми пошкодження ТОТ детально описані у документі ІАЕА [3]. Метал пароперегрівачів парових котлів експлуатується у найважчих умовах повзучості та впливу агресивних середовищ. Для виготовлення ТОТ використовують хромонікелеві нержавні сталі аустенітного класу, що мають високу загальну корозійну тривкість, але схильні до корозійного розтріскування (КР) – утворення тріщин за спільної дії розтягальних напружень та агресивних середовищ [4]. Інформація про показники довговічності таких елементів конструкцій обмежена [5–9]. Окрім цього, специфічна тривала експлуатація трубопроводів сприяє наводнюванню сталей [10–15], оскільки водень утворюється на поверхні металу як катодний складник відповідних електрохімічних реакцій. Раніше [16] кількісно оцінено вплив наводнювання металу на швидкість корозії теплообмінного обладнання. зокрема, виявлено, що корозія стінки трубопроводу пришвидшується більш ніж удвічі. Числово проаналізовано також [17] напружено-деформований стан (НДС) прямолінійної ділянки ТОТ трьох типів ПГ, виготовлених із нержавної жароміцної хромонікелевої сталі аустенітного класу 08X18H10T, за умов, що моделюють експлуатаційні, з урахуванням наводнювання стінки та дії корозивного середовища.

Контактна особа: О. Я. ЧЕПІЛЬ, e-mail: oljach0409@gmail.com

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 розглянутих значень тисків робочого середовища, а за сумісного впливу водню та 5- і 10%-их розчинів хлориду магнію – відповідно, на 60...66 і 85...89%.

Крім прямолінійних ділянок, ТОТ містять багато гинів, які перебувають у стані попередньої неоднорідної деформації. Через потенційний синергізм впливу наводнювання та неоднорідного НДС підвищується ризик виникнення непрогнозованих пошкоджень та руйнувань упродовж їх тривалі експлуатації, що може спричинити аварійні ситуації з непередбачуваними техніко-економічними та соціальними наслідками.

Тому мета дослідження – оцінити вплив наводнювання металу на довговічність гинів ТОТ.

Формулювання задачі. Вивчали елемент конструкції, який тривало перебував під дією механічного навантаження та водневмісного середовища, внаслідок чого метал наводнюється. Необхідно встановити час до його руйнування. Для цього, як і раніше [18], використали концепцію нагромадження пошкоджень у матеріалі об'єкта. Вважали, що воно безперервне і є результатом сукупного впливу декількох експлуатаційних чинників. Отже, для опису матеріалу у будь-який момент часу можна використати критерій його пошкодження і оцінити залишковий ресурс обладнання. За такий критерій приймали енергетичний, згідно з яким мірою енергетичного пошкодження ω вважають відношення енергії пружно-пластичного деформування W локального об'єму до її критичного значення у водні W_{CH} [18]:

$$\omega = W(x, y, z, t) / W_{CH}, \quad \omega(t = 0) = 0, \quad \omega(t = t_*) = 1, \quad (1)$$

де t_* – час до руйнування, який і визначає довговічність елемента конструкції.

Поточне значення енергії деформування розраховують через еквівалентні напруження та швидкість деформацій повзучості:

$$W(x, y, z, t) = \int_0^t \sigma_{eq}(x, y, z, \tau) \dot{\epsilon}_{ij}^{cr}(x, y, z, \tau) d\tau, \quad (2)$$

де σ_{eq} – еквівалентні напруження; $\dot{\epsilon}_{ij}^{cr}$ – швидкість деформацій повзучості локального об'єму елемента, яка залежить від механічних навантажень, температурного поля і концентрації водню

$$\frac{d\epsilon_{ij}^{cr}}{dt} = \frac{3}{2} A \left(\frac{\sigma_{eq}}{1 - \omega} \right)^n \frac{S_{ij}}{\sigma_{eq}} t^m f \left(\frac{C}{C_0}, t \right), \quad (3)$$

де n, m, A – константи, які характеризують тривкість сталі до КР за заданої температури. Значення W_{CH} визначали експериментально [14].

Вплив водневмісного середовища враховано у функції $f(T, C_H, t)$ [18]:

$$f_i(C / C_0, t) = 1 + \alpha_H C(t) / C_0, \quad (4)$$

де C – концентрація водню в металі, а параметр α_H описує його вплив на швидкість деформацій повзучості.

Кінетику проникнення водню в матеріал конструкції описували рівнянням дифузії виду [19]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \vec{\nabla} (D \vec{\nabla} C) - \vec{\nabla} \left(\frac{D V_H C}{RT} \vec{\nabla} \sigma_h \right), \quad (5)$$

де $C = C(x, y, z, t)$; $\vec{\nabla} = (\partial / \partial x, \partial / \partial y, \partial / \partial z)$ – оператор Гамільтона; D – коефіцієнт дифузії; R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура; V_H – парціаль-

ний молярний об'єм водню в металі; σ_h – гідростатична компонента тензора напружень у металі: $\sigma_h = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$; t – час. Крайові та початкові умови приймали згідно з режимами наводнювання.

Кількісна оцінка впливу наводнювання металу на довговічність гину ТОТ горизонтальних ПГ АЕС. Парогенератори – це теплообмінники, що взаємодіють з первинним та вторинним потоками, відіграючи важливу роль захисних бар'єрів.

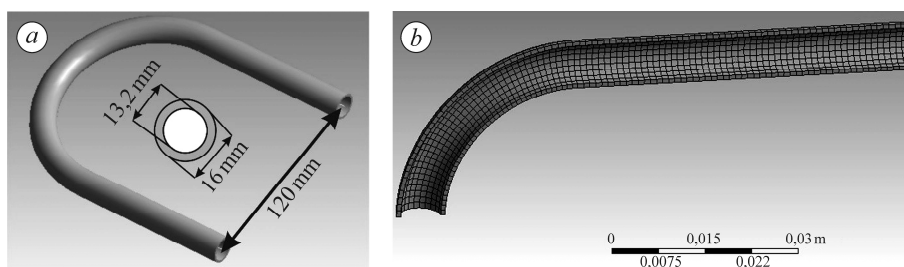


Рис. 1. Фрагмент теплообмінної труби з гином (а) та її розбиття на скінченні елементи (b).

Fig. 1. Fragment of a heat exchange pipe with a bend (a) and its division into finite elements (b).

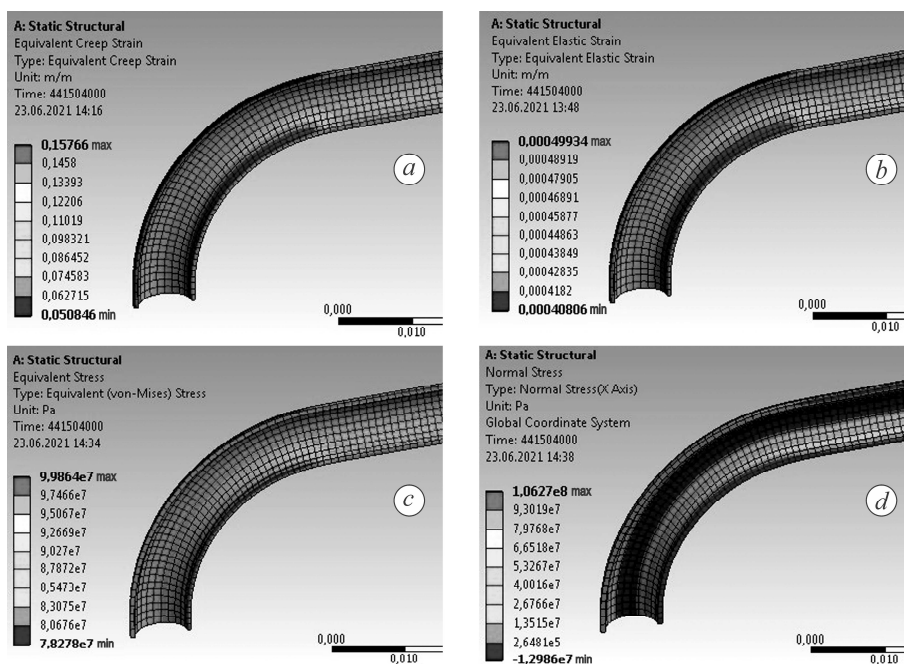


Рис. 2. Розподіл деформацій повзучості (а) та еквівалентних (b), а також еквівалентних (c) та гідростатичних напружень (d).

Fig. 2. Distribution of creep (a), equivalent (b) strains, and also equivalent (c) and hydrostatic stresses (d).

Кожен ПГ містить від 3300 до 5600 трубок із різними радіусами гинів, відповідно до його типу. Первинний потік надходить з активної зони ядерного реактора і циркулює всередині трубок. У цьому потоці підтримують тиск 15,5 МПа і температуру 650°C. Вторинний потік циркулює поза трубками і закипає, контактуючи з трубами для утворення пари. Внаслідок цього відбуваються хімічні реакції, у результаті яких метал наводнюється. Тому важливо визначити вплив наводнювання металу на довговічність гину ТОТ горизонтальних ПГ АЕС.

Використовували спрощену модель умов експлуатації ТОТ. Температура металу труб відповідала 650°C, за робоче середовище приймали теплоносій за тиску 15,5 МПа. Вважали, що внаслідок хімічних реакцій відбулося наводнювання металу труб до концентрації водню, яка відповідає експлуатаційним значенням тиску і температури. Необхідно визначити час розтріскування ТОТ парогенератора ПГВ-4. Досліджували ТОТ зі сталі 08X18H10T із мінімальним радіусом гину трубки в ПГ, який становить 60 mm, та радіусами поперечного перерізу $r_1 = 6,6$ mm і $r_2 = 8$ mm (рис. 1).

Задачу розв'язували методом скінченних елементів. Для цього розробили відповідний алгоритм та модифікували програму, яка дає можливість під час розрахунків враховувати наводнювання металу. Під час проектування моделі трубку з гином розбили на 4158 елементів паралелепіпедоподібної форми. Вважали, що наводнювання відбувається зі середини трубки ПГ за однакової початкової концентрації по всьому внутрішньому периметру. В результаті отримали розподіл деформацій повзучості (рис. 2a) та еквівалентних (рис. 2b), а також еквівалентних (рис. 2c) та гідростатичних (рис. 2d) напружень.

Обчислили енергію деформування в певні моменти часу, визначили параметр пошкодження і встановили час до руйнування труб на прямолінійній ділянці – 68 років (100%); в околі гину – 55 років (81%); в околі гину з урахуванням наводнювання – 46 років (68%) (рис. 3) [17].

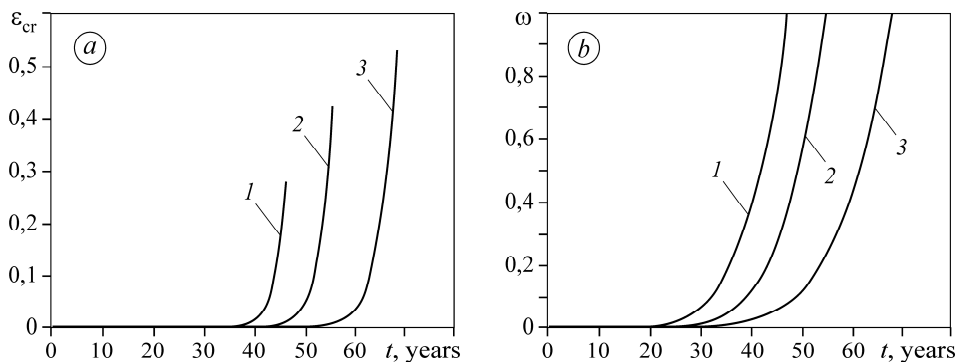


Рис. 3. Залежність деформацій повзучості та накопичення пошкодження від часу експлуатації в ТОТ ПГ: 1 – у прямолінійній ділянці [17]; 2, 3 – в околі гину з урахуванням і без наводнювання.

Fig. 3. Dependence of creep strains and damage accumulation on the operating time in the heat exchange tube of the steam generator: 1 – in a straight section [17]; 2, 3 – in the vicinity of the bend, taking into account saturation with hydrogen.

Виявили, що попереднє неоднорідне деформування металу (гин ТОТ) зменшує довговічність труби на 19% порівняно з прямолінійною ділянкою, а за впливу водневмісного середовища – ще додатково на 12%.

ВИСНОВКИ

Розраховано НДС гину ТОТ ПГ АЕС, виготовленого із нержавної хромонікелевої сталі аустенітного класу 08X18H10T. За енергетичним підходом визначено довговічність гину з урахуванням і без наводнювання. Встановлено, що наводнювання скорочує довговічність прямолінійних ділянок ТОТ до 12%.

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

1. Заразовский М. Н., Бородий М. В., Козлов В. Я. Риск-ориентированный подход к прогнозированию целостности и оптимизации контроля теплообменного оборудования с большой статистикой дефектов // Ядерная та радіаційна безпека. – 2016. – 4 (72). – С. 32–38. DOI:org/10.32918/nrs.2016.4(72).05
2. Steam Generator Tube Integrity Program: Annual Report: October 1997 – September 1998.

- Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1999. – 110 p. – (NUREG/CR-6511, Vol. 6, ANL-99/8).
3. *IAEA-TECDOC-1668. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators.* – Vienna: IAEA, 2011. – 274 p.
 4. *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.
 5. *Ромашов Ю. В. Оценка показателей долговечности теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР на основе континуальной модели коррозионного растрескивания. // Ядерна та радіаційна безпека.* – 2012. – **55**, № 3. – Р. 16–20.
 6. *Програмне забезпечення для управління безпечною експлуатацією парогенераторів АЕС / В. Заславський, Р. Єрмоленко, Н. Сахно, І. Каденко // Комп'ютерні засоби, мережі та системи.* – 2009. – № 8. – Р. 18–27.
 7. *Pietkun-Greber I. Comparison of resistance to damage of unalloyed carbon steels under the influence of hydrogen // MATEC Web of Conf. (3rd Sci. Conf. Environmental Challenges in Civil Eng., ECCE 2018).* – 2018. – **174**. – Article number 01015. DOI:10.1051/mateconf/201817401015.
 8. *Liu Y. and Murakami S. Damage localization of conventional creep damage models and proposition of a new model for creep damage analysis // JSME Int. J., Ser. A: Solid Mechanics and Mat. Eng.* – 1998. – **41**, № 1. – P. 57–65. DOI:10.1299/jsmea.41.57
 9. *Creep crack growth behavior analysis of the 9Cr-1Mo steel by a modified creep-damage model / Y.-C. Zhang, W. Jiang, S.-T. Tu, X.-C. Zhang, and Y.-J. Ye // Mat. Sci. and Eng.: Ser. A.* – 2017. – **708**. – P. 113–120. DOI:10.1016/j.msea.2017.09.112
 10. *A combined fugacity and multi-axial ductility damage approach in predicting high temperature hydrogen attack in a reactor inlet nozzle / S. Z. Chavoshi, L. T. Hill, K. E. Bagnoli, R. L. Holloman, and K. M. Nikbin // Eng. Failure Analysis.* – 2020. – **117**. – Article number 104948. DOI:10.1016/j.engfailanal.2020.104948
 11. *Effect of cyclic plastic deformation on hydrogen diffusion behavior and embrittlement susceptibility of reeling-pipeline steel weldments / Y. Jiang, C. Li, D. Wang, and X. Di // Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2021. – **46**, № 58. – P. 30158–30172. DOI:10.1016/j.ijhydene.2021.06.135
 12. *Hydrogen induced cold cracking of creep resistant ferritic P91 steel for different diffusible hydrogen levels in deposited metal / C. Pandey, N. Saini, M. M. Mahapatra, and P. Kumar // Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2016. – **41**, № 39. – P. 17695–17712. DOI:10.1016/j.ijhydene.2016.07.202
 13. *Toribio J., Vergara D., and Lorenzo M. Hydrogen embrittlement of the pressure vessel structural materials in a WWER-440 nuclear power plant // Energy Procedia.* – 2017. – **131**. P. 379–385. DOI:10.1016/j.egypro.2017.09.464
 14. *Stashchuk M. and Dorosh M. Analytical evaluation of hydrogen induced stress in metal // Hydrogen Energy.* – 2017. – **42**, № 9. – P. 6394–6400. DOI:10.1016/j.ijhydene.2017.01.022
 15. *Pietkun-Greber I. and Janka R. M. The influence of hydrogen on the electrochemical properties of selected types of stainless steel // Chemistry–Didactics–Ecology–Metrology.* – 2014. – **18**, № 1–2. – P. 121–128. DOI:org/10.2478/cdem-2013-0025
 16. *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. DOI:10.1007/s11003-020-00398-x
 17. *Гембара О. В., Чепіль О. Я. Моделювання деформації елементів конструкцій в умовах повзучості, корозійного розтріскування і наводнювання // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2021. – **57**, № 4. – С. 111–115.
 18. *The energy approach to the evaluation of hydrogen effect on the damage accumulation / Ya. Ivanyskyi, Ye. Kharchenko, O. Hembara, O. Chepil, Ya. Sapuzhak, and N. Hembara // Proc. Struct. Integrity.* – 2019. – **16**. – P. 126–133. DOI:10.1016/j.prostr.2019.07.031
 19. *Evaluation of the concentration of hydrogen in the process zone near the crack tip / Ya. L. Ivanyskyi, O. V. Hembara, O. D. Smiyan, and M. Kowalik // Materials Science.* – 2011. – **46**, № 6. – P. 769–774. DOI:10.1007/s11003-011-9351-3

Одержано 10.01.2022