

УДК 539.3

ОЦІНЮВАННЯ ЙМОВІРНОСТІ РУЙНУВАННЯ КОЛЕКТОРА ПАРОПЕРЕГРІВНИКА ТЕС

О. П. ЯСНІЙ, А. Р. СОБЧАК, В. П. ЯСНІЙ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Досліджено вплив глибини поверхневого дефекту і коефіцієнта його форми на ймовірність руйнування колектора пароперегрівника зі сталі 12Х1МФ після $1,785 \cdot 10^5$ h експлуатації. Побудовано залежності ймовірності руйнування моделі колектора з частково круговою тріщиною на його внутрішній поверхні від глибини дефекту за статичного навантаження, корозійного розтріскування під напруженням та циклічного навантаження. Виявлено, що зі збільшенням глибини та коефіцієнта форми тріщини ймовірність руйнування колектора пароперегрівника зростає.

Ключові слова: колектор пароперегрівника, ймовірність руйнування, діаграма оцінювання руйнування, частково кругова тріщина, сталь 12Х1МФ.

За значних термінів експлуатації на високотемпературне енергетичне обладнання, зокрема корпуси реакторів, колектори пароперегрівників, паропроводи, діють механічні (від внутрішнього тиску) та термомеханічні напруження, а також корозивне (водневовмісне) середовище. Це спричиняє мікроструктурні зміни в матеріалі [1–3], зародження і ріст мікротріщин, їх об'єднання та розвиток магістральної тріщини [4], деградацію механічних властивостей [5–8]. Багато множинних макротріщин, переважно довжиною до 2 mm, виявлено в околі отворів перфорованої ділянки колектора пароперегрівника котла типу ТП-100, а також магістральну макротріщину, що перетнула усі отвори колектора в коловому напрямку [5].

На основі двокритеріального підходу побудовано діаграми оцінювання руйнування (ДОР) для гладкої ділянки колекторної труби пароперегрівника типу ТП-100, які враховують механічні характеристики та тріщиностійкість сталі 12Х1МФ після $1,785 \cdot 10^5$ h експлуатації за статичного і циклічного навантажень, а також коефіцієнти запасу міцності для механізму крихкого руйнування та пластичного колапсу [9]. Оцінено критичні розміри внутрішнього поверхневого дефекту, перпендикулярного до осі циліндра, з врахуванням в'язкості руйнування експлуатованої сталі 12Х1МФ. Виявлено, що зі збільшенням відношення довжини тріщини до глибини l/a зменшується мінімальна критична глибина дефекту. Наприклад, зі зростанням l/a від 2 до 16 із урахуванням коефіцієнтів запасу міцності для $K_{mat} = K_{fc}$ вона зменшується від 25,40 mm до 12,77 mm.

Мета роботи – дослідити вплив глибини дефекту на ймовірність руйнування перфорованої ділянки колекторної труби ТЕС з урахуванням статистичного розкиду механічних характеристик експлуатованого матеріалу.

Матеріал і методика експериментальних досліджень. Досліджували теплостійку сталь 12Х1МФ “гарячого колектора” пароперегрівника котла типу ТП-100 після $1,785 \cdot 10^5$ h його експлуатації. Експериментально визначали в'язкість руйнування розтягом компактних зразків товщиною 12 mm за методикою [10] на елек-

трогідралічній випробувальній машині STM-100 за кімнатної температури та швидкості навантаження в межах, рекомендованих стандартом [11]. Зразки виготовляли із перфорованої ділянки колектора [12], а площина їх надрізу перпендикулярна до осі труби, що відповідає орієнтації L–R [13]. Критичне значення J -інтегралу J_{1c} визначали за результатами випробувань одного зразка методом часткового розвантажування, згідно зі стандартом ASTM E-1820-08a 9 [11].

Щоб вивчити вплив можливого експлуатаційного наводнювання металу на тріщиностійкість матеріалу, частину компактних зразків з тріщиною попередньо наводнювали відповідно до методики [14, 15] з подальшим сповільненим розтягом за швидкості переміщення затискачів $1 \mu\text{m/h}$. Щоб запобігти десорбції водню із зразків, їх випробовували у $0,1 \text{ N}$ розчині NaOH за густини струму 100 mA/dm^2 . Таким чином, внаслідок підвищеної концентрації водню у розчині створювався буфер, що унеможлилював витік водню зі зразка через поверхню руйнування під час експерименту. Дослідивши кінетику підростання тріщини, зразки висушували і доламували на повітрі за кімнатної температури, щоб визначити форму фронту кінцевої тріщини.

Результати досліджень та їх обговорення. Розглядали модель колектора пароперегрівника у вигляді труби, навантаженої внутрішнім тиском, з частково круговою тріщиною, перпендикулярною до осі циліндра, на його внутрішній стінці (рис. 1).

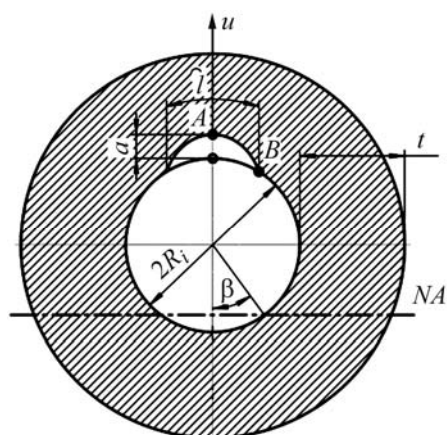


Рис. 1. Схема частково кругової тріщини на внутрішній стінці колектора: a – глибина, l – довжина дефекту на поверхні, NA – нейтральна вісь [16].

Fig. 1. Scheme of a partly circumferential internal crack on the collector inner wall: a – depth, l – length of the defect on the surface, NA – neutral axis [16].

Внутрішній діаметр труби 225 mm і товщина стінки 50 mm відповідають розмірам колектора пароперегрівника котла типу ТП-100. Внутрішній тиск ($15,5 \text{ MPa}$) дорівнює номінальному робочому тиску в колекторі пароперегрівника під час експлуатації.

Механічні характеристики експлуатованої сталі такі: $t = 20^\circ\text{C}$; $\sigma_y = 364 \text{ MPa}$; $\sigma_{UTS} = 478 \text{ MPa}$; $\delta = 19,7\%$; $\psi = 72,6\%$; $K_C = 82,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) корозійного розтріскування $K_{scc} = 42 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; циклічна в'язкість руйнування $K_{fc} = 32 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ [12].

Для досліджуваної геометрії колектора розподіл напружень у стінці порожнинного циліндра за тиску $15,5 \text{ MPa}$ обчислено в праці [9] за формулами [17]. КІН визначали для точок A та B фронту тріщини (рис. 1) за формулою [18].

Щоб оцінити міцність колектора пароперегрівника, застосували процедуру R6 [19], яка ґрунтується на двопараметричному критерії руйнування тіл із тріщинами – ДОР, що враховує пластичність матеріалу у вершині тріщини. Вхідними даними для перевірки руйнування елемента конструкції є геометричні параметри

конструкції та тріщини, параметри експлуатаційного навантаження, механічні властивості матеріалу.

Координати розрахункової точки на ДОР визначають за формулами [20]

$$K_r = \frac{K_{Ip}}{K_{mat}} + \frac{K_{Is}}{K_{mat}} + \rho, \quad L_r = \frac{P}{P_L} = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_T}, \quad (1)$$

де K_{Ip} і K_{Is} – це КІН для напружень I та II роду, відповідно; K_{mat} (K_{Ic}) – в'язкість руйнування матеріалу за статичного навантаження; ρ – поправка на пластичність; P (або σ_{ref}) – прикладене навантаження (напруження); P_L (або границя текучості σ_T) – навантаження (напруження) початку текучості матеріалу в ослабленому перерізі зразка. Зазначимо, що криву $K_r = f_{R6}(L_r)$, яка відділяє безпечну ділянку від ділянки руйнування елемента конструкції, визначають за результатами випробувань зразків із тріщинами на в'язкість руйнування [19].

Розглянемо об'єкт із тріщиною з випадковою варіацією механічних характеристик і геометричних розмірів під дією випадкового навантаження.

Введемо функцію граничного стану $g(\mathbf{x})$, визначену на p -вимірному просторі випадкових змінних, де $g(\mathbf{x}) \leq 0$ – область руйнування і $g(\mathbf{x}) > 0$ – безпечна область; \mathbf{x} – p -вимірний випадковий вектор із компонентами x_1, x_2, \dots, x_p , який характеризує всі невизначеності системи і параметрів навантаження. Випадковому вектору \mathbf{x} відповідає функція густини розподілу $f_x(\mathbf{x})$. Тоді ймовірність руйнування є багатовимірним визначеним інтегралом [21, 22]

$$P_f = \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_x(\mathbf{x}) d\mathbf{x}. \quad (2)$$

Щоб оцінити ймовірність руйнування, використовують дві різні функції граничного стану $g(\mathbf{x})$ [23]

$$g_{FAD}(\mathbf{x}) = g_{FAD}(K_{Ic}, \sigma_T, a) = f_{FAD} - K_r; \quad (3)$$

$$g_{L_r}^{\max}(\mathbf{x}) = g_{L_r}^{\max}(\sigma_T, \sigma_U, a) = L_r^{\max} - L_r, \quad (4)$$

де $\sigma_U = \sigma_B$ – границя міцності; a – розмір тріщини. Функції граничного стану ґрунтуються на аналізі першого рівня у стандартизованій процедурі SINTAP [24].

Механічні властивості (σ_T, σ_B) та критичний КІН $K_{mat} = K_{Ic}$; $K_{mat} = K_{scs}$; $K_{mat} = K_{fc}$ розглядали як випадкові змінні, типи й параметри розподілів яких наведено у таблиці.

Типи й параметри розподілу вхідних даних

Вхідні дані	Тип розподілу	Параметри розподілу
σ_T , МПа	нормальний	$\mu = 376$ МПа, $h = 37,6$ МПа
σ_B , МПа	нормальний	$\mu = 478$ МПа, $h = 47,8$ МПа
K_{Ic} , МПа \sqrt{m}	Вейбулла	$x_0 = 61,6$ МПа \sqrt{m} , $\beta = 2$, $\eta = 25$ МПа \sqrt{m}
K_{fc} , МПа \sqrt{m}	Вейбулла	$x_0 = 28$ МПа \sqrt{m} , $\beta = 2$, $\eta = 4$ МПа \sqrt{m}
K_{scs} , МПа \sqrt{m}	Вейбулла	$x_0 = 36$ МПа \sqrt{m} , $\beta = 3$, $\eta = 4$ МПа \sqrt{m}

Функцію густини нормального розподілу визначали за формулою

$$f(x) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{h}\right)^2\right], \quad (5)$$

де μ – середнє; h – стандартне відхилення.

Функція густини розподілу Вейбулла має вигляд

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x - x_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{\eta} \right)^\beta \right], \quad (6)$$

де x_0 , β , η – параметри розташування, форми і масштабу, відповідно.

Ймовірність руйнування визначали методом Монте-Карло з вибіркою за значущістю. Розглядали три випадки. У першому за K_{mat} вибирали K_{Ic} , у другому $K_{mat} = K_{scs}$, у третьому $K_{mat} = K_{fc}$.

Отримано (рис. 2а) залежності ймовірності руйнування P_f моделі колектора пароперегрівника за статичного навантаження з частково круговою тріщиною на його внутрішній стінці від глибини дефекту a для різного відношення l/a . Зі збільшенням глибини тріщини та відношення l/a ймовірність руйнування зростає.

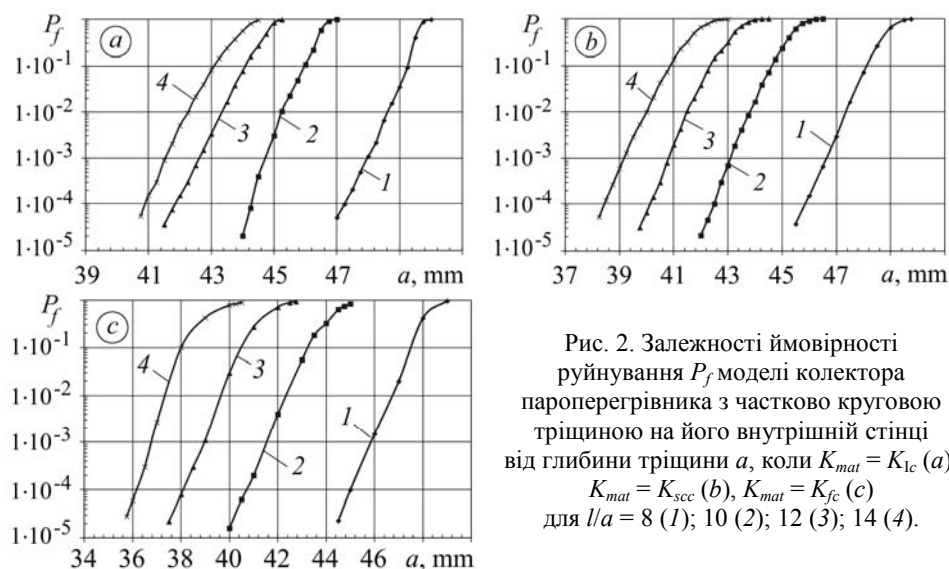


Рис. 2. Залежності ймовірності руйнування P_f моделі колектора пароперегрівника з частково круговою тріщиною на його внутрішній стінці від глибини тріщини a , коли $K_{mat} = K_{Ic}$ (а), $K_{mat} = K_{scs}$ (б), $K_{mat} = K_{fc}$ (с) для $l/a = 8$ (1); 10 (2); 12 (3); 14 (4).

Fig. 2. Dependences of probability of failure P_f of the superheater collector model with a partly circumferential crack on its internal surface on the crack depth a for $K_{mat} = K_{Ic}$ (a), $K_{mat} = K_{scs}$ (b), $K_{mat} = K_{fc}$ (c) for $l/a = 8$ (1); 10 (2); 12 (3); 14 (4).

Залежності ймовірності руйнування моделі колектора із експлуатованої сталі від глибини дефекту також побудовано для корозійного розтріскування (рис. 2б) та циклічного навантаження (рис. 2с).

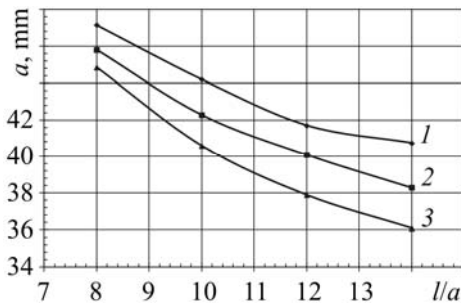
Згідно зі сучасними нормами, для такого типу конструкції, руйнування якої може призвести до катастрофи з важкими наслідками, допустима ймовірність руйнування $P_f = 7 \cdot 10^{-5}$ [24].

На рис. 3 зображено залежності максимально допустимої глибини тріщини, за якої ймовірність руйнування моделі колектора із експлуатованої сталі за статичного і циклічного навантаження та корозійного розтріскування $P_f = 7 \cdot 10^{-5}$.

Зі збільшенням коефіцієнта форми тріщини (l/a) від 8 до 14 максимально допустима її глибина за статичного навантаження зменшується від 47,2 mm до 40,8 mm. За однакового коефіцієнта форми дефекту найбільша допустима глибина тріщини за статичного навантаження, найменша – за циклічного навантаження.

Рис. 3. Залежності максимально допустимої глибини тріщини a від коефіцієнта форми l/a : $K_{mat} = K_{lc}$ (1), $K_{mat} = K_{sc}$ (2), $K_{mat} = K_{fc}$ (3).

Fig. 3. Dependences of maximal allowed crack depth a on the crack shape coefficient l/a : $K_{mat} = K_{lc}$ (1), $K_{mat} = K_{sc}$ (2), $K_{mat} = K_{fc}$ (3).



ВИСНОВКИ

З використанням підходу R6, який включає ДОР, досліджено вплив глибини поверхневого дефекту і коефіцієнта його форми на ймовірність руйнування колектора пароперегрівника зі сталі 12X1MФ після $1,785 \cdot 10^5$ h експлуатації.

Побудовано залежності ймовірності руйнування моделі колектора з частково круговою тріщиною на його внутрішній поверхні від глибини дефекту за статичного навантаження, корозійного (водневого) розтріскування та циклічного навантаження. Виявлено, що за однакового коефіцієнта форми дефекту для нормативної ймовірності руйнування $P_f = 7 \cdot 10^{-5}$ найбільша допустима глибина тріщини за статичного навантаження, найменша – за циклічного навантаження.

Зі збільшенням глибини та коефіцієнта форми тріщини ймовірність руйнування колектора пароперегрівника зростає.

РЕЗЮМЕ. Исследовано влияние глубины поверхностного дефекта и коэффициента его формы на вероятность разрушения коллектора пароперегревателя из стали 12X1MФ после $1,785 \cdot 10^5$ h эксплуатации. Построены зависимости вероятности разрушения модели коллектора с частично круговой трещиной на его внутренней поверхности от глубины дефекта при статической нагрузке, коррозионном растрескивании под напряжением и циклической нагрузке. Выявлено, что с увеличением глубины и коэффициента формы трещины вероятность разрушения коллектора пароперегревателя растет.

SUMMARY. The influence of the depth of the surface defect and its shape coefficient on the failure probability of the superheater collector made of 12X1MФ steel after $1.785 \cdot 10^5$ h operation is investigated. The dependences of the collector model fracture probability with a partly circumferential internal surface crack on the defect depth under static loading, stress corrosion cracking and cyclic loading are constructed. It was found that the increase of the depth and l/a ratio a probability of the superheater collector failure increases.

1. Гладько В., Собчак А. Пошкоджувальність структури сталі колектора пароперегрівача за експлуатаційних умов // Вісник Терн. держ. техн. ун-ту. – 2010. – № 1. – С. 27–31.
2. Dzioba I. Failure assessment analysis of pipelines for heat and power generating plants according to the SINTAP procedures // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2005. – **82**. – P. 787–796.
3. Microcrack initiation and growth in heat-resistant 15Kh2MFA steel under cyclic deformation / P. V. Yasniy, V. B. Hlado, V. B. Hutsaylyuk, T. Vuherer // Fatigue and Fracture of Engng Mater. and Struct. – 2005. – **28**, № 4. – P. 391–397.
4. On thermally induced multiple cracking of a surface: an experimental study / V. Yasniy, P. Maruschak, O. Yasniy, Y. Lapusta // Int. J. of Fract. – 2013. – **181**, № 2. – P. 293–300.
5. Оцінювання експлуатаційної деградації матеріалу колектора пароперегрівника ТЕС / О. Ясній, Т. Вухерер, В. Ясній та ін. // Вісник Терн. нац. техн. ун-ту. – 2011. – **16**, № 1. – С. 7–15.
6. Мікроструктура і розривні напруження пластично деформованої та наводненої тепло-тривкої сталі 15X2MФА / П. В. Ясній, В. Б. Гладько, І. Б. Окіпний, О. Т. Цирульник // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – **44**, № 3. – С. 118–121.

(Microstructure and fracture stresses of plastically deformed and hydrogenated heat-resistant 15Kh2MFA steel / P. V. Yasniy, V. B. Hlad'ko, I. B. Okipnyi, O. T. Tsyryl'nyk // Materials Science. – 2008. – **44**, № 3. – P. 441–445.)

7. Nykyforchyn H. M., Kurzydowski K.-J., and Lunarska E. Hydrogen degradation of steels in long-term service conditions / Ed. S. Shipilov // Environment-induced cracking of materials. Vol. 2: Prediction, industrial developments and evaluations. – Elsevier, 2008. – P. 349–361.
8. Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite-pearlite steel / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyrlunyk et al. // Materials and Corrosion. – 2009. – № 9. – P. 716–725.
9. Оцінювання граничного стану моделі колектора пароперегрівника теплової електростанції за підходом R6 / О. Ясній, В. Бревус, В. Ясній, Ю. Лапуста // Вісник Терн. нац. техн. ун-ту. – 2013. – 72, № 4. – С. 132–140.
10. Ясній В., Бревус В., Марущак П. Методика і деякі результати дослідження сповільненого деформування і руйнування теплостійкої сталі // Там же. – 2013. – 69, № 1. – С. 7–13.
11. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness: ASTM E1820-08a. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, West Conshohocken, PA, USA, 2008.
12. Ясній О., Бревус В., Немченко В. Вплив температури на циклічну тріщиностійкість сталі колектора пароперегрівника // Вісник Терн. нац. техн. ун-ту. – 2012. – 68, № 4. – С. 35–41.
13. Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials: ASTM E 399-90 // Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia. – V. 03.01
14. Цирульник О., Окінний І. Вплив водню і пластичної деформації на напруження сколювання теплостійкої сталі // Вісник Терн. держ. техн. ун-ту. – 2006. – 11, № 1. – С. 5–11.
15. Ясній В. Вплив наводнювання на сповільнене деформування і руйнування теплостійкої сталі // Вісник Терн. нац. техн. ун-ту. – 2013. – 71, № 3. – С. 264–271.
16. Delfin P. Limit Load Solutions for Cylinders with Circumferential Cracks Subjected to Tension and Bending // SAQ/FoU-Report 96/05. SAQ Kontroll AB. Stockholm, Sweden, 1997. – P. 14.
17. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів: Підручник / За ред. Г. С. Писаренка. – К.: Вища школа, 1993. – С. 655.
18. Chapuliot S., Lacire M. H., and Delliou P. Le. Stress intensity factors for internal circumferential cracks in tubes over a wide range of radius over thickness ratio // Fatigue, Fracture and High Temperature Design Methods in Pressure Vessels and Piping – 1998. – 365. – P. 95–106.
19. R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects. Revision 4, Amendment 2. – British Energy, Gloucester, 2003.
20. Assessment of the integrity of structures containing defects / I. Milne, R. A. Ainsworth, A. R. Dowling, A. T. Stewart // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 1988. – 32, № 1–4. – P. 3–104.
21. Rackwitz R. Reliability analysis – review and some perspectives // Structural Safety. – 2001. – 23, № 4. – P. 365–395.
22. Rahman S. and Kim J. S. Probabilistic fracture mechanics for nonlinear structures // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2001. – 78, № 4 – P. 261–269.
23. Dillström. P. ProSINTAP – A probabilistic program implementing the SINTAP assessment procedure // Engng Fracture Mechanics. – 2000. – 67, № 6. – P. 647–668.
24. Structural integrity assessment procedures for European industry, SINTAP, Final Report / Ed.: Bannister AC // Report BE95-1426/FR. – British Steel, Rotherham, United Kingdom, 1999. – P. 75.

Одержано 11.03.2014