

УДК 539.3

Олег Ясній, Віталій Бревус, Володимир Ясній

ОЦІНКА ГРАНИЧНОГО СТАНУ КОЛЕКТОРА ПАРОПЕРЕГРІВНИКА ТЕС

Теплові електростанції (ТЕС) належать до важливих об'єктів, відмови яких можуть призвести до аварій із значними наслідками. Більшість ТЕС в Україні вичерпала свій проектний ресурс, який залежить від стану основних елементів пароводяної системи енергоблоків, що часто мають експлуатаційні пошкодження. Тому важливим завданням є достовірна оцінка граничного стану колекторів пароперегрівників із застосуванням сучасних європейських підходів та врахувавши експлуатаційну деградацію матеріалу.

Ключові слова: колектор пароперегрівача, сталь 12Х1МФ, напружено-деформований стан, термомеханічне навантаження, діаграма оцінювання руйнування.

Теплові електростанції (ТЕС) належать до важливих об'єктів, відмови яких можуть призвести до аварій із значними наслідками. Більшість ТЕС в Україні вичерпала свій проектний ресурс, який залежить від стану основних елементів пароводяної системи енергоблоків [1], що часто мають експлуатаційні пошкодження [2, 3].

В експлуатованому матеріалі колектора на фоні множинного розтріскування, коли довжина більшості тріщин не перевищує 2 мм, виявлено значне локалізоване пошкодження колектора у вигляді частково колової тріщини довжиною 149 мм на внутрішній поверхні і найбільшою глибиною 37,8 мм, яка перетинає всі отвори кріплення патрубків [3]. Тріщини таких розмірів можуть бути причиною раптового руйнування колектора. Тому важливим завданням є оцінювання можливості подальшої експлуатації колектора із наявними дефектами.

Для оцінювання міцності елементів конструкцій застосовують процедуру R6 [4], яка ґрунтується на двопараметричному критерії руйнування тіл із тріщинами – діаграмі оцінювання руйнування (ДОР).

Вхідними даними для перевірки руйнування елемента конструкції є геометричні параметри конструкції та тріщини; параметри експлуатаційного навантаження; механічні властивості матеріалу.

Метою роботи було дослідити вплив розмірів дефекту на граничний стан експлуатованого колектора пароперегрівника.

Оцінювали граничний стан колектора, знятого після 179 тис. год. експлуатації пароперегрівника котла типу ТП-100. Колектор виготовлений із сталі 12Х1МФ, хімічний склад якої наведено у праці [5].

Координати точки на ДОР визначають за формулами [6]:

$$K_r = \frac{K_{Ip}}{K_{mat}} + \frac{K_{Is}}{K_{mat}} + \rho, \quad L_r = \frac{P}{P_L} = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{0,2}}, \quad (1)$$

де K_{Ip} і K_{Is} – коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) для прикладених і залишкових напружень відповідно; K_{mat} (K_{lc}) – в'язкість руйнування матеріалу за статичного навантаження; ρ – поправка на пластичність; P (або σ_{ref}) – прикладене навантаження (напруження); P_L (або границя плинності $\sigma_{0,2}$) – навантаження (напруження) початку текучості матеріалу в ослабленому перерізі зразка. Криву оцінювання руйнування $K_r = f_{R6}(L_r)$, що відділяє безпечну ділянку від ділянки руйнування елемента конструкції, визначають за результатами випробувань зразків із тріщинами на в'язкість руйнування [4].

Колектор пароперегрівника схематизовано розглядали у вигляді товстостінного циліндра, заглушеного на торцях, із частково коловою поверхневою тріщиною на внутрішній стінці. Циліндр навантажений внутрішнім тиском.

Схему частково колової поперечної тріщини на внутрішній стінці колектора ТЕС зображено на рисунку 1.

Товщина стінки циліндра $t = 50$ мм, внутрішній радіус $R_i = 112,5$ мм, внутрішній тиск $p = 15,5$ МПа. Оскільки виконується нерівність $t > 0,1(2R_i + t)/2$, циліндр вважали товстостінним. Внаслідок осьової симетрії

циліндра та навантажень діючі напруження і відповідні їм деформації також симетричні відносно його осі.

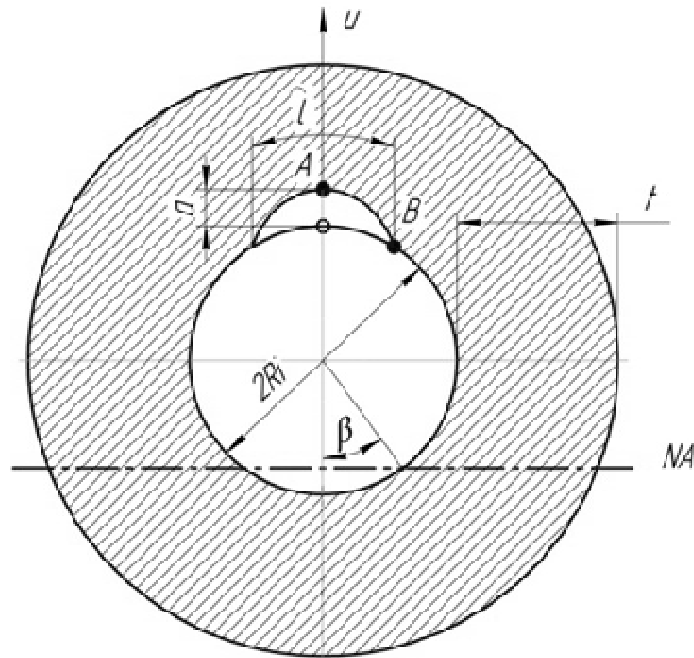


Рисунок 1. Схема частково колової тріщини на внутрішній стінці колектора; глибина, a — довжина дефекту на поверхні, NA — нейтральна вісь [7].

Для досліджуваної геометрії колектора пароперегрівника розподіл напружень у стінці циліндра без отворів, для тиску 15,5 МПа зображено на рисунку 2.

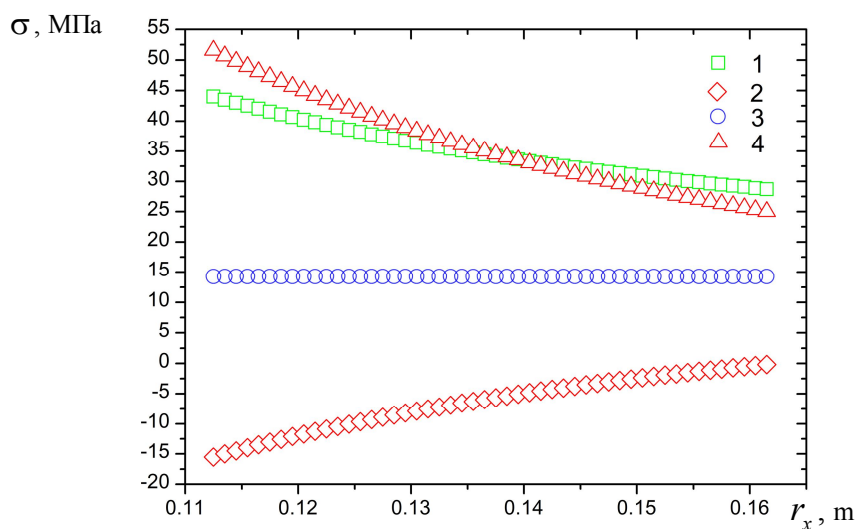


Рисунок 1. Розподіл напружень по товщині товстостінного циліндра без отворів: 1 – тангенціальні, 2 – радіальні, 3 – осьові, 4 – еквівалентні.

Коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) обчислювали для точок A та B фронту тріщини (рис. 1) за формулою [8]:

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left(\sum_{j=1}^3 \sigma_j f_j(a/t, l/a, R_i/t) + \sigma_{bg} f_{bg}(a/t, l/a, R_i/t) \right), \quad (2)$$

де σ_j ($j = 0$ до 3) – коефіцієнти многочлена, отримані апроксимацією розподілу напружень у стінці циліндра без тріщини многочленом 3-го степеня за формулою

$$\sigma = \sigma(u) = \sum_{j=0}^3 \sigma_j \left(\frac{u}{a} \right)^j \quad \text{при } 0 \leq u \leq a, \quad (3)$$

де σ_{bg} – напруження згину, у досліджуваному випадку дорівнюють нулю; f_j, f_{bg} – поправкові функції для точок A та B (проміжні значення знаходили лінійною інтерполяцією) [9].

Для оцінки руйнування обчислювали значення L_r та K_r . Допустима ділянка обмежена кривою оцінювання руйнування згідно з процедурою R6 [6], яка визначається рівнянням

$$K_r \leq f_{R6} = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)]. \quad (4)$$

Допустиме пошкодження також оцінювали з використанням підходу, описаного у праці [10], у якому пропонуються коефіцієнти запасу міцності для параметрів L_r та K_r ,

$$\frac{K_I}{K_{cr}} + \frac{\rho}{\sqrt{SF_J}} \leq \frac{f_{R6}(L_r)}{\sqrt{SF_J}}, \quad (4)$$

$$L_r \leq \frac{L_r^{max}}{SF_L}, \quad (5)$$

де SF_J – коефіцієнт запасу міцності для механізму крихкого руйнування, SF_L – коефіцієнт запасу міцності для механізму пластичного колапсу, K_{cr} – в'язкість руйнування.

Для матеріалу труби феритної структури $SF_J = 10,0$; $SF_L = 2,22$ [10].

З урахуванням наведених вище міркувань, побудовано ДОР із допустимою ділянкою, що визначається вказаними вище коефіцієнтами запасу міцності.

На рисунку 3 зображено ДОР моделі колектора пароперегрівника за 20 °С, $K_{mat} = K_{lc}$. Глибина тріщини $a = 5, 10, \dots, 50$ мм, $l/a = 2$ (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5), 32 (6), при цьому не розглядали дефекти з довжиною тріщини більшою за $2\pi R_i \approx 706,86$ мм.

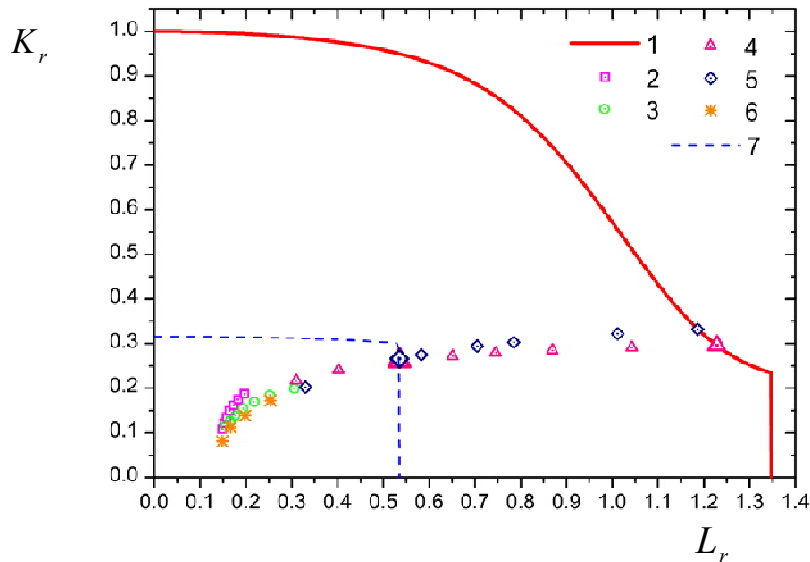


Рисунок 3. ДОР моделі колектора за 20 °С, $K_{mat} = K_{lc}$, $a = 5, 10, \dots, 50$ мм, гранична крива f_{R6} (1), $l/a = 2$ (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5), 32 (6), гранична крива за коефіцієнтами запасу (7)

На рисунку 4 зображено ДОР моделі колектора пароперегрівника при 20 °С, $K_{mat} = K_{fc}$. Глибини тріщин такі ж, як і при ДОР для $K_{mat} = K_{lc}$.

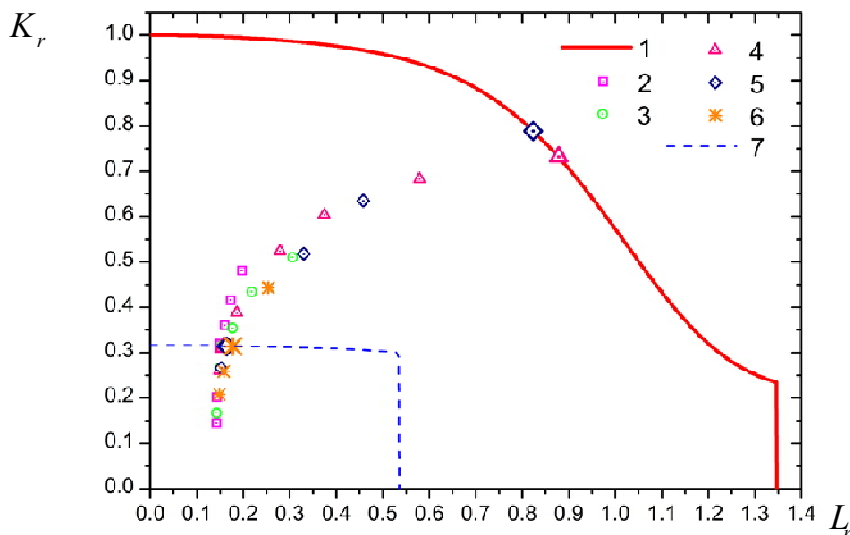


Рисунок 4. ДОР моделі колектора за 20 °С, $K_{mat} = K_{fc}$, $a = 5, 10, \dots, 50$ мм, гранична крива f_{R6} (1), $l/a = 2$ (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5), 32 (6), гранична крива за коефіцієнтами запасу (7)

Найменші розміри тріщин, які є критичними для експлуатації конструкції при $K_{mat} = K_{fc}$ та $K_{mat} = K_{lc}$, із урахуванням коефіцієнтів запасу міцності та без їх урахування наведено у таблиці 1.

Таблиця 1.

Критичні розміри тріщин з урахуванням коефіцієнтів запасу міцності та без їх урахування

$K_{mat} = K_{fc} = 32,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$		$K_{mat} = K_{lc} = 82,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$		
$a, \text{ мм}$				
l / a	з коефіцієнтами запасу міцності	без коефіцієнтів запасу міцності	з коефіцієнтами запасу міцності	без коефіцієнтів запасу міцності
	25,40	–	–	–
	23,00	–	–	–
	15,14	48,06	44,26	48,10
	12,77	41,75	37,00	44,03
	11,90	–	–	–

Виявлено, що із збільшенням відношення l / a зменшується критичне значення мінімальної глибини тріщини. Приміром, із зростанням l / a від 2 до 16 із урахуванням коефіцієнтів запасу міцності для $K_{mat} = K_{fc}$ мінімальна глибина дефекту зменшується від 25,40 мм до 12,77 мм.

Висновки. З використанням двокритеріального підходу R6 та діаграми оцінювання руйнування, що дозволяє аналізувати дефект за двома граничними станами – крихким руйнуванням і пластичним колапсом:

- досліджено вплив розмірів внутрішньої поверхневої тріщини, перпендикулярної до осі циліндра, на залишкову міцність моделі колектора пароперегрівника ТЕС із теплостійкої сталі;
- побудовано діаграми оцінювання руйнування моделі колектора, які враховують характеристики механічних властивостей та в'язкість руйнування сталі 12X1МФ після 179 тис. год. експлуатації за статичного і циклічного навантаження, а також коефіцієнти запасу міцності для механізму крихкого руйнування та пластичного колапсу;
- виявлено, що зі збільшенням відношення l / a зменшується мінімальна глибина тріщини, критична для елемента конструкції.

Приміром, із зростанням l/a від 2 до 16 із урахуванням коефіцієнтів запасу міцності для $K_{mat} = K_{fc}$ мінімальна критична глибина дефекту зменшується від 25,40 мм до 12,77 мм.

Література

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник / за заг. ред. Панасюка В. В. – Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман, М. Г. Стащук, Л. Тот; за ред. І. М. Дмитраха. – Київ: ВД “Академперіодика”, 2005. – 378 с.
2. Оцінювання експлуатаційної деградації матеріалу колектора пароперегрівника ТЕС / О. Ясній, Т. Вухерер, В. Ясній та ін. // Вісник ТНТУ. – 2011. – Т. 16. – № 1. С. 7–15.
3. Пошкодження внутрішньої поверхні ділянки колектора пароперегрівника під час експлуатації / Ясній О., Собчак А., Ясній В. та ін. // Машинознавство. – 2011. – Т. 163–164. № 1-2. – С. 16–19.
4. R6: Assessment of the integrity of structures containing defects, Revision 4, Amendment 2, British Energy, Gloucester, 2003.
5. Сталь теплоустойчивая. Технические условия: ГОСТ 20072–74. – Москва: Стандартинформ. – 1987. – 19 с.
6. Milne I. Assessment of the integrity of structures containing defects / I. Milne et al // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1988. – Vol. 32, № 1–4. – P. 3–104.
7. Delfin P. Limit Load Solutions for Cylinders with Circumferential Cracks Subjected to Tension and Bending / P. Delfin. SAQ // FoU-Report. – Stockholm: SAQ Kontroll AB, 1997. – 96/05.
8. Chapuliot S. Stress intensity factors for internal circumferential cracks in tubes over a wide range of radius over thickness ratio / S. Chapuliot, M. H. Lacire, P. Le. Delliou // ASME PVP. – 1998. – 365. – P.95-106.
9. Ясній О. П. Вплив температури на циклічну тріщиностійкість сталі колектора пароперегрівника / О. Ясній, В. Бревус, В. Немченко // Вісник ТНТУ. – 2012. – Т. 68. – № 4. – С. 35–41.

10. Dillstroem P. A combined deterministic and probabilistic procedure for safety assessment of components with cracks / P. A. Dillstroem, M. Bergman, B. Brickstad et al: Handbook. – 2008. – P. 173–175

Oleh Yasniy, Vitaliy Brevus, Volodymyr Yasniy

ASSESSMENT OF THERMAL POWER PLANT SUPERHEATER COLLECTOR LIMITING STATE

Thermal power plants are the important objects, failure of which can cause accidents with severe consequences. A large portion of Ukrainian thermal power plants has exceeded its design life, which is determined, to large extent, by the main elements of steam power systems. Therefore, the main task is to assess correctly the superheaters collectors limiting state using modern approaches and taking into account the service degradation of material

Keywords: *superheater collector, 12Cr1MoV steel, stress-strain state, thermo-mechanical loading, failure assessment diagrams.*