

УДК 539.3

О. Ясній¹, канд. техн. наук; В. Бревус¹; В. Ясній¹;
Ю. Лапуста², докт. фіз.-мат. наук

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
²Французький інститут сучасної механіки

ОЦІНЮВАННЯ ГРАНИЧНОГО СТАНУ МОДЕЛІ КОЛЕКТОРА ПАРОПЕРЕГРІВНИКА ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЗА ПІДХОДОМ R6

Резюме. Теплові електростанції (ТЕС) належать до важливих об'єктів, відмови яких можуть призвести до аварій зі значними наслідками. Більшість ТЕС в Україні вичерпала свій проектний ресурс, який значною мірою залежить від основних елементів пароводяної системи енергоблоків, що мають суттєві експлуатаційні пошкодження. Тому важливим завданням є достовірне оцінювання граничного стану колекторів пароперегрівників із застосуванням сучасних європейських підходів та врахуванням експлуатаційної деградації матеріалу.

Колектори пароперегрівників ТЕС експлуатуються у середовищі водяної пари під тиском 15,5 МПа за робочої температури 545 °С. Тривалі термомеханічні напруження, корозійно-наводнене середовище та сповільнене деформування у цих елементах конструкції спричиняють появу втомних тріщин на внутрішній поверхні колектора. Тріщини переважно зароджуються вздовж границь зерен, ослаблених порами та виділеннями карбідів. Унаслідок експлуатації колекторів змінюються характеристики механічних властивостей матеріалу.

Оцінено граничний стан моделі колектора пароперегрівника котла ТП-100 з використанням діаграми оцінювання руйнування (ДОР). ДОР будували для $K_{mat} = K_{Ic}$ та $K_{mat} = K_{fc}$, враховуючи коефіцієнти запасу міцності для випадку пластичного колапсу та крихкого руйнування моделі колектора з поперечною тріщиною на внутрішній стінці для різних співвідношень довжини тріщини l до її глибини a .

Ключові слова: колектор пароперегрівника, сталь 12Х1МФ, в'язкість руйнування, діаграма оцінювання руйнування, R6.

О. Yasniy, V. Brevus, V. Yasniy, Y. Lapusta

ASSESSMENT OF THERMAL POWER PLANT SUPERHEATER COLLECTOR MODEL LIMIT STATE USING R6 APPROACH

Summary. Thermal power plants (TPPs) belong to the important objects, the failure of which can cause accidents with severe consequences. A great part of Ukrainian TPP 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 limit state using modern approaches and taking into account the service degradation of material. TPP superheater collectors operate in the environment of water steam under the pressure of 15.5 MPa at temperature 545 °C. As a result of combined action of prolonged thermo-mechanical stresses, corrosive and hydrogen environment and slow deformation, fatigue cracks emerge in these components on the inner collector surface. Operation of collectors results in the change of the material properties.

The limit state of TP-100 type boiler steam superheater collector model was assessed using failure assessment diagram (FAD). The FADs were built for $K_{mat} = K_{Ic}$ and $K_{mat} = K_{fc}$, taking into account safety factors for plastic collapse and for brittle fracture mechanisms for the collector model with part circumferential internal surface crack for various ratio of crack length l to depth a .

The influence of internal surface crack that is perpendicular to the cylinder axis, on the residual structural integrity of TPP superheater collector has been studied. The FADs were built taking into account the fracture toughness of 12Cr1MoV steel after 179 thousand operation hours for static and cyclic loading and, also, the safety factors for the brittle fracture mechanism and plastic collapse. The critical sizes of the inner surface defect, that is perpendicular to the axis of the cylinder, considering fracture toughness of 12Cr1MoV steel for static and cyclic loading, were assessed. It was found out, that with the increase of ratio the minimum crack depth that is critical for the structural element decreases.

Key words: superheater collector, 12Cr1MoV steel, fracture toughness, failure assessment diagrams, R6.

Постановка проблеми. Теплові електростанції (ТЕС) належать до важливих об'єктів, відмови яких можуть призвести до аварій зі значними наслідками. Більшість ТЕС в Україні вичерпала свій проектний ресурс, який залежить від стану основних елементів пароводяної системи енергоблоків [1], що мають значні експлуатаційні пошкодження [2, 3]. Тому важливим завданням є достовірне оцінювання міцності колекторів пароперегрівників з урахуванням експлуатаційної деградації матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Колектори пароперегрівників ТЕС експлуатуються у середовищі водяної пари під тиском 15,5 МПа за робочої температури 545°C. Тривалі термомеханічні напруження, корозійно-наводнене середовище та сповільнене деформування у цих елементах конструкцій спричиняють появу втомних тріщин на внутрішній поверхні колектора. Тріщини зароджуються переважно вздовж границь зерен, ослаблених порами та виділеннями карбідів [2, 4]. Унаслідок експлуатації колекторів змінюються характеристики механічних властивостей матеріалу. Періодичні зупинки і виходи на робочий режим руйнують захисну плівку у вершинах тріщин, пришвидшуючи водневе розтріскування колектора. Зазвичай тріщини поширюються між отворами для патрубків.

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 й 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 [5], яка ґрунтується на двопараметричному критерії руйнування тіл із тріщинами – діаграмі оцінювання руйнування (ДОР), який 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 [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_{Ic}) – 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 [5].

Мета роботи. Дослідити вплив розмірів дефекту на граничний стан експлуатованого колектора пароперегрівника.

Результати дослідження та їх обговорення. Оцінювали граничний стан «гарячого колектора», знятого після 179 тис. год. експлуатації пароперегрівника котла типу ТП-100. Колектор виготовлений зі сталі 12Х1МФ, хімічний склад якої наведено у праці [7].

Характеристики механічних властивостей сталі 12Х1МФ за статичного розтягу наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Механічні властивості сталі 12Х1МФ [8]				
$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{MPa}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{MPa}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
20	364	478	19,7	72,6

В'язкість руйнування визначали за позацентрового розтягу компактних зразків товщиною 12 mm на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-10 згідно зі стандартами ASTM E 1820, ASTM E 647 [9, 10].

Статична в'язкість руйнування матеріалу колектора пароперегрівника при температурі 20°C $K_{Ic} = 82,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, циклічна $K_{fc} = 32,0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ [8].

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.

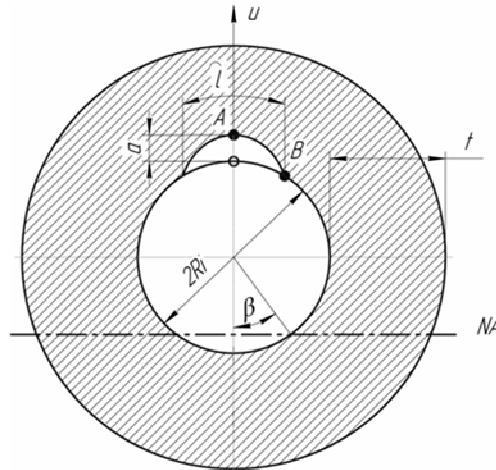


Рисунок 1. Схема частково колової тріщини на внутрішній стінці колектора: a –глибина; l – довжина дефекту на поверхні; NA – нейтральна вісь [11]

Figure 1. Scheme of part circumferential internal surface crack on the inner wall of the collector: a – defect depth; l – length of the defect on the surface, NA – neutral axis [11]

Товщина стінки циліндра $t = 50 \text{ mm}$, внутрішній радіус $R_i = 112,5 \text{ mm}$, внутрішній тиск $p = 15,5 \text{ MPa}$. Оскільки виконується нерівність $t > 0,1(2R_i + t)/2$, циліндр вважали товстостінним. Унаслідок осьової симетрії циліндра та навантажень діючі напруження й відповідні їм деформації також симетричні відносно його осі. Тангенціальні σ_t , радіальні σ_r та осьові σ_a напруження дорівнюють [12]:

$$\sigma_t = \frac{r^2}{R^2 - r^2} \left(1 + \frac{R^2}{r_x^2}\right) p; \quad \sigma_r = \frac{r^2}{R^2 - r^2} \left(1 - \frac{R^2}{r_x^2}\right) p; \quad \sigma_a = \frac{pr^2}{R^2 - r^2}, \quad (2)$$

де p – внутрішній тиск; $r = R_i$ – внутрішній радіус циліндра; $R = R_i + t$ – зовнішній радіус циліндра; r_x – радіус ділянки циліндра, для котрої обчислюємо напруження ($R_i \leq r_x \leq R_i + t$).

Радіальне переміщення визначали за формулами Ляме [12]

$$u = \frac{1-\mu}{E} \frac{pr^2}{R^2-r^2} r_x + \frac{1+\mu}{E} \frac{pR^2r^2}{R^2-r^2} \frac{1}{r_x}, \quad (3)$$

де E і μ – відповідно модуль пружності 1-го роду та коефіцієнт Пуассона.

Напруження σ_r у стінці циліндра будуть стискаючими, а σ_t , σ_a – розтягуючими; радіальні переміщення u збільшуються у напрямку радіуса r_x .

Еквівалентні напруження у стінці циліндра визначали за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2]}. \quad (4)$$

Для досліджуваної геометрії колектора пароперегрівника розподіл напружень у стінці циліндра без отворів обчислено за формулами (2) та (4) для тиску 15,5 МПа (рис. 2).

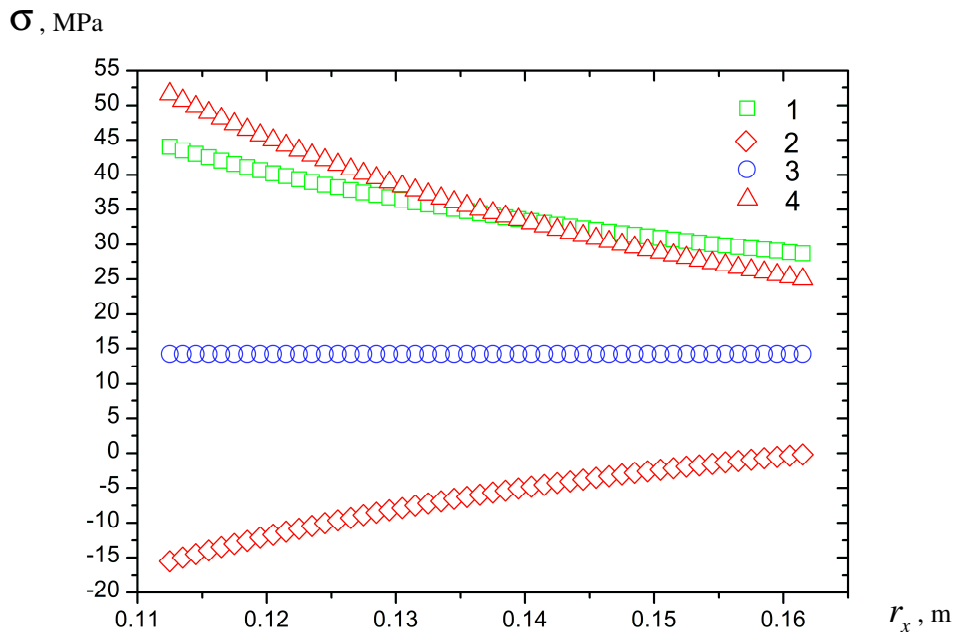


Рисунок 2. Розподіл напружень по товщині товстостінного циліндра без отворів:
1 – тангенціальні, 2 – радіальні, 3 – осьові, 4 – еквівалентні

Figure 2. The distribution of stresses along the thickness of a thick-walled cylinder without holes:
1 – tangential, 2 – radial, 3 – axial, 4 – equivalent

Коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) обчислювали для точок A та B фронту тріщини (рис. 1) за формулою [13]

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left(\sum_{j=1}^3 \sigma_j f_j(a/t, l/a, R_i/t) + \sigma_{bg} f_{bg}(a/t, l/a, R_i/t) \right), \quad (5)$$

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

$$\sigma = \sigma(u) = \sum_{j=0}^3 \sigma_j \left(\frac{u}{a} \right)^j \quad \text{при } 0 \leq u \leq a, \quad (6)$$

де σ_{bg} – напруження згину в досліджуваному випадку дорівнюють нулю; f_j, f_{bg} – поправкові функції для точок A та B (проміжні значення знаходили лінійною інтерполяцією) [13].

Параметр L_r для циліндра із внутрішнім поверхневим дефектом, перпендикулярним до його осі, обчислювали за формулою [11]

$$L_r = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sigma_m}{s_m} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{bg}}{s_{bg}} \right)^2}{\left(\frac{s_m}{s_m} \right)^2 + \left(\frac{s_{bg}}{s_{bg}} \right)^2}}, \quad (7)$$

де параметри s_m, s'_m, s_{bg} та s'_{bg} отримували із системи рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{s_m}{\sigma_Y} = 1 - 2 \frac{\beta}{\pi} - \frac{a}{t} \frac{\alpha}{\pi}, \\ \frac{s_{bg}}{\sigma_Y} = \frac{4}{\pi} \sin \beta - \frac{2}{\pi} \frac{a}{t} \sin \alpha, \\ \theta = \frac{l}{2R_i}, \\ \alpha = \begin{cases} \theta & \text{якщо } \theta \leq \pi - \beta, \\ \pi - \beta & \text{якщо } \theta \geq \pi - \beta, \end{cases} \\ \sigma_m s_{bg} - \sigma_{bg} s_m = 0, \\ s'_m = s_m \quad \text{для } s_{bg} = 0, \\ s'_{bg} = s_{bg} \quad \text{для } s_m = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Для оцінювання руйнування обчислювали значення L_r та K_r . Допустима ділянка обмежена кривою оцінювання руйнування згідно з процедурою R6 [5, 6], яка визначається рівнянням

$$K_r \leq f_{R6} = (1 - 0,14L_r^2) \left[0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6) \right]. \quad (9)$$

Якщо точки знаходяться на допустимій ділянці діаграми, то руйнування не відбувається. У протилежному випадку розміри тріщини є критичними.

Результати підрахунку зображені на діаграмах (рис. 3, 4). Проаналізовано п'ять відношень довжини тріщини вздовж внутрішньої поверхні l до її глибини a .

В усіх проаналізованих випадках дані тріщини є допустимими, за винятком дефектів з $l/a = 8$, глибиною $a \geq 48,06$ mm та $l/a = 16$, глибиною $a \geq 41,75$ mm (при $K_{mat} = K_{fc} = 32,0$ МПа \sqrt{m}) та $l/a = 8$, глибиною $a \geq 48,10$ mm та $l/a = 16$ та

глибиною $a \geq 44,03$ mm (при $K_{mat} = K_{Ic} = 82,2$ МПа \sqrt{m}).

Допустиме пошкодження також оцінювали з використанням підходу, описаного у праці [14], у якому пропонуються коефіцієнти запасу міцності для параметрів L_r та K_r ,

$$\frac{K_I}{K_{cr}} + \frac{\rho}{\sqrt{SF_J}} \leq \frac{f_{R6}(L_r)}{\sqrt{SF_J}}, \quad (10)$$

$$L_r \leq \frac{L_r^{max}}{SF_L}, \quad (11)$$

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 $SF_J = 10,0$, $SF_L = 2,22$ [14].

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

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

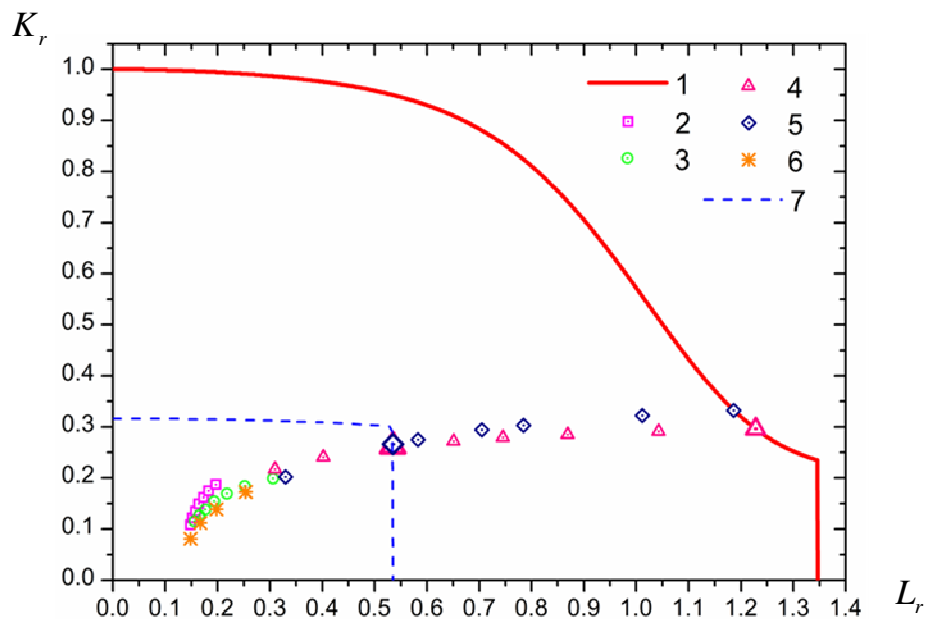


Рисунок 3. ДОР моделі колектора за 20°C, $K_{mat} = K_{Ic}$, $a = 5, 10, \dots, 50$ mm, гранична крива f_{R6} (1), $l/a = 2$ (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5), 32 (6), гранична крива за коефіцієнтами запасу (7)

Figure 3. FAD of collector model at 20°C, $K_{mat} = K_{Ic}$, $a = 5, 10, \dots, 50$ mm, limit curve f_{R6} (1), $l/a = 2$ (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5), 32 (6), limit curve according to safety factor (7)

На рис. 4 зображено ДОР моделі колектора пароперегрівника при 20°C, $K_{mat} = K_{fe}$. Глибини тріщин такі ж, як і при ДОР для $K_{mat} = K_{Ic}$.

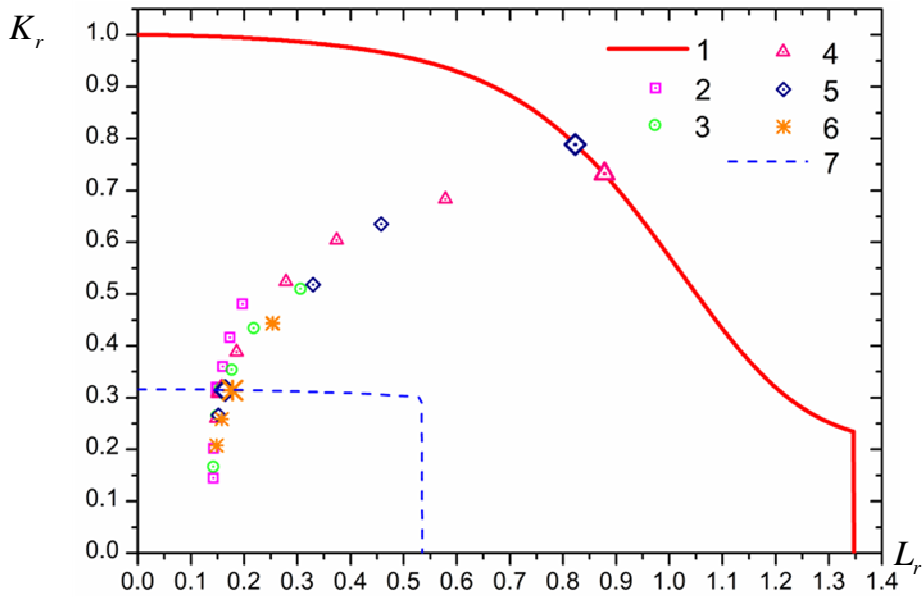


Рисунок 4. ДОР моделі колектора за 20°C, $K_{mat} = K_{fc}$, $a = 5, 10, \dots, 50$ mm, гранична крива f_{R6} (1) $l/a = 2$ (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5), 32 (6), гранична крива за коефіцієнтами запасу (7)

Figure 4. FAD of collector model at 20°C, $K_{mat} = K_{fc}$, $a = 5, 10, \dots, 50$ mm, limit curve f_{R6} (1) $l/a = 2$ (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5), 32 (6), limit curve according to safety factor (7)

Найменші розміри тріщин, які є критичними для експлуатації конструкції при $K_{mat} = K_{fc}$ та $K_{mat} = K_{Ic}$, із урахуванням коефіцієнтів запасу міцності та без їх урахування наведено у табл. 2.

Таблиця 2

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

$K_{mat} = K_{fc} = 32,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$		$K_{mat} = K_{Ic} = 82,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$		
$a, \text{ mm}$				
l/a	З коефіцієнтами запасу міцності	Без коефіцієнтів запасу міцності	З коефіцієнтами запасу міцності	Без коефіцієнтів запасу міцності
2	25,40	—	—	—
4	23,00	—	—	—
8	15,14	48,06	44,26	48,10
16	12,77	41,75	37,00	44,03
32	11,90	—	—	—

Виявлено, що зі 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 mm до 12,77 mm.

Висновки. З використанням двокритеріального підходу R6 та діаграми оцінювання руйнування, що дозволяє аналіз дефекту 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 12Х1МФ після 179 тис. год. експлуатації за статичного і циклічного навантаження, а також коефіцієнти запасу міцності для механізму крихкого руйнування та пластичного колапсу;
- оцінено критичні розміри внутрішнього поверхневого дефекту, перпендикулярного до осі циліндра, врахувавши в'язкість руйнування сталі 12Х1МФ за статичного і циклічного навантаження та коефіцієнти запасу міцності;
- виявлено, що зі збільшенням відношення l/a зменшується мінімальна глибина тріщини, критична для елемента конструкції. Приміром, зі 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 mm до 12,77 mm.

Conclusion. Using R6 approaches:

- The influence of internal surface crack that is perpendicular to the cylinder axis on the residual structural integrity of thermal power plant superheater collector has been studied.
- The failure assessment diagrams were built taking into account the fracture toughness of 12Cr1MoV steel after 179 thousand operation hours for static and cyclic loading and, also, the safety factors for the brittle fracture mechanism and plastic collapse.
- The critical sizes of the inner surface defect, that is perpendicular to the axis of the cylinder, considering fracture toughness of 12Cr1MoV steel for static and cyclic loading, were assessed.
- It was found out, that with the increase of l/a ratio the minimum crack depth that is critical for structural element decreases. For instance, with augment of l/a from 2 to 16, taking into consideration the safety factors for $K_{mat} = K_{fc}$, the minimum critical defect depth reduces from 25.40 mm to 12.77 m.

Список використаної літератури

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник [Текст] / за заг. ред. Панасюка В.В. – Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Сташук, Л. Тот; за ред. І.М. Дмитраха. – Київ: Академперіодика, 2005. – 378 с.
2. Оцінювання експлуатаційної деградації матеріалу колектора пароперегрівника ТЕС [Текст] / 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 [Текст] / О. Ясній, А. Собчак, В. Ясній та ін. // Машинознавство. – 2011. –Т. 163 – 164. № 1 – 2. – С. 16 – 19.
4. Грабовський, Р.С. До оцінки кінетики росту втомних тріщин в стінках трубопроводів [Текст] / Р.С. Грабовський, В.С. Лужецький, Т.М. Горб'як // Машинознавство. – 2005. – № 4. – С. 7 – 10.
5. R6: Assessment of the integrity of structures containing defects, Revision 4, Amendment 2, British Energy, Gloucester, 2003.

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. Сталь теплоустойчивая. Технические условия: ГОСТ 20072–74. – Москва: Стандартиформ. – 1987. – 19 с.
8. Ясній, О.П. Вплив температури на циклічну тріщиностійкість сталі колектора пароперегрівника [Текст] / О. Ясній, В. Бревус, В. Немченко // Вісник ТНТУ. – 2012. – Т. 68, № 4. – С. 35 – 41.
9. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, West Conshohocken: ASTM E1820-08a, PA, USA, 2008.
10. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. In: Annual Book of ASTM Standards: ASTM E 647–99. In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia. – V. 03.01.
11. 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.
12. Писаренко, Г.С. Опір матеріалів: підручник [Текст] / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; за ред. Г.С. Писаренка // Підручник. – Київ: Вища школа, 1993. – С. 655.
13. 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.
14. 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.

Отримано 14.08.2013