

**ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ КОЛЕСА  
ПАРОВОЇ ТУРБІНИ З УРАХУВАННЯМ ДЕГРАДАЦІЇ ЙОГО  
МАТЕРІАЛУ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

**О.Є. Андрейків<sup>1</sup>, В.Р. Скальський<sup>2</sup>, І.Я. Долінська<sup>2</sup>, О.К. Райтер<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Львівський національний університет ім. Івана Франка, Україна;

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

The method of estimation of the residual lifetime of wheel of steam turbine with account of degradation of its material have been proposed. The method development is based on the mathematical model for determining the period of subcritical growth of the crack. Estimated The residual lifetime of the steam turbine wheel from the 20X13 steel in the virgin state, after  $3 \cdot 10^5$  h operation and taking into account its degradation.

Парові турбіни відносять до визначальних елементів, без яких не можливо забезпечити дієвість і продуктивність енергоблоків. Більшість елементів парових турбін, що експлуатуються на підприємствах теплоенергетики відпрацювали свій парковий ресурс або наближаються до його завершення. Разом з тим диски парових турбін містять концентратори напружень в яких за експлуатаційних умов навантаження можуть виникати локальні незворотні деформації. Більше того, в цих зонах з часом накопичуються пошкодження, що призводять до утворення і розвитку мікро- та макротріщин. Досягнення критичного розміру таких тріщин призводить до виникнення експлуатаційних відмов відповідних елементів парової турбіни. Для запобігання виникнення непередбачених аварійних ситуацій, важливо вміти визначати період докритичного росту наявних в елементах тріщин (тобто оцінювати залишковий ресурс).

Внаслідок експлуатаційного режиму роботи парових турбін – тривала експлуатація, високі частота обертання роторів, температура і тиск пари, вплив агресивного середовища, велике механічне навантаження тощо, відбувається деградація її матеріалу – зміна в часі фізико-механічних характеристик матеріалу. А тому розраховуючи залишковий ресурс дисків парових турбін слід враховувати деградацію їх матеріалів, тобто зміну механічних, міцнісних та втомних характеристик з часом експлуатації. На даний час в літературі наведено низку експериментальних досліджень деградації матеріалів елементів парових турбін, зокрема зміни з часом характеристик статичної та циклічної тріщиностійкості матеріалів (див., наприклад, [1]). Однак теоретичних методів оцінки залишкового ресурсу дисків парових турбін, які б враховували деградацію їх матеріалу в процесі експлуатації є недостатньо.

Нижче запропоновано методику визначення залишкового ресурсу дисків парових турбін з урахуванням деградації їх матеріалу, які враховують попередні напрацювання [2, 3] у моделюванні росту тріщини за дії циклічного навантаження. Суть її полягає в наступному.

**Постановка задачі і метод її розв'язання.** Розглянемо плоский диск зі сталі 20X13 парової турбіни внутрішнього і зовнішнього радіусів відповідно  $r_1$ ,  $r_2$  і сталої товщини  $h$ , який має питому масу  $\rho$  та обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  (рис. 1). В диску наявна втомна тріщина початкової довжини  $l_0$ . Вважається, що внаслідок пульсації пари, пусків-зупинок турбіни і т.д. колесо турбіни піддане дії змінним навантаженням, які для спрощення математичних розрахунків замінюємо циклічними. У результаті довготривалої експлуатації за цих умов матеріал труби деградує одночасно з поширенням тріщини. Задача полягає у визначенні кількості циклів

навантаження  $N = N_*$  за якої матеріал деградує, а тріщина підросте до критичного розміру  $l = l_*$ .

Для розв'язання даної задачі застосовуємо перший закон термодинаміки, тобто баланс енергетичних складових, як це наведено у працях [2, 3]. Як свідчать експериментальні дані [1], зміна втомних характеристик матеріалу в результаті його деградації буде незначна, тому, як і в праці [4], обмежимося малими величинами цієї зміни. На основі цього розв'язок задачі зведеться до розв'язання математичних співвідношень

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\alpha(N)[(1-R)^4 \cdot K_{\text{Imax}}^4(l, p) - K_{\text{th}}^4(N)]}{[K_{\text{fс}}^2(N) - K_{\text{Imax}}^2(l, p)]} \quad (1)$$

$$N = 0, l(0) = l_0; \quad N = N_*, l(N_*) = l_*, \quad (2)$$

де  $N$  – кількість циклів навантаження;  $N_*$  – критичне значення кількості циклів навантаження (залишковий ресурс);  $l$  – довжина тріщини;  $K_{\text{fс}}$ ,  $K_{\text{th}}$  – верхнє і нижнє порогові значення циклічної тріщиностійкості матеріалу, відповідно;  $R$  – коефіцієнт асиметрії циклу навантаження;  $\alpha$  – характеристика втомного руйнування;  $K_{\text{Imax}}$  – максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень у циклі;  $p$  – параметр навантаження.

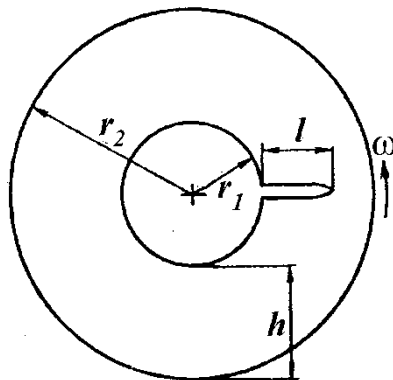


Рис. 1. Кільцевий диск парової турбіни.

Так як зміна величин  $\alpha(N)$ ,  $K_{\text{fс}}(N)$ ,  $K_{\text{th}}(N)$  в часі (кількість циклів навантаження) є незначною, то на основі експериментальних даних циклічної тріщиностійкості сталі 20Х13 у вихідному стані та після  $3 \cdot 10^5$  год її експлуатації (див. рис. 2) [1] їх наближено можна подати лінійною залежністю від зміни кількості циклів навантаження

$$\alpha(N) = 7,25 \cdot 10^{-16} N + 4,6 \cdot 10^{-10}; \quad K_{\text{fс}}(N) = 40 - 6,44N; \quad K_{\text{th}}(N) = 7,8 - 1,45N. \quad (3)$$

Використовуючи співвідношення (3), рівняння (1) запишемо у вигляді

$$\frac{dl}{dN} = \frac{(7,25 \cdot 10^{-16} N + 4,6 \cdot 10^{-10}) \cdot [0,8145 K_{\text{Imax}}^4(l, p) - (7,8 - 1,45N)^4]}{[1600 - 515,2N + 41,47N^2 - K_{\text{Imax}}^2(l, p)]}, \quad (4)$$

$$N = 0, l(0) = l_0; \quad N = N_*, l(N_*) = l_*; \quad l_* = 4,05 p^{-2} K_{\text{fс}}^2(N_*). \quad (5)$$

Тут  $K_{\text{Imax}}(l, p) = 0,25 \sqrt{\pi l} p \frac{1,1215 \sqrt{1-\varepsilon}}{\sqrt{1+0,8460\varepsilon}} \left( 0,0948 + \frac{0,9052}{\sqrt[4]{1-\varepsilon}} \right)^4$ ,  $\varepsilon = l/h$ .

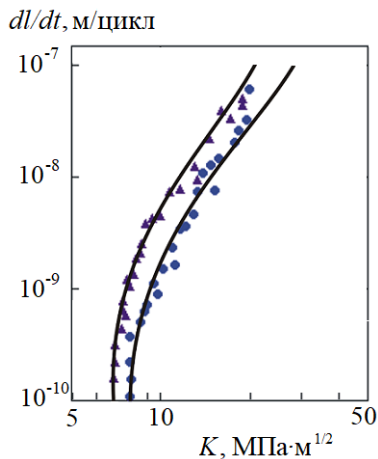


Рис. 2. Кінетичні діаграми втомного руйнування сталі 20X13 у вихідному стані (●) та після  $3 \cdot 10^5$  год її експлуатації (▲): ●, ▲ – експериментальні дані [1]; — за співвідношенням (1).

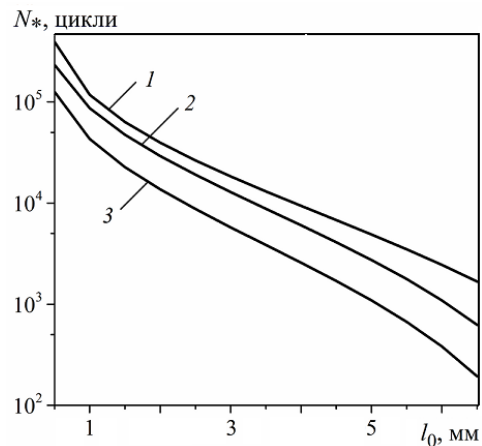


Рис. 3. Залежність залишкового ресурсу диска парової турбіни зі сталі 20X13: 1 – вихідний матеріал; 2 – деградований в процесі експлуатації; 3 – деградований за час експлуатації.

Застосування математичної моделі (4), (5) продемонстровано на прикладі розрахунку залишкового ресурсу диска парової турбіни, коли він обертається зі швидкістю 3000 об/хв., а за його навантаження проходить 50 пульсацій на добу. Математичну задачу (4), (5) розв'язано чисельно. При цьому побудовано (див. рис. 3) залежність залишкової довговічності  $N_*$  диска парової турбіни від початкової довжини тріщини (крива 2) з урахуванням деградації матеріалу під час експлуатації. Водночас на рис. 3 зображені залежності залишкової довговічності диска від початкової довжини тріщини, коли матеріал у вихідному стані (крива 1) і після  $3 \cdot 10^5$  год експлуатації диска (крива 3). При цьому характеристики матеріалу у вихідному стані і після експлуатації визначали з порівняння теоретичних (1) та експериментальних результатів втомного руйнування сталі 20X13 [1] (див. рис. 2). Порівняння даних кривих (див. рис. 3) свідчить в користь коректності запропонованого тут підходу, зокрема уточнює залишковий ресурс колеса турбіни у бік збільшення від випадку повністю деградованого матеріалу, а також вказує на недопустимість розрахунків залишкового ресурсу на основі даних вихідного матеріалу.

**Висновки.** Запропоновано розрахунковий метод для оцінювання залишкового ресурсу дисків парових турбін з наявними в них тріщинами за дії циклічного навантаження з урахуванням деградації в часі їх матеріалів. Розраховано залишковий ресурс диска парової турбіни зі сталі 20X13.

### Література

1. Никифорчин Г. М., Ткачук Ю. М., Студент О. З. Експлуатаційна деградація сталі 20X13 лопаток парових турбін ТЕС. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2011. № 4. С. 28–35.
2. Andreikiv O. E., Dolins'ka I. Ya., Yavors'ka N. V. Estimation of the periods of initiation and propagation of creep-fatigue cracks in thin-walled structural elements. Materials Science. 2011. 47. No 3. P. 273–283.
3. Андрейків О. Є., Кіт М. Б. Визначення залишкової довговічності тонкостінних елементів конструкцій при двохосьовому навантаженні. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2006. №1. С. 11–16.
4. Розрахунок залишкового ресурсу магістральних трубопроводів з урахуванням дії середовища і деградації їх матеріалів / Андрейків О. Є., Штойко І. П., Райтер О. К., Матвіїв Ю. Я. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2018. № 5. С. 33–39.