

УДК 621.165.62

ПРОДОВЖЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТУРБОУСТАНОВКИ K-1000-60/3000 ПІСЛЯ ПОШКОДЖЕННЯ РОТОРА ЦВТ

¹ **О. Ю. Черноусенко**,
д-р техн. наук
chernousenko20a@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1427-8068

¹ **В. А. Пешко**,
канд. техн. наук
vapeshko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0610-1403

² **О. П. Усатий**, д-р техн. наук
alpaus@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8568-5007

¹ Національний технічний
університет України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря
Сікорського»
03056, Україна, м. Київ-56,
пр. Перемоги, 37

² Національний технічний
університет «Харківський
політехнічний інститут»
61002, Україна, м. Харків,
вул. Кирпичова, 2

Нині, коли на території України ведуться широкомасштабні бойові дії, включення вітчизняної енергосистеми до європейської є надійною складовою забезпечення електричною енергією енергетичного ринку країни. Проте передумовою сталої роботи енергетичного сектору України, на переконання фахівців, все-таки вважається безперебійна й безпечна робота атомних електростанцій. Мета публікації полягає в оцінці пошкоджуваності, індивідуального ресурсу ротора циліндра високого тиску (ЦВТ) турбіни K-1000-60/3000 енергоблоку ЛМЗ після пошкодження лопаток для подовження експлуатації енергоблоку в умовах напруженого стану роботи енергосистеми. Одним із найбільш ефективних шляхів часткового вирішення проблеми заміщення генеруючих потужностей є продовження строків експлуатації енергоблоків АЕС після завершення проектного строку експлуатації за умови виконання норм ядерної та радіаційної безпеки. Перегляд раніше встановлених строків служби енергетичного обладнання енергоблоків АЕС передбачає оцінку залишкового ресурсу енергетичного обладнання згідно з нормативними документами. Після аварійного пошкодження робочих лопаток останнього ступеня ротора ЦВТ турбіни K-1000-60/3000 енергоблоку ЛМЗ виникла необхідність у вивченні циклічної та статичної пошкоджуваності, індивідуального залишкового ресурсу ротора ЦВТ. У процесі досягнення поставленої мети були проведені дослідження для трьох варіантів конструкцій: вихідний варіант (п'ять ступенів ротора ЦВТ), варіант без робочих лопаток останнього ступеня і варіант без п'ятого ступеня (з чотирма першими ступенями). Проведений розрахунок ресурсних показників ротора у виконанні ЦВТ без робочих лопаток 5-го ступеня показує, що накопичене в основному металі статичне пошкодження складає 52%, циклічне пошкодження – це 5% при застосуванні нормативних запасів міцності по числу циклів і по деформаціях на рівні $n_N=10$ і $n_e=1,5$ згідно з рекомендаціями СОУ-Н МЕН 40.1-21677681-52:2011. Таким чином, сумарне пошкодження основного металу складає 57%, що встановлює залишковий ресурс ротора ЦВТ на рівні 88,4 тисяч годин. Проведений розрахунок ресурсних показників ротора у виконанні ЦВТ без всього 5-го ступеня показує, що накопичене в основному металі статичне пошкодження становить 52%, циклічне пошкодження – 6% при застосуванні нормативних запасів міцності по числу циклів та по деформаціях на вищезазначеному рівні. Сумарне пошкодження основного металу складає 58%, що визначає залишковий ресурс ротора ЦВТ на рівні 85,6 тисяч годин.

Ключові слова: атомна електростанція, парова турбіна, K-1000-60/3000, циліндр високого тиску, ротор циліндра високого тиску, потужність, тиск, температура, втрата, парковий ресурс, нестационарна теплопровідність, тепловий стан, напружено-деформований стан, малоциклова втома, довготривала міцність, залишковий ресурс, допустиме число пусків.

Вступ

В умовах сьогодення, коли на території нашої держави ведуться широкомасштабні бойові дії, включення енергосистеми України до європейської є надійною складовою забезпечення електричною енергією енергетичного ринку країни. Проте варто пам'ятати, що генерація електроенергії вітчизняними АЕС в загальному балансі споживання складала до початку війни близько 50%, а отже, передумовою сталої роботи енергетичного сектору України виступає безперебійна й безпечна робота АЕС. Крім того, надійність роботи ядерної енергетики на тлі значного вичерпання ресурсу енергетичного обладнання й дефіциту органічного палива на теплових електростанціях позитивно впливає на соціально-економічний

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.
© О. Ю. Черноусенко, В. А. Пешко, О. П. Усатий, 2024

розвиток України. На поточному етапі напрацювання значної частки паротурбінного устаткування АЕС наближається до свого паркового значення. Продовження їх експлуатації понад парковий ресурс потребує проведення повірного розрахунку залишкового ресурсу його основних елементів.

Згідно з Програмою продовження строків експлуатації енергетичного обладнання АЕС України з п'ятнадцяти діючих енергоблоків продовжено строк експлуатації на 10–20 років на дванадцяти енергоблоках. Досвід проведених робіт показав, що питомі фінансові витрати на виконання вимог нормативних документів, які забезпечують можливість отримання ліцензії на експлуатацію енергоблоків у період додаткового строку служби, значно менші за витрати на будівництво нових енергоблоків [1].

Одним із найбільш ефективних шляхів часткового вирішення проблеми заміщення генеруючих потужностей є продовження строків експлуатації енергоблоків АЕС після завершення проектного строку за умови виконання норм ядерної та радіаційної безпеки. Перегляд раніше встановлених строків служби енергетичного обладнання енергоблоків АЕС передбачає оцінку залишкового ресурсу енергетичного обладнання згідно з нормативними документами [2–5]. У разі виникнення аварійних ситуацій проводиться повірний розрахунок пошкодженого енергетичного обладнання відповідно до нормативних документів [3, 4], що визначають порядок та періодичність контролю, а також допустимість продовження строку експлуатації енергетичного устаткування.

Набутий досвід в експлуатації однотипного устаткування на різних електростанціях дозволяє виконувати продовження допустимого строку роботи турбінного обладнання понад парковий ресурс.

Розрахунок індивідуального ресурсу ротора циліндра високого тиску (ЦВТ) турбіни К-1000-60/3000 проводиться із застосуванням комплексного підходу, що передбачає врахування результатів неруйнівного контролю металу з повірними розрахунками на міцність і довговічність, а також детальне вивчення індивідуальної історії експлуатації блоку. На етапі контролю стану металу енергетичного обладнання, що пропрацювало тривалий час додатково, слід вивчити можливість вибору раціональних коефіцієнтів запасу міцності металу, що можливо при проведенні спеціальних експериментальних досліджень.

Як свідчить світовий досвід, продовження строків експлуатації енергоблоків АЕС після завершення проектного строку експлуатації є потенційно можливим, а за умови виконання норм ядерної та радіаційної безпеки – одним з найбільш ефективних шляхів для часткового вирішення проблеми заміщення генеруючих потужностей [6–8].

Мета роботи

Метою роботи є оцінка пошкоджуваності, індивідуального ресурсу ротора ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 енергоблоку ЛМЗ після пошкодження лопаток для подовження експлуатації енергоблоку в умовах напруженого стану роботи енергосистеми. Для досягнення поставленої мети була розроблена відповідна методика, удосконалена математична модель теплового та напружено-деформованого стану ротора високого тиску потужної парової турбіни і проведені відповідні дослідження.

Дослідження індивідуального ресурсу роторів ЦВТ парових турбін АЕС

При вивченні індивідуального ресурсу роторів ЦВТ парових турбін АЕС застосовано комплексний підхід задля встановлення індивідуального ресурсу парових турбін і можливості продовження експлуатації енергетичного обладнання, який містить розрахункове дослідження як індивідуального ресурсу й допустимої кількості пусків з різних теплових станів при циклічному навантаженні ротора ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000, так і індивідуального напрацювання при статичному навантаженні ротора ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000; оцінку можливості подальшого продовження експлуатації понад парковий ресурс ротора ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000. Розрахункове дослідження ресурсних показників ротора ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000 блока 1000 МВт під час експлуатації виконувалося згідно з нормативними документами [3–5].

Метою аналізу технічної (експлуатаційної, конструкторської і ремонтної) документації обстежуваного устаткування є виявлення елементів його конструкцій і ділянок, що працюють у найбільш напружених умовах і/чи які зазнають впливу негативних факторів, дія яких може привести до аварій чи відмов у роботі; виявлення режимів, за яких можливі зміни у структурі і властивостях матеріалів; визначення динаміки розвитку дефектів; розробка програми експертного обстеження.

Управління старінням устаткування енергоблоку здійснюється на всіх етапах життєвого циклу і передбачає розробку станційних програм управління старінням елементів і конструкцій енергоблоку; формування переліку елементів і конструкцій енергоблоку, які підлягають управлінню старінням; виявлення і вивчення процесів старіння елементів і конструкцій енергоблоку (розуміння старіння); вжиття заходів із моніторингу процесів старіння елементів і конструкцій енергоблоку (контроль металу); оцінку поточного технічного стану елементів енергетичного обладнання й прогнозування його заміни внаслідок старіння; реалізацію заходів щодо пом'якшення деградації; оптимізацію програм технічного обслуговування, контролю і ремонту енергетичного обладнання енергоблоку електростанції; впровадження додаткових засобів контролю й діагностики поточного технічного стану елементів і систем енергоблоку електростанції; аналіз ресурсу і показників надійності конструкцій, систем і елементів, виконання робіт з перепризначення ресурсу елементів, заміна тих, які досягли граничного технічного стану; розробку технічних і організаційних заходів з модернізації та реконструкції енергетичного обладнання енергоблоку електростанції, а також мінімізації деградації елементів й управління їх старінням; безперервне вдосконалення програми управління старінням на основі зворотного зв'язку між досвідом експлуатації і дослідженнями, а також результатами самооцінки та експертних оцінок (розробка та вжиття додаткових заходів із моніторингу й пом'якшення деградації); документування діяльності, створення й супроводження бази даних технічного стану елементів енергетичного обладнання і виявлених дефектів на базі узагальнення інформації про виготовлення, експлуатацію, технічне обслуговування, ремонти тощо.

При оцінці залишкового ресурсу елементів парових турбін великої потужності, що відпрацювали парковий ресурс, необхідно виконувати повірочний міцнісний розрахунок для елементів енергетичного обладнання, в яких відбувається змінення структури і властивостей металу, накопичується пошкоджуваність від повзучості і малоциклової втоми [4].

При оцінці залишкового ресурсу роторів парових турбін АЕС виконується розрахункове дослідження теплового, напружено-деформованого стану, малоциклової втоми, статичної пошкоджуваності й індивідуального ресурсу з урахуванням як фактичних даних про режими експлуатації парової турбіни великої потужності АЕС, так і властивостей металу її основних елементів, ремонтних відновлювальних заходів щодо основних елементів обладнання [8–10].

Ротор ЦВТ, що розглядається у статті, на енергоблок АЕС було поставлено виробником турбоустановки у 1995 році. Турбоустановка К-1000-60/3000 експлуатується на енергоблоці АЕС відповідно до технічних вимог заводу-виробника. Ресурс згідно з технічними умовами заводу-виробника складає 30 років.

Напрацювання енергоблоку АЕС становило 122 тисячі годин при сумарній кількості пусків 52. При цьому аналогічні паркові показники дорівнюють 30 рокам і 600 пускам. За весь час експлуатації енергоблоку кількість пусків із холодного й близьких до нього теплових станів складає 27, з гарячих – 25, тобто енергоблок експлуатувався в базовому режимі.

Дослідження ресурсних показників ротора ЦВТ турбіни К-1000-60/3000

Після аварійного пошкодження робочих лопаток останнього ступеня ротора ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 енергоблоку ЛМЗ виникла необхідність дослідження циклічної та статичної пошкоджуваності, індивідуального залишкового ресурсу ротора ЦВТ. У процесі досягнення поставленої мети проведено дослідження для трьох варіантів конструкцій: вихідний варіант (п'ять ступенів ротора ЦВТ), варіант без робочих лопаток останнього ступеня і варіант без п'ятого ступеня (з чотирма першими ступенями).

Математична модель розрахунку залишкового ресурсу ротора ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 енергоблоку АЕС

Представлені вище дослідження теплового й напружено-деформованого станів ротора ЦВТ енергоблоку АЕС показали, що найбільш навантаженими областями ротора ЦВТ є осьовий канал в області четвертого ступеня, галтельні заокруглення ступенів тиску та їх розвантажувальні отвори.

Розрахунок накопиченої малоциклової втоми в роторі високого тиску виконано відповідно до нормативних документів [4].

Амплітуда інтенсивності деформації встановлювалася за значеннями інтенсивності деформації протягом циклу навантаження

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2} (\varepsilon_i^{\max} - \varepsilon_i^{\min}),$$

де ε_i^{\max} , ε_i^{\min} – максимальне і мінімальне значення інтенсивності деформації в циклі навантаження.

Кількість циклів навантаження до появи тріщини визначалося за експериментальними кривими малоциклової втоми, отриманими за результатами випробувань зразків на розтяг-стиснення при жорсткому симетричному циклі і постійній температурі. Допустима кількість циклів пуску приймалася за експериментальними кривими, меншою з двох значень

$$N^{\text{доп}} = \min \left\{ \frac{N_1}{n_N}; N_2 \right\},$$

де N_1 , N_2 – кількість циклів навантаження, що відповідають на кривих малоциклової втоми амплітудам інтенсивності деформації ε_a та $n_\varepsilon \cdot \varepsilon_a$ відповідно; n_N , n_ε – коефіцієнт запасу міцності по числу циклів і деформації.

Ключовою особливістю даної розрахункової моделі є те, що експериментальні криві малоциклової втоми для сталі 30ХНЗМ1ФА, з якої виготовлено ротор ЦВТ турбіни К-1000-60/3000, у нормативних документах відсутні. Тому згідно з рекомендаціями РТМ 108.021.103-85 пропонується вести розрахунок допустимої кількості циклів за кореляційними залежностями малоциклової втоми [8, 9]

$$N_{1,2} = \left[\frac{\frac{1}{4} \ln \frac{100}{100 - \psi_{\text{дм}}}}{C \cdot \left(n_{1,2} \cdot \varepsilon_a^{\text{нр}} + \frac{1 - 2 \cdot \nu}{\varepsilon \cdot E} \cdot \sigma_i \right)} \right]^{0,6}; \quad N^{\text{доп}} = \left[1 - \left| \frac{1,25 \cdot \sigma^c}{\sigma_{\text{дм}}} \right|^q \right] \cdot \min \left\{ \frac{N_1}{n_N}; N_2 \right\},$$

де σ^c – інтенсивність напружень у стані сталі повзучості; $\sigma_{\text{дм}}$ – межа довготривалої міцності; q – показник степені в рівнянні довготривалої міцності; $\psi_{\text{дм}}$ – довготривала пластичність, що визначається за медіанними значеннями для кожного рівня температур $\theta_1 \dots \theta_2$; θ_1 і θ_2 – температури, які відповідають максимальній ε_i^{\max} і мінімальній ε_i^{\min} інтенсивності деформації протягом циклу відповідно; C – коефіцієнт поточної кількості циклів

$$C = \begin{cases} 1, & \text{при } N \leq 10^4 \\ \frac{\bar{K}_T}{K_T}, & \text{при } N > 10^4; \end{cases}$$

\bar{K}_T – ефективний коефіцієнт інтенсивності напружень

$$\bar{K}_T = 1 + p(K_T - 1);$$

p – коефіцієнт чутливості матеріалу до концентрації напружень; $n_1=1$; $n_2=n_\varepsilon$ – коефіцієнти запасу міцності; $\varepsilon_a^{\text{нр}}$ – приведена до симетричного циклу навантаження амплітуда інтенсивності деформації

$$\varepsilon_a^{\text{нр}} = \frac{1 + \nu}{1,5 \cdot E} (C \cdot \sigma_a + \min(\sigma_{-1}; \sigma_{\text{дм}}) - \bar{\sigma}_N);$$

ν – коефіцієнт Пуассона; E – температурно залежний модуль Юнга; $\bar{\sigma}_N$ – межа втоми при несиметричному циклі навантаження

$$\bar{\sigma}_N = \min \{ \sigma_N; \sigma_N^c \};$$

σ_N – межа втоми сталі за певної асиметрії навантаження, характерної для даного пускового режиму

$$\sigma_N = \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b} \cdot \frac{1+r}{1-r}};$$

σ_N^c – межа втоми сталі при несиметричному навантаженні і сталій повзучості

$$\sigma_N^c = \begin{cases} \min \left\{ \frac{\sigma_a \cdot \sigma_{\text{дм}}(T_1)}{|\sigma_{\text{max}}|}; \frac{\sigma_a \cdot \sigma_{\text{дм}}(T_2)}{|\sigma_{\text{max}} - 2 \cdot \sigma_a|} \right\}, \text{ при } \sigma_a < \bar{\sigma}_{0,2}^{\text{п}}; \\ \min \{ \sigma_{\text{дм}}(T_1); \sigma_{\text{дм}}(T_2) \}, \text{ при } \sigma_a \geq \bar{\sigma}_{0,2}^{\text{п}} \end{cases};$$

r – коефіцієнт асиметрії циклу навантаження

$$r = \begin{cases} \max \left\{ \frac{\sigma^{\text{max}} - 2 \cdot \sigma_a}{\sigma^{\text{max}}}; -1 \right\}, \text{ при } \sigma^{\text{max}} > 0; \\ -1, \text{ при } \sigma^{\text{max}} \leq 0 \end{cases};$$

$\sigma_{\text{дм}}(\theta_1), \sigma_{\text{дм}}(\theta_2)$ – межі довготривалої міцності, що відповідають температурам θ_1 і θ_2 ; σ^{max} – максимальне напруження в циклі; σ_{-1} – межа втоми сталі при симетричному навантаженні; σ_b – межа міцності сталі на розтяг; σ_a – амплітуда інтенсивності напружень $\sigma_a = \frac{\sigma^{\text{max}} - \sigma^{\text{min}}}{2}$; $\bar{\sigma}_{0,2}^{\text{п}}$ – середнє значення зведених до розрахункової температури циклічних меж текучості матеріалу за температур θ_1 і θ_2 .

Сумарне пошкодження, накопичене в металі ротора від сумісної дії статичних навантажень при q' різних типів сталих режимів і циклічних навантажень при k' різних типів змінних режимів, визначається з використанням гіпотези Пальмгрена – Майнера за допомогою рівняння виду

$$\Pi' = \Pi'_{\text{ст}} + \Pi'_{\text{ц}} = \sum_{j=1}^{q'} \frac{t'_j}{t'_{pj}} + \sum_{l=1}^{k'} \frac{n'_l}{N'_{pl}},$$

де $\Pi'_{\text{ст}}, \Pi'_{\text{ц}}$ – статичне й циклічне пошкодження, накопичене в досліджуваній зоні ротора на момент розрахунку ресурсних показників; t'_j – час роботи на j -ому сталому режимі за температури металу T_j й еквівалентних місцевих напруженнях повзучості $(\sigma'_{ej})^{\text{max}}$; t'_{pj} – час до настання граничного стану під дією еквівалентних місцевих напружень повзучості $(\sigma'_{ej})^{\text{max}}$ при температурі металу T_j ; n'_l – кількість циклів l -го типу; $N'_{pl} = N^{\text{оп}}$ – кількість циклів до появи втомних тріщин під дією тільки циклічних навантажень l -го типу; q' – кількість різних типів сталих режимів, на момент оцінки, при температурі металу T_j і сталих еквівалентних місцевих напруженнях повзучості $(\sigma'_{ej})^{\text{max}}$; k' – кількість різних типів циклів, на момент оцінки, з різними амплітудами приведених інтенсивності напружень $\Delta\sigma'_l$, або амплітуд деформацій ε'_{al} .

Штрихом відмічені всі величини, що стосуються попереднього періоду експлуатації до розрахунку залишкового ресурсу.

Якщо за даними електростанції не відоме розподілення пусків за типами, а відома лише їх загальна кількість n за час до моменту оцінки, то накопичене циклічне пошкодження $\Pi'_{\text{ц}}$ визначається в запас по спрощеній формулі

$$\Pi'_{\text{ц}} = \frac{n}{N_p},$$

де N_p – кількість циклів до появи втомної тріщини, що відповідає найбільш жорсткому режиму (режиму з максимальною амплітудою деформації ε_a).

Залишкове напрацювання до появи тріщини $[G]^{\text{зал}}$ визначається за формулою

$$[G]^{\text{зал}} = \frac{1 - \Pi'}{\Pi''_{\text{пр}}},$$

де $\Pi''_{\text{пр}}$ – прогнозоване на наступний за оцінкою період експлуатації осереднене годинне пошкодження (швидкість вичерпання ресурсу), яке буде накопичуватися в досліджуваній зоні ротора при чергуванні q'' -типів сталих режимів та k'' -типів циклів з різними циклічними навантаженнями. Двома штрихами відмічені всі величини, що відносять до періоду експлуатації після проведення розрахунку і продовження ресурсу.

Розрахунок накопиченого пошкодження та залишкового ресурсу ротора ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 енергоблоку АЕС

Використовуючи дані щодо динаміки зміни інтенсивності напружень у роторі ЦВТ енергоблоку АЕС при пуску з різних теплових станів (рис. 1), для всіх характерних областей встановлено значення амплітуд інтенсивності напружень σ_a , коефіцієнта асиметрії навантаження r тощо. Додатково визначено й інші показники малоциклової втоми, необхідні для розрахунку допустимої кількості циклів пуску з різних теплових станів для всіх конструктивних виконань ЦВТ.

У роторі ЦВТ при розрахунках пошкоджуваності, малоциклової втоми, довготривалої міцності й індивідуального ресурсу обрано 12 характерних областей дослідження, наведених на рис. 1, а саме:

- 1 – осьовий отвір ротора в області 4-го ступеня;
- 2 – хвостове кріплення робочих лопаток 1-го ступеня;
- 3 – галтель 2-го ступеня з боку вихлопу;
- 4 – галтель 3-го ступеня з боку вихлопу;
- 5 – розвантажувальний отвір диску 3-го ступеня;
- 6 – діафрагмове ущільнення 4-го ступеня;
- 7 – розвантажувальний отвір диску 4-го ступеня;
- 8 – діафрагмове ущільнення 5-го ступеня;
- 9 – розвантажувальний отвір диску 5-го ступеня;
- 10 – галтель 5-го ступеня з боку вихлопу;
- 11 – гребні кінцевих ущільнень з боку камери А;
- 12 – вал ротора в області камери В кінцевих ущільнень.

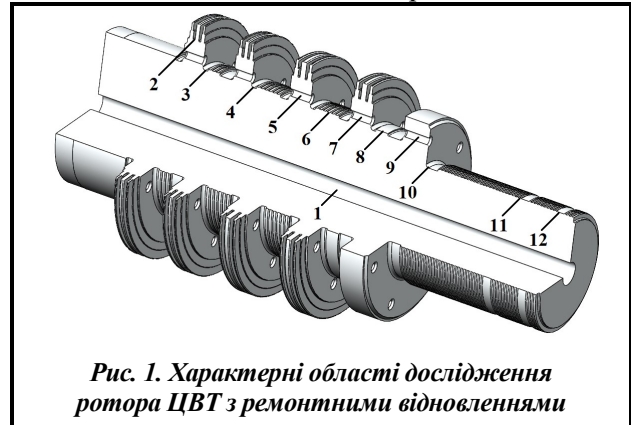


Рис. 1. Характерні області дослідження ротора ЦВТ з ремонтними відновленнями

Найбільш критичними з точки зору інтенсивності напружень і ресурсних показників є точки: 1 – осьовий отвір ротора в області 4-го ступеня тиску; 3 – галтель 2-го ступеня з боку вихлопу; 7 – розвантажувальний отвір диску 4-го ступеня; 8 – діафрагмове ущільнення 5-го ступеня; 10 – галтель 5-го ступеня з боку вихлопу. У зазначених зонах ротору ЦВТ були проведені розрахункові дослідження для всіх типів пуску.

Стосовно наведених даних слід зауважити, що всі представлені межі міцності, втоми й текучості σ_j є температурно залежними t_j . Вони отримані за рахунок аналітичної обробки експериментальних даних щодо дослідження фізико-механічних властивостей сталі 30ХНЗМ1ФА при різних робочих температурах, представлених в [4]. Для апроксимації експериментальних даних застосовано базове рівняння експоненціальної асоціації виду

$$\sigma_j = a \cdot (b - e^{-c \cdot t_j}),$$

де a , b і c – константи, що визначалися за допомогою математичної обробки експериментальних даних.

Аналізуючи наведені дані щодо ресурсних показників малоциклової втоми ротора для різного конструктивного виконання ЦВТ, можна зауважити, що більшість досліджуваних областей зазнає симетричного навантаження протягом циклів пуску. Такими областями є 3 – галтель 2-го ступеня з боку вихлопу; 4 – галтель 3-го ступеня з боку вихлопу, 8 – діафрагмове ущільнення 5-го ступеня та 10 – галтель 5-го ступеня з боку вихлопу, для них коефіцієнт асиметрії $r = -1$. Характерні області 1 – осьовий отвір ротора в області 4-го ступеня тиску і 7 – розвантажувальний отвір диску 4-го ступеня зазнають несиметричного навантаження, для них коефіцієнт асиметрії відрізняється при всіх типах пуску й конструктивного виконання ЦВТ.

Для конструктивного виконання ЦВТ без робочих лопаток 5-го ступеня зі штатним сопловим апаратом при пуску з гарячого стану (ГС) найбільше розтягуюче напруження, якого зазнає ротор ЦВТ, складає $\sigma_{ГС}^{\max} = 267,0$ МПа, а найбільше стискуюче $\sigma_{ГС}^{\min} = -196,0$ МПа. Аналогічно при пуску з холодного стану (ХС) $\sigma_{ХС}^{\max} = 257,0$ МПа, $\sigma_{ХС}^{\min} = -178$ МПа.

Для конструктивного виконання ЦВТ без всього 5-го ступеня при пуску з гарячого стану найбільше розтягуюче напруження, якого зазнає ротор високого тиску, складає $\sigma_{ГС}^{\max} = 299,0$ МПа, а найбільше

стискує $\sigma_{ГС}^{\min} = -206,0$ МПа. Аналогічно при пуску з холодного стану $\sigma_{ХС}^{\max} = 296,0$ МПа, $\sigma_{ХС}^{\min} = -190,0$ МПа.

У зв'язку з досить високим рівнем амплітуд інтенсивності напружень і несиметричністю циклів навантаження області 1 і 7 є зонами, що найбільш суттєво обмежують допустиму кількість циклів пуску з різних теплових станів для всіх трьох конструкцій ЦВТ. Причому при пусках із гарячого стану металу областю, що підлягає найбільш інтенсивному накопиченню циклічного пошкодження, є 7 – зона розвантажувальних отворів у диску 4-го ступеня. Допустима кількість циклів пуску з гарячого стану $N_{ГС}^{\text{доп}}$ для ЦВТ без робочих лопаток 5-го ступеня складає 1061, для ЦВТ без 5-го ступеня – 891.

У той саме час при пусках із холодного стану металу областю, що підлягає найбільш інтенсивному накопиченню циклічного пошкодження, є 1 – зона осьової розточки валу в області під 4-им ступенем тиску. Допустима кількість циклів пуску з холодного стану $N_{ХС}^{\text{доп}}$ для ЦВТ без робочих лопаток 5-го ступеня складає 1219, для ЦВТ без 5-го ступеня – 1050. Результати всіх розрахункових досліджень узагальнені у вигляді ресурсних показників ротора ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 енергоблоку АЕС для різного конструктивного виконання ЦВТ і представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Ресурсні показники ротора для різного конструктивного виконання ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 енергоблоку

Досліджуваний параметр	Позначення, розмірність	ЦВТ без робочих лопаток 5 ступеня	ЦВТ без всього 5 ступеня
Поточне напрацювання енергоблоку	T , годин	122000	
Поточна сумарна кількість пусків	n	52	
Кількість пусків з ГС	$n_{ГС}$	25	
Кількість пусків з ХС	$n_{ХС}$	27	
Коефіцієнти запасу міцності	n_N / n_ϵ	10 / 1,5	
Інтенсивність напружень на номінальному режимі	$\sigma_i^{\text{ном}}$, МПа	185,0	194,0
Амплітуда інтенсивності напружень при ГС	$\sigma_{a, ГС}$, МПа	155,0	167,0
Амплітуда інтенсивності напружень при ХС	$\sigma_{a, ХС}$, МПа	146,0	164,0
Допустимий час роботи	$T^{\text{доп}}$, год.	220000	220000
Допустима кількість пусків з ГС	$N_{ГС}^{\text{доп}}$	1061	891
Допустима кількість пусків з ХС	$N_{ХС}^{\text{доп}}$	1219	1050
Статичне пошкодження	$\Pi'_{ст}$, %	52,0	52,0
Циклічне пошкодження	$\Pi'_{ц}$, %	5,0	6,0
Сумарне пошкодження	Π'_{Σ} , %	57,0	58,0
Залишковий ресурс	$G^{\text{зал}}$, годин	88400	85600

Обговорення результатів роботи

Проведений розрахунок ресурсних показників ротора у виконанні ЦВТ без робочих лопаток 5-го ступеня показує, що накопичене в основному металі статичне й циклічне пошкодження складає $\Pi'_{ст}=52\%$, $\Pi'_{ц}=5\%$ при застосуванні нормативних запасів міцності по кількості циклів і деформаціях на рівні $n_N=10$ і $n_\epsilon=1,5$ згідно з рекомендаціями СОУ-Н МЕН 40.1-21677681-52:2011. Таким чином, сумарне пошкодження основного металу складає $\Pi'_{\Sigma}=57\%$, що встановлює залишковий ресурс ротора високого тиску на рівні 88,4 тисяч годин (табл. 1).

Проведений розрахунок ресурсних показників ротора у виконанні ЦВТ без всього 5-го ступеня показує, що накопичене в основному металі статичне й циклічне пошкодження складає $\Pi'_{ст}=52\%$, $\Pi'_{ц}=6\%$ при застосуванні нормативних запасів міцності по кількості циклів і деформаціях на рівні $n_N=10$ і $n_\epsilon=1,5$ згідно рекомендацій СОУ-Н МЕН 40.1-21677681-52:2011. Таким чином, сумарне пошкодження основного металу складає $\Pi'_{\Sigma}=58\%$, що встановлює залишковий ресурс ротора високого тиску на рівні 85,6 тисяч годин (табл. 1).

Максимальна інтенсивність напружень для варіанта без всього 5-го ступеня у порівнянні з варіантом ЦВТ без робочих лопаток 5-го ступеня збільшилася на 12%.

За результатами проведених розрахунків індивідуальних ресурсних показників ротора ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 для різних конструктивних виконань ЦВТ встановлено, що експлуатація ЦВТ без всього 5-го ступеня призводить до підвищення темпів накопичення пошкодження в основному металі ротора та, як наслідок до зниження його індивідуального ресурсу.

У зв'язку з внесеними змінами до проектної конструкції ротора рекомендується провести уточнюючі розрахунки критичних частот обертання для забезпечення безпечного набору частоти при пускових режимах, виконати балансування ротора ЦВТ. Крім того, з урахуванням пошкоджень корпусу ЦВТ необхідно провести повірочний розрахунок і визначити залишковий ресурсу корпусу ЦВТ з урахуванням наявних пошкоджень у вигляді тріщин у зонах кріплення діафрагм тощо [1].

Якщо експертна комісія, що складається згідно з [3] з представників електричної станції, спеціалізованих та інших організацій, може прийняти допустимий час роботи металу на рівні 220 тисяч годин, то для варіанта **без робочих лопаток 5-го ступеня** накопичене в основному металі статичне й циклічне пошкодження складає $\Pi'_{ст}=52\%$, $\Pi'_{ц}=5\%$ при застосуванні нормативних запасів міцності по кількості циклів і деформаціях на рівні $n_N=10$ і $n_e=1,5$ згідно з рекомендаціями [4]. Таким чином, сумарне пошкодження основного металу складає $\Pi'_{\Sigma}=57\%$, що встановлює залишковий ресурс ротора високого тиску на рівні 88,4 тисяч годин. Це дозволить продовжити експлуатацію ротора ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000 на 50 тисяч годин.

Результати розрахункового дослідження ресурсних характеристик роторів ЦВТ турбін енергоблоків АЕС, що працюють в Україні, свідчать, що малоциклова втома у зв'язку з низькими значеннями температур у парових турбінах АЕС досить мала, тобто розрахована циклічна пошкоджуваність основного металу становила 5–7%. Основний вплив на сумарну пошкоджуваність та індивідуальний ресурс дає статична пошкоджуваність, що виникає при роботі енергоблоку у базовому режимі.

Якщо експертна комісія, що складається згідно з [3] з представників електричної станції, спеціалізованих та інших організацій, може прийняти допустимий час роботи металу на рівні 220 тисяч годин, то для варіанта **без всього 5-го ступеня** накопичене в основному металі статичне й циклічне пошкодження складає $\Pi'_{ст}=52\%$, $\Pi'_{ц}=6\%$ при застосуванні нормативних запасів міцності по кількості циклів і деформаціях на рівні $n_N=10$ і $n_e=1,5$ згідно з рекомендаціями [4]. Таким чином, сумарне пошкодження основного металу складає $\Pi'_{\Sigma}=58\%$, що встановлює залишковий ресурс ротора високого тиску на рівні 85,6 тисяч годин. Це дозволить продовжити експлуатацію ротора ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000 на 50 тисяч годин.

Отже, з точки зору ресурсних показників експлуатація енергоблоку потужністю 1000 МВт без робочих лопаток 5-го ступеня ЦВТ і без всього 5-го ступеня ЦВТ практично однакова. На перший план виходять техніко-економічні показники роботи обладнання. Однак у зв'язку з внесеними змінами до проектної конструкції ротора рекомендується провести уточнюючі розрахунки критичних частот обертання для забезпечення безпечного набору частоти при пускових режимах, виконати балансування ротора ЦВТ. Крім того, з урахуванням пошкоджень корпусу ЦВТ необхідно провести повірочний розрахунок і визначити залишковий ресурс корпусу ЦВТ з урахуванням наявних пошкоджень у вигляді тріщин у зонах кріплення діафрагм тощо.

Висновки

1. Максимальна інтенсивність напружень для варіанта без всього 5-го ступеня у порівнянні з варіантом ЦВТ без робочих лопаток 5-го ступеня збільшилася на 12%.

2. За результатами проведених розрахунків індивідуальних ресурсних показників ротора ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 для різних конструктивних виконань ЦВТ встановлено, що експлуатація ЦВТ без всього 5-го ступеня призводить до підвищення темпів накопичення пошкодження в основному металі ротора та, як наслідок до зниження його індивідуального ресурсу.

3. Висновок щодо можливості застосування результатів звіту для різних рівнів потужності реакторної установки можна зробити після розрахунку проточної частини парової турбіни К-1000-60/3000 енергоблоку АЕС, який необхідно провести зі складанням технічного завдання й обов'язковим визначенням режиму експлуатації, у якому працюватиме парова турбіна К-1000-60/3000 енергоблоку АЕС переважну частину часу протягом року.

4. Якщо експертна комісія, що складається згідно з СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2021 з представників електричної станції, спеціалізованих та інших організацій, може прийняти допустимий час роботи металу на рівні 220 тисяч годин, то для варіанта **без всього 5-го ступеня** сумарне пошкодження основного металу складає $P'_{\Sigma}=58\%$, що встановлює залишковий ресурс ротора ЦВТ на рівні 85,6 тисяч годин, для варіанта **без робочих лопаток 5-го ступеня** накопичене в основному металі сумарне пошкодження основного металу складає $P'_{\Sigma}=57\%$, що встановлює залишковий ресурс ротора ЦВТ на рівні 88,4 тисяч годин. Це дозволить продовжити експлуатацію ротора ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000 на 50 тисяч годин.

Рекомендації

1. У зв'язку з внесеними змінами до проектної конструкції ротора рекомендується провести уточнюючі розрахунки критичних частот обертання для забезпечення безпечного набору частоти при пускових режимах, виконати балансування ротора ЦВТ. Крім того, з урахуванням пошкоджень корпусу ЦВТ необхідно провести повірочний розрахунок і визначити залишковий ресурс корпусу ЦВТ з урахуванням наявних пошкоджень у вигляді тріщин у зонах кріплення діафрагм тощо.

2. Для підвищення надійності елементів турбіни, зменшення теплових навантажень і поліпшення умов експлуатації рекомендується впровадити наступні заходи:

- провести модернізацію системи контролю основних параметрів турбіни з реєстрацією параметрів, що впливають на надійність і ресурс турбіни;
- впровадити системи моніторингу віброактивності турбоагрегату з діагностикою стану елементів валопроводу, у тому числі і на наявність тріщин у роторах;
- дотримуватися графіків-завдань, розроблених заводом-виготовлювачем, і намагатися звести суттєві відхилення до мінімуму;
- впровадити системи контролю й технічної діагностики теплового і напружено-деформованого стану роторів, а також корпусів ЦВТ, стопорних та регулюючих клапанів, що базуються на моделюванні теплового і напружено-деформованого стану обладнання в реальному часі.

3. При кожному наступному плановому продовженні експлуатації для обладнання, що вичерпало парковий ресурс (СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2021), виконувати додаткове розрахункове уточнення індивідуального ресурсу ротора ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000:

- експериментальні дослідження при планово-попереджувальних ремонтах згідно з нормативними документами (неруйнівний контроль металу для виявлення дефектів і експериментальної оцінки утворених пошкоджень, дослідження структури і властивостей металу високотемпературних елементів парової турбіни);
- експериментальні дослідження впливу старіння на зміну фізико-механічних властивостей конструкційних легированих сталей при експлуатаційних температурах для елементів, що перевищили паркове напруження;
- перевірочний розрахунок індивідуального ресурсу енергоблоку з урахуванням фактичних даних про властивості металу і режими експлуатації, змін проектної конструкції при ремонтних відновленнях, особливостей пускових і змінних режимів роботи та інше, а також результатів експериментального дослідження металу, для елементів, що перевищили паркове напруження;
- технічний аудит стану обладнання на поточний момент;
- експертну оцінку стану енергетичного обладнання парової турбіни із зазначенням можливості продовження експлуатації понад парковий ресурс згідно з нормативними документами.

Література

1. Черноусенко О. Ю., Риндюк Д. В., Пешко В. А. Оцінка залишкового ресурсу та подовження експлуатації парових турбін великої потужності (частина 3): монографія для науковців та докторів філософії за спеціальністю 144 «Теплоенергетика». Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2020. 297 с.
2. ГКД 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила (ПТЕ) (в редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.06.2019 № 271): галузевий керівний документ. Київ: ГРІФРЕ, 2003. 599 с.
3. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2021. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція. Офіц. вид. Київ: ГРІФРЕ: Міністерство палива та енергетики України, 2021. 214 с.

4. Визначення розрахункового ресурсу та оцінка живучості роторів і корпусних деталей турбін. Методичні вказівки: СОУ- Н МЕНВ 40.1–21677681– 52:2011 / М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Ю. І. Матюхін, І. І. Мележик, О. В. Пожидаєв. Київ: ОЕП «ГРІФРЕ»: М-во енергетики та вугільної пром-сті України, 2011. 42 с.
5. Металографічні методи дослідження елементів теплоенергетичного устаткування. Положення: СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009. Офіц. вид. Київ: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2009. 69 с.
6. Peshko V., Chernousenko O., Nikulenkova T., Nikulenkov A. Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines. *Propulsion and Power Research*. 2016. Vol. 5. Iss. 4. P. 302–309. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2016.11.008>.
7. Chernousenko O., Butovsky L., Rindyuk D., Granovska O., Moroz O. Analysis of residual operational resource of high-temperature elements in power and industrial equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – Energy-saving technologies and equipment*. 2017. Vol. 1. No. 8 (85). P. 20–26. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92459>.
8. Черноусенко О. Ю., Риндюк Д. В., Пешко В. А. Напружено-деформований стан ротора турбіни К-1000-60/3000 при типових режимах експлуатації. *Вісник НТУ «ХПИ». Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2019. № 3 (1328). С. 4–10. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2019.03.01>.
9. Chernousenko O. Yu., Peshko V. A. Assessment of resource parameters of the extended operation high-pressure rotor of the K-1000-60/3000 turbine. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2019. Vol. 22. No. 4. P. 41–47. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.04.041.14>.
10. Chernousenko O., Nikulenkova T., Peshko V., Nikulenkov A. Approach to impact assessment of the rated power uprate of NPP unit on the service life of the turbine critical elements. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2021. Vol. 22. No. 1. P. 105–116.

Надійшла до редакції 14.08.2023