

# ЗАЛИШКОВИЙ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РЕСУРС КОТЛОАГРЕГАТІВ ЕНЕРГОБЛОКІВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З ПОШКОДЖЕННЯМИ

Р.М. Кушнір, Б.Д. Дробенко, С.Ф. Будз

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН  
України

**Abstract.** The methodology for determination of a stress state of acting boiler units with operational damages to study of a possibility of their further using is considered. It is illustrated on the example of a operating boiler of a power plant. The factors that contributed to the accumulated defectiveness of metal are determined, and recommendations on repair technologies in order to extend the service life of the boiler are developed.

Проблеми забезпечення надійної роботи енергообладнання і подовження термінів його експлуатації належать до найактуальніших у вітчизняній енергетиці. Через обмежене фінансування проблеми оцінювання залишкового ресурсу і придатності обладнання до подальшого використання понад гарантований на момент запуску термін постає надзвичайно гостро, адже значна частина такого обладнання вже вичерпала або майже вичерпала свій парковий ресурс [1], а вартість нового котла для енергоблоку потужністю 200 МВт, наприклад, становить сьогодні близько 250 млн. дол. США [2]. За численних експлуатаційних пошкоджень виникає також потреба в розробленні раціональних технологій ремонту та відновлення елементів енергообладнання з метою подовження термінів їх експлуатації на прогнозований період.

На теплових електростанціях України експлуатується велика кількість енергоблоків різної потужності, зокрема понад сорок блоків потужністю 200 МВт. Практично всі вони оснащені котлоагрегатами барабанного типу. Тому особливе значення у забезпеченні надійності роботи котлоагрегатів відіграють барабани, одні з найнавантажених елементів котлоагрегату.

Барабан котла високого тиску являє собою масивне порожнисте циліндричне тіло діаметром до 2 м, товщиною 0,095-0,115 м і довжиною понад 20 м, закрите сферичними днищами на краях. Вага барабана сягає 130 т. Розрахунковий тиск в барабані – до 15,5 МПа, температура робочого середовища – до 360 градусів.

Барабан виконує роль акумулятивного баку для живильної води, необхідної для заповнення циркуляційних контурів, які не мають пристроїв для примусової циркуляції води в них. У барабані котла, до якого надходить пароводяна емульсія з усіх циркуляційних контурів, відбувається розділення парової і рідкої фаз з утворенням пари, яка прямує до турбіни. Вся трубна система котлоагрегату приєднана до барабана на штуцерах і забезпечує його жорсткість і стійкість.

Котлова вода з барабана по водоопускних трубах поступає в нижні розподільчі колектори екранів, утворених екранними трубами, які приймають тепло пічних газів. Нагріваючись в екранних трубах, вода випаровується і у вигляді парової суміші піднімається до верхніх колекторів екранів і далі вливається в барабан. Так виглядає робочий цикл (див. рис. 1). Тож контур циркуляції котлоагрегату складається з барабана, водоопускних труб, розподільчих колекторів, екранних обігрівачів труб, збірних колекторів пароводяної суміші та паровідвідних труб, які замикають циркуляційний контур на барабан.

Після вичерпання паркового ресурсу котлоагрегату виконують поглиблене діагностування його елементів, вимірюють фактичні розміри окремих деталей і вузлів, досліджують структуру і властивості металу, визначають накопичену пошкодженість в металі та досліджують напружено-деформований стан в елементах котлоагрегату за різних режимів його промислової експлуатації. За результатами досліджень встановлюють індивідуальний ресурс кожного конкретного елемента.

Отже, надійність роботи котлоагрегату забезпечують шляхом розв'язання багатьох різноманітних задач, з-поміж яких оцінка напружено-деформованого стану його окремих вузлів і елементів виходить на перший план. Дані про напружено-деформований стан конструкційних елементів під час експлуатації використовують при прийнятті рішень про подальшу їх експлуатацію чи заміну, а також для оцінки впливу ремонтних заходів на можливість подовження термінів їх експлуатації.

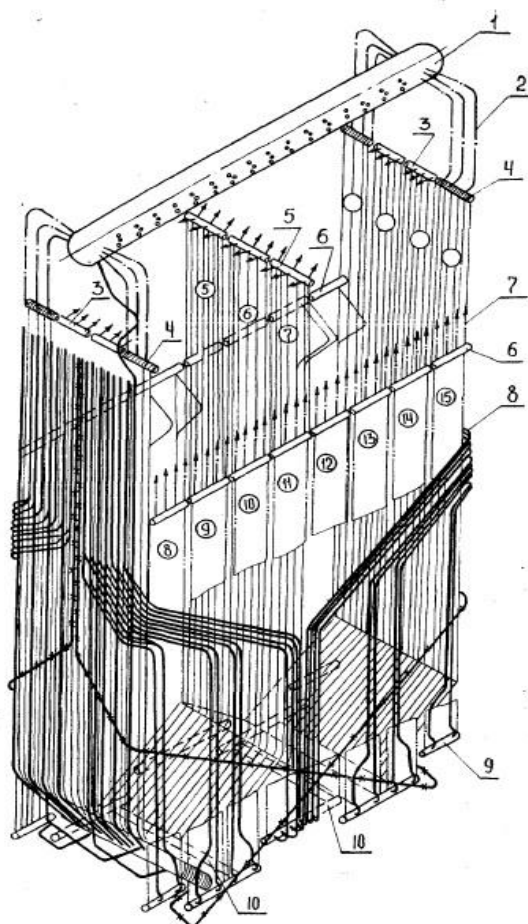


Рис.1. Схема циркуляції котлоагрегату.

- 1 – барабан, 2 – паропідвідні труби з тильного екрану, 3 – верхні колектори тильного екрану, 4 – верхній колектор соляних відсіків, 5 – верхній колектор двостороннього екрану, 6 – верхній колектор бокового екрану, 7 – паровідвідні триби з верхніх колекторів бокового екрану, 8 – водоопускні труби, 9 – колектор нижній, 10 – нижні колектори двостороннього екрану

Оцінювання експлуатаційного ресурсу елементів котлоагрегатів виконують шляхом визначення їх стану за рівнем накопиченої пошкодженості металу (див. напр., [3]). Цей рівень істотно залежить від значень максимальних напружень та амплітуди їх зміни за різних циклічних режимів промислової експлуатації. Визначення максимальних розрахункових напружень в елементах котлоагрегату складної геометричної форми з використанням відомих інженерних розрахункових методик, отриманих в межах моделей стрижнів, балок, пластин і оболонки, часто призводить до істотних похибок, оскільки такі методики зовсім не враховують, або враховують дуже наближено, реальну форму елементів котлоагрегату після ремонтних втручань, форму та локалізацію пошкоджень, зміну властивостей матеріалів конструкції під час її тривалої експлуатації за дії високого тиску, підвищеної температури, повторно змінних циклічних і динамічних навантажень та агресивного робочого середовища. У зв'язку з цим виникає практична потреба у побудові та розвитку методик уточненого розрахунку напруженого стану елементів котлоагрегатів за різних режимів їх експлуатації, які б адекватно враховували реальну геометричну форму окремих елементів,

термочутливість властивостей матеріалу в усьому діапазоні зміни температури та нелінійний характер деформування. Такі методики можна будувати на основі загальних співвідношень нелінійної термомеханіки з використанням сучасних числових методів.

Для кількісного опису термомеханічних процесів в елементах котлоагрегатів за умов їхньої експлуатації використано загальні співвідношення неізотермічної термопружно-пластичності з ізотропно-кінематичним зміцненням. Розроблена на цій основі математична модель [4] дає змогу врахувати нелінійний характер деформування, складну геометричну форму окремих елементів, а також термочутливість властивостей матеріалів. Врахування відзначених вище чинників дає можливість отримувати адекватні оцінки максимальних напружень в елементах котлоагрегатів під час експлуатації, а, отже, і точніше оцінювати залишковий експлуатаційний ресурс котлоагрегатів, а також розробляти рекомендації щодо виконання ремонтних робіт в них з метою продовження їх експлуатації понад парковий ресурс (гарантійний термін на момент інсталяції).

На основі методу скінченних елементів та однокрокових багатопараметричних різницевих алгоритмів розроблено методику чисельного моделювання процесів деформування конструкційних елементів як просторово тривимірних твердих тіл за термосилових навантажень, які відповідають умовам експлуатації, а також створено відповідне програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання процесів деформування елементів котлоагрегатів за різних режимів їх експлуатації, яке дає змогу провести весь процес дослідження у віртуальному просторі за стислі терміни.

З використанням розробленого програмного забезпечення виконано дослідження напружено-деформованого стану елементів котлоагрегатів типу ТП-10 та ТП-100, які вичерпали свій парковий ресурс, за умов, що моделюють режими їх роботи, з метою встановлення можливості продовження їх експлуатації на певні окреслені терміни. Проаналізовано напружено-деформований стан барабанів, штуцерів, колекторів, екранних труб з експлуатаційними пошкодженнями й дефектами. Просторово тривимірний підхід дав можливість врахувати зміну первинної форми елементів котлоагрегатів внаслідок виконаних в них ремонтних робіт.

Аналіз отриманих результатів для барабанів котлів високого тиску показав, що в невеликих областях в околі трубних отворів у водяному об'ємі барабана виникають значні напруження, які можуть перевищувати межу пластичності. У цих місцях локальної концентрації напружень метал барабана працює за умов малоциклової втоми, що може призводити до локального накопичення пошкоджень, утворення і розвитку тріщин. Водночас метал в зонах пластичного деформування зміцнюється. При розвантаженні у ньому виникають стискальні залишкові напруження, і за повторного навантаження деформування відбувається вже винятково у пружній області (вторинні пластичні деформації оберненого знаку не виникають). Тому пошкоджуватись метал може лише при першому досягненні максимальних напружень, тобто за умов циклічного навантаження метал буде пристосовуватись, і умов руйнування від малоциклової втоми не виникатиме.

Отримано кількісну оцінку максимальних напружень в барабанах та визначено їх розмах за цикл режимів стаціонарної експлуатації з урахуванням термоцикування (повільної періодичної зміни температури пароводяної суміші), планового пуску і зупинки, гідравлічних випробувань та аварійної зупинки.

На основі результатів обчислювальних експериментів обґрунтовано технологію виконання ремонтних робіт в елементах котлоагрегату з експлуатаційними пошкодженнями у вигляді тріщин шляхом вибірки металу навколо пошкодженої зони разом з пошкодженням. Запропоновано оптимальні за напруженнями геометричні форми таких технологічних вибірок. Визначено раціональні значення геометричних параметрів вибірок дефектного металу, за яких погіршення міцнісних характеристик барабана є мінімальним.

В результаті дослідження напружено-деформованого стану колекторів з урахуванням деградації матеріалу та експлуатаційних пошкоджень встановлено

причини зародження і поширення тріщин між отворами, які слід пов'язувати зі значними температурними градієнтами в нестационарних режимах різкого охолодження (наприклад, за аварійної зупинки котла чи при відхиленні в режимах охолодження). Отримано практично важливий результат, який показує, що за наявності наскрізної тріщини між отворами (що є найгіршим варіантом з погляду міцності) напружено-деформований стан колектора є таким, що практично виключає непрогнозоване катастрофічне руйнування колектора за відсутності тріщин за межами крайніх отворів (відповідно до кривих деформування зразків металу, що відпрацювали до 296 000 год.). Визначено коефіцієнти інтенсивності напружень для різних глибин тріщини. Отримані результати використано при прийнятті рішень про продовження термінів експлуатації колекторів чи їх заміну.

Досліджено напружено-деформований стан штуцерів з технологічними вибірками дефектів за умов експлуатації. Побудовано функціональні залежності між глибиною, довжиною і шириною вибірки для визначення таких її геометричних параметрів, за яких напруження у штуцерах не перевищують допустимих. Результати цих досліджень використано при прийнятті рішень про заміну штуцерів чи їх бандажування.

В результаті комп'ютерного моделювання процесів деформування екранних труб з експлуатаційними потоншеннями за умов, що моделюють експлуатаційні, побудовано залежності між максимальними напруженнями і геометричними параметрами потоншеної ділянки. На підставі цих залежностей можна визначити мінімальну товщину стінки труб, при якій експлуатаційні напруження не перевищують заданого допустимого рівня. Результати досліджень використано при визначенні ділянок екранних труб, подальша експлуатація яких є небезпечною.

Кількісні оцінки максимальних напружень та амплітуди їх зміни за циклічних режимів експлуатації використано при оцінюванні залишкового ресурсу барабана і його придатності до подальшої експлуатації. В результаті виконаних обчислювальних експериментів визначено швидкості зростання (спадання) тиску і температури робочої суміші під час планових пусків і зупинок, які дають можливість зменшити накопичену пошкоджувальність металу барабана, відповідну цьому режиму, а також встановлено максимальну амплітуду термоцикування, за якої стаціонарний режим експлуатації не робить внеску в накопичувану пошкоджувальність металу, що дозволяє ощадливіше витратити експлуатаційний ресурс елементів котлоагрегату.

Отримано кількісні оцінки залишкового експлуатаційного ресурсу барабанів після виконання відповідних ремонтних робіт і зроблено висновок про можливість їх подальшої експлуатації на конкретні терміни за окреслених режимів їх роботи, враховуючи задовільний стан металу, відсутність недопустимих дефектів, відповідність результатів контролю металу вимогам чинних нормативних документів, а також безаварійну роботу барабанів упродовж усього часу їх експлуатації.

### **Література**

1. Рішення науково-технічної конференції «Діагностування та подовження терміну експлуатації елементів енергетичного обладнання» на Трипільській ТЕС від 27.02.2013. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України.
2. Акімов А. Чорнобильська АЕС, Вуглегірська ТЕС... Хто на черзі? // Дзеркало тижня. – 2013. – № 15.
3. Інструкція СОУ 40.1-21677681-02:2009. Порядок продовження терміну експлуатації барабанів котлів високого тиску. – К.: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». – 2009. – 56 с.
4. Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра. – Т.4: Термомеханіка намагнечуваних електропровідних термочутливих тіл / О.Р. Гачкевич, Б.Д. Дробенко – Львів: СПОЛОМ. – 2010. – 256 с.