

## **ВІДГУК**

на дисертаційну роботу Будза Степана Федоровича

### **"НАУКОВІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ЗБІЛЬШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РЕСУРСУ КОТЛОАГРЕГАТИВ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З ПОШКОДЖЕННЯМИ",**

представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство

#### **Актуальність теми дисертації,**

**її відповідність сучасним напрямкам розвитку науки і техніки.**

#### **Характеристика об'єкту та предмету дослідження**

Для забезпечення надійної експлуатації котлоагрегатів енергоблоків теплоелектростанцій важливого значення набуває адекватне визначення напружено-деформованого стану в елементах котлоагрегатів під час різних режимів їх роботи з урахуванням пошкоджень та деградації матеріалу, а також розроблення раціональних технологій їх ремонту та відновлення з метою їх зміцнення і збільшення залишкового ресурсу.

Актуальність проведення досліджень у зазначених напрямках зумовлена тим, що переважна більшість вітчизняного енергетичного обладнання вичерпала свій ресурс, гарантований на момент запуску.

Дисертаційна робота виконувалась в рамках науково-дослідних тем Інституту прикладних проблем механіки та математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, інноваційних науково-технічних проєктів і низки господарських договірних робіт, спрямованих на розроблення методології подовження термінів експлуатації діючих котлоагрегатів енергоблоків теплоелектростанцій.

Об'єктом дослідження є процеси деформування елементів котлоагрегатів енергоблоків теплоелектростанцій з пошкодженнями при існуючих режимах їх промислової експлуатації. Предметом дослідження є методологія визначення і дослідження міцності та експлуатаційного ресурсу елементів котлоагрегатів з урахуванням деградації матеріалу, експлуатаційних пошкоджень та ремонтних втручань.

#### **Оцінка змісту роботи,**

#### **характеру викладення матеріалу та суті досліджень**

Дисертаційна робота складається з вступу, семи розділів досліджень, висновків, списку використаних літературних джерел та додатків, серед яких

є акти про впровадження результатів. Зміст роботи викладено на 327 стор., з них 299 стор. основного тексту, 28 стор. додатків.

У **вступі** представлено актуальність теми, її зв'язок з науковими програмами, мету та завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення, апробацію та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** наведено опис циркуляційного контуру котлоагрегату та його робочого циклу. Виконано аналіз сучасного стану проблеми забезпечення міцності котлоагрегатів, оцінювання їх залишкового ресурсу і способів ремонту та відновлення. Окреслено внесок вчених в розроблення проблеми дослідження міцності і надійності елементів енергетичних машинних агрегатів.

Проведений аналіз останніх досліджень вказує на необхідність використання уточнених математичних моделей при оцінці міцності та експлуатаційного ресурсу енергетичних машинних агрегатів, оскільки здебільшого використовувані співвідношення, отримані для тіл канонічної форми, переважно для циліндричних оболонок, пластин, балок і стрижнів у припущенні їхнього пружного деформування, може призводити до невірних оцінок їх напружено-деформованого стану, а, отже, і залишкового експлуатаційного ресурсу загалом.

З приведеного аналізу випливає важливість проблеми розроблення наукових основ кількісного опису процесів деформування елементів котлоагрегатів з пошкодженнями з урахуванням деградації металу, часової зміни міцністних і пластичних характеристик металу, конструкційних особливостей і умов експлуатації елементів котлоагрегату, а також методології їх ремонту з метою продовження термінів експлуатації.

У **другому розділі** сформульовано варіант математичної моделі дослідження напружено-деформованого стану елементів котлоагрегату за умов, що відповідають експлуатаційним, та приведено опис методології визначення експлуатаційного ресурсу котлоагрегату шляхом визначення його стану за рівнем накопиченої пошкоджуваності металу під час різних циклічних режимів його промислової експлуатації. Варто особливо зазначити, що за основу прийнято просторово тривимірний підхід, що дає змогу адекватно кількісно описати процеси деформування в елементах котлоагрегату складної форми і структури. Температурне поле в тілі котлоагрегату описує нестационарне рівняння теплопровідності. Для опису напружено-деформованого стану тіла використано варіант теорії неізотермічного термопружно-пластичного перебігу процесу деформування, відповідно до якої цей процес розглядається покроково, де усі теплофізичні та фізико-механічні характеристики залежать від температури.



На основі методу скінченних елементів (для апроксимації шуканих розв'язків за просторовими змінними) і сім'ї різницевих алгоритмів (для їх апроксимації за часом) запропоновано методику числового моделювання термомеханічних процесів в тілі котлоагрегату під час різних циклічних режимів їх експлуатації.

Отримані розподіли параметрів, що характеризують напружений стан елемента котлоагрегату, використовують при оцінюванні його ресурсу. Таку оцінку виконують шляхом визначення стану розглядуваного конструкційного елемента за рівнем накопиченої пошкоджуваності металу, розрахунок якої є базою для визначення додаткового ресурсу, можливостей та умов подальшої його експлуатації.

На основі запропонованої математичної моделі та методики числового дослідження напружено-деформованого стану елементів котлоагрегату під час термосилового навантаження, а також оцінювання їх експлуатаційного ресурсу розроблено відповідне програмне забезпечення, яке дозволяє в стислі терміни провести комп'ютерне моделювання процесів деформування елементів котлоагрегату під час різних режимів його експлуатації, оцінити їх міцність з урахуванням наявних пошкоджень, деградації матеріалу та ремонтних втручань, визначити, у разі потреби, раціональні параметри ремонтних робіт, а також умови, за яких можливе їх подальше використання, оцінити залишковий експлуатаційний ресурс як конкретних елементів, так і котлоагрегату загалом.

У **третьому розділі** приведено результати досліджень міцності конкретних барабанів котлоагрегатів з експлуатаційними пошкодженнями і ремонтними втручаннями під час основних режимів їх роботи, а саме при стаціонарній експлуатації з урахуванням плавного коливання температури робочого середовища, плановому пуску-зупинці, аварійній зупинці та гідравлічних випробуваннях. Показано, що в невеликих околах отворів під час експлуатації має місце значна концентрація напружень, і деформування в околі цих зон носить пружно-пластичний характер. В цих місцях і слід очікувати зародження і поширення тріщин. Як правило, це відбуватиметься в процесі охолодження барабану (під час планової чи аварійної зупинки), а також під час гідравлічних випробувань, коли тиск робочого середовища збільшують на 25% від номінального експлуатаційного. Виявлено засобами комп'ютерного моделювання, що під час циклічних режимів роботи котлоагрегату не виникатиме умов руйнування від малоциклової втоми в околі цих зон. В решті частини барабану руйнування і виникнення пошкоджень малоімовірне.

Обґрунтовано технологію ремонту пошкоджених зон шляхом усунення

частини металу в них разом з дефектами (шляхом ремонтних вибірок). Досліджено вплив різних (за геометричними параметрами та локалізацією) технологічних вибірок металу (на отворах, на тілі барабану в околі отворів) на напружений стан барабану. Показано, що найнебезпечнішими з позицій міцності є вибірки на тілі барабану в околі отворів, а максимальні напруження в зоні вибірки істотно залежать від форми та розмірів вибірки. Визначено раціональні за напруженнями геометричні параметри вибірок, при яких максимальні напруження в околі ремонтних втручань є найменшими з можливих.

**У четвертому розділі** подано результати досліджень напружено-деформованого стану колекторів з тріщиноподібними пошкодженнями на внутрішній поверхні. З використанням обчислювального експерименту показано, що виникнення і поширення тріщин між отворами в колекторі слід пов'язувати зі значними температурними градієнтами по товщині колектора в нестационарних режимах різкого охолодження (під час аварійної зупинки котлоагрегату чи при відхиленні в режимах охолодження). Розглянуто різні глибини тріщин і визначено коефіцієнти інтенсивності напружень в околі вершини тріщини для різних її глибин. Шляхом порівняння визначених теоретичних оцінок з експериментально отриманими критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень для сталей, які відпрацювали до 300000 год., встановлено можливість подальшої експлуатації колекторів з пошкодженнями.

**У п'ятому розділі** приведено результати дослідження напружено-деформованого стану екранних труб з експлуатаційними потоншеннями під дією внутрішнього тиску й температури. Як результат досліджень побудовано залежності між максимальними напруженнями в трубі і геометричними параметрами її потоншеної ділянки. Показано, що на основі встановлених залежностей можна визначити мінімальну товщину труби, при якій максимальні напруження під час експлуатації не перевищують заданого допустимого рівня. Проаналізовано вплив геометричних параметрів зони потоншення на напружений стан труби. Виявлено, що максимальні напруження виникають в місці максимального потоншення труби і при довжинах пошкодженої ділянки понад 10 см вже не залежать від довжини потоншеної зони та однозначно визначаються глибиною пошкодження. Встановлено мінімальну допустиму товщину стінки труби в серединній зоні пошкодженої ділянки з різними коефіцієнтами запасу. Показано, що градієнт температури за товщиною стінки труби при її зовнішньому обігріві спричиняє стискальні напруження у зовнішньому приповерхневому шарі, які понижують рівень розтягувальних напружень від внутрішнього тиску. По



мірі зменшення градієнта температури при виході на стаціонарний режим експлуатації зменшується його вплив на пониження рівня максимальних напружень.

**У шостому розділі** досліджено напружено-деформований стан штуцерів після усунення певного об'єму деградованого чи механічно пошкодженого металу з допомогою ремонтної вибірки. Побудовано залежності між геометричними параметрами вибірок і максимальними напруженнями в штуцерах. Ці залежності дають можливість визначити такі геометричні параметри вибірок, при яких напруження в штуцері не перевищують допустимих. Визначено оптимальні за напруженнями геометричні параметри вибірок. Дослідження напруженого стану штуцера з двома протилежно розташованими вибірками показали, що нема взаємовпливу вибірок на напружений стан, що виникає в їх околі.

**У сьомому розділі** досліджено можливість продовження термінів експлуатації конкретних котлоагрегатів, які працюють при наступних умовах: стаціонарного режиму експлуатації з урахуванням коливання температури робочого середовища навколо номінальної експлуатаційної, режиму планових "пусків-зупинок", гідравлічних випробувань, аварійних зупинок. Показано, що найістотніший внесок в накопичену пошкодженість металу вносить режим планового "пуску-зупинки". Для зменшення внеску цього режиму в накопичувану пошкодженість металу запропоновано зменшити швидкість зростання (спадання) температури робочого середовища до  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ , а в перші хвилини – і до  $1-2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ ; збільшити швидкість зростання (спадання) тиску водно-парової суміші хоча б до  $0,15\text{ МПа}/\text{хв}$ , а краще – до  $0,25\text{ МПа}/\text{хв}$ . Визначено також максимальне значення амплітуди коливання температури водно-парової суміші ( $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) під час стаціонарного режиму експлуатації, при якій внесок цього режиму в накопичувану пошкодженість металу практично відсутній. З використанням розроблених на основі виконаних досліджень рекомендацій відремонтовано ряд діючих котлоагрегатів конкретних теплоелектростанцій і продовжено терміни їх експлуатації на 25000 - 50000 годин.

### **Достовірність, новизна висновків та рекомендацій**

Обґрунтованість і достовірність основних наукових засад і отриманих результатів та висновків забезпечено фізичною обґрунтованістю вихідних положень математичної моделі, суворістю постановки сформульованих задач та методів їх розв'язування, використанням експериментально визначених фізико-механічних характеристик матеріалів, доброю узгодженістю числових розв'язків окремих задач з відомими в літературі аналітичними розв'язками

та дослідженням збіжності отримуваних розв'язків. Достовірність результатів підтверджена їх апробацією в конкретних виробничих умовах. Розроблені рекомендації, методологія дослідження напружено-деформованого стану елементів енергетичного обладнання при різних умовах експлуатації і відповідне програмне забезпечення оцінювання експлуатаційного ресурсу елементів котлоагрегату впроваджені на конкретних теплоелектростанціях. Вони використовуються під час розробки технологій ремонту і відновлення елементів котлоагрегатів, оцінюванні їхнього залишкового ресурсу та прийнятті рішень про продовження чи перепризначення термінів їх експлуатації.

### **Наукова новизна виконаної роботи**

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні важливої науково-технічної проблеми – розроблення наукових засад забезпечення міцності та збільшення експлуатаційного ресурсу діючих котлоагрегатів енергоблоків ТЕС з пошкодженнями на різних режимах експлуатації, а також теоретичних обґрунтувань і пропозицій щодо технології їх ремонту. При цьому вперше:

1) запропоновано на основі просторово тривимірної теорії неізотермічної термопружно-пластичності математичну модель кількісного опису процесів деформування елементів котлоагрегатів при різних умовах експлуатації з урахуванням їх реальної форми та геометричних параметрів експлуатаційних пошкоджень чи змін форми після ремонтних впливів;

2) з використанням запропонованої моделі досліджено напружено-деформований стан конкретних конструкційних елементів з технологічними вибірками циркуляційного корпусу котлоагрегату (барабанів з ремонтними вибірками дефектів, колекторів з пошкодженнями у вигляді тріщин, штуцерів барабанів з вибірками дефектів, екранних труб з експлуатаційними потоншеннями) за умов, що відповідають режимам їх експлуатації;

3) запропоновано раціональні геометричні параметри вибірок в околі отворів і на отворах барабана котлоагрегату, які дають можливість істотно понизити концентрацію напружень в околі зон з ремонтними втручаннями;

4) в рамках запропонованої моделі побудовано залежності між глибиною, шириною і довжиною технологічних вибірок для визначення таких їхніх геометричних параметрів, при яких експлуатаційні напруження в штуцерах не перевищують допустимих;

5) отримано залежності між максимальними напруженнями і геометричними параметрами потоншеної ділянки екранної труби, які

дозволяють визначити мінімально допустиму товщину стінки труби, за якої експлуатаційні напруження не перевищують заданого допустимого рівня;

6) встановлено причини виникнення пошкоджень в колекторах котлоагрегату;

7) розроблено рекомендації щодо коригування окремих режимів експлуатації котлоагрегатів з метою ощадливішого використання їх експлуатаційного ресурсу.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони безпосередньо використані під час розроблення та вдосконалення технології ремонту елементів діючих котлоагрегатів, паспортний ресурс яких вичерпано, а також для кількісної оцінки їх залишкового експлуатаційного ресурсу з урахуванням часової деградації матеріалу, експлуатаційних пошкоджень та ремонтних втручань. Запропонована методика визначення напружено-деформованого стану елементів котлоагрегатів дає можливість виявити ділянки найімовірнішої появи дефектів та з'ясувати причини їх виникнення. На підставі виконаних досліджень розроблено науково-обґрунтовані рекомендації, які використано при вдосконаленні існуючих і створенні нових технологій ремонту елементів котлоагрегатів Бурштинської та Добротвірської ТЕС, які вичерпали свій паспортний ресурс. Розроблені рекомендації покладено в основу прийняття рішень про подальшу експлуатацію зазначених котлоагрегатів.

### **Зауваження по роботі та автореферату**

1) У дисертаційній роботі не наведено чітких критеріїв переходу від використання методу додаткових навантажень до застосування методу змінних параметрів жорсткості під час покрокового проходження пружно-пластичного процесу деформування.

2) При дослідженні міцності елементів котлоагрегату використано критерій Мізеса, але не обговорюються загальні питання розробки критеріїв руйнування з метою обґрунтування їх вибору.

3) Відсутні порівняння результатів з використанням критерію Мізеса та часто використовуюваного для таких задач критерію максимальних напружень.

4) Недостатньо уваги приділено оцінюванню точності отримуваних наближених розв'язків сформульованих задач.



5) Не всі результати досліджень знайшли своє відображення у висновках до розділів і загальних висновках.

Зазначені зауваження не знижують цінності отриманих результатів та не впливають в цілому на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи і не знижують ступеня обґрунтованості та достовірності основних результатів та висновків.

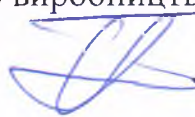
**Висновок про відповідність дисертації вимогам  
"Порядку присудження наукових ступенів"**

1. Дисертаційна робота Будза Степана Федоровича "Наукові засади забезпечення міцності та збільшення експлуатаційного ресурсу котлоагрегатів теплоелектростанцій з пошкодженнями" має актуальну наукову і практичну цінність, полягає у розв'язанні важливої науково-прикладної проблеми і розробленні наукових засад забезпечення міцності деталей, вузлів та механізмів котлоагрегатів енергоблоків ТЕС з метою збільшення їх експлуатаційного ресурсу.

2. Автореферат дисертації повністю відображає зміст дисертації і структурований відповідно до розділів дисертаційної роботи. У 70 наукових працях повністю відображено суть та результати дисертаційної роботи.

3. Дисертаційна робота повністю відповідає існуючим вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук і п. 9, 10, 12 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України, та всім вимогам МОН України до докторських дисертацій, а її автор, Будз Степан Федорович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – «Машинознавство».

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
національний університет  
«Чернігівська політехніка»,  
професор кафедри зварювального виробництва  
і автоматизованого проектування  
будівельних конструкцій



Пилипенко О.І.

Вчений секретар ради  
національного університету  
«Чернігівська політехніка»,  
д. держ. упр., професор



Олійченко І. М.