

ВІДЗИВ
офіційного опонента

„Наукові засади забезпечення міцності та збільшення експлуатаційного ресурсу котлоагрегатів теплоелектростанцій з пошкодженнями”,
поданої до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство

Дисертація стосується великою мірою визначальної, важливої і складної проблеми – забезпечення міцності і збільшення експлуатаційного ресурсу котельних агрегатів енергетичного машинобудування шляхом дослідження напружено-деформованого стану в їх елементах з пошкодженнями за різних режимів їх роботи. На цій основі пропонуються раціональні технології їх ремонту та відновлення цих елементів з метою зміцнення і продовження термінів експлуатації котлоагрегату, який є одним з основних елементів енергоблоку, що виконує функцію приводу турбінного агрегату.

На даний час проведено низку наукових та інженерно-технологічних досліджень, що стосуються збільшення експлуатаційного ресурсу котлоагрегатів і продовження термінів їх промислової експлуатації, запропоновано наближені розрахункові схеми оцінки максимальних напружень в них за умов, що моделюють експлуатаційні. Проте в науковій літературі відсутні роботи, які б комплексно враховували такі великою мірою визначальні особливості поведінки елементів котлоагрегатів, як складну геометричну форму елементів і пошкоджень в них, пружно-пластичний характер деформування, залежність властивостей матеріалів від температури за екстремальних режимів температурного і силового навантаження. Саме тому розробка методології дослідження міцності і експлуатаційного ресурсу елементів котлоагрегатів з урахування перерахованих чинників і вдосконалення на цій основі технологій їх ремонту і відновлення з метою забезпечення необхідних функціональних та міцнісних характеристик та збільшення їх експлуатаційного ресурсу є **актуальною** науковою проблемою.

За своїм **науковим спрямуванням** дослідження по темі дисертації виконувались в рамках наукових тем Інституту прикладних проблем механіки та математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, інноваційних науково-технічних проектів НАН України і господарських договірних робіт, спрямованих на розроблення методології подовження термінів експлуатації діючих котлоагрегатів енергоблоків теплоелектростанцій.

Наукову новизну дисертаційної роботи становлять:

1. Методологія дослідження напружено-деформованого стану елементів котлоагрегатів за умов експлуатації з урахуванням їх реальної форми та геометричних параметрів експлуатаційних пошкоджень чи змін форми після ремонтних впливів, розроблена на основі просторово тривимірної теорії неізотермічної термопружно-пластичності;

2. Дослідження напружено-деформованого стану конкретних конструкційних елементів з технологічними вибірками циркуляційного корпусу котлоагрегату (барабанів з ремонтними вибірками тріщин та тріщиноподібних дефектів, колекторів з пошкодженнями у вигляді тріщин, штуцерів барабанів з

вибірками дефектів, екранних труб з експлуатаційними потоншеннями) за різних циклічних режимів їх інтенсивного термосилового навантаження;

3. Раціональні геометричні форми вибірок в околі отворів і на отворах барабанів котлоагрегатів, які дають можливість суттєво зменшити концентрацію напружень в околі зон з пошкодженнями;

4. Отримані функціональні залежності між глибиною, шириною і довжиною технологічних вибірок в штуцерах, які дозволяють визначити такі геометричні параметри вибірок, за яких експлуатаційні напруження в штуцерах не перевищують допустимих;

5. Побудовані залежності між максимальними напруженнями і параметрами потоншеної ділянки екранної труби, які дають можливість визначити мінімально допустиму товщину труби, за якої експлуатаційні напруження не перевищують заданого допустимого рівня;

6. Причини виникнення пошкоджень в елементах котлоагрегатів, встановлені шляхом комп'ютерного моделювання в рамках запропонованої методології;

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

Достовірність результатів, викладених в роботі, забезпечується фізичною обґрунтованістю вихідних положень математичної моделі, строгістю постановки сформульованих задач і апробованих в літературі 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. Автор ретельно дослідив достовірність розв'язків кожної із розглянутих в роботі задач, використовуючи порівняльний аналіз отримуваних розв'язків на різних за кількістю елементів поділах області на скінченні елементи та часових кроках інтегрування (дискретизації за часом) відповідних рівнянь моделі. Достовірність результатів підтверджена їх апробацією в конкретних виробничих умовах.

Беззаперечним досягненням роботи є створення відповідного програмного забезпечення для комп'ютерного моделювання процесів деформування елементів котлоагрегатів за умов експлуатації, що дає можливість досліджувати тіла як канонічної, так і неканонічної форми. Використаний при цьому апроксимаційний апарат дає можливість враховувати складні залежності властивостей матеріалів від наявних фізико-механічних процесів у доволі широкому температурному діапазоні. Розроблене програмне забезпечення не тільки істотно скорочує процес отримання розв'язків нових задач розглядуваного класу, але й дає можливість у стислі терміни зреалізувати обчислювальний експеримент і на його основі запропонувати раціональні режими ремонту та відновлення елементів котлоагрегатів та визначити умови, за яких можливе продовження термінів їх експлуатації.

Наукова та практична цінність роботи. Запропонована методологія дослідження напружено-деформованого стану елементів котлоагрегатів поглиблює можливості відомих математичних моделей за істотно адекватнішого опису їх механічної поведінки через врахування в комплексі

таких особливостей, як складна геометрична форма елементів та пошкоджень, пружно-пластичний характер деформування, термочутливість характеристик матеріалу тощо. Практичне значення проведеного комплексу досліджень полягає в тому, що його результати безпосередньо використані при розробленні та вдосконаленні технології ремонту елементів діючих котлоагрегатів з пошкодженнями, а також при оцінці їх залишкового експлуатаційного ресурсу з урахуванням часової деградації матеріалу, експлуатаційних пошкоджень та ремонтних втручань. Розроблені в роботі рекомендації покладено в основу прийняття рішень про подальшу експлуатацію конкретних котлоагрегатів. Це вагомий внесок Автора у реалізацію загальнодержавної програми "Ресурс".

Оцінка змісту роботи характеру викладення та суті досліджень. Робота складається зі вступу, семи розділів досліджень, висновків, списку використаних літературних джерел та додатків, серед яких є акти про впровадження результатів.

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

В **першому** розділі наведено опис котлоагрегату та його робочого циклу. Виконано аналіз проблеми оцінювання напружено-деформованого стану елементів котлоагрегатів та їх експлуатаційного ресурсу, а також способів ремонту та відновлення. Окреслено внесок різних вчених в розроблення проблеми дослідження міцності і надійності елементів енергетичних машинних агрегатів. Виконаний аналіз відомих в літературі досліджень вказує на необхідність використання уточнених математичних моделей при оцінці міцності і 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, можуть давати невірні оцінки їх напруженого стану, а, отже, і залишкового експлуатаційного ресурсу загалом. З наведеного аналізу випливає важливість проблеми розроблення наукових основ кількісного опису процесів деформування елементів котлоагрегатів з пошкодженнями за врахування деградації металу, часової зміни міцнісних і пластичних характеристик металу, конструкційних особливостей і умов експлуатації елементів котлоагрегату, а також методології їх ремонту з метою продовження термінів експлуатації.

В **другому** розділі розроблено методологію дослідження напруженого стану елементів котлоагрегату за умов, що відповідають експлуатаційним, і оцінювання експлуатаційного ресурсу котлоагрегату. 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 течіння, відповідно до якої процес деформування розглядається покроково. Усі теплофізичні та фізико-механічні характеристики залежать від температури. Основним методом числового розв'язування сформульованої задачі прийнято метод скінченних елементів в сукупності з різницеvими алгоритмами. Оцінку ресурсу виконують

шляхом визначення стану розглядуваного конструкційного елемента за рівнем накопиченої пошкоджуваності металу, розрахунок якої є базою для визначення додаткового експлуатаційного ресурсу. На основі запропонованої методології дослідження процесів деформування і експлуатаційного ресурсу елементів котлоагрегату розроблено відповідне програмне забезпечення.

В **третьому** розділі приведено результати досліджень міцності конкретних барабанів котлоагрегатів з експлуатаційними пошкодженнями і ремонтними втручаннями за умов стаціонарної експлуатації з урахуванням термоциклування, планового пуску-зупинки, аварійної зупинки та гідравлічних випробувань. Визначено зони концентрації напружень, в околі яких слід очікувати зародження і поширення тріщин, та умови, за яких це відбувається. Обґрунтовано технологію ремонту пошкоджених зон шляхом усунення частини металу в них разом з дефектами. Досліджено вплив різних вибірок металу на напружений стан барабана. Показано, що найнебезпечнішими з позицій міцності є вибірки на тілі барабана в околі отворів, а максимальні напруження в зоні вибірки істотно залежать від форми та розмірів вибірки. Визначено раціональні за напруженнями геометричні параметри вибірок, за яких максимальні напруження в околі ремонтних втручань є найменшими з можливих.

В **четвертому** розділі подано результати досліджень напруженого 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 (за аварійної зупинки котлоагрегату чи при відхиленні в режимах охолодження). Визначено коефіцієнти інтенсивності напружень в околі вершин тріщин 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.

В **п'ятому** розділі наведено результати дослідження напруженого стану екранних труб з експлуатаційними потоншеннями за дії внутрішнього тиску й температури. Отримано залежності між максимальними напруженнями в трубі і геометричними параметрами її потоншеної ділянки. На основі цих 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. 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 сумарних розтягувальних напружень від внутрішнього тиску. В міру зменшення градієнта температури при виході на стаціонарний режим експлуатації зменшується його вплив на пониження рівня максимальних напружень.

В шостому розділі досліджено напружено-деформований стан штуцерів після усунення певного об'єму деградованого металу з допомогою ремонтної вибірки. Побудовано залежності між геометричними параметрами вибірок і максимальними напруженнями. Ці залежності дають можливість визначити такі геометричні параметри вибірок, за яких напруження в штуцері не перевищують допустимих. Визначено оптимальні за напруженнями геометричні параметри вибірок. Досліджено напружений стан штуцера з двома протилежно розташованими вибірками.

У сьомому розділі досліджено можливість продовження термінів експлуатації конкретних котлоагрегатів за стаціонарного режиму експлуатації з урахуванням термоцикування, режиму планових "пусків-зупинок", гідравлічних випробувань та аварійних зупинок. Визначено режими, які роблять найістотніший внесок в накопичену пошкоджуваність металу. Досліджено можливість зменшення внеску різних режимів експлуатації котлоагрегату в накопичувану пошкоджуваність металу і розроблено конкретні рекомендації, які дають можливість істотно зменшити внесок стаціонарного режиму експлуатації та режиму планових "пусків-зупинок" в накопичувану пошкоджуваність металу.

З використанням розроблених на основі виконаних досліджень рекомендацій відремонтовано три діючих котлоагрегати теплоелектростанцій західного регіону і продовжено терміни їх експлуатації на конкретні терміни (від 25000 до 50000 годин).

Щодо роботи можна зробити наступні **зауваження**:

1. Хоча робота і має яскраву практичну спрямованість, у ній не обговорюються питання руйнування елементів конструкцій за розглянутих термосилових навантажень.

2. При дослідженні напруженого стану барабана не враховано, що температура робочого середовища в нижній і у верхній частинах барабана відрізняється.

3. На жаль, отримані залежності між максимальними експлуатаційними напруженнями в елементах котлоагрегату і геометричними параметрами вибірок і пошкоджених зон представлені лише у вигляді графіків. Було б добре подати їх у вигляді простих аналітичних співвідношень чи в табличній формі.

4. У текстах роботи та автореферату трапляються деякі термінологічні неточності та описки.

Однак, зроблені зауваження не заперечують високої оцінки дисертаційної роботи С.Ф. Будза „Наукові засади забезпечення міцності та збільшення експлуатаційного ресурсу котлоагрегатів теплоелектростанцій з пошкодженнями”

У цілому дисертація є завершеною науковою роботою, спрямованою на вирішення важливої науково-прикладної проблеми енергетичного машинобудування – розроблення наукових основ забезпечення міцності, збільшення експлуатаційного ресурсу та продовження термінів експлуатації котлоагрегатів енергоблоків ТЕС з урахуванням пошкоджень, деградації металу та ремонтних втручань.

Результати роботи пройшли дуже широку **апробацію**. Вони доповідались на численних міжнародних наукових конференціях. Результати досліджень

достатньо повно опубліковані у фахових виданнях, в тому числі в 11 працях у виданнях, що включені до наукометричної бази даних Scopus. Кількість публікацій відповідає усім вимогам до докторських дисертацій. Автореферат належно повно й правильно відображає зміст дисертації. Сукупність результатів, що містяться в роботі, можна кваліфікувати як нове, вагоме досягнення у розвитку важливого розділу машинознавства.

Висновок. За обсягом виконаних досліджень, новизною, науковою і практичною значимістю дисертаційна робота С.Ф. Будза „Наукові засади забезпечення міцності та збільшення експлуатаційного ресурсу котлоагрегатів теплоелектростанцій з пошкодженнями ” цілком відповідає всім вимогам МОН України до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 - машинознавство. У ній отримано нові науково-обґрунтовані результати, які в сукупності можна кваліфікувати як вирішення важливої науково-прикладної проблеми енергетичного машинобудування – розроблення наукових основ забезпечення міцності, збільшення експлуатаційного ресурсу та продовження термінів експлуатації котлоагрегатів енергоблоків ТЕС з урахуванням пошкоджень, деградації металу та ремонтних втручань. Автор дисертації за виконаний комплекс досліджень заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.02 - машинознавство.

Офіційний опонент,
член-кореспондент НАН України,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
в.о. завідувача кафедри механіки
Львівського національного університету
імені Івана Франка,
доктор технічних наук, професор



О.Є. Андрейків

