

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Палькова Ігоря Андрійовича

«Термоміцність замкового з'єднання робочих лопаток парової турбіни»,

яка подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Актуальність теми дисертації. Історія розвитку парових турбін - це тенденція підвищення параметрів пари. З початку 60-х років ХХ ст. почався швидкий перехід від докритичних параметрів (13 МПа, 540 °С / 540 °С) до надкритичних (24 МПа, 540 °С / 540 °С). В даний час світова теплоенергетика вже зробила реальні кроки до масового переходу до енергоблоків супернадкритичних параметрів: 30 МПа, 600 °С, а потім 35 МПа, 650 °С. У зарубіжній пресі є повідомлення про роботу над енергоблоком на початкову температуру 720 °С.

При створенні турбоагрегатів великої одиничної потужності особливо важливим є питання забезпечення їх експлуатаційної надійності. У зв'язку з цим серйозна увага має приділятися вивченню працездатності найбільш відповідальних деталей і вузлів турбін зокрема замкових сполучень.

Замкове з'єднання являє собою конструкцію, що працює в умовах складного напруженого стану.

Раніше, при проектуванні турбін меншої потужності, наближеність результатів розрахунку замкових з'єднань і експериментального аналізу їх НДС враховувалася призначенням завищеного запасу міцності. Значне збільшення навантажень, що діють на дане з'єднання потужних турбін, і складні умови їх роботи призвели до значного підвищення напруженості з'єднань. Оскільки вимоги до надійності енергетичного обладнання зростають, важливу роль відіграє уточнена оцінка міцності елементів турбін, для виконання якої необхідні нові методики.

Незважаючи на тривалий досвід застосування замкових з'єднань грибокового типу, не можна вважати достатньо повними проведені дослідження з вивчення їх НДС. Існуючі методи розрахунку, включаючи і метод скінченних елементів для розв'язання плоскої задачі, не відображає в достатній мірі всю повноту НДС цих конструкцій, оскільки в даному випадку мова йде про розв'язання задачі об'ємного напруженого стану. Тому актуальність теми представленої дисертаційної роботи, яка полягає саме у розрахунковому вирішенні задачі впливу на НДС замкового з'єднання робочих лопаток парової турбіни таких факторів, як тривимірна постановка, контактна взаємодія еле-

ментів, температурні навантаження, деформування при пластичності та повзучості, не викликає сумніву.

Зв'язок роботи з пріоритетними науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України та Акціонерному товаристві «Турбоатом» у відповідності до тематичних планів ІПМаш ім. А. М. Підгорного НАН України:

- за договором 2-86/П-14-20 від 02.01.2020 р., додатковою угодою від 07.09.2020 р. №1 «Розробка методів підвищення ефективності енергоблоків ТЕЦ за рахунок впровадження парогазових технологій» за I етапом «Вибір раціональних варіантів впровадження газотурбінних надбудов на ТЕЦ» (Термін виконання: початок «2» січня 2020 р., закінчення «31» грудня 2020 р., № держреєстрації 0120U100883);

- за договором № Н. Е. 4.2 – 2020/П-9-19 від 02.03.2020 р. наукового завдання «Розроблення теплових схем енергоблоків на суперкритичних параметрах пари для використання на діючих ТЕС України з метою підвищення їх маневреності, надійності, економічності та екологічності» за II етапом «Комплексні розрахункові дослідження обраних варіантів теплових схем» (Термін виконання: початок «2» березня 2020 р., закінчення «31» грудня 2020 р., № держреєстрації 0119U101781).

Крім того, тема дисертації безпосередньо пов'язана з роботами, що виконувались на АТ «Турбоатом» в рамках НДР "Розрахункові і конструкторські розробки окремих деталей і вузлів ЦВТ і ЦСТ турбіни на супернадкритичні параметри пари $P_0 = 260 \div 300$ ата і $T_0 = 600$ °С потужністю $600 \div 700$ МВт ".

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, достовірність основних результатів. Обґрунтованість та достовірність отриманих наукових результатів забезпечується використанням випробуваних методів дослідження; обґрунтуванням щільності тривимірної сітки скінченно-елементних розрахункових моделей та верифікацією результатів при порівнянні їх з даними експериментальних досліджень; відповідністю визначених зон перевищення нормативних напружень зонам пошкодження елементів замкового з'єднання, виявленим в експлуатації.

Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі, полягає в удосконаленні методики визначення напружено-деформованого стану замкового з'єднання грибоквого типу лопаток першого ступеню парової турбіни з урахуванням контактної взаємодії його елементів, впливу нерівномірного нагріву, деформацій пластичності і повзучості в тривимірній постановці; в установленні залежності розподілу еквівалентних напружень в

елементах з'єднання від взаємного розташування лопаток и фіксуєчих штифтів та його вплив на нерівномірність розподілу напружень по опорних поверхнях передзамкових лопаток; у виявленні рівня впливу неоднаковості температурного розширення матеріалів елементів з'єднання на їх термонапруженість при пружному та пружно-пластичному деформуванні.

Практична цінність результатів роботи полягає у визначенні найбільш напружених елементів замкового з'єднання лопаток; у визначенні зон можливого перевищення нормативного значення напружень; в пропозиціях щодо використання розробленої методики при проектуванні.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в практику проектування турбомашин згідно з НДР "Розрахункові і конструкторські розробки окремих деталей і вузлів ЦВТ і ЦСТ турбіни на супернадкритичні параметри пари $P_0 = 260 \div 300$ ата і $T_0 = 600^\circ\text{C}$ потужністю $600 \div 700$ МВт " (Акт впровадження №02-112 від 03.03.2021 р.).

Оцінка структури, обсягу та змісту роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 131 стор., в тому числі 39 рисунків та 5 таблиць. Список використаних джерел містить 105 найменувань.

У **вступі** обґрунтована актуальність та доцільність теми дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **першому розділі** на підставі огляду літературних джерел показано сучасний стан розвитку методів аналізу напружено-деформованого стану замкового з'єднання при врахуванні умов експлуатації.

У **другому розділі** подано порівняння результатів розподілу напружень по замковому з'єднанню в модельному та чисельному експериментах. В даному випадку результати натурної тензометрії (крім свого самостійного значення) дозволяють перевірити надійність обраної розрахункової методики, оцінити її точність і скорегувати розрахункову схему.

У **третьому розділі** розв'язується задача про напружений стан замкового з'єднання 1-го ступеню ротора середнього тиску в пружній постановці без урахування впливу температури парового середовища. Методика розв'язання контактних задач за допомогою методу скінченних елементів, яка використовується в даній роботі, заснована на застосуванні моделі контактної пари. Отримані в ході розв'язання задачі результати виявили зони з найбільшими розтягувальними напруженнями. При порівнянні результатів розподілу контактних напружень по опорних поверхнях звичайної робочої лопатки і наявних в літературі даних відзначено відмінність у результатах.

У *четвертому розділі* розглянуто вплив теплообміну між елементами на загальний напружено-деформований стан замкового з'єднання робочих лопаток 1-го ступеню циліндра середнього тиску. Врахування впливу теплообміну на передачу зусиль в замковому з'єднанні здійснювалось в термодинамічній постановці. Отримані результати засвідчили про значний вплив температурної складової на загальний напружено-деформований стан.

П'ятий розділ присвячується дослідженню напружено-деформованого стану замкового з'єднання робочих лопаток з урахуванням впливу пластичного деформування елементів в з'єднанні. Для опису напружено-деформованого стану з урахуванням впливу пластичного деформування елементів в з'єднанні використовувалася теорія пластичної течії. Отримані при розв'язанні задачі результати дозволили виявити зони з наявними пластичними деформаціями.

У *шостому розділі* описано результати дослідження впливу повзучості на напружено-деформований стан замкового з'єднання. Для опису явищ повзучості в даній роботі використано модифіковану часову модель зі зміцненням. В результаті розв'язання задачі встановлено, що вплив повзучості на напружено-деформований стан значним чином позначився на перерозподілі контактних напружень між елементами в замковому з'єднанні. Отримані результати дозволили визначити моменти часу, протягом яких відбувалось ослаблення контакту і поява зон відриву на деяких площадках.

Публікації та оприлюднення результатів. За результатами проведених комплексних розрахункових досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковано 20 наукових праць, серед яких 8 статей у наукових журналах та збірниках наукових праць, в тому числі 1 стаття реферована в базі даних SCOPUS, 12 публікацій – тези та матеріали конференцій. Матеріали роботи апробовані на багатьох представницьких науково-технічних конференціях та семінарах.

Основні зауваження по роботі:

1. Для хвостовиків робочих лопаток парових турбін характерною особливістю є вплив якості виготовлення на напружено-деформований стан. Н жаль, у роботі цей фактор не був розглянутий.

2. В роботі представлені результати порівняння отриманих числових розв'язків з експериментальними даними, які отримані іншими авторами. Але слід зазначити, що було б бажано більш повно описати експериментальну установку, на якій проводилися дослідження.

3. В літературному огляді досить повно розглянуто проблему дослідження задач контактної взаємодії елементів, напружено-деформованого стану в умовах повзучості. Добре представлено напрацювання в області екс-

периментальних досліджень, але замало уваги приділено дослідженню НДС замкового з'єднання при пластичності.

4. На жаль, в тексті не вдалося уникнути граматичних помилок, неоднозначності у використанні окремих термінів та інших редакційних неузгодженостей.

Загальний висновок

Результати проведеного аналізу дисертаційної роботи Палькова Ігоря Андрійовича «Термоміцність замкового з'єднання робочих лопаток парової турбіни», дозволяють зробити однозначний висновок, що вона є завершеним науковим дослідженням, в якій вирішена важлива науково-технічна задача удосконалення методики визначення напружено-деформованого стану замкового з'єднання грибоквого типу лопаток парової турбіни з урахуванням контактної взаємодії його елементів, впливу нерівномірного нагріву, деформацій пластичності і повзучості в тривимірній постановці, і за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Сформульовані зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи, їх слід розглядати як побажання здобувачу наукового ступеню для подальшої плідної науково-дослідної роботи і вказують на необхідність більш уважного ставлення до оформлення результатів досліджень.

Автореферат в достатній мірі відображає основні положення дисертаційної роботи. Оформлення роботи і автореферату в цілому відповідає нормативним вимогам.

Робота відповідає вимогам п. 11 «Порядку присудження наукових ступенів» від 24 липня 2017 року №567 щодо кандидатських дисертацій, а її автор, Ігор Андрійович Пальков, безумовно заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Професор кафедри
конструкції авіаційних двигунів
Національного аерокосмічного університету
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»
к. т. н., доцент

Ю. О. Гусев

Підпис Гусева Юрія Олексійовича **ЗАВІРЯЮ**

Вчений секретар університету, доцент

« _____ » 2021 р.



С.Є. Чмихун