

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

д.т.н., професора Пильова Володимира Олександровича

на дисертаційну роботу Кригіна Сергія Сергійовича
«Забезпечення вимірювання деформацій конструктивних елементів
двигунів і енергетичних установок,
що працюють при температурах 600-700 °С»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 – Електрична інженерія
за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування

Розгляд та аналіз вмісту дисертаційної роботи Кригіна Сергія Сергійовича на тему «Забезпечення вимірювання деформацій конструктивних елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурах 600-700°C», яку подано до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", надав змогу зробити узагальнений висновок щодо її актуальності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, наукової новизни, теоретичної та практичної цінності та разом зі свідченнями про особистий внесок здобувача у підсумку надати сукупну оцінку дисертації.

Актуальність теми дисертації.

Сучасні підходи подальшого розвитку енергетичного машинобудування в цілому та газотурбінного двигунобудування зокрема пов'язані з беззаперечною їх інтеграцією до впровадження новітньої концепції циркулярної економіки. Основні положення останньої обумовлені як економічними, так і соціальними причинами. Економічні пов'язані з вимогами підвищення енергоефективності машин, зменшення вартості їх виготовлення, мінімізації витрат на підтримку повного життєвого циклу. Соціальні пов'язані з першими та обумовлені тенденцією підвищення безпеки застосування.

В дисертаційній роботі доречно відзначається, що підвищення температури перед турбіною є ключовим фактором вдосконалення газотурбінних двигунів. Зі збільшенням робочої температури зростає ефективність перетворення енергії палива в корисну роботу через зростання термічного ККД та можливість збільшення питомої потужності. Однак, означене підвищення температури обмежене термічною стійкістю застосованих матеріалів, що у загальному випадку може потребувати і на практиці потребує впровадження певної сукупності інноваційних технічних рішень. Це означає, що відповідно до положень циркулярної економіки перехід до використання

нових інноваційних рішень повинен бути обґрунтованим, а механічні властивості високотеплонапружених елементів конструкцій двигунів повинні бути вичерпно використані. Саме такий підхід забезпечує найвищу ефективність проходження таких етапів життєвого циклу конструкції як науково-технічний пошук, проектування і доводка, виготовлення, а також подальшу високу ефективність систем експлуатаційного моніторингу та продовження ресурсу.

Важливо, що підтримка високої ефективності проходження усіх етапів життєвого циклу конструкцій обов'язково спирається на достовірне моделювання термонапруженого стану особливо навантажених зон їх елементів. Водночас достовірність такого моделювання визначається достовірністю використаних граничних умов, а верифікацію розрахункових моделей здійснюють на основі повномасштабних тензометричних випробувань. Однак, вимірювання деформацій при температурах, що перевищують 600 °С є складною науково-технічною задачею. Тому високотемпературна тензометрія є таким критично важливим етапом, який часто визначає ефективність підтримки життєвого циклу конструкцій в цілому. І, відповідно, дисертаційне дослідження, націлене на забезпечення вимірювання деформацій конструктивних елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурах 600-700 °С, має високу актуальність та вагоме значення доля теорії і практики в галузі енергетичного машинобудування.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій.

Основні результати і висновки дисертації є достовірними і обґрунтованими.

Теоретичні і практичні результати, що отримані автором під час проведення дослідження, спираються на сучасні досягнення в галузі енергетичного машинобудування, зокрема газотурбінного двигунобудування, базуються на основних засадах теорій моделювання фізичних процесів при високих температурах. Результати роботи не суперечать основним законам теплотехніки, механіки, новітнім досягненням вчених, що працюють в цьому науковому напрямку тощо.

Автор базує свої дослідження на ґрунтовному аналізі сучасного стану проблеми визначення статичного напружено-деформованого стану високонагрітих деталей газотурбінних двигунів. При виконанні роботи проаналізовано і враховано комплекс впливів, що визначають достовірність експериментально вимірюваних даних. В основу методики дослідження покладено поєднання аналітичних методів та чисельного моделювання. Достовірність отриманих результатів забезпечується коректною постановкою експериментів, розрахункових задач та коректним використанням пакетів

САПР і розробленого програмного забезпечення. Перевірка чисельного моделювання за відомими експериментальними даними проведена коректно та підтверджує достовірність отриманих результатів.

Отримані результати є фізично обґрунтованими, належним чином інтерпретовані автором і підтверджені розрахунковими дослідженнями для конкретних елементів газотурбінних двигунів.

Зроблені висновки та рекомендації втілені в розроблених моделях, методиках, програмах та запропонованих конструкціях тензометричних систем.

Висновки, що приведені автором по розділам роботи, та загальні висновки відповідають її змісту, поставленим задачам та отриманим результатам.

Наукова новизна та теоретична цінність результатів

Найбільш значущим науковим результатом, який уперше отримано здобувачем і який визначає відповідність дисертації вимогам до кваліфікаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, є виявлення та наукове обґрунтування закономірностей, що визначають формування сигналу тензорезистора, а також конструктивні рішення та моделі, використання яких дозволяє підвищити точність визначення деформацій деталей двигунів і енергетичних установок в умовах високих температур.

У цілому в роботі сформульовано чотири пункти наукової новизни, з якими слід погодитись:

- Уперше запропоновано принцип вимірювання відносних статичних силових та температурних деформацій елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурі до 650 - 700 °С, який базується на врахуванні впливу нагрітих деталей на тензометричну систему та на явищі взаємодії двох чутливих елементів, розміщених один над одним у шарі високотемпературного зв'язуючого.

На означеному вище принципі побудовано дане дослідження, а його розвиток дозволив сформулювати автором наступні пункти наукової новизни.

- Уперше сформовано засновану на використанні методу скінченних елементів математичну модель взаємодії нагрітих деталей двигунів і енергетичних установок з тензометричною системою, яка включає два чутливих елементи, розміщених один над одним у шарі високотемпературного зв'язуючого, що дозволяє проаналізувати передачу деформації від деталі до чутливих елементів з урахуванням їхньої пружної взаємодії зі зв'язуючим і оцінити залежність похибки вимірів від робочої температури при заданих характеристиках матеріалів.

- Істотно вдосконалено метод виконання тензометричних досліджень високотемпературних елементів двигунів і енергетичних установок, шляхом

застосування зазначених чутливих елементів у шарі високотемпературного зв'язуючого, орієнтація яких на поверхні деталі визначена на основі скінченно-елементного моделювання, крім того, вплив температури компенсується за допомогою температурної характеристики, отриманої на етапі підготовки експерименту.

– Отримали подальший розвиток методи аналізу похибок вимірювань відносних статичних деформацій високотемпературних елементів двигунів і енергетичних установок шляхом впровадження запропонованої математичної моделі формування сигналу тензометричного пристрою з урахуванням шунтування, що дозволяє проводити випробування за більш високих температур.

Найбільш вагомий інтерес тут становлять результати аналітичного та чисельного дослідження взаємодії нагрітих зон деталей двигунів і енергетичних установок з тензометричною системою, що дозволяє проаналізувати передачу деформації від деталі до чутливих елементів з урахуванням їхньої пружної взаємодії зі зв'язуючим і оцінити залежність похибки вимірів від робочої температури при заданих характеристиках матеріалів. З цього приводу, можливо, пункти наукової новизни 2-4 слід розставити в зворотному порядку.

У цілому отримані нові та уточнені в роботі наукові результати дозволили здійснювати наступну практичну реалізацію чутливих елементів вимірювання деформацій зон деталей двигунів і енергетичних установок, що працюють при підвищених температурах.

Практична цінність отриманих результатів та рекомендації щодо використання

В роботі сформульовано п'ять пунктів практичної цінності, які повністю базуються на отриманих нових наукових результатах та демонструють ефективність застосування сформульованих наукових положень.

Інтегровано практичне значення отриманих результатів полягає в створенні науково обґрунтованого підходу, який пропонується ефективно застосовувати для проєктування та модернізації авіаційних газотурбінних двигунів, зокрема для моніторингу статичних деформацій конструкцій при температурі до 700 °C та розробленому на цій основі інструментарію для моніторингу означених деформацій.

Конструктивно тензометричний пристрій базується на використанні двох ортогонально розміщених чутливих елементів. Реалізовано аналіз рівняння стану тензорезистора, що враховує вплив деформації, температури та часових факторів. Визначено деформаційну характеристику тензодатчика в умовах одночасного термічного та силового впливу. Підтверджено ефективність використання тензометричного пристрою шляхом аналізу напружено-

деформованого стану тонкостінного диска.

Практичне втілення розробленої системи діагностування здійснено при виконання держбюджетної теми «Розробка наукових засад удосконалення діагностичного аналізу та управління авіаційних двигунів», номер державної реєстрації – 0109U00108 8, а також у АТ «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, відповідно до планів проведення експериментальних досліджень термонапруженого стану елементів газотурбінних двигунів при довідкових, державних та сертифікаційних випробуваннях двигунів, що розробляються в АТ «Івченко-Прогрес».

Практична цінність результатів підтверджується їх реалізацією в АТ «Івченко-Прогрес» при модернізації, випробуванні та доведенні вузлів двигунів AI-322Ф, AI-222-25КФ, а також використанням у навчальному процесі Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Також слід відзначити, що інтелектуальна власність щодо запропонованого тензометричного пристрою та способу тензометричного вимірювання захищена двома патентами України на корисні моделі.

У цілому отримані наукові та практичні результати можуть бути використані в науково-дослідних і проектних організаціях, конструкторських бюро, організаціях авіабудівної та ракетно-космічної галузей, інших організаціях енергомашинобудівного профілю.

Повнота викладення дисертації в публікаціях

Основні результати дисертаційної роботи упродовж періоду її виконання систематично висвітлювалися автором у наукових публікаціях і матеріалах науково-технічних конференцій.

Автор наводить список із 11 таких робіт, з них 6 статей у вітчизняних фахових журналах, 3 – матеріали міжнародних конференцій і 2 патенти на корисні моделі. Аналіз цих робіт дозволяє вважати, що всі основні результати дисертації опубліковані та відомі широкому колу науковців та спеціалістів галузі. Аналіз внеску здобувача у поданих публікаціях засвідчив повноту та самостійність отриманих результатів.

Оформлення дисертації

Оформлення дисертації відповідає встановленим вимогам до кваліфікаційних наукових робіт. Матеріал викладено послідовно, логічно та в науковому стилі. Структура дисертації є обґрунтованою та відповідає поставленим завданням дослідження. Ілюстративний матеріал, таблиці та графічні залежності належним чином доповнюють результати досліджень і полегшують їх сприйняття. Зміст анотації достатньо повно відбиває зміст дисертації, її структуру та основні результати.

В тексті дисертаційної роботи та публікаціях автора відсутні порушення академічної доброчинності.

Зауваження щодо змісту дисертації

1) У роботі не достатньо наведені проміжні дані для методу оцінювання похибки вимірювання деформацій тензOMETричним пристроєм. Зокрема вказано, що чутливі елементи зареєстрували 96% деформації деталі, що потребує пояснення. Доцільно навести дані, які підтверджують отримані результати.

2) Також потребує пояснення те, що в ряді місць роботи констатується вирішення задачі, яка за параметрами температури перевищує діапазон, визначений темою. Так присутнім є розгляд показників при робочих температурах понад 700 °С (стор. 56, 91, 110, 147). З цього приводу виникає питання можливості використання запропонованого інструментарію при температурних параметрах вище 700 °С, коли так, то наскільки вище.

3) У роботі існує деяка неузгодженість щодо використання термінів «методологія», «метод», «методика».

4) У тексті роботи можна зустріти поодинокі граматичні помилки, неточності та жаргонізми. Наприклад, потребує термінологічного уточнення застосування фраз «в елементах «гарячої частини» ГТД» (що зустрічається тільки в анотації, вступі та першому розділі) та «уявна деформація» (що застосовується доволі часто в роботі, у т.ч. при розробці математичної моделі).

Водночас, слід зазначити, що означені зауваження не вплинули на розуміння поданого науково-технічного викладення матеріалу, достовірність отриманих результатів та вагомість висновків.

Висновки.

Загальна оцінка роботи – позитивна і висока. Робота присвячена надважливому питанню – забезпеченню вимірювань деформацій конструктивних елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурах 600-700 °С. Комплекс поставлених в роботі задач є великим і складним, та здобувач у цілому досяг запланованого результату. Відповідно, вказані зауваження не є такими, що зменшують загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

В результаті наука отримала нові концептуальні положення, метод і методику, що надають нові теоретичні результати, а практика – ефективний інструментарій з підтримки життєвого циклу конструкцій газотурбінних двигунів. Отримані результати можуть бути розповсюдженими щодо використання при аналізі інших об'єктів енергетичного машинобудування.

У цілому подана до захисту дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена актуальна науково-практична задача удосконалення методів визначення напружено-деформованого стану

високотеплонавантажених елементів конструкцій енергетичних установок.

Враховуючи актуальність обраної теми, обґрунтованість наукових результатів дисертації, їх достовірність та новизну, практичну цінність, повноту викладання в наукових публікаціях та відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що дисертаційна робота відповідає пп. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії...», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор - **Кригін Сергій Сергійович** - заслуговує присвоєння вченого ступеня доктора філософії.

Професор кафедри двигунів та
гібридних енергетичних установок
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
доктор технічних наук, професор

Володимир ПИЛЬОВ