

ВІДГУК

офіційного опонента

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 наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань 14 – Електрична інженерія

за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування

Актуальність теми дослідження.

Технічний прогрес в авіаційній техніці значною мірою пов'язаний з впровадженням газотурбінних двигунів. У той же час у вже сформованих класах авіаційних систем логіка розвитку літальних апаратів визначає напрями вдосконалення двигунів у зв'язку зі специфічними вимогами, що пред'являються до кожного типу літального апарату та його силової установки.

Одним з основних напрямків подальшого вдосконалення двигунів є інтенсифікація робочого процесу, тобто збільшення температури газів перед турбіною, степінь підвищення повного тиску, а також вдосконалення основних вузлів двигуна в напрямку зниження втрат в них.

Для забезпечення надійності газотурбінних двигунів їх напружено-деформований стан оцінюється шляхом поєднання чисельного моделювання та фізичних експериментів. Це вимагає комплексного підходу – від аналізу теплового стану конструкцій до вимірювання деформацій у високотемпературних умовах.

Основні труднощі при вимірюваннях деформації полягають у тому, що тензодатчики не зберігають свої характеристики протягом тривалого періоду часу при підвищених температурах. Тому головна вимога до тензометричного матеріалу – електрична стабільність і відтворюваність у всьому діапазоні робочих температур.

Саме тому дисертаційна робота Кригіна Сергія Сергійовича, яка спрямована на розробку науково-обґрунтованого підходу до дослідження напружено-деформованого стану газотурбінних двигунів з метою забезпечення надійності та верифікації розрахункових моделей під час повномасштабних тензометричних

випробувань, є *актуальною*.

Дисертаційна робота виконувалася у Національному аерокосмічному університеті «ХАІ», відповідно до плану держбюджетної теми «Розробка наукових засад удосконалення діагностичного аналізу та управління авіаційних двигунів», а також у АТ «Івченко-Прогрес», відповідно до планів проведення експериментальних досліджень термонапруженого стану елементів газотурбінних двигунів при довідкових, державних та сертифікаційних випробуваннях двигунів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукові положення та висновки і рекомендації, наведені в дисертаційній роботі Кригіна Сергія Сергійовича, в достатній мірі обґрунтовані як у науковому, так і у технічному плані. Обґрунтованість отриманих у роботі наукових положень, висновків і рекомендацій базується на фундаментальних підходах механіки та експериментальних досліджень.

У дослідженнях використовувалися такі методи: метод скінченних різниць, метод скінченних елементів; тензометричний метод. У дослідженнях використовувалося ліцензійне програмне забезпечення.

Дослідження виконані з використанням сучасного комп'ютерного моделювання. Результати перевірені шляхом проведення практичних експериментів, що підтверджує обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджується результатами відповідних експериментальних досліджень.

Наукові дослідження застосовані під час обґрунтування джерел виникнення похибок і розробці комплексу техніко-алгоритмічних рішень, що підвищують точність вимірювань в агресивних середовищах.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

– вперше запропоновано принцип вимірювання відносних статичних силових

та температурних деформацій елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при підвищеній температурі, що ґрунтується на врахуванні впливу температури деталей на тензометричну систему.

- побудовано нову скінченноелементну 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, з урахуванням залежності похибки вимірів від робочої температури при заданих характеристиках матеріалів ;

- вдосконалено метод проведення тензометричних досліджень високотемпературних елементів двигунів і енергетичних установок із застосуванням чутливих елементів у шарі високотемпературного зв'язуючого, орієнтація яких на поверхні деталі визначена на основі скінченноелементного моделювання, крім того, вплив температури компенсується за допомогою температурної характеристики, отриманої на етапі підготовки експерименту.

- набули подальшого розвитку методи аналізу похибок вимірювань відносних статичних деформацій високотемпературних елементів двигунів і енергетичних установок з урахуванням шунтування, що дозволяє проводити випробування за більш високих температур.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Практична цінність полягає у використанні результатів досліджень у АТ «Івченко-Прогрес» – профільній організації, що займається проектуванням, виробництвом, сертифікацією, ремонтом, випробуваннями, доведенням й становленням серійного виробництва газотурбінних двигунів авіаційного й промислового застосування, що підтверджено Актом про впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Результати досліджень опубліковані у 11 наукових працях, серед яких 6 статей у наукових фахових виданнях України, 3 тези доповідей на міжнародних

науково-технічних конференціях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації, та 2 патенти України.

Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві зазначена у дисертаційній роботі.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Кригіна Сергія Сергійовича складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків та додатків.

Анотація відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває наукові результати та практичну цінність роботи.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, показана її наукова і практична цінність, сформульовані мета і задачі дослідження, які необхідно вирішити для її досягнення, приведена апробація дисертаційної роботи і публікації.

У **першому розділі** виконано аналіз проблеми дослідження напружено-деформованого стану вузлів газотурбінних двигунів. Особливу увагу приділено характеристикам високотемпературних тензорезисторів. Встановлено, що сучасні засоби вимірювальної техніки забезпечують контроль динамічних деформацій при температурах до $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$, але для статичних вимірювань робочий діапазон обмежується $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Також проаналізовано та визначено основні компоненти високотемпературних тензорезисторів.

У **другому розділі** обґрунтовано наукову новизну розробленого високотемпературного тензометричного пристрою, призначеного для моніторингу статичних деформацій деталей авіаційних і енергетичних установок при температурах до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Конструктивна особливість пристрою полягає у використанні двох ортогонально розташованих чутливих елементів у шарі високотемпературного адгезиву. Таке рішення забезпечує можливість одночасного

вимірювання деформацій і термічних впливів, а також мінімізацію адитивної температурної похибки, що гарантує стабільність і надійність вимірювань в екстремальних умовах експлуатації.

Третій розділ присвячено практичному застосуванню розробленого тензометричного пристрою. Описано його процес упровадження у вимірювальні системи та підтверджено ефективність запропонованого алгоритму розрахунку деформації випробуваннями на стандартних зразках у температурному діапазоні 200–700 °С. Також розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів, що враховує пружну взаємодію двох чутливих елементів із високотемпературним сполучним шаром. Це дозволяє аналізувати передачу деформації від деталі та оцінювати температурну залежність похибки вимірювань. Удосконалено методику тензометричних досліджень, зокрема впроваджено автоматизовану систему температурної компенсації на базі двох чутливих елементів із використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

У **четвертому розділі** розроблено методику аналізу похибок вимірювальних систем, призначених для моніторингу напружено-деформованого стану елементів двигунів. Обґрунтовано джерела виникнення похибок і запропоновано комплекс техніко-алгоритмічних рішень, що підвищують точність вимірювань в агресивних середовищах. Побудована математична модель формування сигналу з урахуванням ефекту шунтування дозволяє ефективно проводити випробування при підвищених робочих температурах

У **п'ятому розділі** отримані та узагальнені результати проведених досліджень, що підтверджують ефективність запропонованого високотемпературного тензорезистора та методологічного підходу до аналізу напружено-деформованого стану конструкцій з використанням засобів CAE-аналізу. Це дозволяє перенести частково замінити дорогі натурні випробування попередніми теоретичними дослідженнями.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані чітко та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Додатки містять акти впровадження результатів наукових досліджень дисертації на підприємстві АТ «Івченко-Прогрес» та у Національному

аерокосмічному університеті «ХАІ».

Академічна доброчесність.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи:

1. У другому розділі недостатньо описано вплив температури на властивості матеріалів для кріплення дротяної решітки та вивідних проводів високотемпературних тензорезисторів на деталях газотурбінних двигунів та на похибку вимірювань.

2. У третьому розділі не зазначено, як враховувався вплив процесу деградації матеріалів тензорезисторів на коефіцієнт тензочутливості.

3. У практичних задачах при застосуванні методів, що базуються на дискретизації досліджуваних об'єктів, прийнятна швидкість збіжності розв'язку не досягається, доки розбиття сітки не досягає певного граничного значення. Це суттєво збільшує порядок розв'язувальної системи рівнянь. У роботі не зазначено, чи виникав такий ефект у практичних розрахунках конструкцій, та як здійснювався контроль точності розв'язків, що отримані методами скінченних різниць та скінченних елементів у п'ятому розділі.

4. У тексті дисертаційної роботи присутні друкарські, пунктуаційні та стилістичні помилки.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертація є актуальною і має високу наукову цінність та практичну значущість.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Кригіна Сергія Сергійовича «Забезпечення вимірювання деформацій конструктивних елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурах 600-700 °С», за своїм змістом відповідає галузі знань 14 – Електрична інженерія та спеціальності 142 – Енергетичне машинобудування. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв’язує важливу науково-практичну задачу, яка полягає у вдосконаленні сучасних систем діагностики енергетичних установок та авіаційних двигунів.

Подана дисертаційна робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», який затверджено Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44, а здобувач Кригін Сергій Сергійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 – Електрична інженерія за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування.

Офіційний опонент:

Завідувачка відділом вібраційних і
термоміцнісних досліджень
Інституту енергетичних машин і систем
ім. А. М. Підгорного НАН України,
докторка технічних наук, професорка



Наталя СМЕТАНКІНА

10.07.2026 р.