

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу
Кригіна Сергія Сергійовича

на тему: «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»

Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми підвищення точності визначення напружено-деформованого стану високотемпературних елементів газотурбінних двигунів та енергетичних установок. Зростання вимог до паливної економічності, енергетичної ефективності та ресурсу сучасних газотурбінних двигунів супроводжується постійним підвищенням температури робочого процесу, що суттєво ускладнює умови експлуатації елементів «гарячої» частини двигуна. За таких умов точне визначення напружено-деформованого стану деталей набуває вирішального значення для забезпечення їх міцності, довговічності та експлуатаційної надійності.

Актуальність запропонованого в роботі дослідження обумовлена тим, що існуючі методи високотемпературної тензометрії не завжди забезпечують необхідну точність вимірювання деформацій в умовах інтенсивного теплового навантаження, складного температурного поля та деградації властивостей ізоляційних матеріалів. Це зумовлює потребу у створенні нових технічних рішень, спрямованих на підвищення достовірності експериментальних досліджень, удосконалення методів температурної компенсації та оцінювання похибок вимірювань.

Наукова та практична актуальність дисертаційної роботи полягає у розробленні нового тензометричного пристрою, удосконаленні методики проведення високотемпературних тензометричних досліджень, розвитку методів оцінювання похибок вимірювань, а також застосуванні сучасних чисельних методів моделювання для аналізу передачі температури та деформації до чутливих елементів вимірювальної системи. Отримані результати спрямовані на підвищення достовірності експериментальних досліджень, удосконалення методів діагностування технічного стану відповідальних деталей газотурбінних

двигунів та енергетичного обладнання, а також забезпечення їх надійної та безпечної експлуатації.

Таким чином, тема дисертаційної роботи має важливе наукове і практичне значення та повною мірою відповідає сучасним потребам за напрямом розвитку експериментальної механіки, газотурбінного двигунобудування та методів технічної діагностики високотемпературних конструкцій.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукові положення, висновки та рекомендації, наведені у дисертаційній роботі Кригіна Сергія Сергійовича, є достатньо обґрунтованими та базуються на комплексному застосуванні сучасних теоретичних, експериментальних і чисельних методів досліджень. Для розв'язання поставлених завдань автором використано положення механіки деформованого твердого тіла, теорії пружності, тензометрії, математичного моделювання та методу скінченних елементів, що забезпечує належний науково-методичний рівень проведених досліджень.

Достовірність отриманих результатів підтверджується коректністю використаних математичних моделей, достатнім обсягом експериментальних досліджень, застосуванням сучасного вимірювального обладнання та спеціалізованого програмного забезпечення для обробки експериментальних даних. Результати чисельного моделювання узгоджуються з експериментальними даними, що свідчить про адекватність запропонованих математичних моделей і правильність прийнятих методичних підходів. Отримані залежності мають фізичне обґрунтування та не суперечать сучасним науковим уявленням у галузі високотемпературної тензометрії.

Отримані автором результати характеризуються науковою новизною, мають практичну цінність, а також розширюють існуючі підходи до експериментального дослідження напружено-деформованого стану високотемпературних конструкцій. Вони можуть бути використані під час створення сучасних систем технічної діагностики газотурбінних двигунів і енергетичного обладнання. Сукупність застосованих чисельних методів, проведена верифікація розрахунків, комплексний характер моделювання та позитивний виробничий досвід впровадження дозволяють зробити висновок про високу достовірність отриманих результатів.

Результати представленого в дисертації дослідження впроваджені на АТ «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС» та у навчальний процес Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», що свідчить про їх прикладну цінність для енергетичної галузі України.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. На основі запропонованого принципу вимірювання відносних статичних силових та температурних деформацій та відповідної математичної моделі взаємодії чутливих елементів запропоновано тензометричний пристрій для моніторингу термонапруженого стану елементів двигунів, що працюють у високотемпературних умовах, конструкція якого базується на використанні двох ортогонально розміщених чутливих елементів. Надійність фіксації датчиків та їхню стійкість до агресивного робочого середовища забезпечує застосування спеціалізованого високотемпературного клею-цементу. Це технічне рішення

дозволяє визначати напруження в критичних вузлах двигуна в екстремальних умовах експлуатації.

2. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення та автоматизовано процес тензометричних досліджень конструктивних елементів двигунів. Запропонований підхід базується на аналізі рівняння стану тензорезистора, що враховує вплив деформації, температури та часових факторів. Для забезпечення температурної компенсації система використовує два чутливі елементи, сигнали яких обробляються для визначення відносної деформації. Процес автоматизовано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

3. Розроблено новий метод оцінювання похибок тензометричних вимірювань, спричинених шунтуванням чутливих елементів через шар сполучного матеріалу в умовах високих температур. Підвищено точність визначення статичної деформації завдяки застосуванню запропонованої математичної моделі, у вигляді системи диференціальних рівнянь, складених на основі методу скінченних різниць.

4. Методами обчислювального моделювання визначено деформаційну характеристику тензодатчика в умовах одночасного термічного та силового впливу. Отримані дані дають змогу нівелювати температурні похибки, що є критично важливим для підвищення точності вимірювань і формування пропозицій щодо подальшого вдосконалення конструкції.

5. Підтверджено ефективність пристрою для контролю та метод його використання шляхом аналізу напружено-деформованого стану тонкостінного диска з центральним отвором. Для моделювання складних робочих умов радіальний градієнт температури було створено нагріванням внутрішнього краю диска за допомогою газового пальника. Отримані результати підтвердили ефективність пристрою для контролю структурної цілісності в умовах неоднорідного теплового навантаження.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Кригіна Сергія Сергійовича повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування, про що свідчить висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Кригіна С.С., наданий кафедрою конструкції авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут".

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про вагомий внесок здобувача у науковий напрям оцінки напружено-деформованого стану високонагрітих елементів конструкцій газотурбінних двигунів та енергетичних установок.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено. Використання в тексті результатів інших вчених супроводжується відповідними посиланнями, посилання на літературні джерела коректні. Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, що опубліковані у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою, логічно структурована та доступно викладена. Основний текст підготовлено якісною технічною мовою, з використанням професійної термінології. Наукова робота достатньо забезпечена рисунками та таблицями.

Дисертація складається із анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків і списків використаних джерел до кожного розділу, загальних висновків та додатків. Загальний обсяг дисертації складає: 154 сторінки, 57 рисунків за текстом, 10 таблиць за текстом, 137 найменувань використаних джерел сумарно, викладених на 14 сторінках і 2 додатки, викладених сумарно на 5 сторінках.

У **вступі** дисертаційної роботи автором обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та основні задачі, сформульовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, вказано особистий внесок автора та наведено апробацію результатів.

Перший розділ присвячено дослідженню тензодатчиків. Підвищення робочої температури сучасних газотурбінних двигунів є одним із головних напрямів збільшення їх питомої потужності та коефіцієнта корисної дії. Разом із цим суттєво зростають теплові та механічні навантаження на елементи «гарячої» частини двигуна, що призводить до виникнення складного напружено-деформованого стану, розвитку повзучості, термічної втоми та інших деградаційних процесів. Найбільш поширеним методом експериментального дослідження напружено-деформованого стану є тензометрія.

Проведений аналіз показав, що незважаючи на значний прогрес у цій галузі створення сучасних високотемпературних тензорезисторів, існуючі конструкції характеризуються недостатньою стабільністю електричних параметрів під час тривалого нагрівання, чутливістю до окиснення, деградації сполучних матеріалів та шунтування вимірювального кола.

Особливу увагу приділено аналізу джерел похибок високотемпературної тензометрії. Основними чинниками, що обмежують достовірність вимірювань, є температурна уявна деформація, зміна коефіцієнта тензочутливості, повзучість матеріалів, старіння чутливих елементів, зміна електричного опору підвідних проводів, зниження опору ізоляції та виникнення паразитних струмів

шунтування. Для мінімізації зазначених похибок застосовують температурну компенсацію, багатопровідні схеми підключення, попереднє калібрування, використання спеціальних високотемпературних матеріалів та програмну обробку результатів вимірювань.

Аналіз літературних джерел свідчить, що, незважаючи на значну кількість досліджень у галузі високотемпературної тензометрії, проблема забезпечення високої точності вимірювання статичних деформацій при температурах понад 600–700 °С залишається остаточно не вирішеною. Це обумовлює необхідність удосконалення конструкцій високотемпературних тензорезисторів, методів температурної компенсації та оцінювання похибок вимірювань, що й визначає актуальність подальших досліджень, виконаних у дисертаційній роботі.

У другому розділі обґрунтовано наукову новизну розробленого високотемпературного тензометричного пристрою, призначеного для моніторингу статичних деформацій деталей авіаційних і енергетичних установок при температурах до 700 °С. 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. У його основі полягає рівняння стану, що відображає залежність вихідного сигналу від деформації, температури та тривалості навантаження. Описано процес упровадження високотемпературних тензометричних пристроїв у вимірювальні системи, викладені вимоги дореєстраторів. Ефективність запропонованого алгоритму розрахунку деформації підтверджено випробуваннями на стандартних зразках у температурному діапазоні 200 – 700 °С. 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.

Четвертий розділ присвячено аналізу похибок і підвищенню точності вимірювання деформацій елементів двигунів і енергетичних установок. Представлено методику аналізу похибок вимірювальних систем, призначених для моніторингу НДС елементів двигунів. Обґрунтовано джерела виникнення

похибок і запропоновано комплекс техніко-алгоритмічних рішень, що підвищують точність вимірювань в агресивних середовищах. Вдосконалено методи аналізу похибок тензOMETричних систем при вимірюванні статичних деформацій високотемпературних елементів. Розроблено математичну модель формування сигналу з урахуванням ефекту шунтування, що дозволяє ефективно проводити випробування при підвищених робочих температурах.

П'ятий розділ присвячено удосконаленню методів верифікації розрахункових моделей шляхом зіставлення чисельних результатів (зокрема отриманих у середовищі ANSYS та методами скінченних різниць) із даними натурних експериментів є стратегічно важливим завданням для мінімізації похибок при проектуванні критично відповідальних деталей. У цьому розділі розглядаються узагальнені результати проведених досліджень, що підтверджують ефективність запропонованого високотемпературного тензOMETричного пристрою і методологічного підходу до аналізу НДС матеріалів у складних термомеханічних умовах.

У **висновках** наведено підсумкові результати проведених у дисертації наукових досліджень, що узагальнюють висновки за кожним з її розділів.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Наукові результати дисертації висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача у фахових виданнях, затверджених МОН України, 3 тезах доповідей на міжнародних конференціях, 2 патентах на корисну модель.

Публікації Кригіна Сергія Сергійовича мають високий науковий рівень, проходили рецензування та перевірку на унікальність згідно з умовами видавництва. Особистий внесок здобувача до поданих наукових публікацій є вагомим. Публікації охоплюють усі основні результати дисертаційного дослідження.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Розділ 1 доцільно було б доповнити описом сучасних конструкцій тензодатчиків США, Європи та більш ретельно проаналізувати збіжність вимірювальних даних.

2. У Розділі 2 доцільно було б розглянути більш широкий температурний діапазон (на рівні 1500 °C), що буде відповідати вимогам до двигунів, що зараз проектуються і є актуальними.

3. У Розділі 3 доцільно більш детально описати математичну модель, яку використовує програмний комплекс «ANSYS» і чи може бути використаний цей алгоритм при вимірюваннях і оцінці даних на реальних зразках.

4. У Розділі 4 доцільно було б провести дослідження різнокаліброваних датчиків та вплив їхнього калібрування на загальний результат.

5. У розділі 5 доцільно було б висвітлити питання сіткової збіжності, а також обґрунтувати вибір типів розрахункової сітки та граничних умов.

Важливо відмітити, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значущість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Кригіна Сергія Сергійовича на тему «Забезпечення вимірювання деформацій конструктивних елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурах 600-700 °С», виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Кригін Сергій Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування».

Рецензент:

Доктор технічних наук, доцент,
завідувач кафедри аерогідродинаміки
Національного аерокосмічного університету
"Харківський авіаційний інститут"

Олексій ТРЕТЯК