

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації 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

На засіданні кафедри конструкції авіаційних двигунів за участі:

- Єпіфанова Сергія Валерійовича, д.т.н., професора, завідувача кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
- Білогуба Олександра Віталійовича, д.т.н., професора, професора кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
- Гусева Юрія Олексійовича, к.т.н., доцента, професора кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
- Пильова Володимира Олександровича, д.т.н., професора кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
- Гаркуші Олександра Івановича, к.т.н., доцента, доцента кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
- Безуглого Сергія Володимировича, к.т.н., доцента, доцента кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
- Суховія Сергія Івановича, к.т.н., доцента, доцента кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
- Марценюка Євгена Вікторовича, ст. викладача кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
- Торби Юрія Івановича, к.т.н., заступника генерального директора з наукової та експериментально-випробувальної роботи АТ «Івченко-Прогрес»;
- Кухтіна Юрія Петровича, к.т.н., провідного наукового співробітника групи газодинамічних розрахунків турбін АТ «Івченко-Прогрес»;
- Хомилєва Сергія Олександровича, к.т.н., керівника групи газодинамічних розрахунків турбін АТ «Івченко-Прогрес»;
- Бандурко Євгена Олександровича, керівника групи теплових розрахунків АТ «Івченко-Прогрес»;
- Морозова Андрія Володимировича, PhD, провідного інженера-дослідника АТ «Івченко-Прогрес» (Запоріжжя);
- Неманежина Євгена Олександровича, PhD, провідного-інженера дослідника АТ «Івченко-Прогрес»
- Бондаренка Олексія Васильовича, PhD, ст. викладача кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
- Свеженцева Сергія Юрійовича, аспіранта кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;

Цуканова Руслана Юрійовича, ст. викладача кафедри конструкції літаків і вертольотів, аспіранта кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
Векліча Ярослава Сергійовича, аспіранта кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
Сбродова Євгенія Віталійовича, провідного інженера-дослідника АТ «Івченко-Прогрес» аспіранта кафедри технології авіаційних двигунів НУ «ЗП»,
Войтенко Ігора Валерійовича, провідного інженера-дослідника АТ «Івченко-Прогрес»;
Пальчиковського Володимира Олександровича, інженера-дослідника АТ «Івченко-Прогрес», аспіранта кафедри композиційних конструкцій та авіаційного матеріалознавства «ХАІ»;
Пушиліна Олексія Євгенович, начальника відділу АТ «Івченко-Прогрес», аспіранта кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
Карпенка Артема Михайловича, інженера-конструктора АТ «Івченко-Прогрес», аспіранта кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;
Жиркова Олександра Григоровича, провідного інженера-дослідника АТ «Івченко-Прогрес»;
Шевчука Олега Володимировича, провідного інженера АТ «Івченко-Прогрес», аспіранта кафедри турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
Бориса Сергія Богдановича, провідного інженера АТ «Івченко-Прогрес», аспіранта кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»

відбулася публічна презентація дисертаційної роботи *Кригіна Сергія Сергійовича* на тему **«Забезпечення вимірювання деформацій конструктивних елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурах 600–700 °С»**.

На підставі обговорення змісту презентації дисертаційної роботи ухвалено такий висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації (результати голосування – одноголосно).

1. Актуальність теми дослідження

Одним з головних напрямків розвитку газотурбінних двигунів і енергетичних установок є підвищення їх термодинамічної ефективності, головним чином шляхом збільшення температури перед турбіною. Це значно підвищує питому потужність і ККД, але створює екстремальні термічні навантаження на елементи «гарячої частини» і суттєво обмежує навантаження і ресурс.

Забезпечення високих показників міцності складних систем потребує ретельного вивчення їхнього напружено-деформованого стану. Серед численних факторів, які впливають на НДС елементів «гарячої частини», значний внесок робить термічний вплив.

Удосконалення методів визначення напружено-деформованого стану високонагрітих елементів конструкцій є актуальним завданням розвитку сучасних систем діагностики енергетичних установок та авіаційних двигунів.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалася в: Національному аерокосмічному університеті (ХАІ), м. Харків, відповідно до плану 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 ГТД при довідкових, державних та сертифікаційних випробуваннях двигунів, що розробляються в АТ «Івченко-Прогрес».

3. Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

1. Уперше запропоновано високотемпературний тензометричний пристрій, що відрізняється наявністю двох чутливих елементів, розташованих один над одним у шарі високотемпературного зв'язуючого під прямим кутом і забезпечує вимірювання відносних статичних силових і температурних деформацій елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурі до 650-700 °С.

2. Уперше сформовано засновану на використанні методу скінченних елементів математичну модель високотемпературного тензометричного пристрою з двома чутливими елементами, розташованими 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 тензометричних пристроїв, для орієнтації яких на поверхні деталі використовується інформація, отримана в результаті скінченно-елементних розрахунків, а також шляхом компенсації впливу температури за температурною характеристикою, визначеною 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.

4. Теоретичне та практичне значення результатів роботи

Запропоновано новий тензOMETричний пристрій, що дозволяє проводити дослідження термонапруженого стану високонагрітих елементів двигуна при температурах понад 700 °С.

На базі розробленого пристрою вдосконалено методологію тензOMETричного моніторингу елементів енергетичних установок. Запропонований підхід ґрунтується на математичному моделюванні термонапруженого стану тензорезистора, в якому опір розглядається як багатофакторна функція деформації, термічного впливу та часу.

Розроблено метод визначення спричиненої шунтувальним ефектом клейового шару похибки вимірювання деформацій тензOMETричним пристроєм, які реєструються вимірювальною апаратурою як уявна деформація.

За допомогою методів скінченно-елементного (МСЕ) моделювання досліджено передачу температурних і деформаційних полів від об'єкта дослідження до чутливих елементів тензOMETричного пристрою.

Здійснено верифікацію працездатності та точності запропонованого тензOMETричного пристрою під час натурних випробувань високотемпературних вузлів ГТД.

Отримані наукові результати можуть бути використані в науково-дослідних і проектних організаціях, конструкторських бюро, організаціях авіабудівної та ракетно-космічної галузі, авіакомпаніях та інших організаціях спеціального призначення.

5. Апробація/використання результатів дисертації

Основні результати роботи представлено на конференціях:

1. Кригін С. С. Огляд тензOMETричних систем та похибок, які виникають при тензOMETруванні деталей АГТД / С. С. Кригін, Ю. І. Торба // XXVI міжнародний конгрес двигунобудівників: Авіаційно-космічна техніка та технологія Лазурне, 6–11 вер. 2021 р. / Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – Харків, 2021. – С. 28–29.

2. Гусєв Ю. О. Вимірювання статичних деформацій високонагрітих елементів ГТД з допомогою малорозмірних тензорезисторів / Ю. О. Гусєв, А. С. Гольцов, С. С. Кригін // XXVII міжнародний конгрес двигунобудівників: Авіаційно-космічна техніка та технологія / Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – Харків, 2022. – С. 13–14.

3. Кригін С. С. Математична модель передачі температури та статичних деформацій у тензOMETричному пристрої / С. С. Кригін, Ю. О. Гусєв, Ю. І. Торба // XXX міжнародний конгрес двигунобудівників : матеріали XXX міжн. наук.-практ. конф., Харків, 2–5 вер. 2025 р. / Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – Харків, 2025. – С. 49–50.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Пат. 158117 Україна, МПК G01B7/16. ТензOMETричний пристрій для вимірювання відносних деформацій деталей авіаційних двигунів /

Гусев Ю. О., Кригін С. С., Торба Ю. І. – № u202402265 ; заявл. 29.04.2024 ; опубл. 01.01.2025, Бюл. № 1/2025. – 25 с.

2. Пат. 163155 Україна, МПК G01B7/16, G01K7/16. Спосіб одночасного тензометричного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей / Кригін С. С., Гусев Ю. О., Торба Ю. І. – № u202506065 ; заявл. 04.12.2025 ; опубл. 27.05.2026, Бюл. № 21/2026.

Розроблені автором наукові положення реалізовано:

– в АТ "Івченко-Прогрес" (м. Запоріжжя) при проектуванні нових і модернізації існуючих ГТД розробки підприємства, зокрема під час випробувань і модернізації елементів камери згоряння та форсажної камери двигунів АІ-222, АІ-322Ф, АІ-222-28, АІ-222-25, АІ-222-25Ф;

– у навчальному процесі кафедри конструкції авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» у вигляді лекційних матеріалів і практичних робіт за навчальною дисципліною «Проектування, випробування та сертифікація об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки».

6. Дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертація С. С. Кригіна є оригінальною роботою, виконана здобувачем самостійно й доброчесно, текст рукопису дисертаційної роботи не містить ознак академічного шахрайства. Роботу передано експерту для проведення науково-технічної експертизи щодо збігів з Internet-джерелами, про що буде надано відповідний звіт.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача

Основний зміст дисертації відображено в 6 статтях у виданнях, які входять до переліку наукових фахових видань України. Окрім цього, основні результати роботи опубліковані в 3 тезах науково-технічних конференцій і 2 патентах.

1. Кригін, С. С. Вимірювання напружено-деформованого стану деталей АГТД методом тензометрії / С. С. Кригін, Ю. І. Торба // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2021. – № 4 (174) спецвипуск 2. – С. 44–51. doi: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.4sup2.06>.

2. Гусев, Ю. О. Вплив шунтування високотемпературних тензорезисторів на точність виміру статичних деформацій елементів ГТД / Ю. О. Гусев, А. С. Гольцов, С. С. Кригін // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2022. – № 4 спецвипуск 2 (182). – С. 35–41. doi: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.06>.

3. Кригін, С. С. Температурна характеристика електричного опору тензометра при вимірюванні статичних та термічних напружень деталей при температурі до 700 °С / С. С. Кригін, Ю. О. Гусев, Ю. І. Торба // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2023. – № 4 (188). – С. 4–9. doi: <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4.01>.

4. Кригін, С. С. Силове тарування тензометра для вимірювання статичних напружень деталей АГТД при температурі до 700 °С / С. С. Кригін // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2024. – № 4 (196). – С. 43–48. doi: <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.4.05>.

5. Кригін, С. С. Похибки передачі відносних деформацій у тензOMETричному пристрої при підвищеній температурі / С. С. Кригін, Ю. О. Гусев, Ю. І. Торба, О. В. Білогуб // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2025. – № 4 спецвыпуск 2 (206). – С. 119–124. doi: <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.13>.

6. Кригін, С. С. ТензOMETричний пристрій і метод його використання при дослідженні напружено-деформованого стану та температурних деформацій високо-нагрітих елементів газотурбінних двигунів. / С. С. Кригін, Ю. О. Гусев, Ю. І. Торба // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2026. – № 2 (210). – С. 12-19. doi: <https://doi.org/10.32620/aktt.2026.2.02>.

7. Кригін С. С. Огляд тензOMETричних систем та похибок, які виникають при тензOMETруванні деталей АГТД / С. С. Кригін, Ю. І. Торба // XXVI міжнародний конгрес двигунобудівників: Авіаційно-космічна техніка та технологія, Лазурне, 6–11 вер. 2021 р. / Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – Харків, 2021. – С. 28–29.

8. Гусев Ю. О. Вимірювання статичних деформацій високонагрітих елементів ГТД з допомогою малорозмірних тензорезисторів / Ю. О. Гусев, А. С. Гольцов, С. С. Кригін // XXVII міжнародний конгрес двигунобудівників: Авіаційно-космічна техніка та технологія / Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – Харків, 2022. – С. 13–14.

9. Кригін С. С. Математична модель передачі температури та статичних деформацій у тензOMETричному пристрої / С. С. Кригін, Ю. О. Гусев, Ю. І. Торба // XXX міжнародний конгрес двигунобудівників : матеріали XXX міжн. наук.-практ. конф., Харків, 2–5 вер. 2025 р. / Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – Харків, 2025. – С. 49–50.

10. Пат. 158117 Україна, МПК G01B7/16. ТензOMETричний пристрій для вимірювання відносних деформацій деталей авіаційних двигунів / Гусев Ю. О., Кригін С. С., Торба Ю. І. – № u202402265 ; заявл. 29.04.2024 ; опубл. 01.01.2025, Бюл. № 1/2025. – 25 с.

11. Спосіб одночасного тензOMETричного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей / Кригін С., Гусев Ю., Торба Ю. - № u20250606 ; заявл. 4.12.2025 року.

Усі положення наукової новизни дисертації отримано автором самостійно. У статтях, що опубліковано в співавторстві, дослідження і аналіз результатів виконано автором особисто; формулювання задач і висновків виконано разом із науковим керівником; підготовку й видання науково-технічних статей виконано за участю співавторів. У спільних роботах автору належить наступне:

[1] – здобувачем проведено аналіз джерел інформації та розглянуто методологію тензOMETрії під час стендових випробувань ГТД. Досліджено

специфіку вимірювань для роторних і статорних деталей, а також запропоновано шляхи нівелювання температурних градієнтів і електромагнітних перешкод, що забезпечує високу достовірність даних в умовах реальної експлуатації.

[2] – здобувачем визначено струми витoku у вузлах чутливих елементів та оцінено їхній вплив на відносну похибку вимірювання деформації. Використовуючи електричну модель розподілу потенціалів тензодатчика, автор застосував закони Кірхгофа для побудови системи різницевих рівнянь, яку надалі зведено до матричного вигляду для розрахунку струмів шунтування

[3] – здобувачем виконано експериментальне дослідження з визначення температурної характеристики опору чутливих елементів (ЧЕ) тензодатчика та оцінка складових похибки. Додатково досліджено динаміку уявної температурної деформації залежно від температури об'єкта вимірювання.

[4] – здобувачем проведено експериментальне дослідження силових характеристик тензометричного пристрою. У межах роботи проаналізовано вплив статичної деформації, температурного розширення системи "деталь–тензометр", а також ефектів шунтування ізоляції та зміни питомого опору чутливого елемента, що дозволило кількісно оцінити внесок кожного з факторів у загальну похибку вимірювань.

[5] – здобувачем побудована скінченно-елементна модель тензометричного пристрою, яка встановлена на деталь. Методами обчислювального експерименту було визначено температурний градієнт по моделі та розповсюдження відносних деформацій вад деталі до чутливих елементів.

[6] – здобувачем запропоновано методику застосування розробленого тензометричного пристрою, що базується на спільному використанні рівняння стану та вихідного сигналу тензорезистора. Для визначення відносної деформації при одновісному й двовісному навантаженні застосовано аналітичний підхід, що враховує показники опору чутливих елементів та температурний стан досліджуваного вузла. На основі проведених фізичних експериментів та розрахунків визначено параметри напружено-деформованого стану тонкостінного диска за умов нерівномірного нагрівання.

8. Висновок наукового керівника

Виконання індивідуального навчального плану, індивідуального плану наукової роботи, досягнення результатів навчання за відповідною науково-освітньою програмою та написання дисертації Кригіним Сергієм Сергійовичем вважаю успішним. Дисертаційна робота є результатом самостійного дослідження, завершеною науковою працею, яка містить наукову новизну. Вона виконана на високому науковому рівні та відповідає всім установленим вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, й може бути рекомендована до захисту, а її автор Кригін Сергій Сергійович – до присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Отже, вважаємо, що дисертаційна робота Кригіна Сергія Сергійовича на тему «Забезпечення вимірювання деформацій конструктивних елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурах 600 – 700 °С», представлена на здобуття ступеня доктора філософії, відповідає вимогам Порядку присудження наукового ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44). Відтак, вона може бути представлена до захисту в разовій спеціалізованій раді для присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Головуючий на засіданні
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри конструкції авіаційних двигунів
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»



Сергій ЄПІФАНОВ