

УДК 621.452.3

doi: 10.32620/aktt.2026.2.02

С. С. КРИГІН<sup>1,2</sup>, Ю. О. ГУСЄВ<sup>2</sup>, Ю. І. ТОРБА<sup>1</sup><sup>1</sup> Акціонерне товариство «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

## ТЕНЗОМЕТРИЧНИЙ ПРИСТРІЙ І МЕТОД ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ВИСОКО-НАГРІТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Предмет вивчення в статті була розробка та випробування високотемпературного тензометра для вимірювання статичних та температурних деформацій у лопатках, дисках та корпусних елементах газотурбінних двигунів та інших енергетичних машин, що експлуатуються при температурах до 700 °С. Було здійснено порівняння з комерційними зразками низько- та високотемпературних тензометрів, а також представлено рекомендації щодо досліджень ГТД при підвищених температурах. Метою дослідження статті була розробка тензометра з урахуванням особливостей роботи елементів газотурбінних двигунів та інших енергетичних машин, зокрема, високих температур, агресивного навколишнього середовища та механічних навантажень. Завдання: запропонувати конструкцію тензометричного пристрою який можливо використовувати для вимірювання температури, статичних та температурних деформацій, та спосіб температурної компенсації уявних деформацій. Вимірювання деформацій відбувалося тензометричним методом за допомогою тензометричного пристрою, який був змонтований на поверхні диска, який піддавали впливу температурних напружень. Для перевірки отриманих експериментальних результатів авторами було проведено два аналітичні рішення міцності диска. Геометричні параметри та властивості матеріалу диска, а також градієнти температур у ньому, відповідають експериментальним. У першому варіанті аналітичного рішення термонапруженого стану диска використовувалася математична модель навантаження диска, у другому варіанті рішення виконано з використанням МСЕ у системі ANSYS. Отримані результати статті показали достатню точність та надійність тензометричного пристрою при роботі при високих температурах. При градієнті температури менше 50 °С на довжину ЧЕ, похибка не перевищує 400 мкм/м. У висновку показано, що запропонований датчик виконує достатню температурну компенсацію при температурі до 700 °С і стабільність сигналу в часі. Практичне значення роботи полягає у підвищенні достовірності діагностики та прогнозування ресурсної стійкості елементів газотурбінних установок.

**Ключові слова:** високотемпературний тензометр; статичні деформації; температурні деформації; термокомпенсація; газотурбінні двигуни.

### Вступ

Принцип вимірювання деформацій конструктивного елемента - деталі будь-якої машини, за допомогою тензометра, полягає в тому, що при деформації деталі змінюється електричний опір чутливого елемента (ЧЕ) тензорезистора на ній закріпленого. У роботах [1, 2] наводяться експериментальні дані про вплив всебічного (гідростатичного) стиску на електроопір металів. Внаслідок деформації матеріалу ЧЕ тензорезистора змінюється його опір, оскільки відбувається деформація кристалічної решітки і як наслідок змінюється довжина вільного пробігу електронів.

ЧЕ тензорезистора закріплюється на тілі досліджуваної деталі за допомогою ізолятора-сполучного.

Деформація деталі є прикладена вздовж головної осі тензорезистора та передана через шар ізолятора-сполучного до ЧЕ призводить до зміни його електричного опору  $R$  на величину  $\Delta R_{\varepsilon}$ . Крім того, зміна опору ЧЕ залежить від коефіцієнта передачі деформації в тензорезисторі –  $K_{\text{пр}}$  [2 - 4].

У разі застосування тензорезистора при високих температурах необхідно також враховувати її вплив на значення електричного опору ЧЕ тензорезистора, що сприймається вимірювальною апаратурою як уявна деформація, отже, можна записати:

$$\Delta R_{\varepsilon} = f(R, \varepsilon, K_{\text{пр}}, T). \quad (1)$$

При підвищених температурах електроізоляційні



властивості ізолятора – сполучного тензорезистора зменшуються. Це призводить до появи струмів шунтування від ЧЕ на тіло деталі та між провідниками ЧЕ через шар сполучного. Електроопір ЧЕ при цьому змінюється, на величину  $\Delta R_{ш}$  яка вимірювальною системою реєструється також як уявна деформація.

В даний час існує необхідність виміру відносних деформацій в елементах авіаційних газотурбінних двигунів, що працюють при температурах до 600-700 °С.

Значний внесок у розробку високотемпературних тензорезисторів (ВТ) внесли Р. Кемп і Б. Андерсон (США) [5, 6]. Вони створили тензорезистори для вимірювання статичних деформацій до 430 ... 450 °С, використовуючи для виготовлення ЧЕ сплави: едванс (50 ... 68% Cu; 50 ... 32% Ni, аналог константану) і карма (74% Ni; 20% Cr; 3%Fe; 3% Al); Однак едванс має низьку корозійну стійкість, що обмежує застосування цього матеріалу для виготовлення ЧЕ ВТ. Перевага дроту зі сплаву карма у більшій корозійній стійкості та у високому питомому опорі. Це дозволяє підвищити деформаційний сигнал ЧЕ тензорезистора. У роботі [2] наводяться дослідження нікель молібденового дроту сплаву НМ23 ХАЮ, які дозволяють зробити висновок про можливість їх застосування при статичному тензометруванні до температур 430...450 °С.

Відомо [7], що ізолятор-сполучне тензорезистору повинен мати високі електроізоляційні властивості, зменшення яких призводить до появи шунтування ЧЕ.

У роботах [8, 9], наводяться дослідження з застосування ВТ, одержуваних за допомогою роботизованої системи плазмового осадження - «MesoPlasma™». Застосування платини як ЧЕ тензорезистора не дозволяє розглядати його використання при дослідженні статичних і температурних деформацій, внаслідок значного температурного коефіцієнта опору (ТКО) платини. Застосування цих тензорезисторів можливе при аналізі динамічних деформацій, що виникають при резонансних режимах роботи лопаток турбін ГТД.

Інформація в [10] представляє використання плівкового ЧЕ тензорезистора із срібло-паладієвих компонентів, нанесеного на пласку підкладку з оксиду алюмінію, а в роботі [11] розглядається застосування в ВТ плівки платини, яка наноситься на електроізолюючий шар склоподібного SiO<sub>2</sub>, який наноситься на жаростійкий сплав. Дослідження, наведені в [12] представляють ВТ у вигляді тонких шарів електроізолятора - нітриду алюмінію завтовшки 3 нм і ЧЕ у вигляді плівки платини товщиною 7 нм, одержуваних вакуумним напиленням на сапфірову підкладку. Тензорезистор, з ЧЕ з плівки паладій-хромової композиції, одержуваний вакуумним напиленням, представлений у роботі [13].

Аналіз, представлених матеріалів по ЧЕ, дозволяє зробити висновок про те, що існуючі дослідження тензорезисторів, технології їх виготовлення і методи застосування не можуть забезпечити вимірювання статичних і температурних деформацій при температурах вище 450 °С в наслідок використання в якості металів ЧЕ платини, паладію і срібла, що мають значний ТКО. Що сприяє появі значної величини уявної деформації у досліджуваній деталі.

### Постановка задачі дослідження

Чутливі елементи тензометричного пристрою [14, 15] (див. рис.1) виконані із дроту діаметром 30 мкм, зі сплаву ніхром (Н80Х20) та складається з 4-ох витків, база чутливих елементів 5 мм. Опір ЧЕ становив 63 Ом, коефіцієнт тензочутливості  $K = 1,76$ .

Процес виготовлення пристрою складається з нанесення базового ізоляційного шару (високотемпературного цементу сполучного - ВКП-26Ц) завтовшки не більше ніж 0,1 мм, укладання решітки ЧЕ та нанесення покривного шару з подальшою термічною обробкою (ступеневим сушінням до температури 350°С) для видалення вологи та завершення хімічних реакцій. Операцію повторюють для другого ЧЕ, який розташовують ортогонально відносно першого.

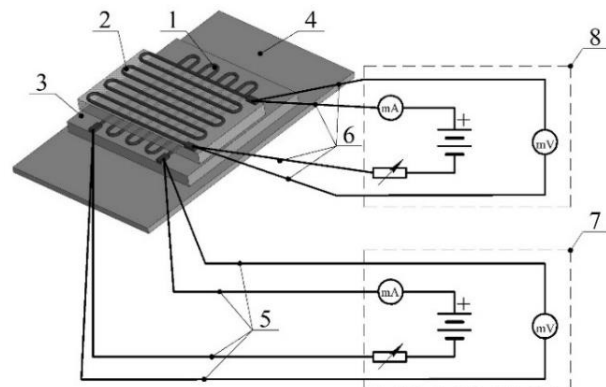


Рис. 1. Схема тензометричного пристрою: 1 – нижній ЧЕ; 2 – верхній ЧЕ; 3 – ізолятор-сполучне; 4 – деталь; 5, 6 – вивідні провідники; 7, 8 – вимірювальні пристрої з чотирьох провідною потенціометричною схемою підключення ЧЕ тензорезистора

Спосіб застосування пропонованого тензометричного пристрою полягає у використанні рівняння стану та вихідного сигналу тензорезистора. Опір тензорезистора є функцією деформації, температури та часу їхнього впливу, для цього вимірюємо електричний опір нижнього та верхнього ЧЕ, які представлені формулами (2) та (3):

$$R_H = R_0(1 + \alpha_L \cdot \Delta T \cdot K + \varepsilon_x \cdot K) \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (2)$$

$$R_B = R_0(1 + \alpha_L \cdot \Delta T \cdot K + \varepsilon_y \cdot K) \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (3)$$

де  $\Delta T$  – зміна температури деталі (градієнт);

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$  – відносна деформація деталі, при одночасному навантаженні  $\varepsilon_y = -\mu \varepsilon_x$ ;

$R_H$  – опір чутливого елемента, головна вісь якого співпадає з напрямком деформації досліджуваної деталі, що знаходиться під впливом деформації та температури;

$R_B$  – опір чутливого елемента, вісь якого ортогональна напрямку деформації досліджуваної деталі, що знаходиться під впливом деформації та температури;

$R_0$  – початковий опір чутливих елементів;

$K$  – коефіцієнт тензочутливості чутливих елементів;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт електричного опору матеріалу чутливих елементів;

$\alpha_L = \alpha_{Lд} - \alpha_{Lтр}$  – температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалів досліджуваної деталі та чутливих елементів;

$\mu$  – коефіцієнт Пуансона матеріалу деталі.

При одночасному навантаженні, для отримання експериментального значення відносної деформації деталі віднімаємо  $R_H - R_B$ , відкидаємо завідомо малі складові та отримуємо формулу (4), цю дію треба розглядати як температурну компенсацію збільшення електричних опорів ЧЕ при їх нагріванні.

При двовісному навантаженні температурна компенсація відносної деформації виконується наступним чином: у формули (2) – (3) підставляємо зміну температури деталі  $\Delta T$  отримані з температурних датчиків, для кожного ЧЕ та отримуємо формулу (5).

$$\varepsilon = \frac{R_H - R_B}{R_0 \cdot K \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \cdot (1 + \mu)}, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta R}{R_0} - \Delta T \cdot (\alpha + \alpha_L \cdot K)}{K \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)}. \quad (5)$$

Вимірювальна система, що застосовується, дозволяє за введеною в неї математичною залежністю і додаткових вхідних даних проводити необхідні обчислення за участю вимірюваних величин.

Для реєстрації зміни електроопору верхнього та нижнього ЧЕ тензометричних пристроїв, при дослідженні деформації диска, використовувалася вимірювальна система HBM SomatXR MX1615B-R.

Для реєстрації зміни температури диска, використовувалася вимірювальна система HBM SomatXR MX840B-R.

Для запису та обробки сигналу використовувалося спеціалізоване програмне забезпечення catman®AP ver.5.5.

## Результати

Оцінка термічного напруженого стану диска проведена під час створення у ньому пальником градієнту температури з його радіусу.

Для оцінки запропонованого тензометричного пристрою і способу його застосування авторами було проведено експериментальне дослідження з визначення напружено-деформованого стану нерівномірно нагрітого, тонкостінного диска з центральним отвором (рисунком 2). Зовнішній діаметр диска дорівнює 382 мм, діаметр центрального отвору 20 мм, товщина 6 мм, матеріал 12X18H10T. Градієнт температури по радіусу диска створений при його нагріванні через торцеву поверхню центрального отвору. Нагрів здійснювався газовим потоком, від газового пальника.

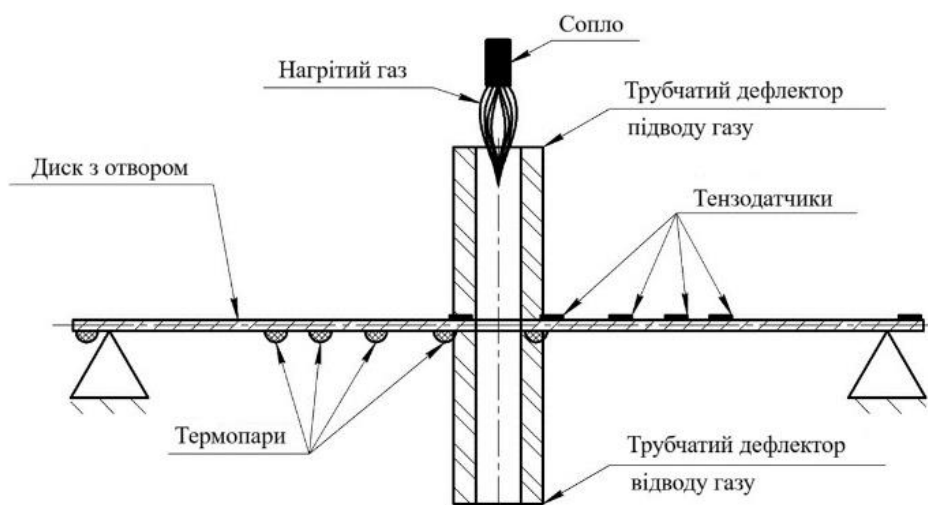


Рис. 2. Схема установки для нагріву диска

Для виключення обдування поверхонь диска газовим потоком, останній підводився до торцевої поверхні центрального отвору із застосуванням трубчастого дефлектора. Відведення газового потоку проводилося також за допомогою дефлектора з нижньої сторони диска. Герметизація дефлекторів щодо поверхонь диска забезпечувалася високотемпературним цементом. Диск встановлювався на конічних опорах, які дозволяли йому вільно розширюватися при нагріванні.

На двох взаємно перпендикулярних радіусах диска – встановлено 12 тензометричних пристроїв. Інтервал їх розташування на радіусі було визначено за результатами попередніх розрахунків теплових моделей диска. Диск із закріпленими на ньому тензометричними пристроями та хромель-алюмелевих термопар представлений на рисунку 3.

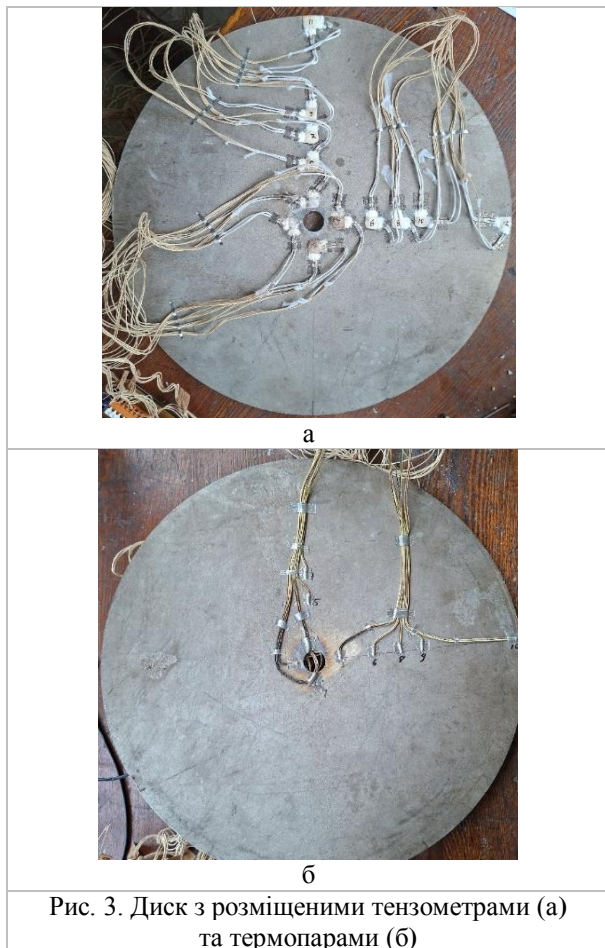


Рис. 3. Диск з розміщеними тензометрами (а) та термопарами (б)

Експериментально визначено розподіл відносної деформації по радіусу диска в радіальному та окружному напрямках під час створення у ньому пальником градієнту температури 20 – 700 °С по його радіусу.

Для перевірки отриманих експериментальних результатів авторами було проведено два аналітичні рішення міцності диска. Геометричні параметри та

властивості матеріалу диска, а також градієнти температур у ньому, відповідають експериментальним.

У першому варіанті аналітичного рішення використовувалася математична модель навантаження диска, представлена рівняннями (7) та (8):

$$d\sigma_R = -\sigma_R \left( \frac{dR}{R} + \frac{db}{b} \right) + \sigma_T \frac{dR}{R} - \rho\omega^2 R^2 \frac{dR}{R}, \quad (7)$$

$$d\sigma_T = \sigma_R \left( \frac{dR}{R} - \mu \frac{db}{b} - \mu \frac{dE}{E} \right) + \sigma_T \left( \frac{dR}{R} + \frac{dE}{E} \right) - \mu\rho\omega^2 R^2 \frac{dR}{R} - Ed(\alpha t) \quad (8)$$

де  $\sigma_R$  і  $\sigma_T$  – радіальні та окружні нормальні напруження;

$b$ ,  $R$  – поточні значення товщини та радіуса диска;

$\omega$  – кутова швидкість обертання диска;

$\rho$  – щільність матеріалу диска;

$E$  – модуль пружності матеріалу диска;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона;

$\alpha$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу диска;

$t$  – Температура елемента диска на радіусі  $R$ .

Представлена математична модель передбачає навантаження диска відцентровою силою. За відсутності обертання диска ( $\omega = 0$ ) в експериментальному дослідженні контурне навантаження в розрахунку вибиралося близьким до нуля, і враховувалося лише нерівномірне його нагрівання по радіусу. Рішення рівнянь (7) та (8) проведено з використанням методу кінцевих різниць. Математична модель, що використовується, дозволила отримати розподіл термічних напружень в диску, як по радіусу, так і в окружному напрямку.

Другий варіант аналітичного визначення термопруженого стану диска проведено з використанням скінчено-елементної моделі у системі ANSYS. Твердотільна модель диска з скінчено-елементною сіткою створеною з використанням системи Workbench представлена на рисунку 4.

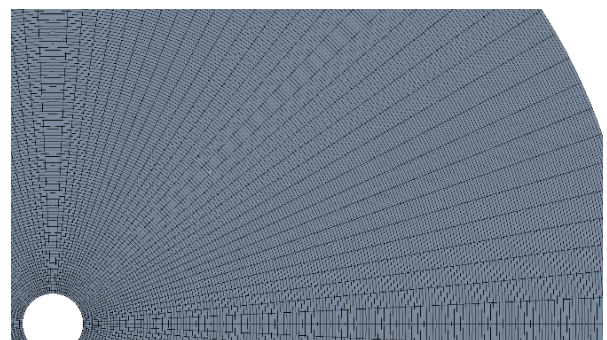


Рис. 4. Твердотільна модель диска з скінчено-елементною сіткою

Результати експериментальних досліджень та аналітичних розрахунків розподілу відносної деформації диска при градієнті температури 20 – 700 °С по його радіусу представлені на рисунку 5.

Для проведення порівняльного аналізу, результати експериментальних та розрахункових досліджень диска, наведені в таблиці 1.

### Висновки

У цій статті систематично досліджуються високотемпературні тензодатчики, що застосовуються за температур вище 800 °С. Спочатку йдеться про узагальнення принципів вимірювання високотемпературними тензодатчиками, аналіз джерел похибок вимі-

рювання та обговорення стратегій підвищення точності вимірювання. Далі в статті наведено огляд та аналіз матеріалів і конструкцій, що наразі використовуються у високотемпературних тензодатчиках, що працюють за температур 800 °С і вище.

Авторами було запропоновано тензометричний пристрій і способу його застосування. Для оцінки його працездатності та точності було проведено експериментальне дослідження з визначення напружено-деформованого стану нерівномірно нагрітого, тонкостінного диска. Результати експерименту були порівняні з аналітичним розрахунком та МКЕ ANSYS. При градієнті температури менше 50 °С на довжину ЧЕ, похибка не перевищує 400 мкм/м.

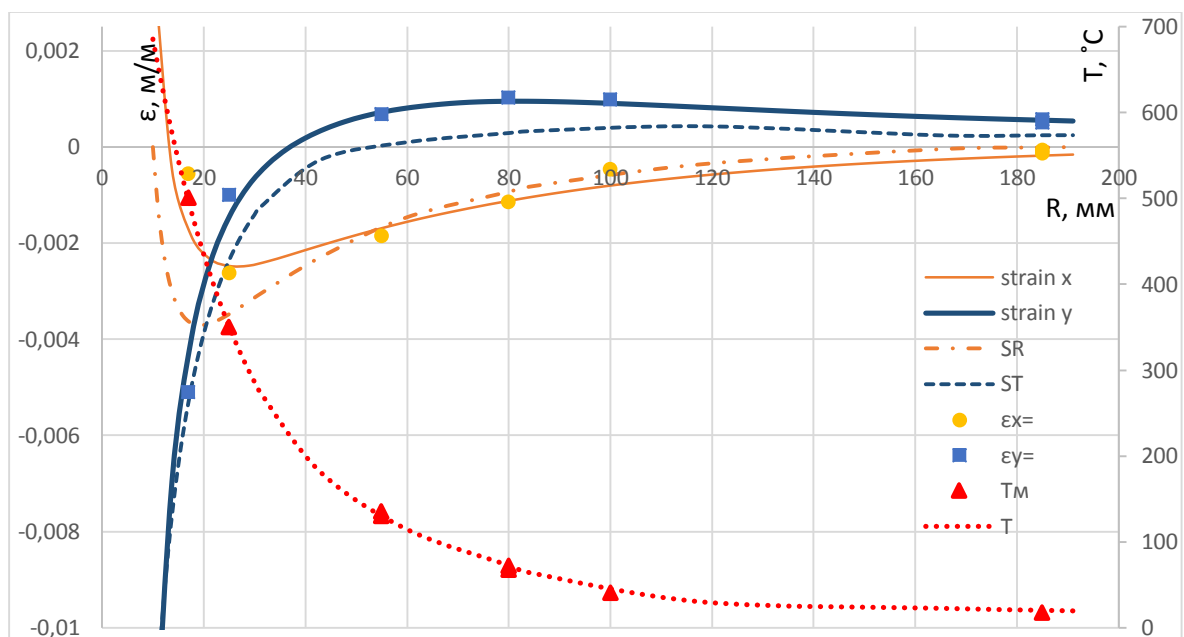


Рис. 5. Розподіл відносної деформації та температури по радіусу диска:  
 $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  – відносні деформації отримані з експерименту;  
 strain x, strain y – відносні деформації розраховані у ANSYS;  
 SR, ST – відносні деформації розраховані математичною моделлю;  
 T – температура розрахована; T<sub>м</sub> – температура виміряна

Таблиця 1

Результати експериментальних та розрахункових досліджень диска

R, мм	Експеримент		Математична модель		ANSYS	
	$\epsilon_R$	$\epsilon_T$	$\epsilon_R$	$\epsilon_T$	$\epsilon_R$	$\epsilon_T$
17	-5,58E-04*	-5,10E-03*	-2,45E-03	-4,81E-03	-1,85E-03	-4,00E-03
25	-2,62E-03	-1,00E-03	-2,68E-03	-1,86E-03	-2,48E-03	-1,44E-03
55	-1,85E-03	6,76E-04	-1,55E-03	5,96E-04	-1,69E-03	7,26E-04
80	-1,15E-03	1,03E-03	-9,74E-04	2,72E-04	-1,09E-03	9,50E-04
100	-4,73E-04	9,79E-04	-5,27E-04	9,28E-04	-8,00E-04	9,04E-04
185	-1,34E-04	5,64E-04	-1,02E-05	2,42E-04	-1,89E-04	5,59E-04

$\epsilon_R$  і  $\epsilon_T$  - радіальні та окружні деформації;

\*датчики розташовані на ділянках зі значним температурним градієнтом (більше 100 °С на довжину ЧЕ) в наслідок чого отримані дані мають значну похибку.

Таким чином, досліджуваний тензометричний пристрій і спосіб його застосування можуть бути використані при експериментальному дослідженні напружено-деформаційного стану елементів конструкцій, що працюють в умовах нерівномірного нагрівання при температурах до 700 °С.

**Внесок авторів:** формулювання проблеми – С. С. Кригін, Ю. О. Гусєв; огляд та аналіз інформаційних джерел – Ю. О. Гусєв, Ю. І. Торба; розробка дослідницького стенда – С. С. Кригін, Ю. О. Гусєв, Ю. І. Торба; результати – С. С. Кригін, Ю. О. Гусєв; висновки – С. С. Кригін, Ю. І. Торба.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

### Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

### Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

### Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

### Література

1. Лоусон, А. У. Давление как параметр в физике твердого тела [Текст] / А. У. Лоусон // Твердые тела под высоким давлением. – М. : Мир, 1966. – С. 20-54.
2. Клокова, Н. П. Тензорезисторы: теория, методика расчета, разработки [Текст] / Н. П. Клокова. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.
3. Рузга, З. Электрические тензометры сопротивления [Текст] / З. Рузга. – М. : Госэнергоиздат, 1961. – 335 с.
4. Гусєв, Ю. О. Високотемпературна тензометрія [Текст] : монографія / Ю. О. Гусєв. – Харків : Нац. аэрокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 169 с.
5. Кемп, Р. Исследование свойств высокотемпературных тензодатчиков для замера статических и динамических деформаций [Текст] / Р. Кемп // Высокотемпературные тензодатчики : сб. науч. ст. – 1963. – С. 59–78.

6. Андерсон, Б. Разработка и применение высокотемпературных тензодатчиков, предназначенных для измерения напряжения в турбореактивных двигателях [Текст] / Б. Андерсон // Высокотемпературные тензодатчики : сб. ст. – М., 1963. – С. 113–124.

7. High-Temperature Strain Gauge Measurement Techniques for Temperatures Above 800 °C: A Review [Text] / W. Wang, R. Zong, D. Li, J. Zhang, G. Teng, & S. Li // Materials. – 2025. – Vol. 18, iss. 7. – Article no. 1588. DOI: 10.3390/ma18071588.

8. Development and f-class industrial gas turbine engine testing of smart components with direct-write embedded sensors and high temperature wireless telemetry [Text] / D. Mitchell, A. Kulkarni, E. Roesch, & et al. // In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. – 2008. – Vol. 43123. – P. 381-388.

9. Development and testing of harsh environment, wireless sensor systems for industrial gas turbines [Text] / D. Mitchell, A. Kulkarni, A. Lostetter, et al. // ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. June 8–12, 2009, Orlando, Florida, USA. – 2010. – Article no. GT2009-60316. – P. 777-784. DOI: 10.1115/GT2009-60316.

10. AgPd thin-film strain gauges fabricated by direct writing for high-temperature application [Text] / C. Wu, F. Lin, X. Pan, & et al. // IEEE Sensors Journal. – 2022. – Vol. 22, iss. 23. – P. 22473-22478. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3216369

11. Multilayer co-sintered Pt thin-film strain gauge for high-temperature applications [Text] / C. Wu, F. Lin, Y. Fu, & et al. // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Vol. 459. – Article no. 129380. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129380.

12. Influence of the AlN/Pt-ratio on the electro-mechanical properties of multilayered AlN/Pt thin film strain gauges at high temperatures [Text] / P. Schmid, F. Triendl, C. Zarfl, & et al. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – Vol. 302. – Article no. 111805. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111805.

13. High temperature static and dynamic strain response of PdCr thin film strain gauge prepared on Ni-based superalloy [Text] / H. Liu, X. Mao, Z. Yang, & et al. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2019. – Vol. 298. – Article no. 111571. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111571.

14. Похибки передачі відносних деформацій у тензометричному пристрої при підвищеній температурі [Текст] / С. С. Кригін, Ю. О. Гусєв, Ю. І. Торба, & О. В. Білогуб // Авіаційно-космічна техніка та технологія. – 2025. – № 4 спецвипуск 2 (206). – С. 119–124. DOI: 10.32620/akt.2025.4sup2.13.

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

## References

1. Louson, A. U. *Davlenye kak parametr v fizyke tverdoho tela* [Pressure as a parameter in solid state physics]. *Tverdye tela pod vysokym davlenym – Solids under high pressure*. Moscow, *Myr Publ.*, 1966, pp. 20-54. (In Russian).
2. Klokova, N. P. *Tenzorezystory: Teoriya, metodyka rascheta, razrabotky* [Strain gauges: theory, calculation methods, development]. Moscow, *Mashynostroenyey Publ.*, 1990. 224 p. (In Russian).
3. Ruzgha, Z. *Elektrycheskiye tenzometry soprotivleniya* [Electrical resistance strain gauges]. Moscow, *Hosenerhoizdat Publ.*, 1961. 335 p. (In Russian).
4. Husiev, Yu. O. *Vysokotemperaturna tenzometriia* [High-temperature strain gauge]. Kharkiv, *Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho «Kharkiv. aviats. yn-t»*, 2021. 169 p. (In Russian).
5. Kemp, R. *Yssledovanye svoystv vysokotemperaturnykh tenzodatchykov dlia zamera statycheskykh y dyna-mycheskykh deformatsyi* [Investigation of properties of high-temperature strain gauges for measuring static and dynamic strains]. *Vysoko-temperaturnye tenzodatchyky: sb. nauch. st.* [High-temperature strain gauges: collection of scientific articles.], 1963, pp. 59–78. (In Russian).
6. Anderson, B. *Razrabotka y prymerenye vysokotemperaturnykh tenzodatchykov, prednazna-chennykh dlia yzmereniya napriazheniya v turboreaktyvnykh dvyhateliakh* [Development and application of high-temperature strain gauges intended for measuring stress in turbojet engines]. *Vysokotemperaturnye tenzodatchyky: sb. st.* [High-temperature strain gauges]. Moscow, 1963, pp. 113–124. (In Russian).
7. Wang, W., Zong, R., Li, D., Zhang, J., Teng, G., & Li, S. High-Temperature Strain Gauge Measurement Techniques for Temperatures Above 800 °C: A Review. *Materials*, 2025, vol. 18, iss. 7, article no. 1588. DOI: 10.3390/ma18071588.
8. Mitchell, D., Kulkarni, A., Roesch, E., Subramanian, R., Burns, A., Brogan, J., & Waits, R. Development and F-Class Industrial Gas Turbine Engine Testing of Smart Components With Direct-Write Embedded Sensors and High Temperature Wireless Telemetry. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2008, vol. 43123, pp. 381-388.
9. Mitchell, D., Kulkarni, A., Lostetter, A., Schupbach, M., Fraley, J., & Waits, R. Development and testing of harsh environment, wireless sensor systems for industrial gas turbines. *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. June 8–12, 2009*, Orlando, Florida, USA, 2010, article no. GT2009-60316, pp. 777-784. DOI: 10.1115/GT2009-60316.
10. Wu, C., Lin, F., Pan, X., Zeng, Y., Fu, Y., Chen, G., & Hai, Z. AgPd thin-film strain gauges fabricated by direct writing for high-temperature application. *IEEE Sensors Journal*, 2022, vol. 22, iss. 23, pp. 22473-22478. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3216369.
11. Wu, C., Lin, F., Fu, Y., Zeng, Y., Chen, G., Xu, L., & Hai, Z. Multilayer co-sintered Pt thin-film strain gauge for high-temperature applications. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 459, article no. 129380. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129380.
12. Schmid, P., Triendl, F., Zarfl, C., Schwarz, S., Artner, W., Schneider, M., & Schmid, U. Influence of the AlN/Pt-ratio on the electro-mechanical properties of multilayered AlN/Pt thin film strain gauges at high temperatures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, vol. 302, article no. 111805. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111805.
13. Liu, H., Mao, X., Yang, Z., Cui, J., Jiang, S., & Zhang, W. High temperature static and dynamic strain response of PdCr thin film strain gauge prepared on Ni-based superalloy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 298, article no. 111571. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111571.
14. Kryhin, S., Husyev, Y., Torba, Y., & Bilohub, O. Pokhybky peredachi vidnosnykh deformatsiy u tenzome-trychnomu prystroyi pry pidvyshcheniy temperaturi [Errors in relative deformation transmission in a strain gage device at elevated temperature]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2025, no. 4 sup.2, pp. 119–124. DOI: 10.32620/akt.2025.4sup2.13. (In Ukrainian).
15. Husiev Yu. O., Kryhin S. S., Torba Yu. I. *Tenzometrychniy prystrii dlia vymiriuvannia vidnosnykh defor-matsii detalei aviatsiinykh dvyhuniv* [Strain gauge device for measuring relative deformations of aircraft engine parts]. Patent UA, № 158117, 2025. (In Ukrainian).

Отримано 07.01.2026, отримано у доопрацьованому вигляді 12.02.2026

Дата ухвалення 15.04.2026, дата публікації 22.04.2026

## STRAIN GAUGE AND METHOD OF ITS USE IN STUDYING THE STRESS-DEFORMED STATE AND TEMPERATURE DEFORMATIONS OF HIGH-HEATED ELEMENTS OF GAS TURBINE ENGINES

*Serhiy Kryhin, Yuriy Husyev, Yuriy Torba*

The subject of the study was the development and testing of a high-temperature strain gauge for measuring static and temperature deformations in the blades, disks, and housing elements of gas turbine engines and other power machines operated at temperatures up to 700 °C. A comparison was made with commercial samples of low- and high-temperature strain gauges, and recommendations were presented for research on gas turbine engines at elevated temperatures. The purpose of the study of the article was to develop a strain gauge considering the peculiarities of the operation of elements of gas turbine engines and other power machines, in particular, high temperatures, aggressive environments, and mechanical loads. The task was to propose a design for a strain gauge device that can be used to

measure temperature, static, and temperature deformations, and a method for the temperature compensation of imaginary deformations. The deformations were measured by the strain gauge method using a strain gauge device that was mounted on the surface of the disk, which was subjected to temperature stresses. To verify the obtained experimental results, the authors conducted two analytical solutions of the disk strength. The geometric parameters and properties of the disk material, as well as the temperature gradients in it, correspond to the experimental ones. In the first variant of the analytical solution of the thermally stressed state of the disk, a mathematical model of disk loading was used, in the second variant, the solution was performed using FEM in the ANSYS system. The obtained results of the article showed sufficient accuracy and reliability for the strain gauge device when operating at high temperatures. With a temperature gradient of less than 50 °C along the length of the SE, the error does not exceed 400 μm/m. The conclusion shows that the proposed sensor performs sufficient temperature compensation at temperatures up to 700 °C and provides signal stability over time. The practical significance of the work lies in increasing the reliability of diagnostics and forecasting the service life stability of gas turbine plant elements.

**Keywords:** high-temperature strain gauge; static deformations; temperature deformations; thermal compensation; gas turbine engines, shunt currents.

**Кригін Сергій Сергійович** – асп. каф. конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; провідний інженер ЕВК АТ «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Гусєв Юрій Олексійович** – канд. техн. наук, доц., проф, каф, конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, Україна.

**Торба Юрій Іванович** – канд. техн. наук, начальник експериментально-випробувального комплексу АТ «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Serhiy Kryhin** – PhD Student, Department of Aircraft Engine Design, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine; Leading Research Engineer, JSC "Ivchenko-Progres", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: sergice1984@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7139-3815.

**Yuriy Husyev** – Cand. Tech. Sci., Associate Professor, Professor at the Department of Aircraft Engine Design, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: gusev.yurii.a@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3776-9844.

**Yuriy Torba** – Cand. Tech. Sci., Head of the Complex, JSC "Ivchenko-Progres", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: torba.yuriy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8470-9049.