

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Кригін Сергій Сергійович

УДК 621.452.3: 681.518.2

ДИСЕРТАЦІЯ

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНІВ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 600-700 °С.

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування
Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і тестів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ С. С. Кригін

Наукові керівники: Гусєв Юрій Олексійович, к.т.н., професор
Торба Юрій Іванович, кандидат технічних наук

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Кригін С. С. Забезпечення вимірювання деформацій конструктивних елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурах 600-700 °С. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – «Енергетичне машинобудування» (14 Електрична інженерія) – Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2026.

Дисертаційна робота присвячена актуальному питанню вимірювання напружено деформованого стану безпосередньо під час роботи газотурбінних двигунів (ГТД) для забезпечення надійності та верифікації розрахункових моделей під час повномасштабних тензометричних випробувань.

У роботі виконано аналіз проблеми визначення статичного напружено-деформованого стану високонагрітих деталей ГТД. Підвищення робочої температури в ГТД значно покращує енергетичну ефективність, проте створює критичні виклики для надійності «гарячої частини» конструкції. Виникнення значних температурних градієнтів і нерівномірне термічне розширення матеріалів призводять до виникнення складних напружено-деформованих станів (НДС) деталей. Оскільки фізичні властивості матеріалів залежать від температури, аналіз таких систем потребує врахування нелінійних чинників. Для забезпечення довговічності та запобігання незворотній деформації або руйнуванню елементів ГТД, критично важливим є комплексне моделювання термічних навантажень з урахуванням складної конфігурації деталей і нестационарних температурних режимів.

Запропоновано новий тензометричний пристрій, що дозволяє досліджувати термонапружений стан високо нагрітих елементів двигуна. Його конструкція базується на використанні двох чутливих елементів, розташованих паралельно металевій платівці (що має ідентичний із деталлю коефіцієнт температурного розширення) та ізольованих високотемпературним клеєм-цементом ВКП-26Ц. Ортогональне розташування елементів забезпечує високу точність вимірювань, а використання неорганічного клею гарантує надійну фіксацію та захист датчиків від

агресивного середовища під час експлуатації. Це рішення значно підвищує ефективність і стабільність моніторингу деформаційних процесів у високонавантажених вузлах авіаційної техніки.

Удосконалено метод виконання тензометричних досліджень високотемпературних елементів двигунів і енергетичних установок шляхом застосування зазначеного тензометричного пристрою. Представлена методика базується на аналізі рівняння стану тензорезистора, де опір є функцією деформації, температури та часу. Для забезпечення температурної компенсації в системі застосовуються два чутливі елементи: нижній і верхній. Експериментальне значення відносної деформації визначається шляхом обробки отриманих значень електричного опору цих елементів. Процес обробки та автоматизації розрахунків реалізовано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що інтегрує математичні залежності з вхідними даними вимірювань для отримання достовірних результатів деформації в умовах високих температур.

Розроблено метод оцінювання похибки вимірювання деформацій тензометричним пристроєм, обумовлені шунтуванням його чутливих елементів через шар сполучного, що сприймаються вимірювальною апаратурою як уявна деформація. Двоелементна архітектура ефективно зменшує шунтуючі струми в первинному чутливому шарі, значно зменшуючи похибки вимірювання, спричинені термічною деградацією сполучної ізоляції. Крім того, нова методологія розрахунку похибок, що використовує електричну модель, побудовану в рамках системи диференціальних рівнянь зі скінченними різницями. Цей матричний підхід підвищує точність оцінки статичної деформації в екстремальних теплових середовищах.

За допомогою скінченно-елементного методу досліджено передачу деформації та температури від поверхні досліджуваної деталі до чутливих елементів тензометричного пристрою. Під дією теплового потоку та навантаження при температурі 700 °C чутливі елементи зареєстрували 96% деформації деталі. Ці результати мають теоретичне та практичне значення для підвищення точності досліджень за підвищених температур та внесення необхідних коригувань у вимірювання.

Здійснено верифікацію працездатності та точності запропонованого тензометричного пристрою.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

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 отриманих результатів:

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.

Отримані наукові результати можуть бути використані в організаціях, що спеціалізуються на дослідженні статичної та динамічної міцності конструкцій ГТД.

Ключові слова: газотурбінний двигун, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, міцність, високотемпературний тензодатчик, тепловий стан, похибки вимірювання, компенсація похибок, температурна уявна деформація, коефіцієнт тензочутливості,.

Список публікацій здобувача:

Статті у наукових фахових виданнях затверджених МОН України:

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. Гусєв, Ю. О. Вплив шунтування високотемпературних тензорозісторів на точність виміру статичних деформацій елементів ГТД / Ю. О. Гусєв, 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. Гусєв, 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 тензومتра 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 тензометричному пристрої при підвищеній температурі / 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: <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.13>.
6. Кригін, С. С. Тензометричний пристрій і метод його використання при дослідженні напружено-деформованого стану та температурних деформацій високо-нагрітих елементів газотурбінних двигунів. / С. С. Кригін, Ю. О. Гусєв, Ю. І. Торба // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2026. – № 2 (210). – С. 12-19. doi: <https://doi.org/10.32620/aktt.2026.2.02>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Кригін С. С. Огляд тензометричних систем та похибок, які виникають при тензометруванні 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 тензометричному 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.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Пат. 158117 Україна, МПК G01B7/16. Тензометричний 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 високо-температурних деталей / Кригін С. С., Гусев Ю. О., Торба Ю. І. – № u202506065 ; заявл. 04.12.2025 ; опубл. 27.05.2026, Бюл. № 21/2026.

ABSTRACT

Kryhin S. S. Ensuring the measurement of deformations of structural elements of engines and power plants operating at temperatures of 600-700 °C. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 142 – “Energy Engineering” (14 Electrical Engineering) – National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to the topical issue of measuring the stress-strain state directly during the operation of the gas turbine engine to ensure the reliability and verification of calculation models during full-scale strain gauge tests.

The work analyzes the problem of determining the static stress-strain state in highly heated gas turbine engine parts. Increasing the operating temperature in gas turbine engines (GTE) significantly improves energy efficiency, but creates critical challenges for the reliability of the “hot part” of the structure. The emergence of significant temperature gradients and non-uniform thermal expansion of materials lead to the emergence of complex stress-strain states (SSS). Since the physical properties of materials depend on temperature, the analysis of such systems requires taking into account nonlinear factors. To ensure durability and prevent irreversible deformation or destruction of GTE elements, comprehensive modeling of thermal loads is critically important, taking into account the complex configuration of parts and non-stationary temperature regimes.

A new strain gauge device is proposed that allows for the study of the thermal stress state of highly heated engine elements. The design is based on the use of two sensitive elements located parallel to a metal plate (which has an identical coefficient of thermal expansion to the part) and insulated with high-temperature adhesive cement VKP-26C. The orthogonal arrangement of the elements ensures high measurement accuracy, and the use of inorganic glue guarantees reliable fixation and protection of the sensors from aggressive environments during operation. This solution significantly increases the efficiency and stability of monitoring deformation processes in highly loaded aircraft components.

The method for performing strain gauge studies of high-temperature engine elements and power plants has been improved by using the specified strain gauge device. The presented technique is based on the analysis of the equation of state of a strain gauge, where the resistance is a function of deformation, temperature and time. To ensure temperature compensation in the system, two sensitive elements are used: lower and upper. The experimental value of the relative deformation is determined by processing the obtained electrical resistances of these elements. The process of processing and automation of calculations is implemented using specialized software that integrates mathematical dependencies with input measurement data to obtain reliable deformation results in high temperature conditions.

A method for estimating the measurement error of strain gauges caused by shunting of their sensitive elements through a layer of binder, which are perceived by the measuring equipment as an imaginary deformation, has been developed. The two-element architecture effectively reduces shunting currents in the primary sensitive layer, significantly reducing measurement errors caused by thermal degradation of the binder insulation. In addition, a new methodology for calculating errors using an electrical model built within the framework of a system of differential equations with finite differences. This matrix approach increases the accuracy of estimating static deformation in extreme thermal environments.

Using the finite element method, the transfer of deformation and temperature from the surface of the tested part to the sensitive elements of the strain gauge was investigated. Under the action of heat flow and load at a temperature of 700 °C, the sensitive elements registered 96% of the deformation of the part. These results have theoretical and practical significance for increasing the accuracy of research at elevated temperatures and making the necessary adjustments to measurements.

Verification of the operability and accuracy of the proposed strain gauge device was carried out. Practical application of the developed means and methods of static deformations of highly heated elements of the gas turbine engine.

Scientific novelty of the dissertation work:

1. A novel principle is proposed for measuring relative static force and thermal deformation in engine and power plant components operating at temperatures between 650°C and 700°C. This method accounts for the thermal influence of heated parts on the strain gauge system by leveraging the interaction between two sensing elements stacked within a layer of high-temperature binder.
2. A mathematical model has been developed to analyze the interaction between heated components and a dual-element stacked strain gauge system. This model facilitates the analysis of deformation transfer from the part to the sensors, accounts for their elastic interaction with the binder, and enables the assessment of measurement error as a function of operating temperature.
3. The methodology for performing high-temperature strain gauge studies has been significantly enhanced. By utilizing the aforementioned stacked sensor configuration and determining optimal surface orientation via finite element modeling, the system achieves improved accuracy. Furthermore, temperature effects are actively compensated for using calibration characteristics established during the experimental preparation phase.
4. Analytical techniques for evaluating measurement errors in relative static deformation have been advanced through the implementation of a new signal-formation model. By incorporating the effects of shunting into the strain gauge device's mathematical framework, this approach allows for reliable testing at significantly higher operating temperatures.

The practical significance of the obtained results:

1. Based on the proposed principle of measuring relative static force and temperature deformations and the corresponding mathematical model of the interaction of sensitive elements, a strain gauge device is proposed for monitoring the thermally stressed state of engine elements operating in high-temperature conditions, the design of which is based on the use of two orthogonally placed sensitive elements. The reliability of sensor fixation and their resistance to aggressive operating environments is ensured by the use of specialized high-temperature adhesive cement. This technical solution allows determining stresses in critical engine components in extreme operating conditions.

2. Specialized software has been developed and the process of strain gauge studies of engine structural elements has been automated. The proposed approach is based on the analysis of the equation of state of the tensor resistor, which takes into account the influence of deformation, temperature and time factors. To ensure temperature compensation, the system uses two sensitive elements, the signals of which are processed to determine the relative deformation. The process is automated using specialized software.
3. A new method for estimating the errors of strain gauge measurements caused by shunting of sensitive elements through a layer of composite material under high temperature conditions has been developed. The accuracy of static deformation determination has been increased by using the proposed mathematical model in the form of a system of differential equations based on the finite difference method.
4. The deformation characteristic of the strain gauge under conditions of simultaneous thermal and force effects has been determined by computational modeling methods. The obtained data make it possible to eliminate temperature errors, which is critically important for increasing the accuracy of measurements and formulating proposals for further improvement of the design.
5. The effectiveness of the control device and the method of its use have been confirmed by analyzing the stress-strain state of a thin-walled disk with a central hole. To simulate difficult operating conditions, a radial temperature gradient was created by heating the inner edge of the disk using a gas burner. The obtained results confirmed the effectiveness of the device for monitoring structural integrity under conditions of non-uniform thermal loading.

The obtained scientific results can be used in organizations specializing in the study of static and thermal strength of gas turbine engine structures.

Keywords: gas turbine engine, finite element method, effective elastic characteristics, stress-strain state, strength, experimental verification, high-temperature strain gauge, thermal gradients, thermal expansion, measurement errors, error compensation, temperature apparent strain, strain sensitivity coefficient.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ ПРИ ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ НАПРУЖЕНО ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНІВ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК.....	25
1.1 Особливості роботи елементів конструкцій ГТД, що працюють в умовах високотемпературного статичного навантаження.....	25
1.2 Високотемпературні тензорезистори для оцінки напружено- деформованого стану елементів газотурбінних двигунів (конструктивні та технологічні особливості).....	29
1.3 Похибки, вимірювання високотемпературними тензорезисторами при дослідженні напружено–деформованого стану елементів конструкцій.....	39
1.4 Особливості застосування високотемпературних тензорезисторів для дослідження напружено деформованого стану елементів конструкцій.....	47
1.5 Висновки з розділу, постановка задачі та передбачувані шляхи її вирішення 55	
Література до першого розділу.....	57
РОЗДІЛ 2. ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ ТЕНЗОМЕТРИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНІВ і ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК.....	67
2.1 Конструкція ВТП.....	67
2.1.1 Чутливі елементи.....	73
2.1.2 Сполучне.....	74
2.1.3 Особливості технології ВТП на фольговій підкладці.....	76
2.2 Основні властивості та характеристики ВТП.....	77
2.2.1 Особливості методики дослідження температурної характеристики ВТП на установці АТ «Івченко-ПРОГРЕС».....	79

2.2.2 Дослідження ВТП на установці ХАІ з використанням балки чистого вигину	83
2.2.3 Дослідження характеристик ВТП на фольговій підкладці	87
2.4 Обговорення результатів	91
Література до другого розділу	92
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕНЗОМЕТРИЧНОГО ПРИСТРОЮ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ДВИГУНІВ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК	95
3.1 Спосіб приєднання ВТП до вимірювальної системи та вимоги до реєструючих приладів	95
3.2 Методика застосування ВТП для дослідження термонапруженого стану елементів конструкцій	99
3.2.1 Попередній розрахунок досліджуваної конструкції МСЕ з метою визначення напрямку головного вектора силового впливу	99
3.2.2 Алгоритм розрахунку відносної деформації досліджуваного елемента конструкції з використанням показань електричних опорів нижнього (головного) та верхнього (поперечного) ЧЕ	100
3.4 Обговорення результатів	105
Література до третього розділу	106
Розділ 4. Аналіз похибок і підвищення точності вимірювання деформацій елементів двигунів і енергетичних установок	108
4.1 Методичні похибки ВТП	108
4.2 Вплив шунтування через сполучне на результати вимірювання деформації досліджуваної деталі	111
4.2.1 Математична модель шунтування ВТП	112
4.2.2 Електрична модель шунтування ВТП	113
4.3 Поправки на результати вимірів ВТП від шунтування	122
4.4 Аналіз передачі деформації до ВТП	124
4.4.1 Розрахунок передачі деформації у ВТП у системі ANSYS	124
4.5 Обговорення результатів	128

	15
Література до четвертого розділу.....	129
Розділ 5. Застосування високотемпературного тензометричного пристрою при випробуваннях газотурбинних двигунів.....	131
5.1 Методика досліджень деформації елементів ГТД.....	131
5.2 Експериментальне визначення відносної деформації в тонкостінному нерівномірно прогрітому диску з центральним отвором з використанням ВТП. 132	
5.2.1 Розрахунок розподілу відносної деформації в тонкостінному нерівномірно прогрітому диску з центральним отвором із використанням системи ANSYS.....	135
5.2.2 Розрахунок розподілу відносної деформації в тонкостінному нерівномірно прогрітому диску з центральним отвором з використанням аналітичної моделі навантаження диска.....	136
5.2.3 Порівняльний аналіз результатів експериментального та розрахункових методів розподілу відносної деформації в диску.....	139
5.3 Дослідження відносної деформації кронштейна кріплення жарової труби основної камери згоряння турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою (AI-222K-25Ф).....	139
5.3.1 Аналіз результатів експериментального навантаження кронштейна жарової труби КЗ і рекомендації щодо конструктивного рішення.....	145
5.4 Обговорення результатів.....	145
Література до п'ятого розділу.....	146
ВИСНОВКИ.....	147
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	150
ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЇ.....	152

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

Умовні позначення та символи

R – номінальний опір тензорезистора, Ом;
 R_0 – початковий опір тензорезистора, Ом;
 ΔR – зміна електричного опору, Ом;
 K_T – коефіцієнт тензочутливості;
 ε – відносна лінійна деформація;
 E – модуль Юнга, Па;
 μ – коефіцієнт Пуассона;
 α – коефіцієнт лінійного теплового розширення;
 ΔT – зміна температури, К;
 T – абсолютна температура, К;
 α – температурний коефіцієнт електричного опору;
 α_L – температурні коефіцієнти лінійного розширення;
 σ_R і σ_T – радіальні та окружні нормальні напруження.

Скорочення

ВТП – високотемпературний тензометричний пристрій;
ГТД – газотурбінний двигун;
КЗ – камера згоряння;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КТР – коефіцієнт термічного розширення;
ММ – математична модель;
МСЕ – метод скінченних елементів;
НДС – напружено-деформований стан;
СА – сопловий апарат;
ТКО – температурний коефіцієнт опору;
ТЧЕ – тензочутливий елемент;
ЧЕ – чутливий елемент.

ВСТУП

Актуальність теми. 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. Для подолання цих обмежень впроваджуються інноваційні рішення: використання монокристалічних сплавів, термобар'єрних покриттів, складних систем охолодження та керамічних композитів. 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.

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

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

Дисертаційна робота виконувалася у: 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».

Мета – підвищення точності експериментального визначення деформацій високонагрітих деталей двигунів і енергетичних установок.

Об'єкт дослідження – процес передачі деформації в умовах взаємодії високонагрітих деталей двигунів і енергетичних установок з елементами тензометричної системи.

Предмет дослідження – закономірності, 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.

Наукова новизна

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.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

а) виконати огляд інформації про визначення статичних напружень у високонагрітих деталях ГТД;

б) модернізувати інструмент – тензометричний пристрій, що дозволяє проводити дослідження термонапруженого стану високо нагрітих елементів двигуна,

в) удосконалити метод виконання тензометричних досліджень високотемпературних елементів двигунів та енергетичних установок шляхом застосування зазначених тензометричних пристроїв;

г) розробити метод оцінки похибки вимірювання деформацій тензометричним пристроєм, обумовлені шунтуванням його ЧЕ через шар сполучного, що сприймаються вимірювальною апаратурою як уявна деформація;

д) дослідити передачу деформації від поверхні досліджуваної деталі до ЧЕ тензометричного пристрою,

е) практично застосувати розроблені засоби та методи його при дослідженні статичних деформацій високо нагрітих елементів ГТД.

Практичне значення отриманих результатів.

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.

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.

Особистий внесок здобувача. Усі положення наукової новизни, висновки та рекомендації, викладені в дисертації, виконано особисто автором. На захист не виносяться результати, що належать співавторам, разом з якими опубліковано наукові праці.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на: XXVI, XXVII, XXX міжнародних конгресах двигунобудівників (Україна, м. Харків, 2021 р., 2022 р., 2025 р.)

Публікації. Основні наукові положення та практичні результати дисертаційної роботи опубліковано в 6 статтях в журналах [1–6], що входять до переліку

наукових фахових видань України; окрім цього, основні результати роботи опубліковано в 3 тезах науково-технічних конференцій [7–9] і 2 патентах [10-11].

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 тензометрії 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–тензомер", 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 одно-вісному 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.

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

Література до вступу

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. Гусєв, Ю. О. Вплив шунтування високотемпературних тензорозісторів на точність виміру статичних деформацій елементів ГТД / Ю. О. Гусєв, 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. Гусєв, 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 тензометричному пристрої при підвищеній температурі / 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: <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.13>
6. Кригін, С. С. Тензометричний пристрій і метод його використання при дослідженні напружено-деформованого стану та температурних деформацій високо-нагрітих елементів газотурбінних двигунів. / С. С. Кригін,

- Ю. О. Гусєв, 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 тензометричних систем та похибок, які виникають при тензометруванні 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. 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.
 9. Кригін С. С. Математична модель передачі температури та статичних деформацій у тензометричному 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.
 10. Пат. 158117 Україна, МПК G01B7/16. Тензометричний пристрій для вимірювання відносних деформацій деталей авіаційних двигунів / Гусєв Ю. О., Кригін С. С., Торба Ю. І. – № u202402265 ; заявл. 29.04.2024 ; опубл. 01.01.2025, Бюл. № 1/2025. – 25 с.
 11. 2. Пат. 163155 Україна, МПК G01B7/16, G01K7/16. Спосіб одночасного тензометричного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей / Кригін С. С., Гусєв Ю. О., Торба Ю. І. – № u202506065 ; заявл. 04.12.2025 ; опубл. 27.05.2026, Бюл. № 21/2026.

РОЗДІЛ 1.

ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ ПРИ ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ НАПРУЖЕНО ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНІВ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

У роботі розглядаються тензометричний метод оцінки напружено деформованого стану елементів газотурбінних двигунів.

Використання високотемпературних тензодатчиків – складний, проте безальтернативний метод аналізу напружень у термонавантажених конструкціях. Успіх вимірювань залежить від якості підготовки поверхні, надійності монтажу, правильної маршрутизації дротів і ефективної температурної компенсації. Найвищої точності дозволяє досягти калібрування безпосередньо на об'єкті. Ураховуючи необхідність ретельного аналізу похибок при інтерпретації сигналів, удосконалення цих датчиків залишається ключовим фактором для гарантування цілісності конструкцій в екстремальних умовах експлуатації.

1.1 Особливості роботи елементів конструкцій ГТД, що працюють в умовах високотемпературного статичного навантаження

Сучасне авіадвигунобудування та енергетичне машинобудування характеризуються постійним прагненням до підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) газотурбінних двигунів [46, 47].

Тенденція до підвищення температури перед турбіною є ключовим фактором вдосконалення ГТД, як простих, так і комбінованих циклів (рис. 1.1), оскільки зростання температури безпосередньо корелює зі збільшенням питомої потужності та термічного ККД [48]; зі збільшенням робочої температури зростає ефективність перетворення енергії палива в корисну роботу (рис. 1.2).

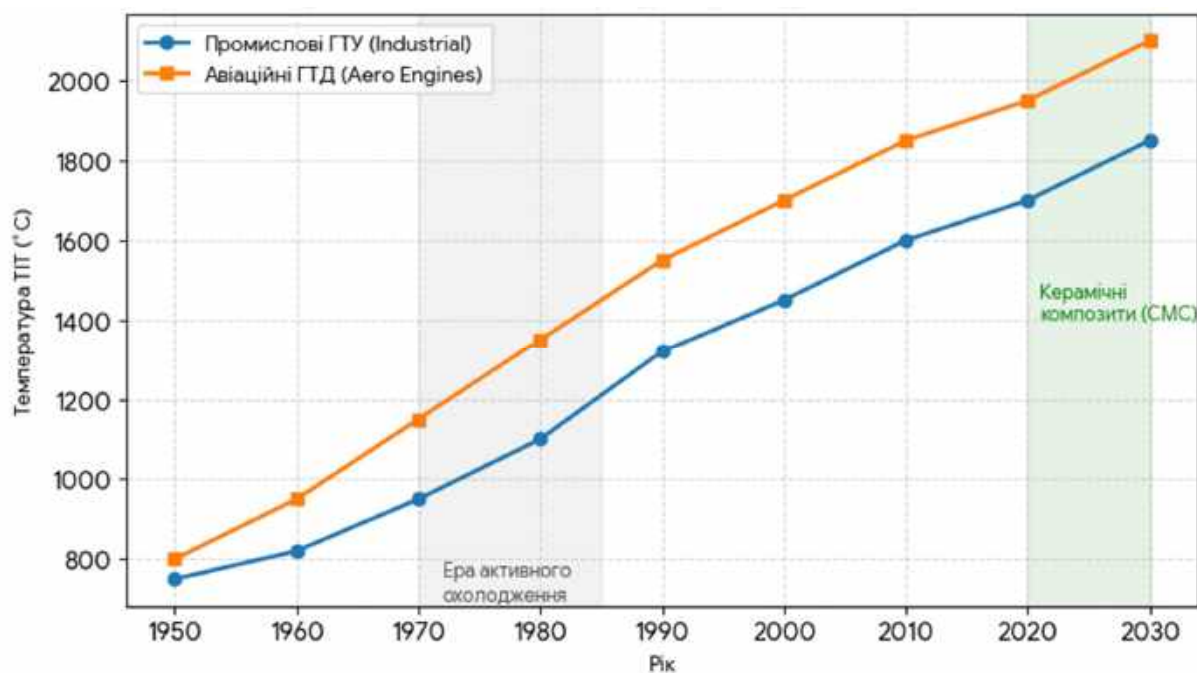


Рис. 1.1 – Історична динаміка та прогнозований тренд підвищення температури перед турбіною для авіаційних та промислових газотурбінних двигунів [1]

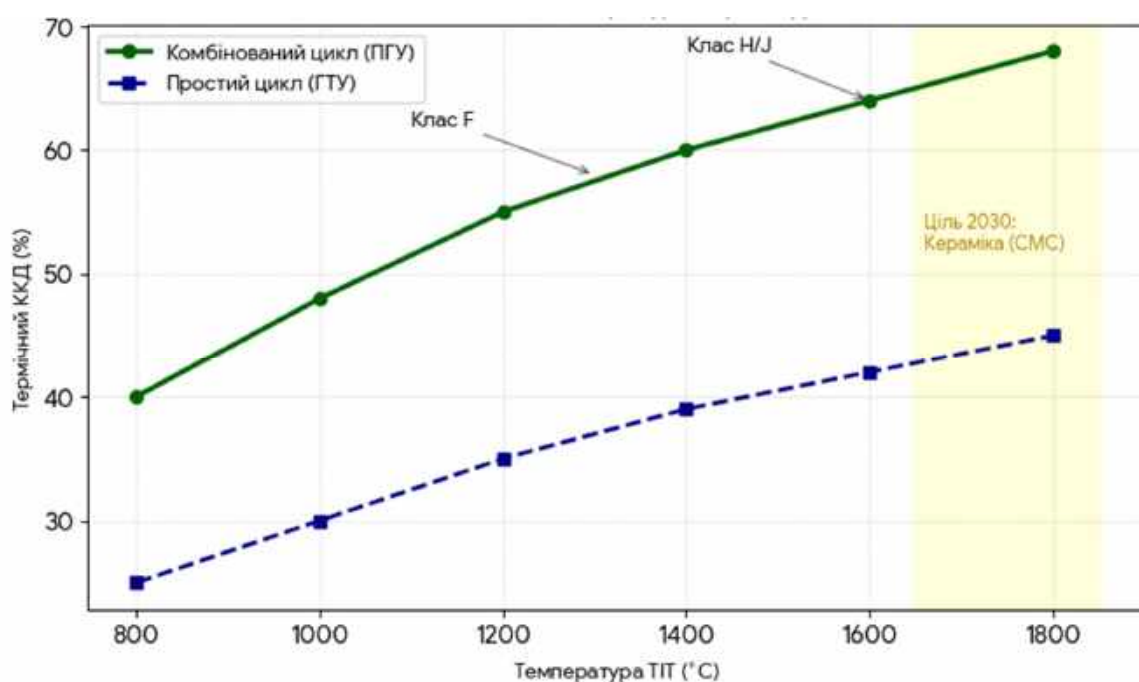


Рис. 1.2 – Залежність ефективності перетворення енергії палива на корисну роботу від робочої температури [2]

Однак цей прогрес накладає серйозні обмеження на структурні елементи двигуна, особливо ті, що піддаються впливу найгарячіших ділянок, такі як форсунки камери згоряння, робочі та статорні лопатки турбіни, а також деталі вихлопного тракту. Зростання температури робочого тіла спричиняє додаткові термічні

навантаження в елементах «гарячої частини» ГТД, які досягають критичних значень [49, 50].

Робочі лопатки та диски турбін працюють в умовах інтенсивного теплового потоку, високих механічних напружень від відцентрових сил і вібраційних навантажень.

Підвищення температури обмежене термічною стійкістю матеріалів і потребує впровадження інновацій: використання нікелевих сплавів з монокристалічною структурою, термобар'єрних покриттів [73], складних методів охолодження з використанням пари замість повітря та перспективного виготовлення деталей з керамічних матричних композитів [76].

У сучасній інженерії та матеріалознавстві проблема забезпечення міцності та надійності конструкцій нерозривно пов'язана з аналізом їхнього напружено-деформованого стану (НДС). Одним із факторів, що найбільше впливають на НДС, є теплове навантаження.

При аналізі НДС важливо враховувати, що фізичні константи матеріалу, наприклад модуль пружності, межа текучості та коефіцієнт теплового розширення, змінюються з температурою, що робить задачу нелінійною.

В авіакосмічній галузі зокрема, температурні градієнти часто стають домінуючим чинником, який визначає життєвий цикл виробу [86].

Елементи ГТД мають складну конфігурацію та кріпляться до холодніших частин корпусу, що спричиняє значні напруження через температурні градієнти. Теплові напруження є результатом внутрішніх зусиль, що виникають у суцільній конструкції в умовах нерівномірного розширення від зміни температури.

Статичне нагрівання корпусу та ротора характеризується встановленням теплової рівноваги, при якій градієнт температур визначає рівень термічних напружень, які призводять до появи внутрішніх зусиль, здатних викликати незворотну деформацію та руйнування конструкції [51].

У сталому режимі роботи ці напруження є постійними, але взаємодіють з відцентровими та вібраційними навантаженнями, створюючи складний багатоосьовий

напружений стан. Структурні елементи повинні зберігати несну здатність, витримуючи ці умови протягом тисяч годин.

Жарова труба камери згоряння піддається впливу прямого випромінювання факела полум'я та конвективному нагріванню газами з температурою понад 2000 К, під впливом статичного тепла та тиску вона деформується, що може викликати пошкодження (рис. 1.3).

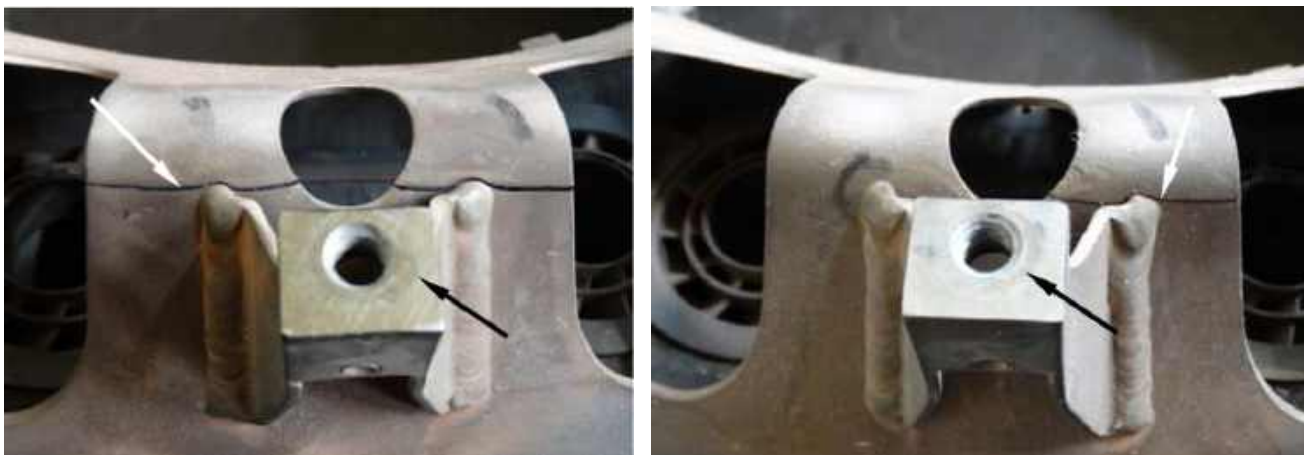


Рис. 1.3 – Тріщини на кронштейнах обтічника жарової труби

Сучасне проектування елементів, схильних до нагрівання значною мірою спирається на метод скінченних елементів (МСЕ) з інтегрованими моделями пошкоджуваності для моделювання статичних сценаріїв нагрівання.

Соплові апарати (СА) сприймають нерівномірне в коловому та радіальному напрямках температурне поле (рис. 1.4).



Рис. 1.4 – Тріщини на стулці керованого сопла форсажного двигуна

Сучасне програмне забезпечення (ANSYS, Abaqus, SolidWorks Simulation) дозволяє проводити нестационарний аналіз, що є критичним для оцінки напружено-деформованого стану (НДС) та теплового навантаження.

Ефективне проектування вузлів ГТД можливе лише за умови інтегрованого підходу, що поєднує точний тепловий розрахунок, аналіз НДС, здатність керувати впливом статичного нагрівання та глибоке розуміння кінетики високотемпературних пошкоджень [50, 64].

Однак вимірювання деформацій при температурах понад 400 °С становить значну науково-технічну проблему через зміну електричних властивостей матеріалів, деградацію адгезійних шарів та значний температурний дрейф «нуля».

1.2 Високотемпературні тензорезистори для оцінки напружено-деформованого стану елементів газотурбінних двигунів (конструктивні та технологічні особливості)

Для забезпечення надійності та верифікації розрахункових моделей НДС необхідно проведення повномасштабних тензометричних випробувань безпосередньо під час роботи двигуна [94]. Однак вимірювання деформацій при температурах понад 600 °С становить значну науково-технічну проблему через зміну електричних властивостей матеріалів, деградацію адгезійних шарів і значний температурний дрейф «нуля» [87]. Високотемпературна тензометрія є критично важливою технологією для оцінки ресурсу та безпеки експлуатації ГТД [52,53].

Конструкція тензорезистора масового застосування

Дротяний тензорезистор масового застосування (рис. 1.5) є плоскою дротяною решіткою 2 прямокутної форми, до кінців 4 якої припаяно або приварено відносно товсті виводи 5. Дротяна решітка за допомогою спеціального клею-сполучного 3 з'єднується з підкладкою 1. Чутливість дротяної решітки практично однакова як під час розтягування, так і під час стискання; це пояснюється тим, що тонкі дроти по всій своїй довжині знаходяться в міцному шарі клею й під час дії

стискаючої деформації не втрачають стійкість, оскільки становлять єдине ціле разом із клейовим шаром та поверхнею деталі [54].

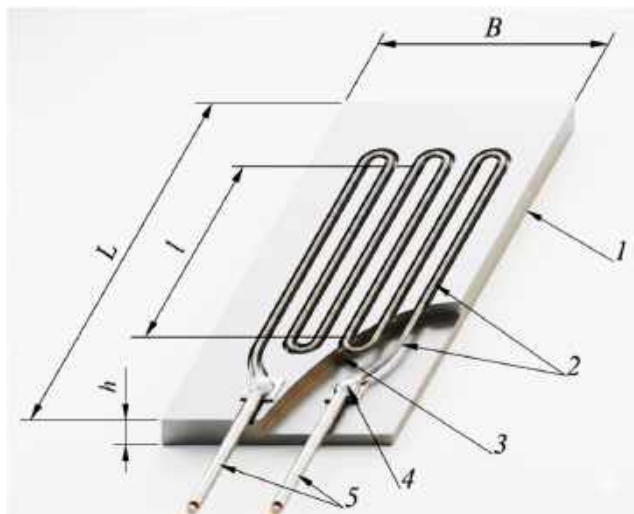
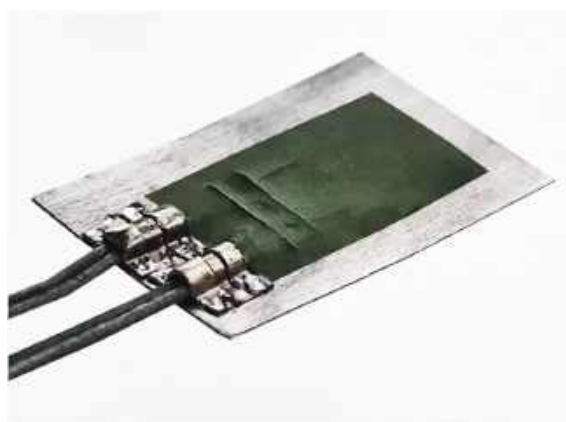


Рис. 1.5 – Конструкція тензорезистора:

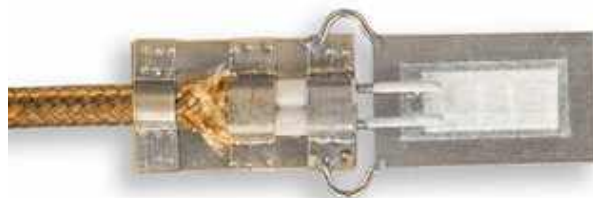
- 1 – підкладка
- 2 – чутливий елемент
- 3 – захисний шар, сполучне
- 4 – місце паяння (зварювання)
- 5 – вивідні провідники

Існуючі високотемпературні тензорезистори

Стрімкий прогрес останніх років у аерокосмічній та ядерній областях, у яких переважають екстремально високі робочі температури, призвів не тільки до пошуку нових жароміцних матеріалів, але й до необхідності створення високотемпературних тензорезисторів [55-59]. Існуючі високотемпературні тензорезистори призначені для вимірювання деформацій деталей машин під динамічними навантаженнями в діапазоні температур $-269\dots+900$ °C (рис. 1.6), але при дослідженні статичних деформацій робочий діапазон обмежується 450 °C [66] (рис. 1.7). Існує гостра необхідність пошуку нових конструкцій датчиків, які можна використовувати при більш високих температурах [60-62].



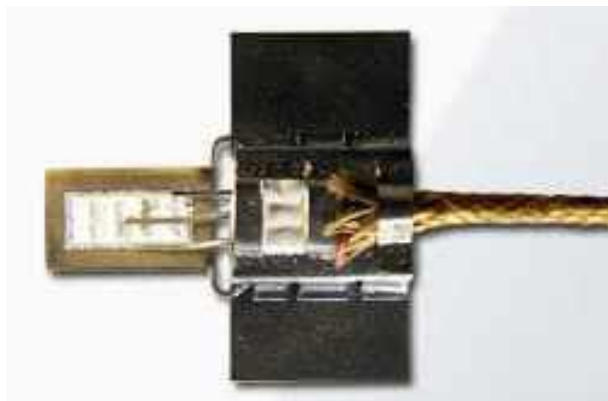
а)



б)

Рис 1.6 – Приварювальні динамічні тензометричні датчики:

а) НРМ серії WTN [81], б) НРІ серії HBWANV [82]



а)



б)

Рис 1.7 – Приварювальні статичні тензометричні датчики:

а) НРІ серії HBWAN [83], б) НВМ серії LS31HT [84]

Конструктивні особливості ВТТ і технологічні виробничі процеси

Конструкція ВТТ суттєво відрізняється від стандартних фольгових тензорезисторів на поліамідній основі [63].

Для екстремальних температур часто використовують «вільну» сітку з тонкого дроту (діаметром 15–30 мкм). Така конструкція не має власної підкладки; дріт закріплюється безпосередньо на деталі за допомогою спеціальних цементів або плазмового напилення [67].

Тонкоплівкові високотемпературні ЧЕ виготовляються за допомогою вакуумного напилення або фотолітографії [88], з наступним етапом інкапсуляції [3, 65, 68].

Товстоплівкові ЧЕ виготовляють з пасти (наприклад, Pt-Rh), яка наноситься на основу методом трафаретного або 3D друку, після чого проводиться високотемпературне відпалювання для стабілізації мікроструктури [85].

Приварювані високотемпературні тензометри складаються з резистивного елемента, інкапсульованого в металеву оболонку та ізольованого керамічним порошком. Потім уся конструкція приварюється точковим або ємнісним розрядним

зварюванням до випробуваного зразка [4]. Діапазон робочих температур до 600-800 °С, а спеціалізовані версії досягають 1000 °С [77].

Гібридні технології виготовлення поєднують тонкоплівкові тензодатчики з об'ємною керамікою для балансування термічної стабільності та вартості [5, 89, 93].

До ЧЕ, сполучного та вивідних провідників високотемпературних тензорезисторів пред'являються жорсткі вимоги [72], які принципово ускладнюють як технологію їх виготовлення (монтажу), так і вибір необхідних матеріалів [78].

Для дослідження статичних напружень у високо-нагрітих елементах ГТД при температурах понад 500 °С можуть бути використані тензометри з дротяними та фольговими чутливими елементами з наступних сплавів: молібден, карма, платина – вольфрам, константан, ніхром.

Матеріал тензочутливого елемента

Матеріал тензочутливого елемента (ТЧЕ) є визначальним фактором точності вимірювань. Основні вимоги до матеріалів ТЧЕ включають: високу стабільність коефіцієнта тензочутливості, лінійність залежності опору від деформації, високе відношення межі пропорційності до модуля пружності, високий питомий електричний опір та опір окислювальній дії зовнішнього середовища [69-71].

Найбільшого поширення набули тензорезистори з чутливими елементами, виготовленими з наступних матеріалів.

Ніхромові сплави (наприклад, Х20Н80) традиційно використовуються до температур 500–600 °С. Вони мають гарну корозійну стійкість, проте при вищих температурах у них починаються структурні перетворення (утворення К-стану), що призводить до непередбачуваної зміни опору. У діапазоні 500–700 °С коефіцієнт тензочутливості ніхрому змінюється дуже незначно (близько **0,01–0,02% на 10 °С**) і становить приблизно **2,1–2,3**. При більш високих температурах 800-900 °С ніхром наближається до межі своєї стабільності як тензометричного матеріалу через початок інтенсивного окислення та структурних змін. Проте він зберігає лінійність відгуку "опір–деформація" [40].

У той же час, дослідження [60] показали, що застосування ніхрому (Н80Х20) при віброметрії з задовільним збереженням стабільності його основних характеристик можливе до температур 800-950 °С.

Сплави системи Pt-W (наприклад, Pt-9.5% W) є одними з найбільш стабільних для тривалих статичних вимірювань при температурах до 800°С. Вони характеризуються високими механічними властивостями, підвищеною жароміцністю та корозійною стійкістю. Застосовуються для виготовлення термопар із вмістом 5-40% Rh, та тензодатчиків з 8-10% W [90]. Вони мають високий коефіцієнт тензочутливості (близький 4), що вдвічі вище, ніж у ніхромів. Однак їх високий температурний коефіцієнт опору (ТКО) спричиняє необхідність використання складної схеми температурної компенсації.

Платиново-родієві Pt-Rh сплави (наприклад, 10% родію) є кращими завдяки своїй термічній стабільності (до 1300 °С) та низькому температурному коефіцієнту опору (ТКО) [6, 91].

Композити на основі вольфраму/глинозему використовуються в тонкоплівкових тензодатчиках для температур понад 1200 °С та є наступним кроком у розвитку високотемпературної тензометрії, перевершуючи ніхром Н80Х20 за стабільністю при екстремальних температурах (понад 1000 °С). Використання композиту (наприклад, W-AL₂O₃) дозволяє "налаштувати" температурний коефіцієнт опору (ТКО) майже до нуля, що критично важливо для зменшення похибки від нагрівання, хоча схильність до окислення вимагає інкапсуляції [7].

Сплави залізо-хром-алюміній володіють унікальною здатністю формувати на поверхні щільну плівку оксиду алюмінію, яка захищає ТЧЕ від подальшого окислення. Це дозволяє використовувати їх для динамічного тензометрування при температурах до 1000–1100 °С.

Сплави нікелю з молібденом мають назви хастеллоїв. Вони являють собою тверді розчини й мають міцність, пластичність і хімічну стійкість у розчинах мінеральних кислот. При вмісті молібдену вище 20% корозійна стійкість сплавів особливо висока. Характеризуються високою межею міцності за підвищених

температур. Теплопровідність цих сплавів приблизно така ж, як і нержавіючих сталей. Широке використання цих сплавів нині обмежується їх високою вартістю.

Провід із **сплаву карма** використовується в основному для виготовлення високоточних резистивних елементів. Температурний коефіцієнт електричного опору значно нижчий, ніж у манганинового дроту. Сплав карма також перевершує манганін щодо термостійкості, оскільки здатний витримувати температури в діапазоні від -60 до 300 °С.

Опір **константана** не залежить від температури. Використовується для виготовлення термопар, ЧЕ тензодатчиків, з робочою температурою до 400–500 °С. Виготовляється у вигляді дроту та фольги.

Керамічні напівпровідники: матеріали на основі WO_3 та ZrO_2 демонструють стабільність за високих температур, але потребують ретельного легування для регулювання електричних властивостей [74, 75].

У таблиці 1.1 наведено перелік матеріалів чутливих елементів, що застосовуються в середньо- та високотемпературній тензометрії.

Таблиця 1.1 – Властивості матеріалів чутливих елементів високотемпературних тензорезисторів

Сплав	Формула	Коефіцієнт тензочутливості К	Максимальна робоча температура °С
Ніхром	X20H80	2,0 – 2,3	991
Ніхром	X15H60	2,5 – 2,7	1000
Платина		4,1 – 6,1	більше 1250
Платина – іридій	ПлИ-15	5,8 – 6,0	1250
Фехраль	X23Ю10	2 – 2,2	650
Фехраль	X23Ю5	2,8 – 2,9	1000
Нікель–молібден	H70M28	2,5	430
Карма	6J22	2,0	800
Платина–вольфрам	ПлВ-10 (PtW10)	–	550 – 700
ЭИ–617	ХН70ВМТЮ	2,0	600
Константан	МНЦ40-1,5	1,9 – 2,2	350 – 500

Товщина відомих високотемпературних дротяних і фольгових тензорезисторів досягає 0,2-0,5 мм, а в деяких видів тензорезисторів – 1 мм.

Дротові вивідні провідники високотемпературних тензорезисторів зазвичай виготовляються з ніхрому [8, 9], нікелю [10, 11], сплаву карми [12], їх поперечні розміри найчастіше на 1-2 порядку перевищують переріз дротяних чутливих елементів.

Основними способами приєднання вивідних провідників до ЧЕ є електроіскрове та електроконтактне зварювання [12]. Утворене таким способом з'єднання через можливі утовщення при зварюванні відрізняється зниженою вібротехнічною міцністю, що зазвичай є основною причиною виходу з ладу тензорезисторів.

Чутливий елемент тензорезистора закріплюється на досліджуваній деталі за допомогою сполучного, яке повинно бути еластичним, міцним, добре приклеюватися до різних матеріалів, мати хорошу вологостійкість і високі ізоляційні якості, не змінювати своїх властивостей у заданому інтервалі температур, не мати гістерезису (ускладнює отримання однозначних результатів при збільшення та зменшення навантаження) та повзучості.

Сполучні високотемпературні тензорезисторів

Розробка сполучного є визначальним моментом у створенні тензорезистора, працездатного при високих температурах. Це визначається комплексом суперечливих вимог, задоволення яких є більш складним завданням, ніж вибір плівкового або дротяного ЧЕ [13, 14]. Основними важковиконуваними є такі вимоги до сполучних: неспотворена передача деформації від досліджуваної поверхні до ЧЕ, достатній опір високим механічним навантаженням, які виникають при дослідженні НДС, достатній опір теплоперепаду при запуску та зупинці двигуна, високий питомий електроопір (не менше 10^5 - 10^6 Ом см) при робочих температурах, технологічність.

Найбільш перспективними ізоляторами - сполучними для високотемпературної статичної тензометрії є: **жаростійкі оксиди плазмового напилення, високотемпературні емалі, кремнійорганічні і алюмофосфатні цементи** [15].

Цирконій, стабілізований оксидом ітрію (YSZ), широко використовується в термобар'єрних провідниках та як дифузійний бар'єр для тензодатчиків. ВТТ часто вбудовуються в шари ТЗП для захисту від прямого теплового впливу [16].

Карбід кремнію (SiC) забезпечує високу термічну та хімічну стабільність, але є дорогим і складним для інтеграції.

Використання в якості сполучного **жаростійких оксидів**, що наносяться способом плазмового напилення, дозволяє отримувати високий питомий електричний опір аж до температур 1000-1100 °C [17, 18], що на два-три порядки перевищує опір таких поширених сполучних, як кремній [19]. Плазмове покриття виконує роль підшару, на якому за допомогою цементу типу **Ц7-165-32А** закріплюється чутливий елемент. Для жаростійких окислів характерна недостатня адгезія до матеріалу деталі, тому що механізм зчеплення плазмових покриттів має механічний, а не хімічний характер [20]. Значна пористість жаростійких оксидів змушує наносити шар значної товщини (до 1 мм), що зменшує опір до тепломіні і вібростійкість [18]. Крім того, значна пористість сприяє швидкому окисленню чутливого елемента тензорезистора.

Результати досліджень [8, 11] показали, що застосування жаростійких оксидів плазмового напилення при монтажі дротяних ЧЕ дозволяє створити тензорезистори з високоомною ізоляцією та надійною передачею деформації від досліджуваної деталі до ЧЕ через шар сполучного [21]. Однак подібні тензорезистори зберігають значну товщину (понад 0,3 мм), а дротяний ЧЕ часто ушкоджується частинками оксидів при їх нанесенні.

У роботах [22, 23] описано застосування **високотемпературних емалей** на основі Al_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , нанесених тонкими (5-10 мкм) шарами. Ці емалі відрізнялися відмінною адгезією до досліджуваної поверхні й, отже, високим опором до тепломіні. Відомо, що їхній питомий електроопір різко падає при температурах вище 700 °C (рис. 1.8) [15].

Застосування **керамічних емалей** дозволяє отримувати тензорезистори меншої товщини, ніж при інших високотемпературних сполучних. Однак складність попереднього закріплення ЧЕ та високі температури випалу емалей, що перевищують межі допустимого нагріву матеріалів ЧЕ [23], не дозволяють успішно застосовувати керамічні емалі як сполучні.

У практиці тензометрії застосовують також **кремнійорганічні цементи** В - 58, ВН-15Т, ВН-12 [24, 25, 18, 26]. Вони використовуються як у статичному, так і в динамічному тензометруванні [27, 28]. Однак їх робочі температури не перевищують 400–500 °С. До основних недоліків перерахованих кремнеорганічних цементів можна віднести високу пористість, що досягає 40% і значну ерозію під впливом високошвидкісних потоків продуктів згоряння [29].

У високотемпературній тензометрії стала вельми поширеною набули поширення **кремнієвокорундові** цементи аміачного твердіння [30]. У [31, 28] описано цемент типу Ц 7-165-32А, що складається з гідролізованого ефіру ортокремнієвої кислоти й електрокорунду як наповнювача. Описано успішні випадки застосування при вібротметрії елементів ГТД до температур 800–990 °С.

Однак істотним недоліком відомих **фосфатних цементів**, що використовуються як сполучні тензорезисторів, є недостатньо високий питомий електроопір при температурах 900-1000 °С (рис. 1.9) [30, 32].

Необхідність при нанесенні зазначених цементів такої технологічної операції, як просочування сполучного парами аміаку, ускладнює процес препарування досліджуваної деталі. Найбільш повно досліджено цемент Ц7–165–32А, зміну опору якого залежно від температури представлено в [33, 34, 9, 35, 24].

Низька пористість **покриттів фосфатного твердіння** перешкоджає розвитку високотемпературної корозії чутливого елемента та деталі. Компаунди фосфатного твердіння не вимагають попередньої високотемпературної обробки, а температура їх сушіння, як правило, не перевищує 300 °С [15, 36, 28].

Таким чином, існуючі ізолятори–сполучні недостатньо термостійкі, та не технологічні. Вони мають низьке значення питомого електричного опору при температурах вище 600-700 °С, а спосіб зниження ступеня шунтування між ЧЕ та поверхнею деталі не знайшов практичного застосування при оцінці похибок вимірювання статичних напружень в елементах, що працюють у складних умовах ГТД.

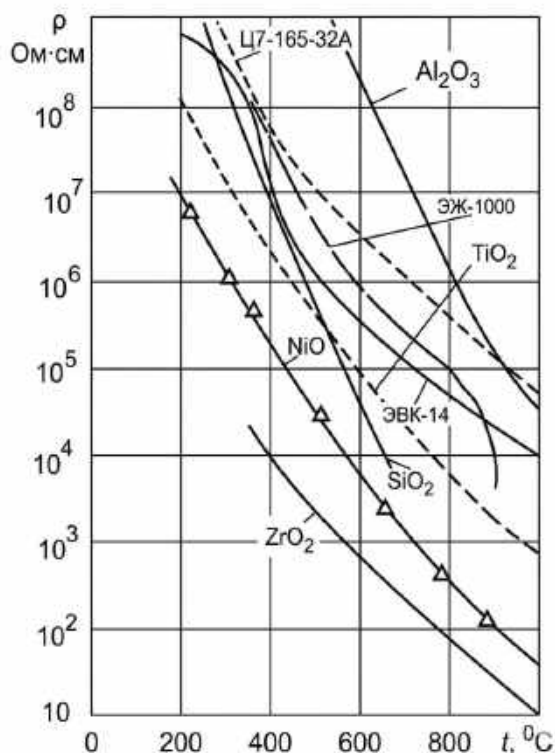


Рис. 1.8 – Залежність питомого електроопору різних ізоляторів-пі-
дкладок від температури

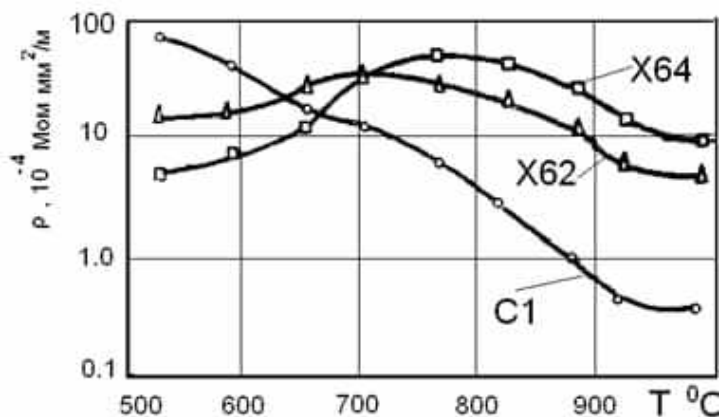


Рис. 1.9 – Залежність питомого опору де-
яких відомих фосфатних цементів від тем-
ператури: X-62 – 65% Al_2O_3 ; 25% SiO_2 ;
10% CrO_3 ; сполучне – $2\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_3)$; X-64 –
90% Al_2O_3 ; 3,3%; SiO_2 ; 1%; CrO_3 ; сполучне
інше [30];
C 1 – 68% Al_2O_3 ; 22% SiO_2 ; 10% CrO_3
фосфатне сполучне

Висновок

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

1.3 Похибки, вимірювання високотемпературними тензорезисторами при дослідженні напружено–деформованого стану елементів конструкцій

Дослідження НДС є фундаментальною задачею в інженерії, особливо при розробці та експлуатації конструкцій, що піддаються впливу екстремальних умов. Елементи конструкцій, що працюють при високих температурах, такі як турбінні лопатки, компоненти ядерних реакторів, деталі авіаційних двигунів, трубопроводи хімічної промисловості та вироби космічної техніки, вимагають ретельного аналізу НДС для запобігання передчасному руйнуванню, втомі, повзучості та іншим деградаційним процесам.

Високотемпературні тензодатчики є важливими інструментами для вивчення напружено-деформованого стану матеріалів, проте результати вимірювання отримані з їх використанням, схильні до різних похибок через температурну хибну деформацію, зміну коефіцієнта тензочутливості, деградацію адгезивів і матеріалів датчиків, вплив з'єднувальних проводів, а також електричні шуми та дрейф [79].

При температурах до 100–200 °С тензорезистори забезпечують високу точність і надійність вимірювань. Однак, коли температура експлуатації конструкцій зростає до сотень і навіть тисяч градусів Цельсія, традиційні тензорезистори стають непридатними через деградацію матеріалів, адгезивів та суттєве спотворення сигналу. Це призвело до розробки спеціалізованих ВТТ, які здатні функціонувати в умовах до 1000 °С і вище.

Незважаючи на значний прогрес у розробці ВТТ, вимірювання деформацій при високих температурах залишаються складним завданням. Висока температура впливає на всі компоненти вимірювальної системи: сам датчик, адгезив, з'єднувальні проводи та навіть матеріал об'єкта дослідження. Це призводить до виникнення численних джерел похибок, які можуть значно спотворити результати, роблячи їх ненадійними. Без точного розуміння цих похибок і ефективних методів їх компенсації, отримані дані про НДС можуть призвести до неправильних інженерних рішень, що, в свою чергу, може загрожувати безпеці та експлуатаційній придатності конструкцій.

Теоретичні основи вимірювань тензорезисторами при високих температурах

Принцип роботи тензорезистора ґрунтується на явищі тензорезистивного ефекту, тобто зміні електричного опору провідника під дією механічної деформації. Зміна опору лінійно пов'язана зі зміною довжини дроту тензорезистора:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \cdot \varepsilon,$$

де ΔR – зміна електричного опору провідника,
 R_0 – початковий опір тензорезистора,
 K – коефіцієнт тензочутливості,
 ε – відносна лінійна деформація.

Для ізотропного лінійно-пружного тіла зв'язок між напруженнями та деформаціями встановлюється *узагальненим законом Гука*. Проте при включенні теплового фактору, цей зв'язок набуває вигляду рівнянь Дюамеля-Неймана:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \mu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\mu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \alpha \Delta T \delta_{ij}.$$

де:

E – модуль Юнга;
 μ – коефіцієнт Пуассона;
 α – коефіцієнт лінійного теплового розширення;
 ΔT – зміна температури;
 δ_{ij} – символ Кронекера.

Пружна частина $\left(\frac{1+\mu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\mu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij}\right)$ описує деформацію матеріалу під дією механічних навантажень.

Термічна частина $(\alpha \Delta T \delta_{ij})$: враховує розширення або стиснення матеріалу внаслідок зміни температури (рівномірна деформація по всіх осях без виникнення дотичних напружень від самої температури).

Джерела похибок при вимірюваннях високотемпературними тензорезисторами

Похибки при високотемпературній тензометрії можна класифікувати за їхньою природою та джерелом походження.

Температурна уявна деформація—це, напевно, найбільше та найскладніше для компенсації джерело похибок. Вона виникає з кількох причин:

Опір тензорезистора змінюється при нагріванні навіть за відсутності механічної деформації через різницю коефіцієнтів термічного розширення (КТР) матеріалу резистивної решітки та матеріалу об'єкта дослідження. Коли температура змінюється, решітка та об'єкт розширюються або стискаються по-різному, що створює "уявну" деформацію в датчику.

Питомий опір більшості металів і сплавів залежить від температури, що призводить до зміни опору тензорезистора незалежно від його геометрії.

Сумарний ефект цих факторів називається температурною уявною деформацією, і вона може бути значно більшою, ніж очікувані механічні деформації, особливо при великих перепадах температур.

Коефіцієнт тензочутливості K не є постійною величиною й залежить від температури. Це пов'язано зі зміною фізичних властивостей матеріалу резистивної решітки, таких як модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та тензорезистивні властивості [41]. Виробники зазвичай надають графіки залежності K від температури, але ці дані можуть відрізнятися для конкретних партій датчиків або умов експлуатації. Нехтування цією зміною призводить до систематичної похибки у вимірних значеннях деформації [92].

Високі температури значно прискорюють процеси старіння та ***деградації матеріалів тензорезисторів***.

Під дією високих температур органічні адгезиви (епоксидні смоли) втрачають свої властивості (міцність, модуль пружності, електричний опір) при температурах понад 200-300 °С, а керамічні цементи можуть бути крихкими, чутливими до вологи, і мати обмежену міцність на зсув при високих температурах, що може призвести до відшаровування або часткової втрати зчеплення датчика з поверхнею.

У матеріалі резистивної решітки при тривалій дії високих температур можуть відбуватися процеси окислення, рекристалізації, сегрегації елементів сплаву, що призводить до зміни питомого опору, коефіцієнта тензочутливості та стабільності. Матеріал підкладки може розтріскуватися або деградувати при термічних циклах. Ці процеси призводять до дрейфу сигналу, гістерезису, зниження точності та повного виходу датчика з ладу.

При високих температурах під навантаженням матеріал об'єкта дослідження, адгезив і навіть матеріал ЧЕ тензорезистора можуть проявляти повзучість – повільну, залежну від часу пластичну деформацію. Це може призвести до зміни геометрії самого датчика або до погіршення зчеплення з поверхнею, що викликає дрейф вимірюваного опору.

Дрейф від старіння пов'язаний з фізико-хімічними змінами в матеріалах датчика та адгезиву, що призводить до повільних, але незворотних змін опору з часом, навіть за відсутності механічної деформації та постійної температури.

При температурах вище 700 °С основною причиною похибок є зміна поперечного перерізу дроту через окислення та внутрішні структурні фазові перетворення. Це призводить до монотонного зростання опору, яке важко відрізнити від статичної деформації.

Опір з'єднувальних проводів значно змінюється з температурою, і якщо ці зміни не компенсуються, вони додаються до вимірюваної зміни опору тензорезистора, створюючи значну похибку.

На стиках різних металів, що знаходяться при різних температурах, виникає термоелектричний ефект (ефект Зеєбека) – термоелектрорушійна сила. Це може відбуватися на з'єднаннях тензорезистора з проводами, провід-роз'єм тощо, додаючи небажану напругу до вимірювального сигналу.

Ізоляція проводів може втрачати свої властивості при високих температурах, що призводить до зниження ізоляційного опору, витоків струму та збільшення електричних шумів.

При високих температурах атоми та іони в матеріалах стають більш рухливими, що призводить до **зниження опору** підкладки тензорезистора та адгезиву. Це

призводить до витоку струму, який шунтує резистивну решітку, спотворюючи вимірювання.

Тепловий рух електронів збільшується з температурою, що призводить до зростання теплового шуму в ланцюзі, ускладнюючи реєстрацію малих сигналів.

При високих температурах у присутності вологи або агресивних середовищ можуть виникати електрохімічні реакції на поверхнях, що призводять до додаткових струмів і дрейфу.

У зв'язку з цим заслуговує на увагу спосіб конструкційного та схемного зниження рівня шунтування ЧЕ, де в шар сполучного між ЧЕ та поверхнею деталі введено екран, що збігається за конфігурацією з ЧЕ та включений спеціальним чином до мостової схеми. Ця пропозиція реалізована в роботі [19] в умовах лабораторного експерименту. Наведено оцінку похибки шунтування стосовно плівкового тензрезистора з емалевою ізолятор–підкладкою.

Адгезив має свою пружність і пластичність. При передачі деформації від об'єкта до датчика через адгезив можуть виникати нелінійності через гістерезис і втрати.

Неправильна підготовка поверхні, нерівномірне нанесення адгезиву, невідповідний тиск під час полімеризації – все це може призвести до неякісного зчеплення та неправильної передачі деформації.

При динамічних навантаженнях високотемпературні матеріали можуть проявляти значну в'язкість і залежність властивостей від швидкості деформації, що ускладнює інтерпретацію сигналів.

Методи компенсації та мінімізації похибок

Для отримання достовірних результатів необхідно застосовувати комплексний підхід до компенсації та мінімізації зазначених похибок.

Виробники виготовляють ***самокомпенсовані тензорезистори*** зі спеціальних сплавів, КТР яких підбирається таким чином, щоб компенсувати температурну хибну деформацію для конкретного матеріалу об'єкта в певному діапазоні температур. Це досягається, наприклад, сплавами, чий питомий опір зменшується з

температурою, компенсуючи ефект розширення. Однак, компенсація є достатньою лише для одного матеріалу та обмеженого температурного діапазону.

Компенсація за допомогою компенсуючого тензорезистора, коли другий тензорезистор, ідентичний до робочого, приклеюється до зразка з того ж матеріалу, що й об'єкт дослідження, але не піддається механічній деформації (або наклеєний на ділянку, де деформації відсутні). Обидва тензорезистори включаються в протилежні плечі мостової схеми.

Якщо температурна залежність хибної деформації для конкретного типу тензорезистора та матеріалу об'єкта відома (отримана шляхом попереднього калібрування в печі без навантаження), її можна врахувати за допомогою програмної компенсації, тобто відняти від загального сигналу. Це вимагає точного вимірювання температури в точці установки датчика.

Для високих температур необхідно визначати залежність $K(T)$ для кожної партії тензорезисторів або використовувати дані виробника з урахуванням можливих відхилень. Це робиться шляхом *калібрування* на спеціальних установках, де зразок з тензорезистором нагрівається до заданих температур, і на нього послідовно прикладаються відомі деформації. Отримана залежність потім використовується при обробці експериментальних даних.

Розробка *нових сплавів* для виготовлення ЧЕ тензорезисторів з меншою температурною залежністю питомого опору, більшою стабільністю при високих температурах, стійкістю до окислення та повзучості. Це можуть бути сплави на основі платини, вольфраму, ніобію, хрому.

Використання керамічних цементів, фосфатних, поліамідних або неорганічних адгезивів, що зберігають свої адгезійні та електричні властивості в широкому діапазоні температур. Важливо дотримуватися рекомендацій виробника щодо підготовки поверхні, нанесення та режиму полімеризації.

Використання підкладок з кераміки (наприклад, з оксиду алюмінію), що забезпечують високий опір ізоляції при високих температурах і стабільність.

Трипровідна або чотирипровідна схема підключення дозволяють *виключити вплив зміни опору* з'єднувальних проводів на вихідний сигнал. Трипровідна

схема компенсує зміну опору одного з провідників, у той час як чотирипровідна схема (Кельвіна) вимірює напругу безпосередньо на резисторі, повністю виключаючи опір проводів.

Використання проводів з низьким температурним коефіцієнтом опору та високотемпературною ізоляцією (керамічні намистини, скловолокно).

Екранування проводів і сенсорів для зменшення впливу електричних шумів і наводок.

Для мінімізації дрейфу та оптимізації стабільності показників тензорезистори проходять процедуру термічного «старіння» – витримування за температури, наближеної до граничної робочої. Цей процес забезпечує стабілізацію властивостей сенсора та клейового шару, що дозволяє суттєво знизити часову нестабільність вимірювань.

За можливості доцільно надавати перевагу короткочасним або динамічним вимірюванням, оскільки вони менш чутливі до ефектів повзучості та дрейфу порівняно зі статичними.

Для мінімізації похибок вимірювань необхідно забезпечити максимальний *опір ізоляції* як між резистивною решіткою й об'єктом, так і між комутаційними провідниками.

Доцільно застосовувати прецизійні тензометричні підсилювачі з низьким рівнем власного шуму, високим коефіцієнтом придушення синфазних завад і адаптивністю до датчиків з високим вихідним опором.

У низці випадків використання мостових схем, що функціонують на змінному струмі, дозволяє ефективно нівелювати вплив термоелектричних ефектів і окремих типів адитивних похибок.

Експериментальні міркування та найкращі практики

Для досягнення високої точності вимірювань критично важливо забезпечити ретельне планування та послідовне виконання кожного етапу експериментального процесу.

Підготовка *поверхні* під тензорезистор є визначальним чинником якості даних. Вона передбачає механічну обробку (шліфування або піскоструминне

очищення) для усунення дефектів і створення мікрорельєфу, що сприяє надійній адгезії; подальше знежирення хімічними агентами, як-от ацетоном чи ізопропіловим спиртом; а також фінішну обробку (травлення або пасивацію) для формування хімічно стабільного поверхневого шару.

Вибір *адгезиву* має бути зумовлений його робочими характеристиками: стійкістю до температурних впливів, мінімальною повзучістю, високим опором ізоляції та міцністю зчеплення. Суворе дотримання регламенту виробника щодо пропорцій суміші, часу життєздатності складу, а також температурно-часових режимів полімеризації є необхідною умовою для коректної експлуатації датчика.

Окрему увагу слід приділити точному позиціонуванню тензорезистора відповідно до вектора вимірюваної деформації, що є ключовим для забезпечення достовірності результатів

Для високотемпературних досліджень зазвичай використовується точкове приварювання проводів до контактних майданчиків тензорезистора, оскільки традиційна пайка не витримує високих температур.

Проводи має бути прокладено так, щоб мінімізувати вплив термічних градієнтів, механічних напружень, вібрацій і електромагнітних наводок.

Завжди слід використовувати *термокомпенсацію та багатопровідні* схеми підключення.

Надійне *вимірювання температури* безпосередньо в точці установки тензорезистора є абсолютно необхідним для будь-яких температурних поправок.

Проведення *попереднього калібрування* тензорезисторів на зразках з матеріалу, ідентичного до об'єкта дослідження, в контрольованих температурних умовах. Це дозволяє визначити фактичні залежності $\epsilon(T)$ і $K(T)$.

Перевірка опору ізоляції та стабільності сигналу перед початком вимірювань.

Висновки

Численні джерела похибок при вимірюванні напружено-деформованого стану елементів конструкцій, спричинені високими температурами, можуть значно спотворити отримані дані, якщо їх не враховувати належним чином.

Високотемпературні тензорезистори чутливі до наступних похибок: температурна уявна деформація, зміна коефіцієнта тензочутливості з температурою, деградація матеріалів тензорезисторів та адгезивів, повзучість та дрейф сигналу з часом, вплив з'єднувальних проводів, зниження опору ізоляції та збільшення електричних шумів.

Застосування комплексного підходу та глибоке розуміння фізики процесів, що відбуваються при високих температурах, дозволяє значно підвищити точність та достовірність вимірювань високотемпературних конструкцій.

Для отримання реальних значень механічної деформації, необроблені дані з високотемпературних тензорезисторів повинні пройти наступні етапи обробки та інтерпретації: віднімання видимої деформації, корекція коефіцієнта тензочутливості, корекція впливу підвідного дроту [37, 38].

Ретельний аналіз невизначеності, враховуючи всі виявлені джерела похибок, має вирішальне значення для оцінки отриманих даних про деформацію [39].

1.4 Особливості застосування високотемпературних тензорезисторів для дослідження напружено деформованого стану елементів конструкцій

Високотемпературні тензорезистори (ВТТ) відрізняються від звичайних конструкційним матеріалом, використанням спеціальних адгезивів і екранирувальної оболонки, які дозволяють коректно працювати при температурах від 800 до 1200 °С. Особливості застосування високотемпературних тензорезисторів у дослідженні напружено-деформованого стану елементів конструкцій полягають у їх здатності зберігати стабільні електричні характеристики при температурах, які значно перевищують 200 °С, що робить їх незамінними у вимірюваннях в агресивних середовищах, таких як робоче тіло газотурбінних двигунів. Важливою особливістю є використання металічних тугоплавких сплавів або керамічних носіїв, які зберігають адгезію без деградації при високих температурах, мінімізують термічний дрейф, втрату чутливості внаслідок високих температур і мінімізують теплові витоки між сенсором і підкладкою [80].

Такі тензорезистори мають низький температурний коефіцієнт термічного розширення та високу термостійкість до окислення, що забезпечує точність вимірювань навіть у агресивному середовищі.

Вимірювальна система повинна ефективно розділяти реальний механічний сигнал від температурних перешкод, що підвищує достовірність отриманих даних.

Ці технічні характеристики відкривають можливість безперервного моніторингу напружено-деформованого стану елементів конструкцій, включаючи силові турбіни, печі високих температур і корпуси авіаційних двигунів, коли потрібно отримати точні дані без переривань у процесі експлуатації складних технічних систем.

Високотемпературні тензорезистори (ВТТ) – це спеціалізовані датчики, призначені для вимірювання механічної деформації на поверхнях, що піддаються впливу підвищених температур, часто від 300 °С до 1200 °С або навіть вище, де звичайні тензодатчики з полімерною підкладкою швидко виходять з ладу [37].

Однак застосування ВТТ є набагато складнішим порівняно з їхніми аналогами, що працюють при кімнатній температурі.

Агресивне високотемпературне середовище створює значні джерела помилок, нестабільності та погіршення сигналу.

Ці «особливості» вимагають спеціалізованих знань, ретельних методів застосування та складних алгоритмів обробки даних. Неврахування цих факторів може призвести до помилкових вимірювань, необґрунтованих проєктних рішень та потенційно катастрофічних структурних руйнувань.

ВТТ загалом класифікуються на основі їхньої конструкції та методу встановлення, кожен з яких підходить для різних температурних діапазонів та сценаріїв застосування:

Наразі в галузі вимірювання високотемпературної деформації основні дослідження все ще зосереджені на нитяних тензодатчиках та тонкоплівкових тензодатчиках. Обидва типи високотемпературних тензодатчиків в основному складаються із захисного шару, чутливих сіток, перехідного шару та підкладки.

ВТТ з металевої фольги та дроту концептуально схожі на звичайні тензодатчики, але використовують спеціалізовані сплави для ЧЕ, такі як Karma (сплав Ni-Cr), Kanthal (сплав Fe-Cr-Al) або платино-вольфрамові (Pt-W) сплави, обрані за їхню високотемпературну стабільність, низьку теплову вихідну здатність та прийнятну стабільність коефіцієнта тензочутливості. Зазвичай вони скріплюються зі зразком за допомогою керамічних цементів [38]. Керамічні цемента вимагають ретельного нанесення, багатоетапного ступеневого затвердіння та можуть бути крихкими. Зазвичай підходять для температур до 800-1000 °С.

Основна відмінність між двома зазначеними типами високотемпературних тензодатчиків полягає в методиці виробництва чутливої сітки. Чутлива сітка високотемпературного тензодатчика дротяного типу виготовляється шляхом безпосереднього намотування металевого резистивного дроту діаметром 0,015–0,03 мм, а чутлива сітка тонкоплівкового високотемпературного тензодатчика створюється безпосередньо на підкладці за допомогою методів вакуумного осадження або наплення (рис. 1.10) [2].



Рис. 1.10 – Чутливі сітки

дротяного (а) та тонкоплівкового (б) високотемпературних тензодатчиків

Хоча тепловий вихідний сигнал мінімізовано вибором сплаву, він все ще є значним і потребує компенсації.

Захисний шар в основному використовується для захисту чутливих сіток, які повинні мати кращу стійкість до окислення за високих температур та електричну ізоляцію.

Підготовка поверхні є критично важливою для міцного та надійного з'єднання. Зазвичай це включає: шліфування, знежирення, абразивоструминну обробку – (використовується для керамічно-зв'язаних та зварюваних вимірювачів для

створення мікрошорсткої поверхні для механічного з'єднання), хімічне травлення (може використовуватися залежно від матеріалу та клею).

Перехідний шар в основному використовується для скріплення чутливих сіток з підкладкою, яка повинна мати добру здатність до передачі деформації, міцність з'єднання та електричну ізоляцію. Як основний елемент високотемпературних тензодатчиків, чутлива сітка використовується для вимірювання деформації вимірюваного компонента та перетворення сигналу деформації в сигнал опору. Ця сітка повинна мати стабільний і високий питомий опір, стабільний і близький до нуля температурний коефіцієнт опору (ТКО), високий коефіцієнт чутливості до деформації та високу робочу температуру.

Вибір методу склеювання визначається типом ВТТ і робочим діапазоном температур.

Керамічні цементні наносяться ретельно тонкими шарами, часто вимагаючи спеціальних багатоступеневих циклів затвердіння з контрольованими температурними лімітами та витримками для забезпечення належних хімічних реакцій і міцної адгезії.

Точкове або ємнісне розрядне зварювання для приварювальних ВТТ вимагає точного контролю параметрів (струму, часу, сили) для забезпечення надійного з'єднання без пошкодження датчика або зразка.

Напилення полум'ям вимагає точного контролю параметрів плазми/полум'я та швидкості подачі матеріалу.

Підкладка в основному використовується для кріплення чутливих сіток і повинна мати хороші адгезійні властивості, механічну міцність і електричну ізоляцію [3].

Високотемпературні датчики (виготовлені полум'яним напиленням) з керамічним з'єднанням передбачають напилення резистивного елемента безпосередньо на підготовлену поверхню деталі полум'ям, а потім напилення керамічного ізоляційного шару. Матеріалом вимірювача часто є сплав платини та родію (Pt-Rh).

Може ефективно працювати до 1200°C, а в деяких дослідницьких застосуваннях – навіть вище.

Потрібне спеціалізоване обладнання та висококваліфіковані оператори. Нанесення на місці може бути ускладненим.

Якість з'єднання, нанесеного полум'ям, є критично важливою та значною мірою залежить від підготовки поверхні та контролю процесу.

Приварювальні високотемпературні тензометри складаються з резистивного елемента (часто невеликої котушки або фольги), інкапсульованого в металеву оболонку (наприклад, з нержавіючої сталі або інконелю) та ізолюваного керамічним порошком (наприклад, оксидом магнію). Потім уся конструкція приварюється точковим або ємнісним розрядним зварюванням на випробуваний зразок [4]. Діапазон робочих температур – до 600-800 °С, а спеціалізовані версії досягають 1000 °С (рис. 1.11).



Рис. 1.11 – Приварювальні високотемпературні тензометри

Висока міцність і стійкість цих датчиків до суворих умов робить їх придатними для тривалого моніторингу.

Вони є відносно простішими та швидшими в установці порівняно з керамічними типами, особливо в польових умовах.

Матеріал оболонки має бути сумісним з випробувальним зразком, щоб уникнути проблем з гальванічною корозією або різницею тепловим розширенням.

Через свій більший розмір та інкапсуляцію вони схильні усереднювати деформацію на більшій площі, що може знижувати точність при дослідженні сильно локалізованих градієнтів деформації.

Якість і кількість точкових зварних швів мають вирішальне значення для надійної передачі деформації.

Високотемпературні тензодатчики в основному використовуються для вимірювання деформації конструкцій у високотемпературних середовищах. Водночас,

високотемпературні тензодатчики також можуть використовувати на стадії попереднього дослідження перед випробуванням компонента, щоб заздалегідь отримати інформацію про його міцність, оптимізувати та модернізувати конструкцію, щоб уникнути багатьох проблем з міцністю під час розробки моделі [4].

З появою та вдосконаленням високотемпературних матеріалів, швидким розвитком аерокосмічних і ядерних технологій, а також інших передових галузей, робоча температура основних компонентів продовжує зростати. Наприклад, для проектування авіаційних двигунів з вищими числами Маха та вищими співвідношеннями тяги до ваги, потрібно постійно підвищувати температуру на вході до турбіни. Для забезпечення точних вимірювань деформацій в ключових компонентах, необхідно підвищити допустиму температуру високотемпературних тензодатчиків.

Наразі більшість високотемпературних тензодатчиків мають допустиму температуру нижче 800 °С, та існує відносно мало досліджень щодо високотемпературних тензодатчиків, що застосовуються в умовах температур вище 800 °С [5].

Проблеми та обмеження

Тривалий вплив температур, більших від 1000°C, призводить до окрихчування ЧЕ датчиків, знижуючи точність. Наприклад, датчики на основі константану втрачають до 30% чутливості після 500 годин при 900°C [7]. Тому в цих умовах потрібне повторне динамічне калібрування, що є логістично складним. Нові методи, такі як активна термоелектрична компенсація, зараз тільки тестуються [42].

Лабораторне калібрування ВТТ виконується в контрольованих печах, часто на консольних балках або зразках, що деформуються в умовах розтягу, для характеристики їхньої теплової потужності та коефіцієнта калібрування в очікуваному діапазоні температур. Ці дані потім використовуються для програмної компенсації.

В ідеалі ВТТ слід калібрувати на місці за робочої температури, що дозволяє визначити фактичний коефіцієнт калібрування в реальних умовах.

Окислення, вологість і вібрація можуть спотворювати результат вимірювань. Незахищені ВТТ у агресивному середовищі можуть давати велику похибку, що вимагає використання вдосконалених покриттів [43].

Система збору даних повинна бути достатньо надійною для застосування при високих температурах, мати високий імпеданс, щоб мінімізувати вплив на електричний сигнал і мати низький рівень шуму при високій температурі, що вимагає ретельного екранування та обробки сигналу.

Інтегровані датчики температури (термопари) поблизу кожного вимірювача є важливими для точної компенсації.

Підвідні дроти, що з'єднують ВТТ із системою збору даних, також піддаються впливу високих температур і впливають на вимірюваний опір. Вони виготовляються з високотемпературних сплавів, таких як Pt-Rh, Pt, Ni-Cr або нержавіюча сталь, обраних за їх стабільність і характеристики питомого опору.

Їхній опір значно змінюється з температурою, що збільшує уявну деформацію.

Граденти температури вздовж підвідних проводів можуть генерувати термоелектричні напруги, які можуть перешкоджати сигналам низького рівня деформації.

Ізоляція підвідних проводів може деградувати, а самі дроти можуть окислюватися, що призводить до коротких замикань або утворення високоомних спаїв.

Зі зміною температури опір ЧЕ змінюється не лише через механічну деформацію, але й через пряме теплове розширення матеріалу ЧЕ та випробувального зразка, а також зміни питомого опору матеріалу ЧЕ з температурою. Цей ефект може бути на порядки більшим за справжню механічну деформацію [44], що робить його точну характеристику та компенсацію абсолютно важливими.

Коефіцієнт калібрування (КК) високотемпературних тензодатчиків (ВТТ) не є постійним з температурою. Зазвичай він змінюється, й цю зміну необхідно знати, щоб точно перетворити зміни опору на механічну деформацію. Більше того, тривалий вплив високих температур може спричинити металургійні зміни в матеріалі тензодатчика, що з часом призводить до постійного дрейфу КК, що впливає на довгострокову точність.

Цілісність зв'язку між тензодатчиком і зразком має першорядне значення для точного перенесення деформації. За високих температур органічні клеї

руйнуються, що вимагає використання керамічних цементів або інтегрального з'єднання (зварюванням, полум'яним напилюванням).

Проте керамічні з'єднання схильні до розтріскування, пористості або хімічних змін, що може виникати внаслідок термоцилювання або тривалого впливу високих температур.

За підвищених температур матеріали тензодатчика, керамічні цементи і випробуваний зразок демонструють повзучість - деформацію, що залежить від часу, під постійним напруженням, що призводить до втрати ефективності передачі деформації та значних похибок вимірювання [45].

Це може призвести до значного дрейфу нуля протягом тривалого часу.

Окрім температури, на характеристики ВТТ впливають середовища з високою вологістю або забрудненнями, що може призвести до збільшення струмів витоку, шунтування опору ЧЕ та значних похибок.

Кореляція з числовими моделями

Експериментальні дані щодо НДС, отримані з використанням високотемпературних тензодатчиків часто використовуються для перевірки МСЕ або інших числових моделей. Розбіжності між експериментальними та числовими результатами можуть виявити обмеження в моделях властивостей матеріалу, граничних умовах або припущеннях щодо навантаження, що використовуються в моделях. Систематичне порівняння отриманих експериментальних даних з результатами чисельного моделювання дозволяє одночасно удосконалювати експериментальну методику та покращувати саму модель.

Висновок

Застосування високотемпературних тензодатчиків є незамінним, але складним аспектом експериментального аналізу НДС конструкцій, що працюють в екстремальних теплових умовах.

Успішне впровадження ВТТ залежить від критичної уваги до підготовки поверхні, відповідних методів з'єднання, ретельного вибору та маршрутизації підвідних дротів, а також надійних методів температурної компенсації (таких як міст з пасивним ЧЕ або складна програмна корекція). Калібрування на місці, де це

можливо, пропонує найточнішу характеристику поведінки датчика в робочих умовах. Крім того, точна інтерпретація даних, включаючи комплексний аналіз помилок і невизначеностей, є життєво важливою для перетворення необроблених електричних сигналів на надійні дані про механічну деформацію.

Оскільки інженерні вимоги продовжують розширювати межі характеристик матеріалів та робочих температур, розробка та застосування високотемпературних тензодатчиків залишатимуться на передньому краї забезпечення структурної цілісності та покращення нашого розуміння поведінки матеріалів в екстремальних умовах.

1.5 Висновки з розділу, постановка задачі та передбачувані шляхи її вирішення

Цей розділ присвячено аналізу НДС вузлів газотурбінних двигунів. Окрему увагу приділено характеристикам високотемпературних тензорезисторів. Встановлено, що сучасні засоби вимірювальної техніки забезпечують контроль динамічних деформацій при температурах до $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$, водночас для статичних вимірювань робочий діапазон обмежується $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У цьому розділі проаналізовано та визначено основні компоненти ВТТ: матеріал, сполучні елементи та покриття тензочутливого датчика. Крім того, проведено аналіз літературних джерел, що дозволило оцінити сучасний стан досліджень та систематизувати здобутки вчених у галузі вивчення високотемпературного напружено-деформованого стану (НДС) деталей авіаційних двигунів.

Сьогодні в інженерії питання міцності та надійності конструкцій нерозривно пов'язане з аналізом їхнього напружено-деформованого стану, де одним із ключових чинників є теплове навантаження. Аналіз літературних джерел свідчить, що вимірювання деформацій за температур понад $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ залишається складною науково-технічною проблемою. Існуючі методи мають низку обмежень через зміну електричних властивостей матеріалів, деградацію адгезійних шарів і значний температурний дрейф «нуля», що вимагає проведення додаткових масштабних експериментальних досліджень. З огляду на це, надзвичайно актуальним є створення

високотемпературних тензорезисторів, здатних задовольняти жорсткі вимоги до оцінки напружено-деформованого стану елементів газотурбінних двигунів. Виходячи з цієї науково-практичної задачі, метою даної дисертаційної роботи є розробка інструменту для вимірювання деформацій конструктивних елементів двигунів та енергетичних установок, що працюють за температур понад 700 °С.

Задача полягає в створенні надійного ВТТ для моніторингу напружено-деформованого стану відповідальних елементів газотурбінного двигуна при температурах, що перевищують 700 °С, з метою продовження їх ресурсу.

Модель оснащена ВТТ для роботи в умовах понад 700 °С, де традиційні фольгові тензодатчики втрачають працездатність та спеціальну схему температурної компенсації.

В екстремальних умовах експлуатації – (високий тиск, вібрації, циклічне термічне навантаження) – потрібно забезпечити не тільки термостійкість матеріалів чутливого елемента та підкладок, але й стабільність тензочутливості, адгезію до підкладки, довготривалу експлуатацію без дрейфу нуля та зберегти високу точність вимірювань при значних градієнтах температур і навантажень.

Передбачувані шляхи створення ВТТ включають:

(1) вибір матеріалу та обґрунтування конструкції високотемпературних ЧЕ тензорезисторів для підвищення коефіцієнту тензочутливості та термостійкості;

(2) виготовлення ЧЕ тензодатчиків із вбудованими компенсаторами термічного розширення;

(3) застосування захисних оксидних покриттів ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) з низьким тепловим розширенням, які одночасно виконуватимуть функцію бар'єру проти корозії;

(4) підключення ЧЕ до вимірювальної апаратури таким чином, щоб передача даних у режимі реального часу виконувалась без деградації та мінімізувати похибки;

(5) проведення багатофазного валідаційного циклу, що включає чисельне моделювання температурних полів, лабораторні випробування в печах із швидким нагрівом та експериментальне калібрування на випробувальних стендах, які імітують реальні робочі умови двигуна. Такий комплексний підхід забезпечить створення

високотемпературних тензорезисторів з мінімальними похибками (<0,5 % при 700 °C) та довговічністю понад 10 000 годин експлуатації, що відкриє нові можливості для активного керування станом елементів ГТД та продовжити їх ресурс.

Література до першого розділу

- 1 Martínez, F. Evaluation of the Gas Turbine Inlet Temperature with Relation to the Excess Air / F. Martínez // *Energy and Power Engineering*. – 2011. – Vol. 3. – P. 517-524 doi: 10.4236/epe.2011.34063
- 2 Mevissen, F. The Future of Industrial Gas Turbines: Technological Advances and Market Trends / F. Mevissen, R. Krewinkel, A. Wiedermann // *ASME. J. Thermal Sci. Eng. Appl.* – 2026. Vol. 18(3). – 22 p. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4070223>
- 3 High-temperature strain gauges for gas turbine blades / G. F. Fischer [et al.] // *Journal of Materials Science*. - 2021. – Vol. 56(1). – P. 321–345. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05238-1>
- 4 Fuji Ceramics Corporation. (n.d.). Weldable Strain Gauges. Retrieved from. Available at: <https://fujicera.co.jp/en/products/strain-gauge/wsc/> (Note: Actual link may vary, this is a placeholder for a typical product page).
- 5 Zhang, R. A novel SiC strain gauge for temperature-resistant structural health monitoring / R. Zhang, H. Liu, G. Chen // *Smart Materials and Structures*. – 2020. – Vol. 29, iss. 7. - P. 075005. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab8c49>
- 6 High Temperature Strengthening Mechanisms in the Alloy Platinum-5% Rhodium DPH / K. Teichmann, C. H. Liebscher, R. Völkl [et al.] // *Platinum Metals Review*. – 2011. - Vol. 55, Iss. 4. – P. 217–224. doi: <https://doi.org/10.1595/147106711x591971>
- 7 Fischer, T. Material selection for high-temperature strain gauges / T. Fischer // *Strain*. – 2020. – Vol. 56, iss. 3. – P. 120–132. doi: <https://doi.org/10.1111/str.12239>

8. Ильинская, Л. С. Высокотемпературные тензорезисторы на основе жаростойких окислов / Л. С. Ильинская, В. М. Иванов, В. В. Поднебеснов. – М.: Машиностроение, 1973. – 69 с.
9. Коротаев, А. П. Жаростойкие тензорезисторы ЖТН-2Н / А. П. Коротаев, Е. А. Отцов // Методы и средства тензометрии и их использование в народном хозяйстве: тез. докл. науч.–техн. конф. – М., 1976. – С. 19–20.
10. Анкудинов, Д. Т. Малогабаритные тензодатчики сопротивления / Д. Т. Анкудинов, К. Н. Мамаев. – М.: Машиностроение, 1968. – 188с.
11. Ильинская, Л. С. Полупроводниковые тензодатчики / Л. С. Ильинская, А. Н. Подмарьков. – Л.: Энергия, 1966. – 120с.
12. Андерсон, Б. Разработка и применение высокотемпературных тензодатчиков, предназначенных для измерения напряжения в турбореактивных двигателях / Б. Андерсон // Высокотемпературные тензодатчики : сб. ст. – М.: Машиностроение, 1963. – С. 113–124.
13. Карслоц, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоц, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 487с.
14. МИ 1347–86. Методика определения погрешности измерения деформаций проволочными и фольговыми тензорезисторами. – Свердловск, 1986. – 41 с.
15. Будников, П. П. Огнеупорные бетоны на фосфатных связках / П. П. Будников, Л. Б. Хорошавин. – М.: Metallургия, 1971. – 192с.
16. Clarke, D. R. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines / D. R. Clarke, M. Oechsner, N. P. Padture // MRS Bulletin 37. – 2012. – P. 891–898. doi: <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.232>
17. Пентикост, Дж. Л. Материалы и системы покрытий / Дж. Л. Пентикост // Высокотемпературные неорганические покрытия. – М., 1968. – С.20–143.
18. Уизерс, Д. С. Методы нанесения покрытий / Д. С. Уизерс // Высокотемпературные неорганические покрытия: сб.ст. – М., 1968. – С.186–229.
19. Аппен, А. А. Температурноустойчивые неорганические покрытия / А. А. Аппен. – Л. : Химия, 1976. – 239с.

20. А.с. 200859 СССР. Способ закрепления проволочной решетки высокотемпературного тензодатчика / Ильинская Л. С., Поднебеснов Б. В., Иванов В. К. – № 20008119292 заявл. 23.11.65; опубл. 25.09.67. - Бюл. № 17. – 25 с.
- 21 Development and testing of harsh environment, wireless sensor systems for industrial gas turbines / D. Mitchell, A. Kultkarni, M. Lostettar [et al.] // Proceeding of ASME Turbo Expo for Land, Sea and Air GN 2009, June 8–12, 2009, Orlando, Florida, USA. - P. 777-784. doi: <https://doi.org/10.1115/GT2009-60316>
22. Борисенко, А. И. Тонкослойные стеклоэмалевые и стеклокерамические покрытия / А. И. Борисенко, Л.В. Николаева. – Л.: Наука, 1970. – 69 с.
- 23 Холодилин, Н. Н. Эмалирование стальных и чугуновых изделий / Н. Н. Холодилин. – М.: Госиздат, 1962. – 352 с.
- 24 Моор, Д. Некоторые свойства цементов высокотемпературных тензодатчиков / Д. Моор // Высокотемпературные тензодатчики: сб.ст. – М.: Машиностроение, 1963. – С. 44–48.
- 25 Тензометрия в машиностроении : справ. пособие ; под ред. Макарова Р. А. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.
- 26 Химические основы технологии и применения фосфатных связок и покрытий / В. Л. Голышко–Вольфсон, М. М. Сычев, А. Г. Судыкас [и др.]. – Л.: Химия, 1968. – 192 с.
27. Термокомпенсированные тензорезисторы для неметаллических материалов в летно–прочностных испытаниях самолетов / Г. М. Харитонов, Н. И. Володин, Ю. Н. Мишин [и др.] // Авиационная промышленность. – 2012. – № 1. – С. 3–8.
- 28 Хатунцев, О. А. Динамическое тензометрирование элементов энергетического оборудования / О. А. Хатунцев // Теплоэнергетика. - 1973. – № 5. – С.48–52.

- 29 Магин, И. Я. Одновременное измерение деформации и температуры при помощи одного преобразователя / И. Я. Магин // Измерительная техника. - 1971. – № 2. – С.48–50.
30. Пентикост, Дж. Л. Материалы и системы покрытий / Дж. Л. Пентикост // Высокотемпературные неорганические покрытия. – М., 1968. – С. 20–143.
- 31 Пипс, Д. Измерение сопротивления керамических цементов, предназначенных для изготовления тензодатчиков сопротивления / Д. Пипс, Е. Бузард, Д. Моор // Высокотемпературные тензодатчики: сб. ст. – М.: Машиностроение. - 1963. – С. 32–43.
- 32 Графт, В. Разработка проволок для высокотемпературных тензодатчиков / В. Графт // Высокотемпературные тензодатчики: сб. ст. – М.: Машиностроение. - 1963. – С. 11–25.
- 33 Еленевский, Д. С. Высокотемпературные тензорезисторы для измерений статистических напряжений горячих деталей газотурбинных двигателей / Д. С. Еленевский, В. В. Ртищев, Ю. А. Рошин // Методы и средства тензометрии и их использование в народном хозяйстве. «Тензометрия–76»: тез. докл. науч.–техн. конф. – М.: Гостехиздат. - 1976. – С. 18–19.
- 34 Ведь, В. Е. Исследование свойств эксплуатационных характеристик высокотемпературных цементов, связующих тензорезисторов / В. Е. Ведь, Ю. А. Гусев, Л. Н. Ржавин // 7-й Науч. методический Межвузовский семинар, посвященный 325-летию воссоединению Украины с Россией: тез. докл. – Хмельницкий. - 1979. – С. 39.
- 35 Коротаяев, А. П. Исследование возможности повышения термостойкости и усталостных свойств проволочных тензодатчиков / А. П. Коротаяев: – М.: Машиностроение. - 1970. – 28 с.
- 36 Полупроводниковые тензодатчики ; под ред. М. Дина: пер. с англ. – Л.: Энергия. - 1965. – 216с.
- 37 Vishay Precision Group. Strain Gage Technical Data Sheet: High Temperature Strain Gauges. – 2020. – Available et: <https://www.vishaypg.com/docs/11039/tds-strain-gages-high-temp.pdf>

- 38 Vishay Precision Group. Strain Gage Gage Applications Engineering Notes: Strain Gage Selection for High Temperature Applications. – 2020. – Available et: <https://www.vishaypg.com/docs/11075/an-strain-gage-selection-high-temp.pdf>
- 39 Coleman, H. W. Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers / H. W. Coleman, W. G. Steele, H. W. Coleman // 3rd Edition. NJ: John Wiley & Sons. – 2009. – 317 p.
- 40 The electromechanical behavior of nichrome (80/20 wt.%) film / I. H. Kazi, P. M. Wild, T. N. Moore, M. Sayer // Thin Solid Films. 2003. - Vol. 433, Iss. 1-2. - P. 337-343. doi: [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(03\)00390-0](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(03)00390-0)
- 41 Dally, J. W. Experimental stress analysis / J. W. Dally, W. F. Riley // 4th ed. McGraw-Hill. - 2005. – 89 p.
- 42 High temperature strain sensor based on a fiber Bragg grating and rhombus metal structure / L. Zhang, Y. Liu, X. Gao, Z. Xia // Applied Optics. – 2015. - Vol. 54, iss. 28. - P. E109-E112. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.54.00E109>
- 43 Müller, K. Fiber optic strain sensing for nuclear reactor applications / K. Müller, A. Schröder, P. Wagner // Sensors and Actuators A: Physical. – 2021. – Vol. 325. P. 112689. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112689>
- 44 Scott, K. A. Thermal output characteristics of high temperature strain gages at temperatures up to 800°C / K. A. Scott, S. P. Wnuk // Strain. – 2004. – Vol. 40, iss. 2. – P. 65-72.
- 45 Bizon, J. High-temperature strain gauges: Application and challenges / J. Bizon, S. Wnuk // Strain. – 2007. – Vol. 43, iss. 1. – P. 1-13.
46. Boyce, M. P. Gas Turbine Engineering Handbook / M. P. Boyce // 4th ed. Waltham, MA: Elsevier. - 2012. – 956 p.
47. Cumpsty, N. Jet Propulsion: A Simple Guide to the Aerodynamic and Thermodynamic Design and Performance of Jet Engines / N. Cumpsty, A. Heyes // 3rd ed. Cambridge University Press. - 2015. – 365 p.

48. Inozemtsev, A. A. Gas Turbine Engines / A. A. Inozemtsev, V. L. Sandratsky // Perm: OAO "Aviadvigatel". - 2006. – 640 p. (In Russian).
49. Walsh, P. P. Gas Turbine Performance / P. P. Walsh, and P. Fletcher // 2nd ed. Oxford: Blackwell Science. - 2004. – 640 p.
50. Rolls-Royce. The Jet Engine // 5th ed. London: Rolls-Royce Technical Publications. – 2015. – 288 p.
- 51 Fournier, M. P. High-temperature deformation and microstructure evolution in nickel-based superalloys / M. P. Fournier, D. Bellet, J. Besson // International Journal of Plasticity. – 2018. – Vol. 101. - P. 205–225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2017.11.005>
- 52 Tichy, J. Sensors for Strain and Force Measurement at High Temperatures / J. Tichy // Springer Science & Business Media. – 2012. – 296 p.
- 53 High-temperature strain gauge sensors for aeronautical turbine testing / M. Danyluk [et al.] // Journal of Aerospace Engineering. - 2015. – Vol. 28(4). – P. 04014101.
- 54 Strain Gage Selection: Criteria, Procedures, Recommendations // Measurements Group. Technical Note TN-505-4. – 2010. – 16 p.
- 55 Nagarajan, B. High-Temperature Strain Gages: A Review / B. Nagarajan, D. Ramachandra // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. - 2018. – Vol. 41, iss. 2. - P. 1-10.
- 56 Preston, H. High-Temperature Strain Gages / H. Preston // In Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis. – 1960. – Vol. 17, iss. 1. – P. 1-12.
- 57 Stetson, L. High Temperature Strain Gauge Technology: A State of the Art Review / L. Stetson // Sensors and Actuators A: Physical. – 2015. – Vol. 233. – P. 1-15.
- 58 Wang, Z. Advancements in Strain Gauge Measurement Techniques for High-Temperature Applications / Z. Wang, C. Lu // Experimental Mechanics. – 2019. – Vol. 59, iss. 7. – P. 963-978.

- 59 White, C. S. Strain Gauge Technology at High Temperatures / C. S. White // Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2001. – Vol. 36, iss. 6. – P. 579-590.
- 60 Carroll, G. Experimental stress analysis for engine components at high temperatures / G. Carroll, K. Degtyarev // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2018. – Vol. 140, iss. 5. – P. 051701.
- 61 Dally, J. W. Experimental stress analysis / J. W. Dally, W. F. Riley, A. S. Kobayashi // McGraw-Hill Book Company, New York. – 1978. – 571 p.
- 62 Hagen, D. H. High temperature strain measurement and calibration techniques / D. H. Hagen // Measurement Science and Technology. – 2010. – Vol. 21, iss. 9. - P. 092001.
- 63 Tavassoli, S. A. H. Advances in strain gauge technology for high-temperature applications / S. A. H. Tavassoli, S. Rothberg // Measurement. – 2004. – Vol. 36, iss. 4. P. 373–382.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2003.09.005>
- 64 International Atomic Energy Agency. Nuclear reactor structural health monitoring using strain gauges. (Technical Report No. IAEA-TECDOC-1905). – 2020. – 128 p.
- 65 Lei, J. F. Thin-film thermocouples and strain gauges for high temperature applications / J. F. Lei, H. A. Will // NASA Lewis Research Center, Technical Memorandum. – 1998. – 18 p.
- 66 High-temperature strain gauge sensors for aeronautical turbine testing / M. Danyluk [et al.] // Journal of Aerospace Engineering. – 2015.- Vol. 2, iss. 4. – 9 p.
- 67 Borodenko, V. M. Construction and properties of high-temperature resistive strain gauges for gas turbine diagnostics / V. M. Borodenko // Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. – 2018. – Vol. 2. – P. 45-51.
- 68 Microstructure and corrosion properties of plasma-sprayed NiCr–Cr₃C₂ coatings comparison with different post treatment / G. Xie, Y. Lu, Z. He [et al.]

- // Surface and Coatings Technology. - 2008. – Vol. 202, iss. 13. – P. 2885–2890. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.10.024>)
- 69 Hoffmann, K. An Introduction to Measurements using Strain Gages / K. Hoffmann // Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. - 1989. - 273 p.
- 70 Borodenko, V. M. Construction and properties of high-temperature resistive strain gauges for gas turbine diagnostics / V. M. Borodenko // Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. - 2018. – No. 2. – P. 45-51.
- 71 Grant, H. P. High temperature static strain sensor development program / H. P. Grant, J. S. Przybyszewski // NASA Contractor Report 165201. – 1980. - 118 p.
- 72 HBM. High-temperature strain gauge technology. – 2021. – Available et: <https://www.hbm.com/htsg.html>
- 73 Padture, N. P. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications / N. P. Padture, M. Gell, E. H. Jordan // Science. – 2002. – Vol. 296, iss. 5566. – P. 280–284.
- 74 Huang, K. A silicon carbide-based strain gauge for high-temperature environments / K. Huang, Z. Wang, Z. Zhou // Measurement Science and Technology. – 2021. – Vol. 32, iss. 4. – P. 045101. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abcd123>
- 75 Chen, Y. High-temperature strain sensor based on sapphire fiber Bragg gratings: A review / Y. Chen, L. Zhang, J. Liu // Sensors. – 2024. – Vol. 49, iss. 3. – P. 446–449. doi: <https://doi.org/10.1364/OL.509397>
- 76 Smith, S. T. Materials and technologies for turbine engine instrumentation / S. T. Smith // Academic Press. – 2020. – 442 p.
- 77 High-Temperature Strain Gauge Measurement Techniques for Temperatures Above 800 °C: A Review / W. Wang, R. Zong, D. Li [et al.] // Materials. – 2025. – Vol. 18, iss. 7. – P. 1588. doi: <https://doi.org/10.3390/ma18071588>
- 78 Tichy, J. Sensors for Strain and Force Measurement at High Temperatures / J. Tichy // Springer Science & Business Media. – 2012. – 238 p. (In Russian)

- 79 Zhao, Y. Drift analysis of high-temperature strain gauges in nickel-based superalloys / Y. Zhao, X. Li, Q. Wang // *Experimental Mechanics*. – 2016. – Vol. 56, iss. 5. – P. 887–901. doi: <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0160-0>
80. Development and testing of harsh environment, wireless sensor systems for industrial gas turbines / D. Mitchell, A. Kultkarni, M. Lostettar [et al.] // *ASME Turbo Expo for Land, Sea and Air GN 2009* June 8–12, 2009, Orlando, Florida, USA. - P. 777-784. doi: <https://doi.org/10.1115/GT2009-60316>
- 81 Weldable strain gage WTN series. – Available et: <https://www.directindustry.com/prod/high-precision-measurement-llc/product-245057-2712849.html>
- 82 Nichrome V – HBWANV Series. – Available et: https://hitecprod.com/hpi_products/nichrome-v-hbwanv-series/
- 83 Hoskins – HBWAH Series. – Available et: https://hitecprod.com/hpi_products/hoskins-hbwah-series/
- 84 LS31HT: Weldable Strain Gauge for Rough Environments and High Temperatures. – Available et: https://www.hbm.com/tw/3450/ls31-a-weldable-strain-gauge-sg/?product_type_no=LS31
- 85 3D-Printed polysilazane/cr2o3 composite thick-film negative temperature coefficient thermistors for high-temperature sensing applications / Shilong Jia [et al.] // *ACS applied nano materials*. – 2025. <https://doi.org/10.1021/acsanm.5c03124>
- 86 Diagnostics using a physics-based engine model in aero gas turbine engine verification tests / Sangjo Kim [та ін.] // *Aerospace science and technology*. – 2023. – C. 108102. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.108102>
- 87 Future development directions of high-temperature strain sensors: a comprehensive review of structure and performance characteristics / Xiang Liu [та ін.] // *Nanoscale advances*. – 2025. <https://doi.org/10.1039/d5na00039d>
- 88 High-Linearity and high-stability agnps thin-film temperature sensor and microcrack thin-film strain gauge based on laser-assisted fabrication / Luoxin

- Li [et al.] // IEEE sensors journal. – 2025. – P. 1.
<https://doi.org/10.1109/jsen.2025.3563269>
- 89 High thermal stability of ultra-high temperature surface acoustic wave devices with multilayer composite electrodes / Daiqing Zhu [et al.] // Journal of alloys and compounds. – 2023. – P. 169056.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169056>
- 90 Metal-based sandwich type thick-film platinum resistance temperature detector for in-situ temperature monitoring of hot-end components / Yingjun Zeng [et al.] // Applied surface science. – 2023. – P. 157979.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157979>
- 91 Microstructure-optimized platinum thin-film strain gauges for extreme environment monitoring up to 1300 °C / Xianwei Qian [та ін.] // Chemical engineering journal. – 2025. – C. 170509.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170509>
- 92 Podobied O. Verification of the gage factor of a high-temperature strain gage for the dynamic testing of gas turbines / Oleksii Podobied, Ihor Vernyhora, Oleksii Kulikov // International journal of turbomachinery, propulsion and power. – 2024. – T. 9, № 3. – C. 30. <https://doi.org/10.3390/ijtpp9030030>
- 93 Printing highly sensitive strain gauges with polymer-derived ceramics and In₂O₃ composites for high-temperature applications / Xianwei Qian [et al.] // Surfaces and interfaces. – 2024. – P. 105324.
<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105324>
- 94 Research on static fatigue failure and life prediction of high temperature resistant fiber bragg grating sensors / L. Chen, Y. Feng, P. Liu and K. Ding // ECIE 2024, <https://doi.org/10.1109/ECIE61885.2024.10626616>.

РОЗДІЛ 2.

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ ТЕНЗОМЕТРИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНІВ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

У цьому 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

2.1 Конструкція ВТП

В тензометрії широко застосовують метод схемної термокомпенсації оснований на тому, що два тензорезистори з однаковими характеристиками встановлюються на один і той же об'єкт (рис. 2.1) близько один від одного та включаються в суміжні плечі симетричної мостової схеми (рис. 2.2). Робочий тензорезистор жорстко прикріплюють до поверхні деталі, а компенсаційний – встановлюють так, щоб він при щільному контакті з поверхнею деталі міг вільно подовжуватися при нагріванні.

Основна помилка схемної компенсації може виникнути внаслідок різних температур нагрівання робочого та компенсаційного тензорезисторів, а також можливого вигину компенсаційного тензорезистора при недостатньому його закріпленні.

Наприклад, при різниці температур робочого та компенсаційного тензорезисторів на 5 °С похибка вимірювання (при вимірюванні тензорезисторами з дроту НМ23ХЮ в інтервалі температур 300 °С) становить 10 % від робочих напружень (100 МПа).

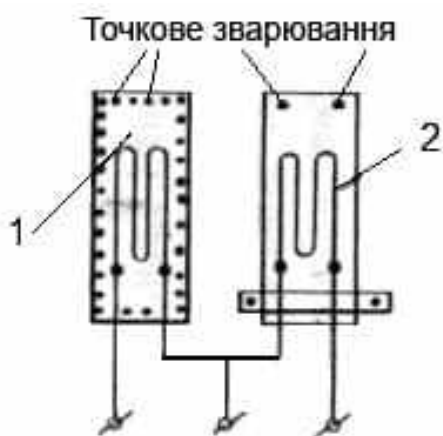


Рис. 2.1 – Схемна компенсація.

Тензорезистори: 1 – робочий,
2 – компенсаційний

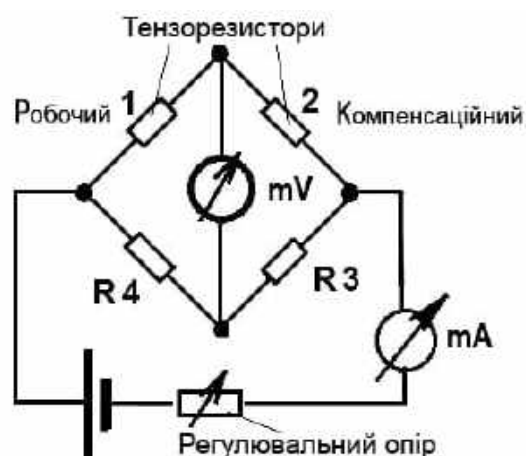


Рис. 2.2 – Вимірвальний міст при схемній компенсації

Для досягнення повної термокомпенсації необхідно робочий і компенсаційний тензорезистори закріплювати на випробуваній об'єкт таким чином, щоб вимірювана деформація спричиняла в них протилежну за знаком зміну опорів. Вони включаються в мостову схему (див. рис. 2.3). Обидва тензорезистори є одночасно і активними, і компенсаційними (один щодо іншого) і при ідентичності їх робочих характеристик досягається повна компенсація температурних похибок.

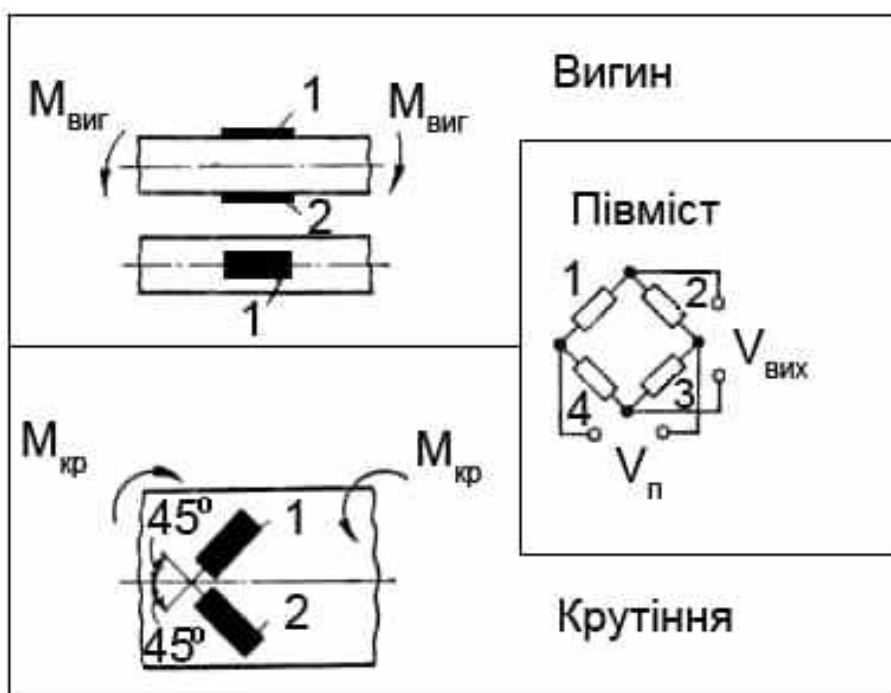


Рис. 2.3 – Варіанти розміщення тензорезисторів при визначенні напружень вигину балки і дотичних напружень при крученні вала з виконанням умови повної термокомпенсації

Чутливість моста при такій схемі збільшується, оскільки обидва тензорезистори беруть участь у вимірюванні деформації.

Проте, таке розташування тензорезисторів можливо лише у окремих випадках та неможливо досліджувати малогабаритні деталі із значним температурним градієнтом.

З метою створення тензометричного пристрою, придатного для вимірювання статичних відносних деформацій деталей авіаційних двигунів, які знаходяться під впливом високих температур (понад 450 °С), було запропоновано високотемпературний тензометричний пристрій (ВТП), у якому забезпечується надійне з'єднання чутливих елементів тензометричного пристрою з досліджуваною деталлю та компенсація адитивної температурної похибки в процесі випробувань [література до вступу 10, 11].

Створення ВТП ґрунтується на застосуванні комплексу конструктивних і схемних особливостей, а також на оригінальній математичній обробці отриманих вхідних даних.

Моделі використовується з метою підвищення точності вимірювання відносних деформацій досліджуваних деталей авіаційних двигунів методом компенсації адитивної температурної похибки в процесі випробувань за рахунок взаємного розташування чутливих елементів тензометричного пристрою та їх надійного скріплення.

У тензометричному пристрої два чутливі елементи скріплені сполучним з металевою платівкою, яка закріплюється на поверхні досліджуваної деталі за допомогою точкового зварювання. Чутливі елементи знаходяться в об'ємі неорганічного клею-цементу, який ізолює їх один від одного та скріплює з металевою платівкою, при цьому чутливі елементи розташовані один над одним та паралельно до площині металеві платівки, на яку встановлено чутливий елемент, головна вісь якого

співпадає з віссю досліджуваної деформації деталі та ортогональна до головної осі другого чутливого елемента.

Як сполучне використано високотемпературний неорганічний клей-цемент ВКП-26Ц гарячого затвердіння.

Металеву платівку виконано з матеріалу, коефіцієнт температурного розширення якого дорівнює коефіцієнту температурного розширення матеріалу досліджуваної деталі.

Таким чином, використання сполучного неорганічного високотемпературного клею-цементу ВКП-26Ц гарячого затвердіння в сукупності з взаємним розташуванням чутливих елементів дозволило забезпечити надійне з'єднання чутливих елементів та їх захищеність від впливу агресивного середовища, а також достатню точність вимірювання відносних деформацій деталей авіаційних двигунів тензометричним пристроєм.

Схему запропонованого високотемпературного тензометричного пристрою для вимірювання відносних деформацій деталей авіаційних двигунів зображено на рис. 2.4.

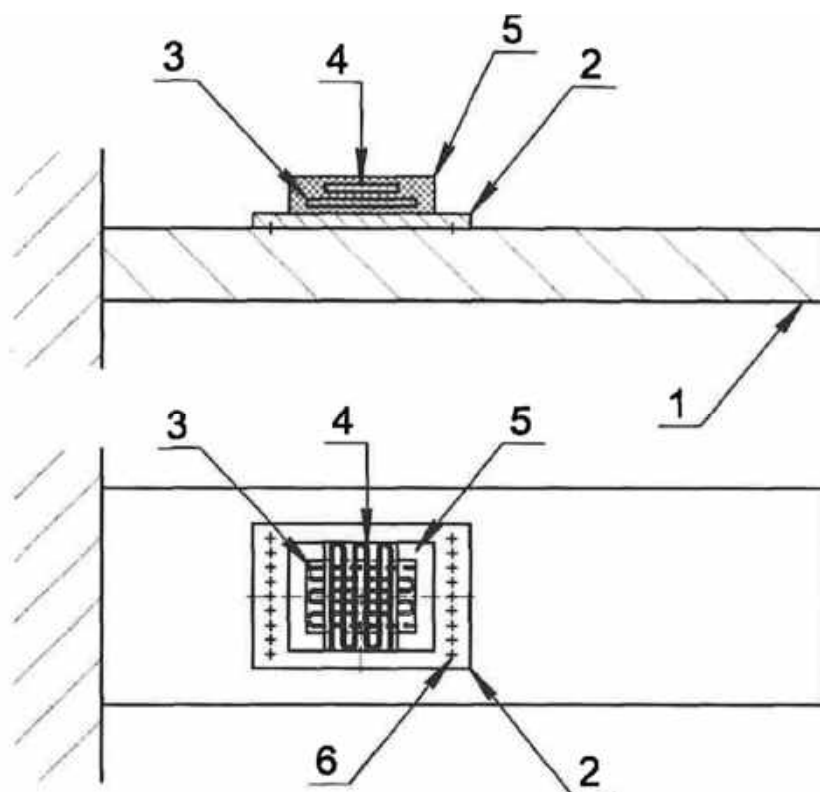


Рис. 2.4 - Схема високотемпературного тензометричного пристрою

На рис. 2.5 показано аксонометричну проекцію конструкції тензOMETричного пристрою.

ТензOMETричний пристрій для вимірювання відносних деформацій деталей авіаційних двигунів містить чутливі елементи 3 та 4, які знаходяться в об'ємі 5 неорганічного клею-цементу, який ізолює їх один від одного та скріплює з металевою платівкою 2. Металева платівка 2 закріплюється на поверхні досліджуваної деталі 1 за допомогою точкового зварювання 6.

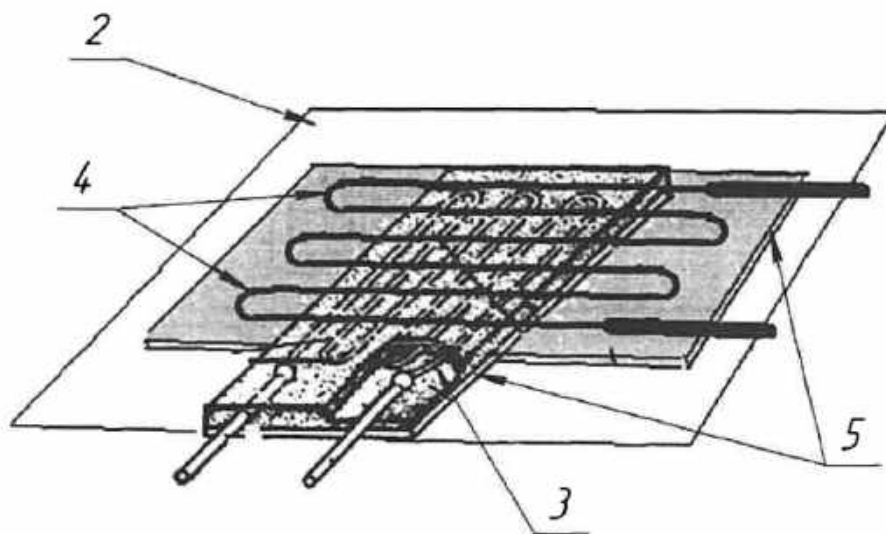


Рис. 2.5 - Аксонометрична проекція конструкції високотемпературного тензOMETричного пристрою

Чутливі елементи 3 і 4 розташовано один над одним паралельно до площині металевої платівки 2, на яку встановлено чутливий елемент 3, головна вісь якого співпадає з віссю досліджуваної деформації деталі 1 та ортогональна головній осі чутливого елемента 4.

Об'єм 5 виконано з високотемпературного клею-цементу ВКП-26Ц гарячого затвердіння.

Металеву платівку 2 виконано з матеріалу, який має коефіцієнт температурного розширення, що дорівнює коефіцієнту температурного розширення матеріалу досліджуваної деталі 1 та близький до коефіцієнта лінійного термічного розширення об'єму 5 неорганічного клею-цементу, що підвищує точність вимірювання відносних деформацій досліджуваної деталі 1.

Головна вісь чутливого елемента 3 співпадає з віссю досліджуваної деформації деталі 1, сприймає поздовжню відносну та температурну деформації.

Чутливий елемент 4, ось якого ортогональна до осі елемента 3, сприймає поперечну відносну та температурну деформації.

Взаємне розташування чутливих елементів 3 та 4 дозволяє призводити вимірювання поздовжніх, поперечних відносних деформацій і температури, а також компенсувати адитивну температурну похибку в процесі випробувань.

Скріплення конструктивних частин тензометричного пристрою для вимірювання відносних деформацій деталей авіаційних двигунів здійснюється послідовно в окремих технологічних операціях, кожна з яких містить нанесення шару неорганічного клею-цементу з подальшим сушінням. Висихаючи після кожної операції склеювання окремо, нанесені шари утворюють єдиний об'єм 5 неорганічного клею-цементу, який надійно скріплює чутливі елементи 3 та 4 між собою, а також з металевою платівкою 2.

У цьому запропонованому нами тензометричному пристрої забезпечена надійність з'єднання чутливих елементів та захищеність від впливу агресивних середовищ, а також підвищена точність вимірювання відносних деформацій досліджуваних деталей авіаційних двигунів.

Його було використано при дослідженні напружено-деформованого стану кронштейнів жарової труби турбореактивного двоконтурного двигуна AI-322, соплового апарата ступеня турбіни AI-450T та направляючого апарата ступеня компресора Д-436-148ФМ.

Зовнішній огляд тензометричного пристрою після проведення дослідження деталей авіаційних двигунів при високих температурах (450 °C ... 800 °C) показав відсутність ушкоджень об'єму 5 неорганічного клею-цементу та збереження адгезії до поверхні металевої платівки 2, завдяки їх близьких коефіцієнтів лінійного термічного розширення.

2.1.1 Чутливі елементи

Чутливі елементи тензOMETричного пристрою виконано із 4-ох витків дроту діаметром 30 мкм, зі сплаву ніхром (Н80Х20 - таблиця 2.1), база чутливих елементів 5 мм. Опір ЧЕ становив 63 Ом, $K = 1,76$.

Ніхромові сплави мають гарну корозійну стійкість і зазвичай використовуються при температурах до 500-600 °С. У діапазоні 500-700 °С коефіцієнт тензочутливості ніхрому змінюється дуже незначно (близько 0,01-0,02% на 10 °С) і становить приблизно 2,1–2,3. При більш високих температурах 800-900 °С починається інтенсивне окислення та структурні зміни. Проте він зберігає лінійність відгуку "опір-деформація".

Таблиця 2.1 – Фізичні та електричні властивості сплаву

Марка сплаву	X20H80 (X20H80-ВИ) ГОСТ 8803-89
Границя міцності σ_B , Н/мм ²	620-680
Густина ρ , г/мм ³	8,4
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, $10^{-6}K^{-1}$	12
20-100	13,5-14
20-600	15,5-16,5
20-1000	17,5-18,5
Температурний коефіцієнт електричного опору $-60...+20 \alpha$, $10^{-6}K^{-1}$	100
ТКЕО $+20 \dots +60 \alpha$, $10^{-6}K^{-1}$	90
ТКЕО $+60 \dots +100 \alpha$, $10^{-6}K^{-1}$	90
Коефіцієнт тензочутливості, К	1,9–2,3

Можливо в якості чутливого елемента використовувати інші матеріали.

- Сплави залізо-хром-алюміній формують на поверхні плівку оксиду алюмінію, яка захищає ЧЕ від подальшого окислення. Це дозволяє використовувати їх при температурах до 1000-1100 °С.
- Сплави нікелю з молібденом являють собою тверді розчини і мають міцність, пластичність, хімічну стійкість у розчинах мінеральних кислот та високу корозійну стійкість. Характеризуються високою межею міцності за підвищених температур. Теплопровідність цих сплавів приблизно така ж, як і в нержавіючих сталях.

- Композити на основі вольфраму/глинозему використовуються в тензодатчиках для температур понад 1200 °С; вони є наступним кроком у розвитку високотемпературної тензометрії. Використання композиту дозволяє корегувати температурний коефіцієнт опору (ТКО) майже до нуля, що критично важливо для зменшення похибки від нагріву.
- Сплави Pt-W та Pt-Rh характеризуються підвищеною жароміцністю, високими механічними властивостями, корозійною стійкістю та термічною стабільністю. Однак необхідно враховувати їх високий температурний коефіцієнт опору (ТКО).

2.1.2 Сполучне

Об'єм неорганічного сполучного, виконаний з високотемпературного клею-цементу ВКП-26Ц гарячого затвердіння, призначений для кріплення дротяної решітки та вивідних проводів високотемпературних тензорезисторів на деталях ГТД з хромонікелевих сплавів, жаростійких сталей і титанових сплавів для вимірювання деформацій в інтервалі температур від 20 до 1000 °С.

Цей клей-цемент ВКП-26Ц складається з наступних компонентів: ВСКО-26 – сполучне, етилцеллозольв – розчинник, дистильована вода – затверджувач, електрокорунд марки Е9А – наповнювач, аміак – затверджувач.

У свою чергу, ВСКО-26 ТУ 1-595-12-1299-2012 складається з наступних компонентів: етиловий ефір ортокремнієвої кислоти, спирт етиловий, борна кислота та дистильована вода.

Етиловий ефір ортокремнієвої кислоти, відомий як тетраетоксисилан (ТЕОС, TEOS) або етилсилікат (ЕТС) — це кремнійорганічна сполука $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$ (рис. 2.6), прозора рідина з ефірним запахом. Використовується як зв'язувальний матеріал у ливарному виробництві, для виробництва силікагелів, підвищення твердості будівельних матеріалів, а також як затверджувач у полімерах.

Металеві поверхні, на які наноситься цемент, обробляють для надання рівномірної шорсткості, знежирюють бензином, та промивають ацетоном.

На підготовлену поверхню деталі пульверизатором чи шпателем наносять шар цементу завтовшки не більше 0,1 мм. Цемент наносять у 4-5 шарів. Товщина покриття цементу не повинна перевищувати 0,4 мм.

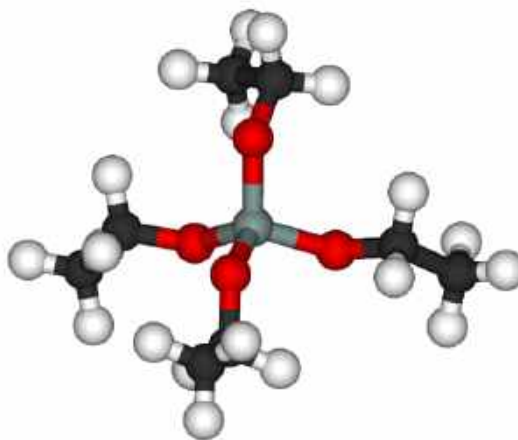


Рис. 2.6 - Тетраетоксисилан

Нанесений шар цементу просушують на повітрі протягом 3 годин, а потім обробляють парами аміаку, для чого деталь помістити на 20-30 хв у камеру над 8-10% водним розчином аміаку. Деталь виймають із камери та витримують на повітрі протягом 30 хв для видалення аміаку.

Аміачна обробка проводиться для прискорення затвердіння цементу. Її можна виключити але в цьому випадку час повітряного сушіння між шарами збільшується до 10-12 год.

Наступні шари цементу наносять аналогічно, після чого цемент піддають ступеневій термообробці, як зазначено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Режими ступеневої термообробки цементу

Витримка при температурі, °С	Час, хв
80-100	60
180-200	60
250-280	30
350	30

Швидкість підйому температури між зазначеними інтервалами – 2-3 град/хв. Деталі охолоджують у печі.

Фізико-механічні властивості неорганічного клею-цементу ВКП-26Ц гарячого затвердіння (а саме коефіцієнт лінійного термічного розширення та ізолюючі

параметри) можливо змінювати за рахунок наповнювача під час приготування. Додаючи до його складу компоненти тугоплавкого скла [1, 2], можна покращити терmostійкість, вібростійкість, можливість нанесення на поверхні з малим радіусом кривизни.

Покриття зазначеного складу використовувалося при виготовленні підкладок-ізоляторів і захисних покриттів високотемпературних плівкових термопар [3].

При дослідженнях високотемпературної поведінки покриття, що містить склофазу, відзначалося аномальне підвищення міцності та в'язкості руйнування. Збільшення міцності кераміки, що містить склофазу, пояснюється заокругленням кінчиків тріщин [4]. Модуль пружності корундового покриття змінюється від 80 ГПа (при температурі 20 °С) до 30 ГПа (при 1000 °С).

2.1.3 Особливості технології ВТП на фольговій підкладці

При дослідженні НДС великогабаритних деталей, або деталей які неможливо піддавати ступеневій термообробці до 350 °С використовується ВТП попередньо встановлений на фольгову підкладку. Таким чином отримуємо приварюваний ВТП, який за допомогою точкового зварювання встановлюється на поверхню досліджуваної деталі.

Металеві поверхні, на які наноситься високотемпературний клей-цемент ВКП-26Ц, повинні бути оброблені для надання рівномірної шорсткості, наприклад за допомогою абразиво-струминного методу. Але при проведенні цієї процедури металева фольгова підкладка значно деформується. Тому для придання поверхні необхідної шорсткості, в металевій фольговій підкладці було зроблено масив наскрізних отворів діаметром 0,3 мм, які забезпечують необхідну адгезію (рис. 2.7).

Отвори заповнювалися клеєм-цементом, після чого встановлювалися ЧЕ за технологією (рис. 2.8).



Рис. 2.7 - Металева фольгова підкладка з отворами

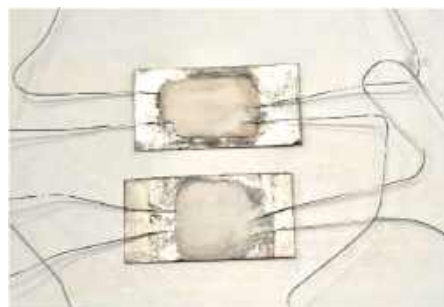


Рисунок 2.8 - ВТП на фольговій підкладці

2.2 Основні властивості та характеристики ВТП

Чутливі елементи тензометричного пристрою (див. рис. 2.9) виконані з 4-ох витків дроту діаметром 30 мкм зі сплаву ніхром (Н80Х20), база становить 5 мм. Опір ЧЕ становив 63 Ом, $K = 1,76$.

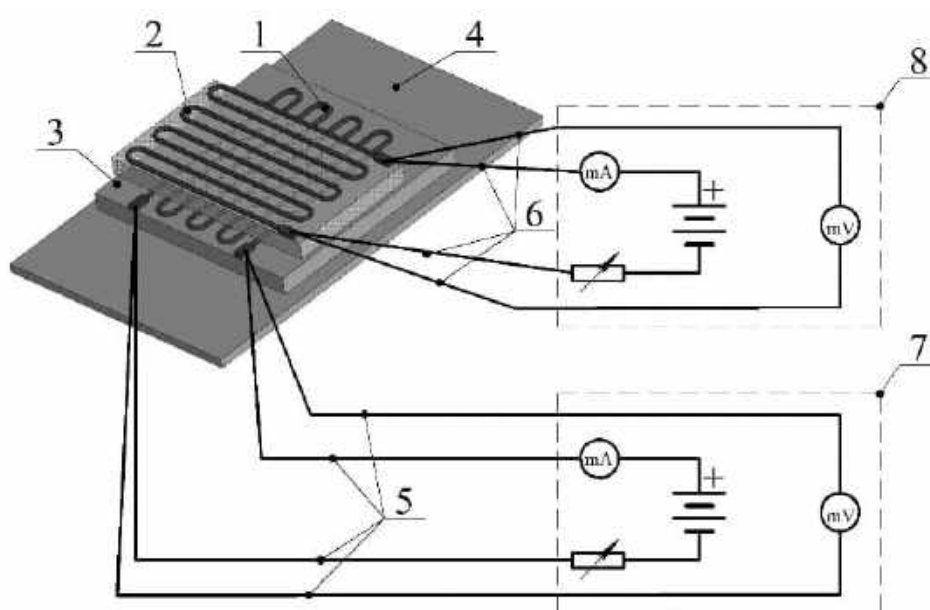


Рис. 2.9 – Схема високотемпературного тензометричного пристрою :

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

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 до першого.

Методика застосування запропонованого ВТП базується на комплексному аналізі рівняння стану пристрою та обробці його вихідного сигналу. В основу моделі покладено залежність електричного опору тензорезистора від сукупності факторів, що визначають точність вимірювання в умовах термічного впливу. Зокрема, функція зміни опору враховує механічну деформацію, поточну температуру, коефіцієнт тензочутливості та температурний коефіцієнт електричного опору (ТКО) матеріалу чутливих елементів (ЧЕ). Крім того, алгоритм розрахунку інтегрує різницю коефіцієнтів лінійного теплового розширення матеріалів досліджуваного об'єкта й самого датчика, а також коефіцієнт Пуассона матеріалу деталі. Для отримання вихідних даних здійснюється прецизійне вимірювання електричного опору верхнього та нижнього чутливих елементів.

При дослідженні об'єктів під дією одновісного навантаження, за умови заздалегідь відомого напрямку головної деформації, визначення експериментального значення відносної деформації базується на методі диференціального аналізу опорів. У процесі математичної обробки виключаються компоненти вищого порядку малості, що дозволяє реалізувати ефект автоматичної температурної компенсації. Такий підхід забезпечує нівелювання похибки, спричиненої нагріванням ЧЕ, оскільки температурно-залежні складові рівняння взаємно скорочуються, залишаючи чистий сигнал деформації.

У випадках двовісного напруженого стану процедура температурної компенсації відносної деформації набуває складнішої форми. Корекція значень виконується шляхом введення даних про термічний стан об'єкта: у розрахункові формули підставляються показники температурного градієнта (ΔT), отримані безпосередньо з температурних датчиків, інтегрованих у зону кожного ЧЕ. Це дозволяє розділити термічну та механічну складові загальної деформації з високим ступенем достовірності.

Спеціалізоване програмне забезпечення, на основі закладених математичних моделей та введених фізико-механічних констант матеріалів, здійснює

автоматизоване обчислення шуканих величин. Система інтегрує масиви вхідних даних із результатами реальних вимірювань, що дозволяє в режимі реального часу отримувати точні характеристики напружено-деформованого стану конструкції в умовах високих температур.

2.2.1 Особливості методики дослідження температурної характеристики ВТП на установці АТ «Івченко-ПРОГРЕС»

Експериментальне дослідження полягало у визначенні температурної характеристики опору як нижнього, так і верхнього ЧЕ досліджуваного тензOMETричного датчика, пов'язаної з температурним розширенням системи деталь-тензOMETр, а також із шунтуванням ізоляції (ізолятора-сполучного) та зміною питомого опору матеріалу ЧЕ.

Також визначено величину уявної температурної деформації тензOMETра в залежності від температури досліджуваної деталі.

ТензOMETри закріплювалися на трьох видах зразків:

– циліндричний, стандартний зразок на розтяг діаметром 10 мм, виготовлений зі сталі 30ХГСА (рис. 2.10);



Рис. 2.10 - Препарований тензOMETром стандартний зразок для випробувань на розтяг

– пластина товщиною 1,5 мм виготовлена зі сплаву ВЖЛ14Н-ВІ, що застосовується в авіаційних ГТД для виготовлення елементів жарових труб камер згоряння. (ОСТ 1 90126-85) – рис. 2.11;

Пластина товщиною 2,5 мм виготовлена з кераміки (електрокорунд зі сполучним з технічного глинозему та пластифікатора на парафіновій основі), яка застосовується для виготовлення ливарних стрижнів каналів охолодження лопаток турбін (рис. 2.12).



Рис. 2.11 – Препарована тензометром пластина зі сплаву ВЖЛ14Н-ВІ

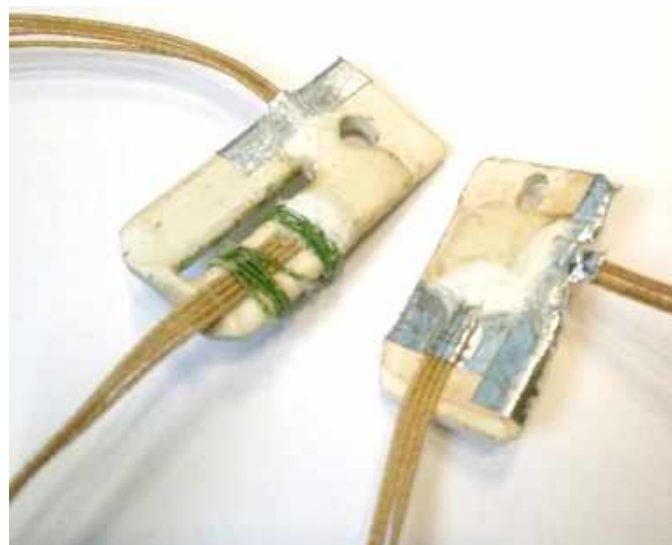


Рис. 2.12 - Препаровані тензометром керамічні пластини

Зразки, із встановленими на них тензометрами піддавалися повільному нагріванню від 20 до 700 °С, (протягом 2-х годин). Кожен ЧЕ тензометра для виключення впливу з'єднувальних проводів був підключений до реєструючої апаратури за допомогою 4-х провідної, потенціометричної схеми в режимі вимірювання електричного опору.

Вимірювання температури здійснювалося за допомогою термопари типу L (хромель-копель), вимірюваний діапазон температур від – 200 °С до +850 °С.

За отриманими даними, для кожної пари ЧЕ тензометрів в процесі нагрівання були розраховано наступні параметри:

Відносна зміна опору окремих ЧЕ тензометра при нагріванні від температури ($\Delta R/R$) представлена залежністю

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(R_i - R_0)}{R_0}. \quad (2.1)$$

Уявна температурна деформація тензومتра залежно від температури деталі.
($\varepsilon_{\text{уявна}}$)

$$\varepsilon_{\text{уявна}} = \left(\frac{R_i^1 - R_0^1}{R_0^1} - \frac{R_i^2 - R_0^2}{R_0^2} \right) \cdot \frac{1}{K_{GF}} \text{ е.о.д.}, \quad (2.2)$$

де R_i – опір ЧЕ тензومتра при певній температурі,

R^1, R^2 – опір поздовжнього та поперечного ЧЕ тензومتра,

R_0 – початковий опір ЧЕ тензومتра при кімнатній температурі,

$K_{GF} = 1,78$ – коефіцієнт тензочутливості партії ЧЕ тензومتра з ніхрому Х20Н80.

В результаті аналізу вимірювань, була зафіксована нерівномірність отриманої досліджуваної характеристики при першому нагріванні, що, ймовірно, пов'язано з процесом спікання клею-зв'язуючого тензومتра. Технологічний процес нанесення цементу Ц-165-32А вимагає виконання заключної теплової обробки при 350 °С з витримкою при цій температурі протягом 30 хвилин. Для вимірювання статичних напружень необхідно підвищити температуру теплової обробки тензومتра при його закріпленні на досліджуваній деталі.

Усі результати проведених досліджень електроопорів ЧЕ наведено після попереднього нагрівання зразків до робочих температур.

Відносна зміна опору кожного ЧЕ тензومتра від температури $(\Delta R/R) = f(t)$ – рис. 2.13 зберігає лінійний характер в діапазоні від 20 до 520 °С. Вище цієї температури відбувається істотне зменшення електроопору ЧЕ, що вказує на його шунтування через шар клею-сполучного на тіло досліджуваної деталі, внаслідок зменшення електроізолюючих властивостей останнього.

Відмінність температури початку впливу шунтування на окремих графіках пов'язана з товщиною шару сполучного (процес нанесення клею-сполучного не автоматизований і виконується вручну).

Графіки рис. 2.13 являють собою температурні характеристики опору ЧЕ тензометрів на окремо взятих зразках. Знання температурної характеристики чутливих елементів тензометра (головного та поперечного) дозволяє оцінити значення уявної деформації, що сприймається вимірювальною системою.

Уявні деформації, реєстровані тензометрами (прямокутна розетка) на різних досліджуваних зразках, при їх нагріванні, визначалися за формулою (2.2).

Зміна уявної деформації тензометра в залежності від температури для різних досліджуваних зразків представлена на рис. 2.14.

На уявну температурну деформацію тензометра (прямокутна розетка), згідно з формулою (2.6), впливає незначна різниця вихідних характеристик двох ЧЕ тензометра. Незважаючи на те, що вони знаходяться в однакових температурних умовах, вони відрізняються початковим опором, коефіцієнтом тензочутливості та просторовим розташуванням дротяних ниток. Зменшити уявну температурну деформацію тензометра-розетки можна підбором ЧЕ.

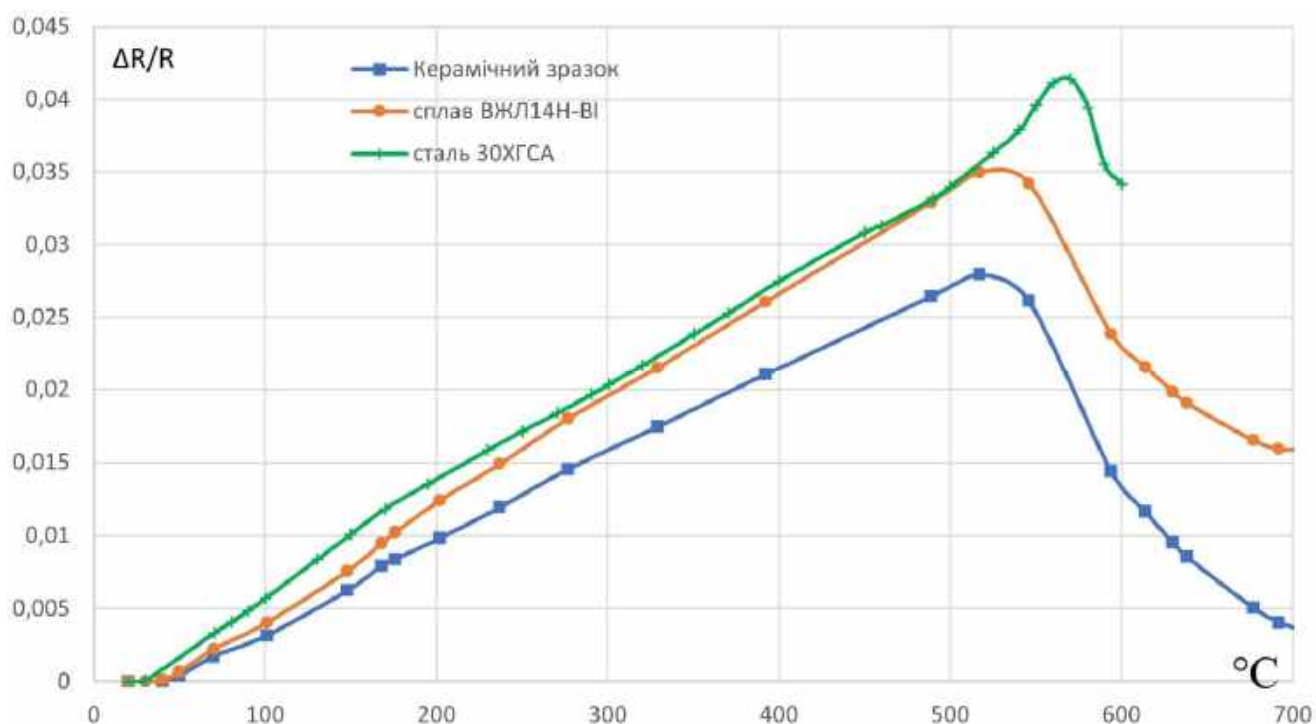


Рис. 2.13 – Відносна зміна електроопору тензометричного датчика (тензометра) від температури

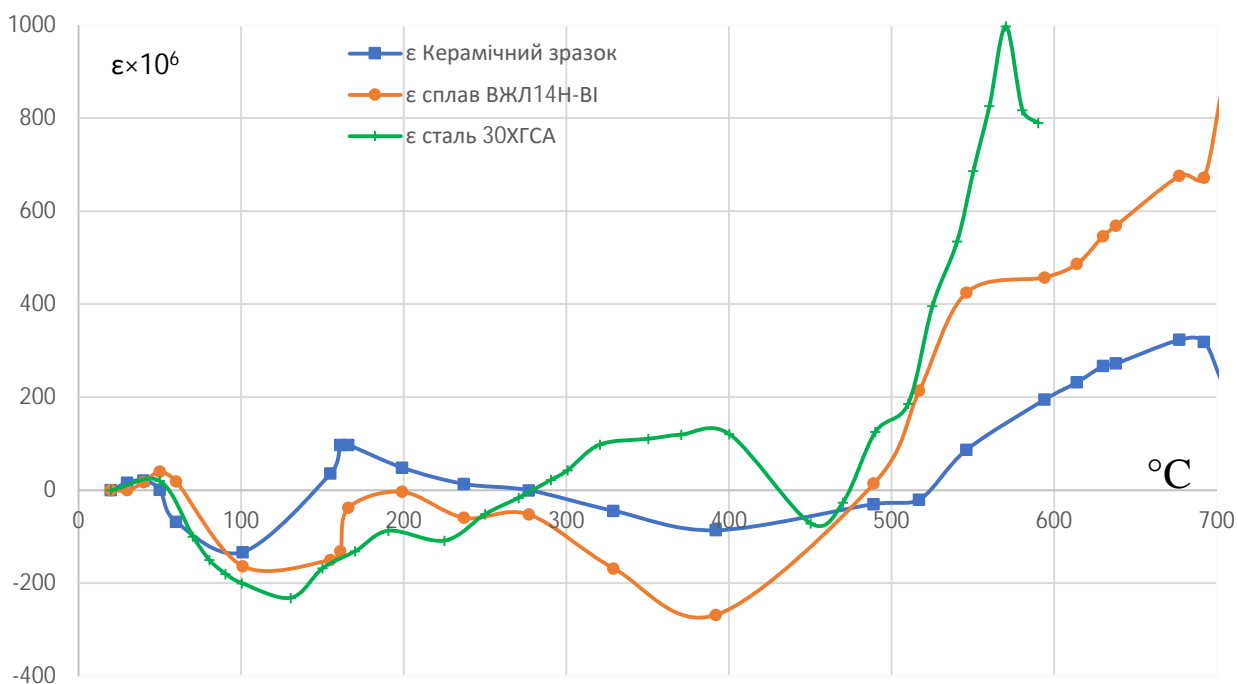


Рис. 2.14 – Уявна температурна деформація тензометра в залежності від температури деталі (ε)

2.2.2 Дослідження ВТП на установці ХАІ з використанням балки чистого вигину

Для визначення тензочутливості розроблено низку вимірювальних систем, конструкція яких різниться між собою переважно типом пружного елемента (градуювальної балки), де фіксуються піддослідні тензорезистори. Найчастіше в практиці застосовують стенди для статичного навантаження. Визначення коефіцієнта тензочутливості K за цими методиками здійснюється шляхом розрахунку за стандартною формулою

$$K_T = \frac{\Delta R_T}{R_T} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{TP}}, \quad (2,3)$$

де R_T – опір тензорезистора при температурі T ;

ΔR_T – збільшення опору тензорезистора в зв'язку з його деформацією;

ε_{TP} – деформація градуювальної балки в області закріплення на ній тензорезистора.

Значення ε_{tr} зазвичай розраховується за безпосередньою вимірюваною величиною прогину балки [5, 6, 7], причому рекомендується застосовувати установку з градуювальною балкою, що навантажується чистим вигином і рівномірним розподілом температури за її довжиною. Однак конструктивні особливості навантажувальних пристроїв та їх нагрівальних елементів більшості існуючих градуювальних установок не забезпечують рівномірності температури за її довжиною [5]. Це може спричинити значні похибки при визначенні деформації.

На точність градуювання тензорезисторів впливають похибки під час вимірювання температури балки та її прогину безпосередньо в зоні встановлення датчика. Загалом, рівень методичних похибок під час градуювання значною мірою визначається специфікою конструкції обладнання, що використовується для калібрування.

Для зняття температурних характеристик високотемпературних тензорезисторів у роботах [8, 9, 10, 11] використовуються описані вище градуювальні установки. При цьому температура балок у місці закріплення тензорезистора контролюється зазвичай за допомогою дротяних термопар.

Більшість дослідників [12, 10, 13] вимірюють електроізоляційні властивості сполучного в самій конструкції тензорезистора, тобто між чутливим елементом і деталлю. При цьому відмінності конструкцій тензорезисторів, складність визначення товщини сполучного, площі чутливого елемента та додатковий вплив висновоків призводять, очевидно, до отримання різних значень питомого електричного опору одного й того ж сполучного.

У роботах [12, 14] вказується, що для вимірювання деформацій, що фіксуються тензорезистором, найбільш доцільно застосовувати потенціометричну схему включення тензорезисторів з живленням напругою постійного струму.

Для вимірювання опору електричної ізоляції сполучного в [10, 12] використовується мегомметр типу МОМ-2М МОМ-3М або Е-6-3.

Сучасна методика статичної градування високотемпературних тензорезисторів спирається на умову ідеально-рівномірного прогріву градувальної балки, яку в більшості випадків не можна дотримати.

Для дослідження ВТП використовувалася високотемпературна (до 1000-1200 °С) установка (рис. 2.15). Її градувальні балки розмірами 365x30x6 мм виготовлено з жароміцного сплаву ЖС6-К та литої кераміки на основі Al_2O_3 . На верхню та нижню грані балки в її робочій зоні закріплюються високотемпературні тензорезистори. Градувальна балка з тензорезисторами встановлюється на опорні призми 2, виконані з високовогнетривкої кераміки на основі Al_2O_3 , що має високі електроізоляційні властивості до високих (1400 °С) температур і низьке значення теплопровідності. Опорні призми встановлюються за допомогою консольних балок 1, виготовлених зі сплаву ЖС6-К. Їхнє закріплення на силовій рамі 16 установки забезпечує сталість розміру між опорними призмами.

Зусилля при обертанні маховичка 9 передається на гвинт 7, від якого через шарнірну опору 6 навантажувальній рамі 5, а воно в свою чергу передає зусилля на призми натискні 4, що рівномірно навантажують градувальну балку. Натискні призми закріплюються в спеціальних пазах навантажувальної рами; як і опорні призми, вони виконуються з високовогнетривкої кераміки. Градувальна балка повністю електроізолюється від корпусу та навантажувального механізму.

Таким чином, працездатність установки при температурах до 1100 °С забезпечено застосуванням жароміцних матеріалів: Al_2O_3 і ЖС6-К.

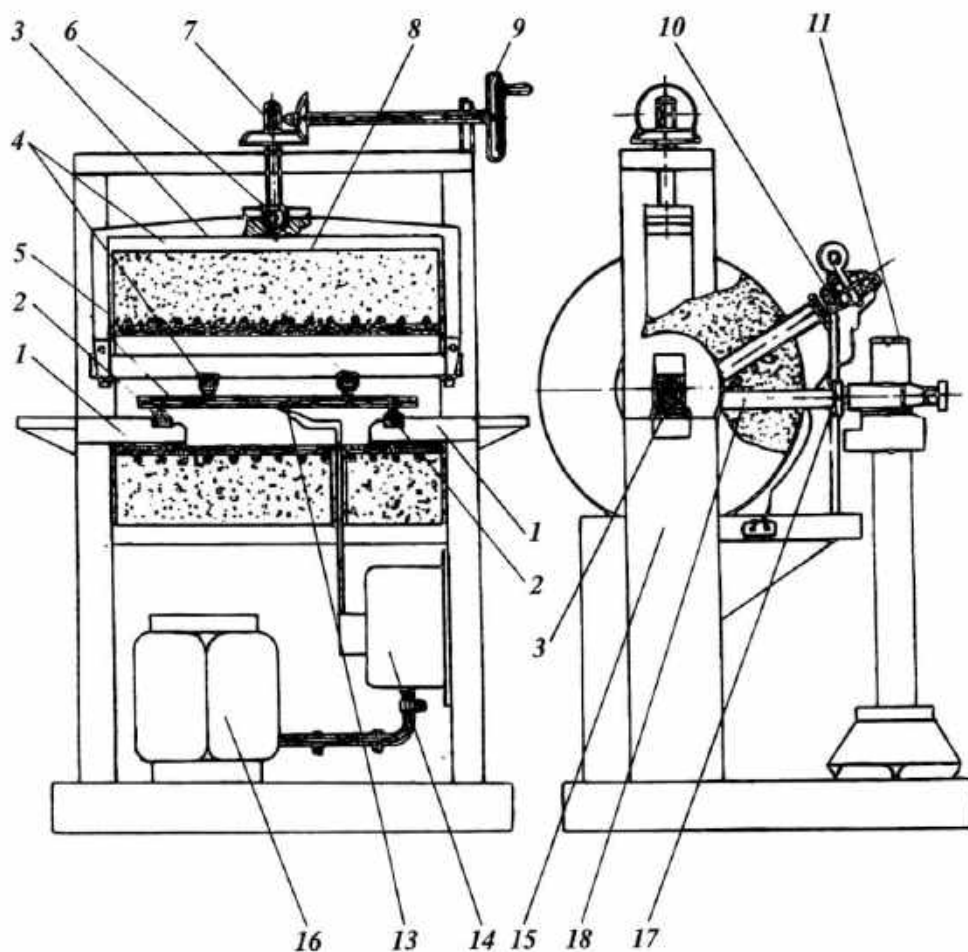


Рис. 2.15 – Конструкція градуювальної установки:

1 – кронштейн (ЖС–6К); 2 – опорні призми – Al_2O_3 ; 3 – градуювальна балка;
 4 – призми навантаження – Al_2O_3 ; 5 – навантажувальна рама; 6 – шарнірний підвіс навантажувальної рами; 7 – редуктор; 8 – електрична піч; 9 – ручка навантаження;
 10 – освітлювач; 11 – катетометр; 13 – термопара; 14 – регулятор температури печі; 15 – станина установки; 16 – світловий канал; 17 – заглушка світлового каналу /кварцове скло/; 18 – силовий трансформатор

Для вимірювання прогину градуювальної балки, що визначає ступінь деформування ТВП, застосовано вертикальний однокоординатний катетометр 12 типу КМ-8. Вимір прогину проводився щоразу від однієї й тієї ж контрольованої бази та, крім того, з високою точністю, оскільки катетометр не пов'язаний ні з системою навантаження установки, ні з її нагріванням. Відхилення градуювальної балки контролювалося катетометром через спеціальний клапан 17 у тілі печі, щільно

закритий оптично прозорим кварцовим склом 18. При низьких температурах місце вимірювання прогину висвітлюється за допомогою освітлювача 2.

Нагрівання градуювальної балки здійснюється електричною піччю опору 8, що отримує напругу живлення від силового трансформатора 13.

Вимірювання температури градуювальної балки в області закріплення тензорезисторів здійснювалося хромель-алюмелевою термопарою 14 діаметром 0,5 мм, що закріплюється в місці розташування тензорезисторів у середньому перерізі балки.

Таким чином, простота конструкції створеної установки і застосування жароміцних матеріалів для виготовлення її основних елементів дозволяють без труднощів проводити дослідження високотемпературних тензорезисторів до температур 1000-1100 °С, при цьому гранична деформація, створювана навантажувальним пристроєм при товщині балки 6 мм, становить $2,8 \cdot 10^{-5}$ відносних одиниць. Похибка вимірювання прогину градуювальної балки визначається паспортними даними катетометра й не перевищує ± 15 мкм.

2.2.3 Дослідження характеристик ВТП на фольговій підкладці



Рис. 2.16 – ВТП на фольговій підкладці

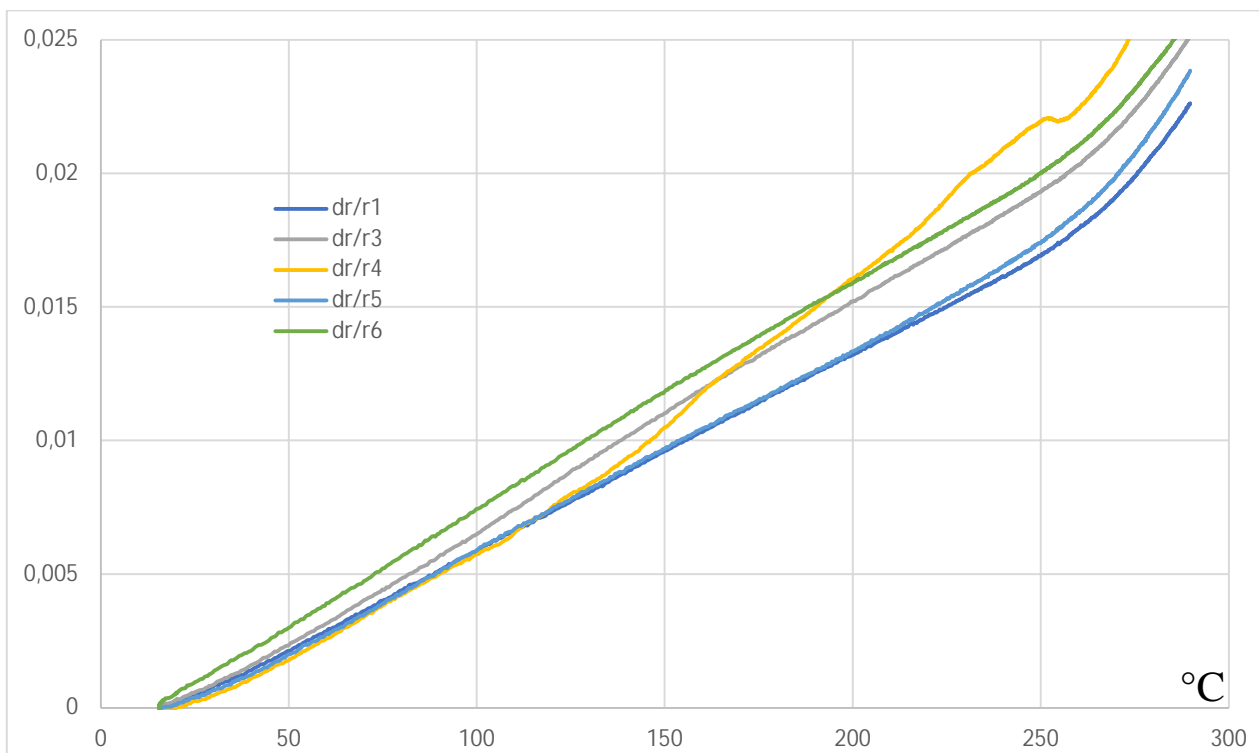


Рис. 2.17 – Відносна зміна електроопору ВТП на фольговій підкладці від температури

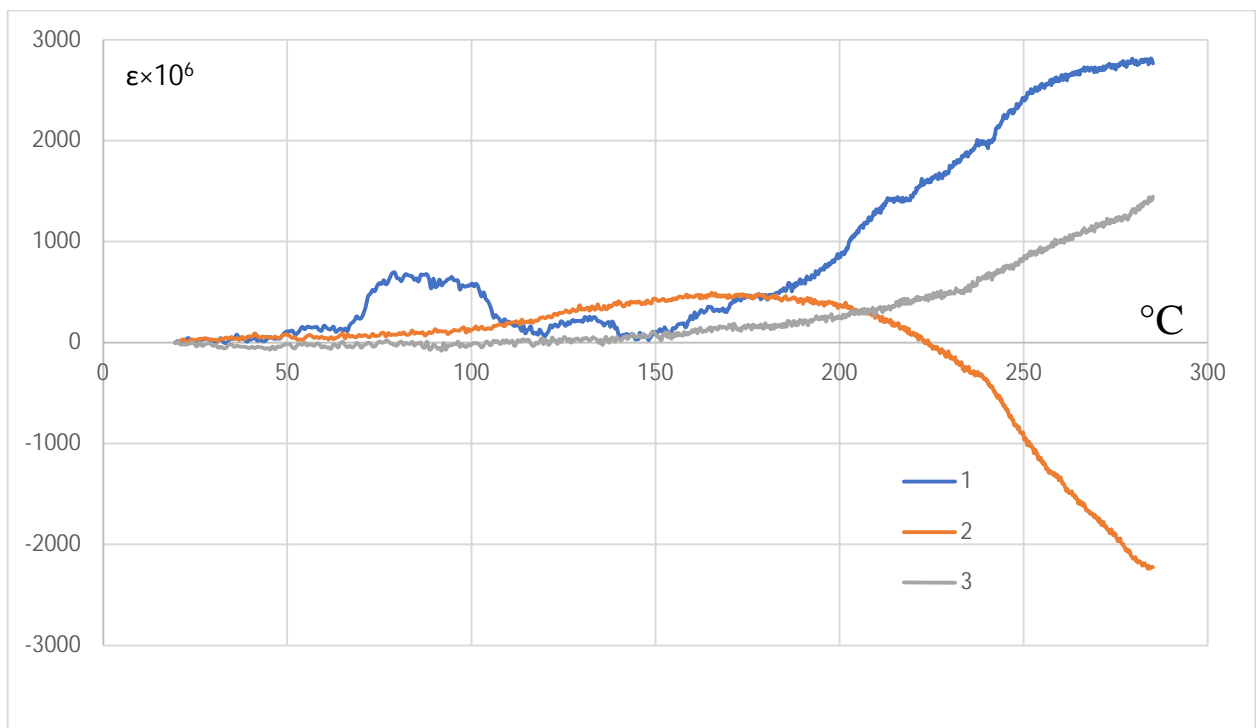


Рис. 2.18 – Уявна температурна деформація ВТП на фольговій підкладці в залежності від температури деталі (ϵ)

2.3 Особливості електроізоляційних властивостей сполучного ВТП

При дослідженнях питомого об'ємного електроопору ізолюючих матеріалів ГОСТ 6433.2-71 рекомендується схема, яка дозволяє проводити вимірювання малих струмів, що протікають через ізолятор при відомій прикладеній напрузі.

На рис. 2.19 наведена відповідна схема [86], у якій зразок досліджуваного матеріалу 3 знаходиться між двома електродами 1 і 4. До цих електродів прикладається напруга – V від джерела – E . Для виключення впливу струмів поверхневої провідності на показання гальванометра – Γ у схему вимірювання вводиться охоронний електрод 2 (рис. 2.19). При цьому зазор між охоронним та вимірювальним електродом становить 2 мм.

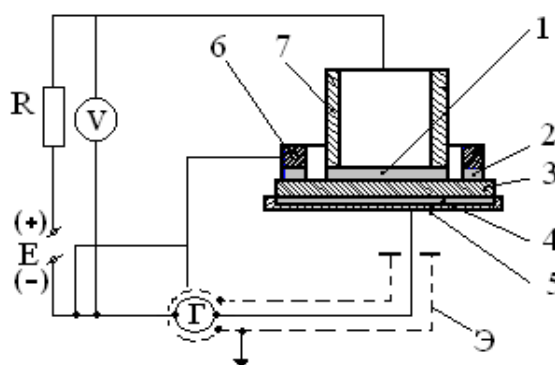


Рис. 2.19 – Схема вимірювання питомого об'ємного електроопору електроізолюючих матеріалів: 1 і 4 – плівкові електроди; 2 – охоронний електрод; 3 – досліджуваний зразок; 4 – електроізоляційна підставка; 6, 7 – керамічні основи плівкових електродів (циліндри)

Величина об'ємного опору визначається за показаннями гальванометра та вольтметра:

$$R_v = \frac{V}{J}, \quad (2.8)$$

а питомий об'ємний опір за залежністю:

$$\rho = R_v \frac{h}{S}, \quad (2.9)$$

де h, S – товщина ізолятора та площа електрода, відповідно.

Вимірювання величини об'ємного опору проводили при постійній напрузі 2 В зі зміною полярності.

Досліджено електроізоляційні властивості емалей ЭВ-55, ЭЖ-1000, ЭВК-14, ЭВК-20 (рис. 2.20), корунду (99,9% Al_2O_3) та цементу фосфатного твердіння (рис. 2.21).

Температурну залежність електроопору ізолятора-підкладки з цементу фосфатного твердіння наведено на рис. 2.22.

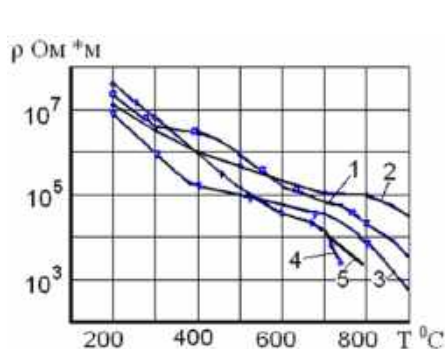


Рис. 2.20 – Залежність питомого об'ємного опору жаростійких емалей від температури: 1 – ЭВК-13; 2 – ЭВК-14; 3 – ЭВК-20; 4 – ЭЖ-1000; 5 – ЭВ-55

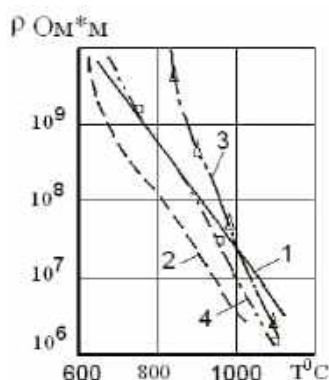


Рис. 2.21 – Залежність питомого об'ємного опору цементу фосфатного твердіння та корунду залежно від температури:

- 1 – Al_2O_3 еталон;
- 2 – ізолятора-підкладка ВПТ;
- 3 – Al_2O_3 [15];
- 4 – Al_2O_3 [16]

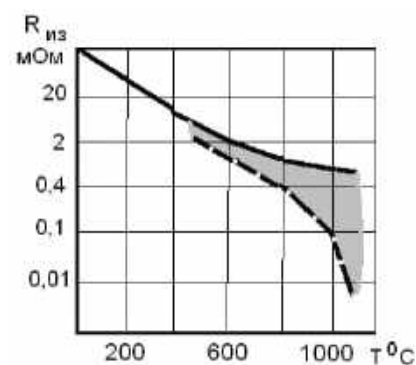


Рис. 2.22 – Температурна залежність електроопору ізолятора-підкладки ВПТ із цементу фосфатного твердіння

Виходячи із загальноприйнятих оцінок [17], величина питомого об'ємного електроопору ізоляторів-підкладок для ВПТ має становити близько 10^5 – 10^6 Ом·см. Таким чином, застосування жаростійких емалей як ізоляторів-підкладок

обмежується наступними температурами: ЭЖ-1000 – 600 °С, ЭВ-55 – 800 °С, ЭВК-14 – 1000 °С и ЭВК-20 – 850 °С, а електроізоляційні властивості цементу фосфатного твердіння дозволяють застосовувати його як ізолятор–підкладку до температур 1000–1100 °С.

Для визначення електроопору ізоляторів–підкладок ВТП останні виконувались за багатопетльовою схемою (розділ 2.2). Їхня база становила 5 мм, ширина доріжки чутливого елемента – 0,03 мм, число доріжок – 8. Товщина ізоляторів–підкладок із цементів фосфатного твердіння становила близько 100 мкм. Відвідні дроти приєднувалися приварюванням. Провідник від балки та відвідні дроти ТВП приєднувалися до вимірювального приладу (омметра) типу Е6-10. Балку нагрівали в електричній печі.

Таким чином, можна зробити висновок, що як матеріал ізоляторів–підкладок ВТП до температур 800-1000 °С можуть бути використані цементи фосфатного твердіння, а також емалі ЕВК-13, ЕВК-14.

Електроопір ізоляторів–підкладок ТВП, виконаних із цементів фосфатного твердіння, становить від 0,1 до 1 МОм при температурі 1000 °С, що задовольняє вимоги високотемпературної тензометрії.

2.4 Обговорення результатів

У цьому розділі запропоновано та досліджено основні технологічні процеси, які дозволили створити конструкцію ВТП, придатного для вимірювання статичних відносних деформацій деталей авіаційних двигунів, які знаходяться під впливом високих температур (понад 450 °С), було запропоновано високотемпературний тензометричний пристрій (ВТП), у якому забезпечується надійне з'єднання чутливих елементів тензометричного пристрою з досліджуваною деталлю та компенсація адитивної температурної похибки в процесі випробувань.

Робочі температури ВТП становлять понад 700 °С, робоче середовище – продукти згоряння газу в повітрі.

Отримано такі основні результати:

- Описано конструкцію чутливих елементів тензометричного пристрою, виконаних із дроту діаметром 30 мкм, зі сплаву Н80Х20.
- Досліджено технологію нанесення високотемпературного клею-цементу ВКП-26Ц гарячого затвердіння на основі модифікованого кремнійорганічного сполучного для кріплення дротяної решітки та вивідних проводів високотемпературних тензорезисторів на деталях ГТД та особливості його електроізоляційних властивостей.
- Описано ВТП на фольговій підкладці та досліджено його характеристики.
- Досліджено методику застосування запропонованого високотемпературного тензометра.
- Досліджено температурну характеристики опору ЧЕ досліджуваного тензометричного датчика, пов'язану з температурним розширенням системи деталь-тензомер, а також із шунтуванням ізоляції (ізолятора-сполучного) та зміною питомого опору матеріалу ЧЕ.

Основні результати цього розділу опубліковано в роботах автора [література до вступу 3, 10].

Література до другого розділу

1. Жаростойкое покрытие для лопаток турбин ГТУ / В. Е. Ведь, Ю. А. Гусев, Н. И. Гусева, Камбиз Кахраи // *Авиационно–космическая техника и технология*. – 2012. – № 9 (96). – С. 127–131.
2. Свойства жаростойких покрытий лопаток турбин ГТД / В. Е. Ведь, Ю. А. Гусев, Н. И. Гусева, Камбиз Кахраи // *Газотурбинные технологии* – 2012. – № 10. – С. 116-119.
3. Термометрия трубных лопаток в натуральных условиях / Д. Ф. Симбирский, А. М. Фрид, А. Я. Аникин [и др.] // *Экспериментальные методы термомпрочности ГТУ: сб. науч. тр. – Харьковского авиационного ин-та*. – Вып. 1. – 1973.– С. 58–64.

4. Davidge R. W. The texture of special ceramics with particular reference to mechanical properties / R. W. Davidge // Proc. Brit. Ceram. Soc. – 1972. – № 20. – С. 364–378.
5. Пучкин, Б. И. Приклеиваемые тензодатчики сопротивления / Б. И. Пучкин. – М.–Л.: Энергия, 1968. – 186 с.
6. Рузга, З. Электрические тензометры сопротивления / З. Рузга // Госэнергоиздат, 1961. – 335 с.
7. Тензометрия в машиностроении : справ. пособие ; под ред. Макарова Р.А. – М.: Машиностроение, 1975. – 288с.
8. Дей, Э. Лабораторные исследования высокотемпературных тензодатчиков, применявшихся для измерения деформаций при температурах до 480 °С / Э. Дей // Высокотемпературные тензодатчики: сб.ст. – М.: Машиностроение, 1963. – С. 230.
9. Келеп, Р. Исследования свойств высокотемпературных тензодатчиков для замера статических и динамических деформаций / Р. Келеп // Высокотемпературные тензодатчики: сб.ст. – М.: Машиностроение, 1963. – С. 59–78.
10. Клокова, Н. П. Тензодатчики для экспериментальных исследований / Н. П. Клокова. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.
11. Хатунцев, О. А. Динамическое тензометрирование элементов энергетического оборудования / О. А. Хатунцев // Теплоэнергетика, 1973. – № 5. – С. 48–52.
12. Ильинская, Л.С. Высокотемпературные тензорезисторы на основе жаростойких окислов / Л.С. Ильинская, В.М. Иванов, В.В. Поднебеснов. – М.: Машиностроение. - 1973. – 69 с.
13. А.с. 200859 СССР, Способ закрепления проволочной решетки высокотемпературного тензодатчика / Л. С. Ильинская, Б. В. Поднебеснов,

В. К. Иванов. – № 20008119292 заявл. 23.11.65; опубл. 25.09.67. -
Бюл. № 17. –25 с.

14. Панин, Е. А. Основы тензометрии двигателей летательных аппаратов / Е. А. Панин. – Самара: СГАУ им. академика С.П. Королева, 2004. – 39 с.
15. Андерсон, Б. Разработка и применение высокотемпературных тензодатчиков, предназначенных для измерения напряжения в турбореактивных двигателях / Б. Андерсон // Высокотемпературные тензодатчики: сб. ст. – М.: Машиностроение, 1963. – С. 113–124.
16. Дайчик, М. Л. Исследование процесса изготовления высокотемпературных тензорезисторов на основе жаростойких окислов / М. Л. Дайчик, Л. С. Ильинская // Исследование температурных напряжений: сб. ст. – М.: Машгиз, 1972 – С. 86–102.
17. Гусев, Ю. А. Тензорезисторы с антишунтирующим экраном / Ю. А. Гусев, Е. А. Кононыхин, Камбиз Кахраи // Авиационно–космическая техника и технология. – 2013. – № 7 (104). – С. 107–111.

РОЗДІЛ 3.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕНЗОМЕТРИЧНОГО ПРИСТРОЮ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ДВИГУНІВ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Цей розділ присвячено практичному застосуванню розробленого тензометричного пристрою. У його основі лежить рівняння стану, що відображає залежність вихідного сигналу від деформації, температури та тривалості навантаження.

Описано процес упровадження ВТП у вимірювальні системи та вимоги до реєстраторів. Ефективність запропонованого алгоритму розрахунку деформації підтверджено випробуваннями на стандартних зразках у температурному діапазоні 200–700 °С.

У цьому розділі обґрунтовано наукову новизну – 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.

3.1 Спосіб приєднання ВТП до вимірювальної системи та вимоги до реєструючих приладів

При вимірюванні НДС застосовуються переважно схеми з одиночним тензорезистором, підключеним за 2х, 3х і 4х провідними схемами.

Для перетворення зміни опору тензорезистора у вихідну напругу зазвичай застосовують міст Вітстона, де одне з плечей утворює тензодатчик, а інші три – компенсаційні резистори вимірювальної системи. Використання двопровідної схеми підключення (рис. 3.1, а) є недоцільним у промислових умовах через температурну похибку: зміна опору дротів сприймається системою як хибна деформація. Відтак, такий метод обмежується лише лабораторними дослідженнями зі стабільним

температурним режимом або динамічними тестами, де температурним дрейфом можна знехтувати.

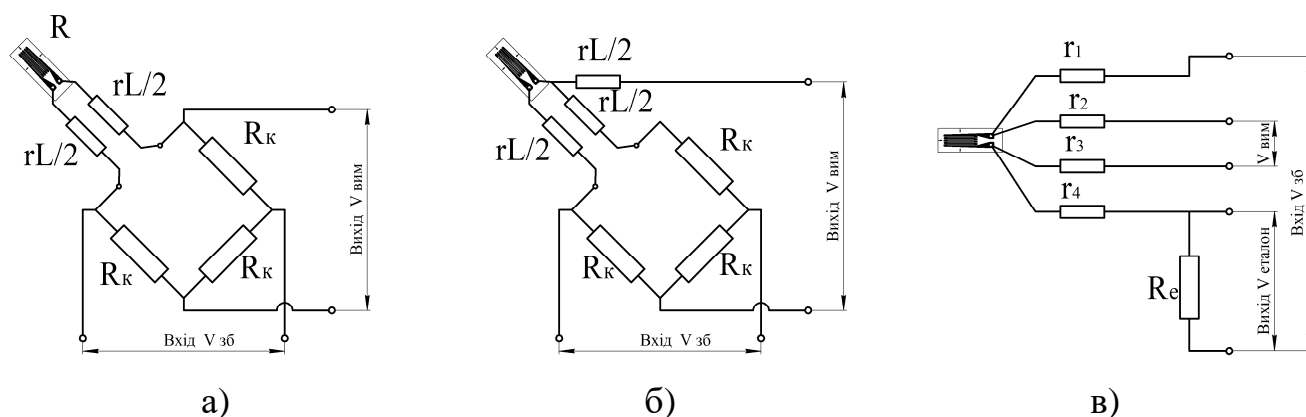


Рис. 3.1 – Схеми підключення тензорезисторів:

а) – чвертьмостова 2х провідна схема, б) – чвертьмостова 3х провідна схема,
в) – 4х провідна потенціометрична схема;

$r_1...r_4$ – опір проводів; R – номінальний опір тензорезистора;

R_k – компенсаційний опір; R_e – еталонний опір; r – сумарний опір дроту на метр довжини; L – довжина дроту; $V_{зб}$ – напруга збудження;

$V_{вим}$ – виміряна напруга

Вплив опору проводів на коефіцієнт тензочутливості 2х провідної схеми враховується формулою (3.1). Чвертьмостова схема з 3х проводовим підключенням (рис. 3.1, б) дозволяє компенсувати температурну зміну опору проводів. Коефіцієнт тензочутливості 3х провідної схеми коригується за формулою (3.2).

$$K'_{2пр} = K \frac{R}{R + rL}. \quad (3.1)$$

$$K'_{3пр} = K \frac{R}{R + \frac{rL}{2}}, \quad (3.2)$$

де R – номінальний опір тензорезистора, Ом;

r – сумарний опір дроту на метр довжини;

L – довжина дроту, м;

K' – скоригований коефіцієнт тензочутливості;

K – паспортний коефіцієнт тензочутливості.

У чотирипровідній схемі вимірювання деформації (рис. 3.1, в) використовується послідовне з'єднання тензорезистора з еталонним опором. Значення деформації розраховується на основі співвідношення падіння напруги на тензорезисторі (V) та еталонному елементі (V_e). Завдяки розділенню ліній живлення та вимірювальних кіл, вплив опору дротів і контактних з'єднань на результат нівелюється. Це забезпечує стабільність коефіцієнта тензочутливості незалежно від довжини та параметрів підключення.

Статичні вимірювання охоплюють повільні процеси – від постійного струму до частоти дискретизації 100 Гц. На таких швидкостях головними факторами впливу стають вихідний опір ліній зв'язку та його коливання через теплове розширення дротів.

Для стабільності результатів зазвичай використовують тензорезистори з вбудованою термокомпенсацією, яка ефективно працює в діапазонах від $-196\dots+10$ °C до $80\dots150$ °C.

Якщо ж температура виходить за межі цих значень, застосовують такі методи корекції: програмна компенсація – вимірювання температури безпосередньо в точці монтажу тензорезистора з подальшим коригуванням сигналу; напівмостова схема – використання пари резисторів, один з яких орієнтований уздовж лінії навантаження, а інший – перпендикулярно, для віднімання температурної похибки; використання «пасивного» тензорезистора: встановлення додаткового датчика, що реагує лише на температурну деформацію, дані з якого віднімаються від показників робочих тензорезисторів.

Під час динамічних випробувань роторів ми маємо справу з високошвидкісними процесами, де частота дискретизації сягає від 100 до 500 000 вибірок на секунду. У такому діапазоні вихідний опір лінії легко нівелюється, а температурні коливання траси настільки повільні порівняно з частотою сигналу, що ними можна знехтувати. Головним викликом тут стають перешкоди та наведення в тензорезисторах і дротах. Через це вимірний сигнал часто виявляється сильно «зашумленим»

– іноді рівень перешкод може бути співмірним із корисним сигналом, що ставить під загрозу цілісність частини отриманих даних.

При виконанні статодинамічних досліджень виникає потреба в компенсації температурних похибок, електромагнітних наводок та шумів тензодатчика.

Наразі дослідження НДС деталей авіаційних газотурбінних двигунів (АГТД) потребують використання великогабаритного стаціонарного обладнання, розміщення якого безпосередньо біля об'єкта випробувань є неможливим. Застосування малогабаритних універсальних мостових тензопідсилювачів дозволяє наблизити вимірювальний вузол до датчика, винісши реєструвальну апаратуру та робоче місце оператора на безпечну відстань.

Водночас технічні обмеження змушують використовувати слаботочні лінії живлення довжиною не менше 2–3 метрів. Це призводить до погіршення якості сигналу через підвищення рівня шуму, виникнення хибних статичних напруг унаслідок температурного розширення провідників (при двопровідній схемі підключення), а також до нестабільності коефіцієнта тензочутливості в дво- та трипровідних схемах вимірювання АГТД.

Робочі лопатки газотурбінних двигунів (ГТД) функціонують у вкрай агресивних середовищах: під впливом високошвидкісних потоків (до 600 м/с) та температурних режимів 1300 – 1500 °С, що зумовлює інтенсивну ерозію та значні механічні навантаження. Окрім термічного впливу, критичним фактором є відцентрові сили, що виникають під час обертання ротора. Зокрема, в сучасних малорозмірних ГТД частота обертання турбокомпресора може перевищувати 57 000 об/хв, що створює граничні напруження розтягу в лопатках.

Для верифікації вібронапруженого стану цих вузлів застосовують високотемпературні дротяні або плівкові тензорезистори. Процес вимірювання напружень на рухомих деталях потребує інтеграції спеціалізованих систем струмознімачів для передачі сигналу з ротора на вимірювальну апаратуру.

3.2 Методика застосування ВТП для дослідження термонапруженого стану елементів конструкцій

3.2.1 Попередній розрахунок досліджуваної конструкції МСЕ з метою визначення напрямку головного вектора силового впливу

Метод скінченних елементів (МСЕ) є фундаментальним інструментом прогнозування поведінки складних конструкцій, коли традиційні аналітичні підходи часто є недостатньо ефективними через геометричну складність об'єктів. Застосування систем автоматизованого інженерного аналізу (CAE), зокрема програмного комплексу ANSYS, дозволяє моделювати НДС і обґрунтовано оптимізувати проектні рішення.

Ключовим завданням дослідження є визначення вектора сумарного силового впливу на вузли кріплення. Це дозволяє нівелювати невизначеність експлуатаційних навантажень, раціонально розмістити елементи жорсткості та мінімізувати матеріаломісткість за умови забезпечення конструктивної надійності. Аналіз головного вектора силового впливу – суми всіх реактивних сил, що виникають у вузлах під дією зовнішніх факторів – є обов'язковим етапом верифікації конструкторських рішень.

Процес моделювання реалізовано за таким алгоритмом: створення 3D-моделі з подальшою ідеалізацією (виключенням другорядних конструктивних елементів, які не впливають на загальний рівень напружень), генерація сітки тетраедральних скінченних елементів другого порядку (10 вузлів), що забезпечує високу точність розрахунків у зонах концентрації напружень, задання лінійних пружних характеристик матеріалу та прикладення робочих навантажень, обчислення результуючого вектора сил, ідентифікація гранично навантажених вузлів та оцінка працездатності конструкції.

Такий підхід дозволяє перевести процес проектування з ітеративного виправлення помилок на етапі експлуатації до превентивної оптимізації на стадії розробки.

3.2.2 Алгоритм розрахунку відносної деформації досліджуваного елемента конструкції з використанням показань електричних опорів нижнього (головного) та верхнього (поперечного) ЧЕ

Принцип роботи розробленого тензометричного пристрою базується на застосуванні рівняння стану, що пов'язує вихідний сигнал із фізичними параметрами. Оскільки опір тензорезистора є функцією деформації, температури та тривалості їхньої дії, для аналізу ми використовуємо значення електричного опору нижнього та верхнього чутливих елементів (ЧЕ), що визначаються формулами

$$R_H = R_0(1 + \alpha_L \cdot \Delta T \cdot K + \varepsilon_x \cdot K)(1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (3.3)$$

$$R_B = R_0(1 + \alpha_L \cdot \Delta T \cdot K + \varepsilon_y \cdot K)(1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (3.4)$$

де ΔT – зміна температури деталі (градієнт);

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

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;

α – температурний коефіцієнт електричного опору матеріалу чутливих елементів;

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

μ – коефіцієнт Пуансона матеріалу деталі.

При одновісному навантаженні експериментальне значення відносної деформації визначається різницею $R_H - R_B$ з урахуванням нехтування малозначущими складовими, що приводить до формули

$$\varepsilon = \frac{\frac{R_H - R_B}{R_0}}{K(1 + \alpha \cdot \Delta T) \cdot (1 + \mu)}. \quad (3.5)$$

Цю процедуру слід трактувати як температурну компенсацію зростання електричного опору чутливих елементів (ЧЕ) внаслідок їх нагрівання.

Для двовісного навантаження температурна корекція відносної деформації реалізується шляхом введення значень ΔT (отриманих із зовнішніх термодатчиків) у формули (3.3–3.4), що дозволяє вивести підсумкову залежність

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta R}{R_0} - \Delta T \cdot (\alpha + \alpha_L \cdot K)}{K(1 + \alpha \cdot \Delta T)}. \quad (3.6)$$

Температура тензометричного пристрою розраховується формулою

$$\Delta T = \frac{\frac{R_H + R_B}{R_0} - 2}{2 \cdot (\alpha + (\alpha_{Lд} - \alpha_{Lтр}) \cdot K)}. \quad (3.7)$$

Використовувана вимірювальна система забезпечує виконання обчислень над отриманими даними згідно із заданою математичною моделлю та додатковими вхідними параметрами.

3.3 Приклад застосування методу, що розглядається при оцінці деформації стандартного зразка в діапазоні температур 200-700 °С

Об'єктом дослідження виступає високотемпературний перетворювач (ВТП) (рис. 2.9, розд. 2.2), чутливий елемент (ЧЕ) якого виконано з ніхромового дроту (сплав Х20Н80) діаметром 30 мкм. Конструктивні параметри ЧЕ характеризуються базою 5 мм і номінальним електричним опором 63 Ом при температурі 20 °С. Для забезпечення стабільної фіксації ЧЕ на досліджуваній поверхні застосовано спеціалізований високотемпературний цемент марки ВКП-26Ц, що виконує функції ізолятора та сполучного матеріалу.

Метою експериментальних досліджень було визначення силової характеристики тензометричного пристрою шляхом аналізу динаміки зміни опору верхнього та нижнього ЧЕ. Дослідження охоплювало оцінку впливу таких факторів на похибку вимірювань, як статична деформація, термічне розширення системи «деталь–

тензометр», ефект шунтування ізоляційного шару, а також температурна нестабільність питомого опору матеріалу ЧЕ.

Для проведення випробувань тензометри були змонтовані на стандартних зразках для випробувань на розтяг. Зразки виготовлено зі сталі марки 30ХГСА; вони мають діаметр 10 мм, що відповідає площі поперечного перерізу 78,54 мм² (див. рис. 3.2). Коефіцієнт тензочутливості матеріалу ЧЕ, використаний при розрахунках, становить 1,87.



Рис. 3.2 - Препарований тензометром циліндричний, стандартний зразок діаметром 10 мм для випробувань на розтяг

Для мінімізації впливу опору з'єднувальних ліній на результати вимірювань, кожен чутливий елемент (ЧЕ) тензометра був приєднаний до реєстраційної апаратури за чотирипровідною (потенціометричною) схемою. Даний метод застосовувався безпосередньо в режимі вимірювання електричного опору.

Експериментальні дослідження проводилися на зразках із попередньо встановленими тензометрами з використанням випробувальної машини РМ-100 (рис. 3.3), налаштованої на режим статичного розтягу. Процедура випробувань передбачала послідовне нагрівання зразків до цільових температурних рівнів (20, 200 і 600 °С) із подальшою витримкою при кожній температурі для термічної стабілізації. Після стабілізації зразки піддавалися циклічному навантаженню. Навантаження здійснювалося ступінчасто — зусиллями 400, 800, 1200 і 1600 кгс, причому кожен ступінь повторювався тричі. Відносна деформація та модуль пружності зразка за заданої температури дослідження наведено в таблиці 3.1. Зазначені рівні навантаження відповідають механічним напруженням у зразку, що становлять 5, 10, 15 і 20 кгс/мм² відповідно.



Рис. 3.3 – Випробувальна машина РМ–100 для досліджень на розтягстик із встановленою пічкою

Таблиця 3.1 – Показники відносної деформації та модуля пружності зразка за визначеної температури дослідження

Температура дослідження, °С	Модуль пружності, МПа	Відносна деформація, мкм/м при навантаженні, кгс			
		400	800	1200	1600
20	2,15·10 ⁵	240	480	718	950
200	2,03·10 ⁵	255	510	760	1012
600	1,64·10 ⁵	318	632	942	1253

Для реєстрації змін електричного опору верхнього та нижнього чутливих елементів (ЧЕ) тензометричних пристроїв застосовувалася вимірювальна система НВМ SomatXR MX1615В-Р. Моніторинг температури забезпечувався термопарою типу L (хромель-копель) у поєднанні з вимірювальним модулем НВМ SomatXR MX840В-Р. Збір, запис та подальша обробка отриманих сигналів здійснювалися за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення catman®АР версії 5.5.

Під час випробування вівся постійний запис опору ЧЕ.

З отриманих даних за формулою (3.5) розраховувалася відносна деформація зразка.

Результати розрахункових та експериментальних дослідження відносної деформації тензометричного датчика залежно від навантаження наведено на рисунку 3.4 та в таблиці 3.2.

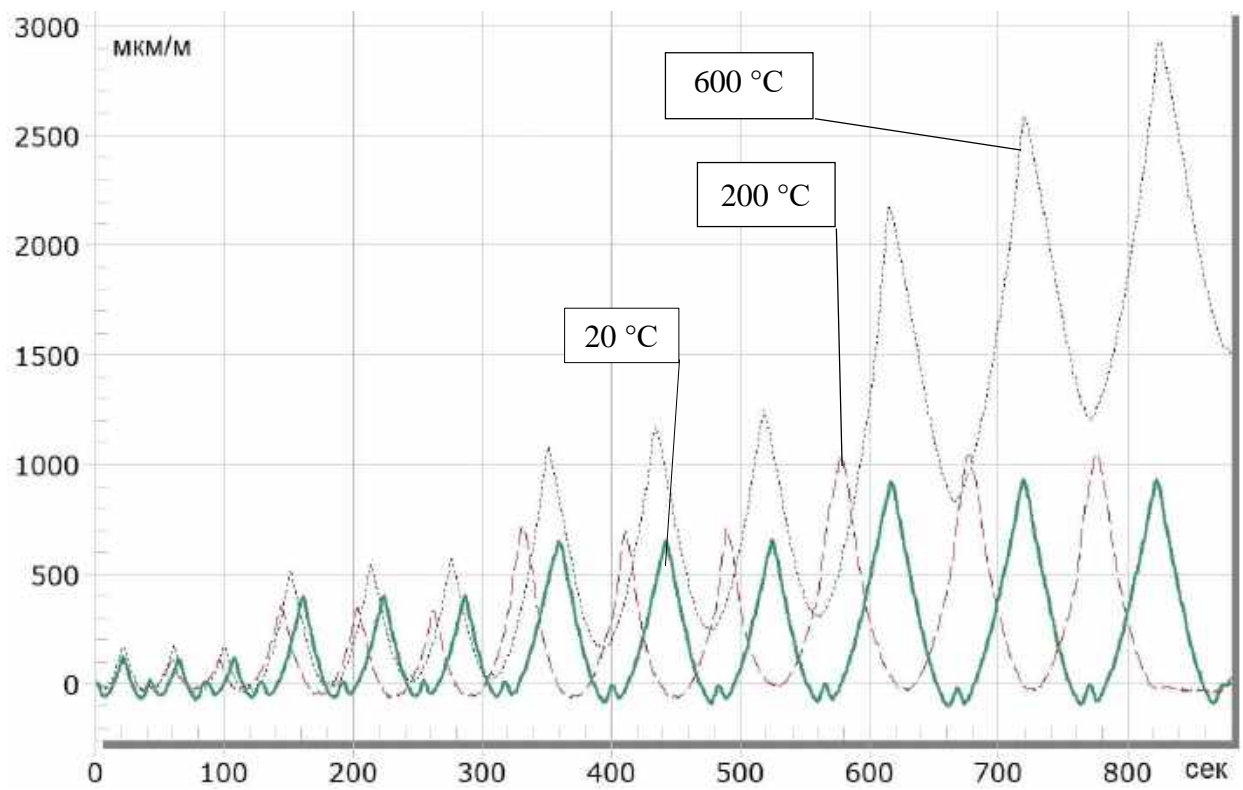


Рис. 3.4 – Виміряна відносна деформація тензометричного датчика (тензометра) при температурах 20, 200, 600 °C (ϵ , е.о.д. $\times 10^6$)

Таблиця 3.2 – Результати розрахункових і експериментальних досліджень відносної деформації

Температура дослідження, °C	Відносна деформація (мкм/м): розрахункові та експериментальні дані при навантаженні (кгс)							
	400		800		1200		1600	
20	240	235	480	510	718	750	950	990
200	255	215	510	550	760	790	1012	1050
600	318	310	632	660	942	1050*	1253	2200*

За аналізом результатів вимірювань, була зафіксована пластична деформація * зразка при дослідженні з температурою 600 °C.

Запропонований метод вимірювання та розрахунку відносних деформацій продемонстрував високу узгодженість із теоретичними даними та забезпечив майже повну компенсацію адитивної похибки, зумовленої термічними чинниками.

Згідно з формулами (3.3, 3.4), на виникнення уявної температурної деформації ВТП впливає мінімальна розбіжність вихідних параметрів двох чутливих елементів (ЧЕ) тензومتра (див. рис. 2.9, розд. 2.2). Попри ідентичні умови експлуатації, ці елементи різняться за початковим опором, коефіцієнтом тензочутливості та просторовою конфігурацією витків. Оптимізація показників уявної температурної деформації тензومتра-розетки досягається шляхом ретельного підбору відповідних чутливих елементів.

3.4 Обговорення результатів

У представленому матеріалі розглядаються сучасні підходи до проектування тензOMETричних систем та їх оптимізації через використання методів комп'ютерного моделювання. Ключовим вузлом вимірювальних систем є міст Вітстона, причому ефективність його роботи безпосередньо залежить від обраної схеми підключення. Автор наголошує, що для мінімізації похибок, спричинених опором дротів, доцільно використовувати три- або чотиріпровідні схеми, тоді як двопровідна схема є прийнятною лише для обмежених лабораторних умов.

Окрему увагу приділено питанню температурної стабільності вимірювань. Для забезпечення точності показників у складних експлуатаційних умовах запропоновано комплексний підхід, що включає застосування термокомпенсованих датчиків, інтеграцію «пасивних» тензорезисторів, використання напівмостових конфігурацій і впровадження методів програмної корекції. Запропонована автором система автоматизації обробки сигналів від двох чутливих елементів дозволяє вираховувати деформації з урахуванням термічних впливів: при одновісному навантаженні шляхом диференціального аналізу опорів, а при двовісному — через інтеграцію даних із зовнішніх температурних сенсорів у розрахункові алгоритми реального часу.

Для інженерно-проектного аналізу точки зору, важливим етапом створення надійних конструкцій є застосування МСЕ в середовищі ANSYS. Цей інструментарій дозволяє перейти від традиційного методу «спроб і помилок» до превентивної інженерної оптимізації. Алгоритм реалізації передбачає створення 3D-моделі з

використанням тетраедральних елементів другого порядку для аналізу критичних зон конструкції. Визначення вектора силового впливу на вузли кріплення дає змогу оптимізувати матеріаломісткість виробу, не знижуючи при цьому показників його конструктивної надійності та довговічності.

Отже, поєднання високоточних тензометричних схем (наприклад НВМ SomatXR MX1615B-R) з інтелектуальними методами температурної компенсації та чисельним моделюванням (МСЕ) формує ефективний методологічний комплекс. Це дозволяє розробникам отримувати достовірні дані про напружено-деформований стан об'єктів у режимі реального часу, забезпечуючи високу точність проектних рішень ще на етапі конструкторської розробки.

Результати, викладені в третьому розділі роботи, опубліковано в роботах автора [література до вступу 1, 4, 7].

Література до третього розділу

1. Зенкевич, О. Метод скінченних елементів у техніці / О. Зенкевич. – К.: Вища школа, 1975. – 542 с.
2. Zienkiewicz, O. C. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu // 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. - 2013. – 756 p.
3. ANSYS, Inc. ANSYS Mechanical User's Guide (Release 2022 R1). Canonsburg, PA. – 2022. - 2800 p.
4. Madenci E. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS / E. Madenci, I. Guven. – Springer, 2015. – 657 p.
5. The Finite Element Method for Engineers / K. H. Huebner, D. L. Dewhirst, D. E. Smith, T. G. Byrom // Wiley-Interscience. – 2001. – 720 p.
6. Sharpe, W. N. Jr. Handbook of Experimental Solid Mechanics / W. N. Jr. Sharpe // Springer. – 2008. – 1095 p.
7. Hetnarski, R. B. Thermal Stresses: Advanced Theory and Applications / R. B. Hetnarski, M. R. Eslami // Dordrecht: Springer. - 2009. – 562 p.

8. Bathe, K. J. *Finite Element Procedures* / K. J. Bathe // Watertown, MA: Klaus-Jürgen Bathe. – 2016. – 1043 p.
9. *Simulation Study on the Strain Transfer Process of High Temperature Thin Film Strain Gauges* / C. Y. Chen, S. W. Zhou, Z. Z. Zhou, S. W. Jiang // *Aeronaut. Sci. Technol.* – 2024. – Vol. 35. – P. 76–83.
10. Mouritz, A. P. *Introduction to Aerospace Materials* / A. P. Mouritz // Woodhead Publishing, Sawston, Cambridge, UK. – 2012. - P. 251. doi: 10.1533/9780857095152.
11. *Development and application of high-temperature sensors and electronics for propulsion applications* / G. W. Hunter, J. D. Wrbanek, R. S. Okojie [et al.] // *Sensors for Propulsion Measurement Applications. Proc. of SPIE.* - 2006. - Vol. 6222. – P. 622209-1-622209-12. doi:10.1117/12.668458
12. Wu, T. T. *Development of temperature-compensated resistance strain gages for use to 700 °C* / T. T. Wu, L. C. Ma, L. B. Zhao // *Experimental Mechanics* March. – 1981. – №. 21. – P. 117–123. doi: 10.1007/BF02326368
13. Holmes, H. K. *High temperature strain gage apparent strain compensation* / H. K. Holmes, T. C. Moore // *The 1992 NASA Langley Measurement Technology Conference: Measurement Technology for Aerospace Applications in High-Temperature Environments.* – №. N93-13672. – P. 211-222.
14. *Strain Gage thermal output and gage factor Variation with temperature.* Technical Note, TN-504-1. Measurement Group, Inc., P.O. Box 27777, Raleigh, North Carolina 27611. – 2014. – P. 1-13.
15. Bertodo, R. *Development of High-Temperature Strain Gauges* / R. Bertodo // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.* – 1959. – № 173-1. – P. 605–622. doi: 10.1243/pime_proc_1959_173_052_02
17. *Plastic deformation and ductile fracture of L907A ship steel at increasing strain rate and temperature* / X. Li, R. Yu, P. Wang [et al.] // *International Journal of Impact Engineering.* – 2023. – Vol. 174. – P. 104515. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104515>.

РОЗДІЛ 4.

АНАЛІЗ ПОХИБОК І ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНІВ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Надійність сучасних енергетичних установок значною мірою залежить від точності оцінки їхнього залишкового ресурсу, що визначається циклічними та статичними деформаціями вузлів. Проте екстремальні умови експлуатації (високі температури, вібрації, електромагнітні завади) суттєво ускладнюють процес вимірювання деформацій.

У цьому розділі 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.

Наукова новизна – вдосконалено методи аналізу похибок тензометричних систем при вимірюванні статичних деформацій високотемпературних елементів. Розроблена математична модель формування сигналу з урахуванням ефекту шунтування дозволяє ефективно проводити випробування при підвищених робочих температурах.

4.1 Методичні похибки ВТП

Точність тензометричних вимірювань за умов високих температур обмежується комплексом фізико-хімічних процесів, що відбуваються в структурі датчика. Класифікація відповідних похибок ґрунтується на їхній фізичній природі; основними чинниками дестабілізації є ефект уявної деформації, температурна залежність коефіцієнта тензочутливості та деградація матеріале ЧЕ. Систематизація цих чинників за фізичною природою походження є критично важливою для забезпечення достовірності даних. Основними дестабілізуючими чинниками є:

1. Температурна уявна деформація

Найбільш вагомим джерелом похибок, що складно піддається компенсації, є температурна уявна деформація. Її поява зумовлена двома ключовими факторами:

Диференціальне термічне розширення: Невідповідність коефіцієнтів термічного розширення (КТР) матеріалу резистивної решітки та об'єкта дослідження спричиняє механічне розтягування або стискання сенсора навіть за відсутності зовнішнього навантаження.

Термозалежність опору: Зміна питомого електричного опору сплаву решітки безпосередньо корелює зі зміною температури, що інтерпретується вимірювальною системою як корисний сигнал.

Сумарний вплив цих чинників часто призводить до того, що уявна деформація за своєю амплітудою значно перевищує реальні механічні деформації, особливо в умовах інтенсивних теплових циклів.

2. Термозалежність коефіцієнта тензочутливості (К)

Коефіцієнт К не є константою і змінюється під впливом температури. Це пояснюється трансформацією фізико-механічних властивостей матеріалу решітки, зокрема модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона та тензорезистивних характеристик. Хоча виробники надають довідкові графіки температурної залежності К, реальні показники окремих партій датчиків можуть суттєво відрізнитися залежно від умов монтажу та експлуатації. Ігнорування варіативності коефіцієнта тензочутливості стає причиною накопичення системних похибок у результатах вимірювань.

3. Термічна деградація компонентів датчика

Тривалий вплив високих температур ініціює незворотні зміни в структурі всіх елементів тензорезистора:

Адгезивні матеріали: Органічні клеї (зокрема епоксидні сполуки) втрачають механічну міцність і діелектричні властивості вже при температурах понад 200 - 300 °С. Керамічні цементи, хоч і є більш термостійкими, стають крихкими та гігроскопічними, що загрожує частковою втратою зчеплення з поверхнею.

Резистивна решітка: Процеси окислення, рекристалізації та сегрегації елементів сплаву змінюють хімічний склад провідника, що призводить до нестабільності сигналу та дрейфу «нуля».

Підкладка: В умовах термічного циклування матеріал підкладки піддається розтріскуванню, що негативно впливає на передачу деформації від об'єкта до решітки.

4. Часозалежна деформація та деградація матеріалів (повзучість і старіння)

Під дією термомеханічних навантажень компоненти вимірювальної системи – об'єкт дослідження, адгезив та ЧЕ – піддаються явищам повзучості. Ця повільна пластична деформація призводить до зміни геометрії датчика та послаблення його зчеплення з поверхнею, що ініціює дрейф вимірюваного опору. Паралельно з цим процеси фізико-хімічного старіння матеріалів зумовлюють незворотні зміни опору навіть за незмінної температури та відсутності механічних зусиль.

5. Окислювальні та структурні процеси в екстремальних умовах (>700 °C)

У діапазоні температур понад 700 °C критичним фактором стає зменшення площі поперечного перерізу дроту внаслідок окислення та внутрішніх фазових перетворень. Такі деструктивні зміни викликають монотонне зростання опору, яке за своїми характеристиками важко диференціювати від корисного сигналу статичної деформації.

6. Електрофізичні переешкоди та паразитні сигнали

Температурна залежність опору сполучних ліній, якщо вона не компенсована схемно, вносить значну адитивну похибку. Крім того, температурний градієнт на стиках різнорідних провідників стає джерелом термоелектрорушійної сили (ефект Зеєбека), що генерує небажаний потенціал у вимірювальному ланцюзі. Зростання інтенсивності теплового руху електронів додатково підвищує рівень фонового шуму, знижуючи співвідношення сигнал/шум при реєстрації малих деформацій.

7. Деградація ізоляції та ефект шунтування

Екстремальний нагрів провокує термічну активацію атомів та іонів, що різко знижує опір ізоляції підкладки та адгезиву. Як наслідок, виникають струми витоку, що шунтують резистивну решітку. Для мінімізації цього ефекту в роботі [8] запропоновано конструкційне рішення: введення в шар сполучного спеціального екрана, конфігурація якого ідентична ЧЕ. Включення такого екрана в мостову схему дозволяє значно знизити похибку шунтування, що підтверджено експериментальними даними для плівкових тензорезисторів на емалевій ізоляції.

8. Адгезійна стійкість та динаміка передачі навантаження

Ефективність передачі деформації від об'єкта до ЧЕ безпосередньо залежить від в'язкопружних властивостей адгезиву. Недотримання технології підготовки поверхні, нерівномірність клейового шару або порушення режиму полімеризації спричиняють нелінійність вихідного сигналу та гістерезис. У динамічних режимах ситуація ускладнюється залежністю властивостей високотемпературних матеріалів від швидкості деформації, що вимагає специфічної інтерпретації результатів.

9. Електрохімічний вплив середовища

У присутності вологи або хімічно активних реагентів високі температури ініціюють електрохімічні реакції на поверхнях датчика. Це створює додаткові дрейфові струми, що суттєво викривлюють результати довготривалих спостережень.

Комплексна дія цих факторів проявляється в формі гістерезису, дрейфу сигналу та істотного зниження ресурсу роботи датчика, аж до його повного виходу з ладу.

4.2 Вплив шунтування через сполучне на результати вимірювання деформації досліджуваної деталі

Для вимірювання механічних напружень і деформацій у критичних вузлах енергетичних турбін, авіаційних двигунів і аерокосмічних конструкцій застосовуються високотемпературні тензорезистори, розраховані на роботу в діапазоні температур від 500 °С до 1100 °С. Однак експлуатація таких сенсорів у

високотемпературному середовищі стикається з фундаментальною технічною перешкодою – ефектом шунтування ЧЕ.

При температурах понад 400 °С діелектричні властивості ізоляційних матеріалів і керамічних клейових композицій суттєво деградують. Це призводить до експоненціального падіння опору ізоляції $R_{із}$: з гігаомних значень у нормальних умовах він знижується до величин, порівнянних з опором самого тензорезистора R_T . У результаті виникає паралельний струмопровідний шлях між чутливим елементом і металевою підкладкою, що спричиняє розвиток критичних похибок вимірювання.

Фізико-технічними наслідками цього явища стають дрейф «нуля» та значне спотворення вихідного сигналу, зокрема, зниження ефективного коефіцієнта тензочутливості. Шунтування особливо критично для тензометрів із опором 200–400 Ом, які, незважаючи на високий рівень корисного сигналу, стають вкрай чутливими до такого впливу.

Розуміння механізмів виникнення цих похибок є критичним для забезпечення достовірності даних у високотемпературній тензометрії. Проблема шунтування залишається одним із ключових бар'єрів на шляху до підвищення точності. Обґрунтовано електричну та математичну модель виникнення похибок, спричинених паразитними струмами витоку, та виведено аналітичні залежності для розрахунку відповідних корекційних коефіцієнтів.

4.2.1 Математична модель шунтування ВТП

Активний опір тензорезистора залежить від температури та деформації:

$$R_T = R_{T0}(1 + \alpha \cdot \Delta T)(1 + K \cdot \varepsilon),$$

де α – ТКО (температурний коефіцієнт опору),

K – коефіцієнт тензочутливості.

Високотемпературні тензорезистори зазвичай монтуються на металеву поверхню за допомогою керамічних клеїв або напилення оксидів металів (Al_2O_3 , MgO). При високих температурах в діелектрику активізуються механізми іонної провідності та перескокової провідності електронів.

Опір ізоляції R_{i3} описується експоненціальною залежністю

$$R_{i3}(T) = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right),$$

де E_a – енергія активації провідності діелектрика,
 k – константа Больцмана,
 T – абсолютна температура.

Оскільки опір ізоляції включений паралельно до тензорезистора, він створює шунтуючий шлях для вимірювального струму. Реєструвальною апаратурою таке зменшення опору сприймається як уявна деформація, яка при визначенні напруженого стану деталі може становити значну величину.

Для малорозмірних тензометрів, що широко застосовуються нині, через близьке розташування смуг ЧЕ існує також струм шунтування зі смуги в смугу.

Припустимо, що тензорезистор із номінальним опором R_T встановлено на провідну підкладку. При високих температурах паралельно до тензорезистора виникає шлях проходження струму через опір ізоляції R_{i3} , який є функцією температури T .

Еквівалентний опір тензорезистора, $R_{екв}$ визначається за законом паралельного з'єднання:

$$R_{екв} = \frac{R_T \cdot R_{i3}}{R_T + R_{i3}},$$

де R_T – номінальний опір тензорезистора,
 R_{i3} – інтегральний опір шунтування (сума опорів шунтування між виводами тензорезистора та "землею" у вимірювальній схемі).

4.2.2 Електрична модель шунтування ВТП

Розглянемо еквівалентну електричну схему ВТП, що складається з двох тензорезисторів із мостовою або потенціометричною схемою реєстрації сигналу, встановленого на струмопровідну підкладку.

Нижній ЧЕ тензометричного датчика розташований в ізоляторі- сполучному на відстані h_2 від тіла деталі, верхній ЧЕ, розташований над нижнім, шар сполучного між чутливими елементами становить h_1 (див. рис. 4.1).

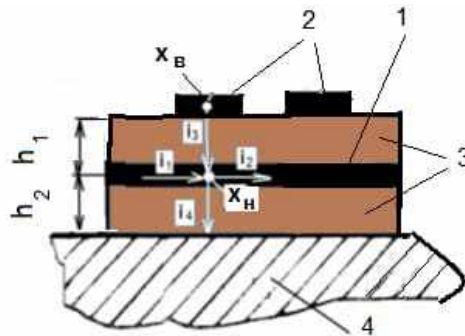


Рис. 4.1 – Структурна схема тензометричного датчика:

1 – нижній ЧЕ; 2 – верхній ЧЕ; 3 – ізолятор-сполучне; 4 – тіло деталі

Значення опору двополюсного тензометра з урахуванням двомірного шунтування визначається за формулою

$$r'_4 = r \left(1 - \frac{r}{4R_y} - \frac{r}{12R_z} \right), \quad (4.1)$$

де r – повний опір ЧЕ тензометрів без шунтування;

R_y, R_z - електричний опір ізолятора - сполучного в напрямку ЧЕ – тіло деталі та між двома смугами ЧЕ.

Розв'язання задачі шунтування в двошаровому тензометричному датчику полягає у визначенні струмів витоку від нижнього ЧЕ на тіло деталі та від верхнього до нижнього ЧЕ. Шунтування всередині ЧЕ (від смуги до смуги) не розглядалося в зв'язку з великою відстанню між ними.

Для отримання кількісних співвідношень елементів конструкції пропонованого тензометричного датчика приймаємо $h_1 \neq h_2$.

Розглянемо струми в довільній точці нижнього ЧЕ тензометричного датчика (рис. 4.1). Нехай вимірювальний струм, що протікає через резистор 1, створює в точці X_n потенціал V_n , а в розташованій над нею точці X_v верхнього ЧЕ – потенціал V_v (потенціал деталі 4 при цьому прийнятий за нуль: $V_T = 0$). Струми в тензометрі

через точку x позначено на рис. 1 як i_1, i_2, i_3, i_4 . Якщо ізолятор ідеальний, тобто струми витоку в сполучному 3 відсутні ($i_3 = i_4 = 0$), то для струму в нижньому ЧЕ справедлива умова $i_1 = i_2$. У реальних умовах через існування струмів витоку i_3 та i_4 закон збереження струмів у точці x_n набуває вигляду $i_1 = i_2 - i_3 + i_4$. З цього виразу випливає, що якщо струми витоку компенсують один одного ($i_3 = i_4$), то струм у нижньому ЧЕ зберігається таким же, як у випадку ідеальної ізоляції. Для виникнення струму i_3 , що компенсує струм витоку i_4 , необхідно створити між точками x_n та x_b різницю потенціалів, яка б викликала такий самий струм, як струм, створюваний різницею потенціалів точки нижнього ЧЕ x_n і тіла деталі. Виразивши струми витоку через відповідні їх потенціали та опори ділянок сполучного R_1 та R_2 , отримаємо, що для компенсації (рівності) цих струмів необхідно виконати умову

$$(V_b - V_n)/R_1 = V_n/R_2, \quad (4.2)$$

де R_1 та R_2 - опори в шарах 1 і 2 сполучного.

З виразу (4.2) випливає, що необхідний потенціал точки екрану можна визначити так:

$$V_b = V_n(\rho_1 h_1 / \rho_2 h_2 + 1). \quad (4.3)$$

Якщо шари сполучного 1 і 2 виконано з одного матеріалу (питомі електричні опори ρ_1 і ρ_2 рівні), то відношення опорів замінюємо відношенням їх товщин:

$$V_b = V_n \rho (h_1 / h_2 + 1), \quad (4.4)$$

де h_1 і h_2 – товщини першого та другого шарів сполучного, рахуючи від поверхні деталі.

Для виконання зазначеної умови (4.3) та проведення вимірювань тензометр включається до потенціометричної схеми вимірювання деформацій (рис. 4.2) Якщо заземлити кінці нижнього та верхнього ЧЕ на деталь, то їх потенціали в точці Д будуть рівними між собою та дорівнюватимуть нулю. У той же час опір нижнього ЧЕ 1 визначається за величиною струму, що протікає через нього, амперметром 4, а

викликане цим струмом падіння напруги – вольтметром 5, що дозволяє забезпечити необхідну величину різниці потенціалів резисторів 1 і 2 (див. рис. 4.2).

Завдання дослідження полягає у визначенні струмів витoku i_3 та i_4 (шунтування ЧЕ) у тензометричному датчику, оскільки саме ці струми змінюють опори ЧЕ, що сприймається вимірювальною системою як уявна деформація. Необхідно запропонувати метод розрахунку похибки вимірювання статичної деформації, пов'язаної з шунтуванням його ЧЕ.

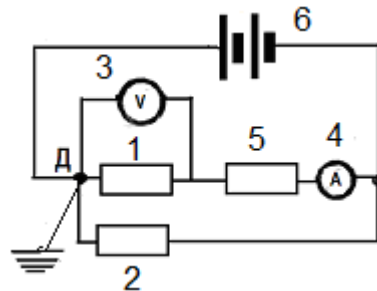


Рис. 4.2 – Потенціометрична схема включення тензорезистора:

1 – нижній ЧЕ; 2 – верхній ЧЕ; 3 – мілівольтметр; 4 – амперметр;

5 – регулюючі опори; 6 – джерело напруги;

Розв'язання поставленої задачі

З метою оцінки похибок, що виникають при вимірюванні статичних деформацій від шунтування ЧЕ необхідно досліджувати електричну модель двохшарового тензометричного датчика, представлену на рис. 4.3.

У моделі: $\varphi_1(0) = V$, $\varphi_1(L_1) = \varphi_d$ – потенціали в точках В і Д нижнього ЧЕ тензометричного датчика, а $\varphi_2(0) = kV$, $\varphi_2(L_2) = \varphi_d$ – потенціали в точках А і Д верхньої решітки тензометра; довжина нижнього та верхнього ЧЕ тензометра L_1 , L_2 – відповідно; I_1 – величина струму у точці У, а I_2 – величина струму у точці А.

Передбачається, що шунтування в тензометричному датчику здійснюється через вузли решітки ЧЕ, що взаємно розташовані по висоті шару ізолятора-сполучного.

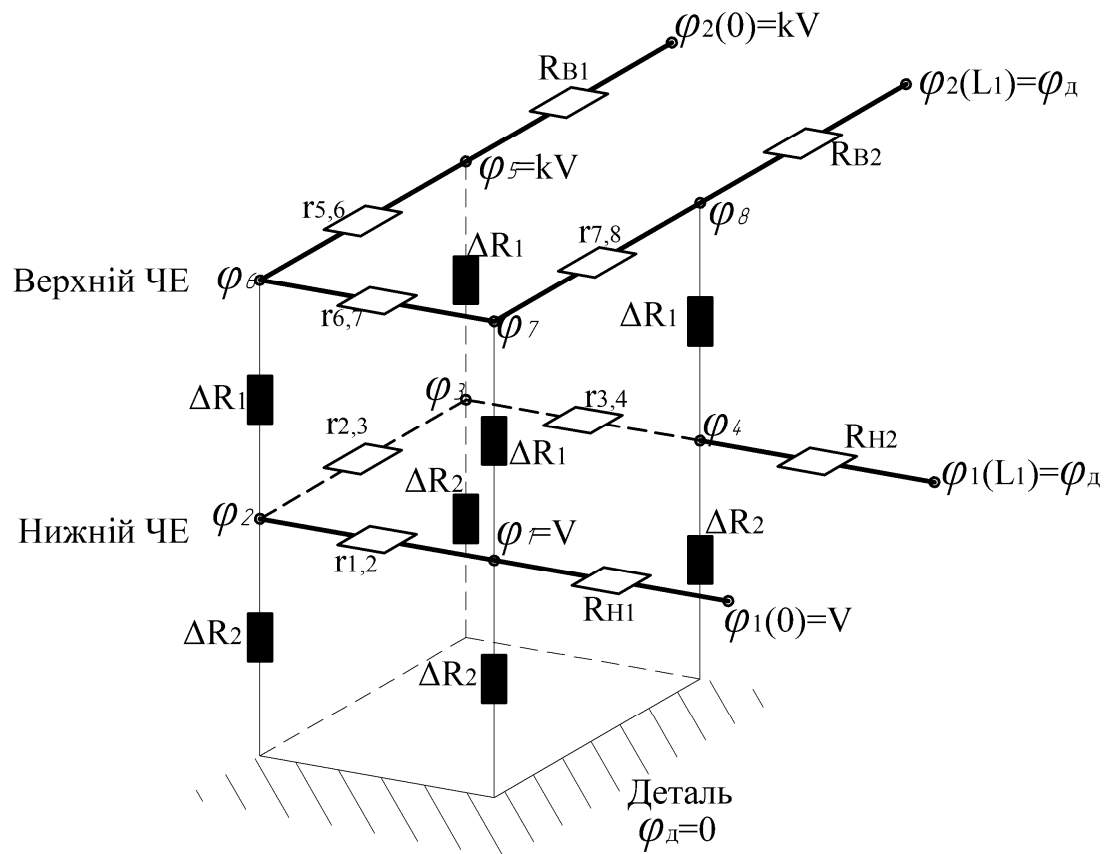


Рис. 4.3 – Електрична модель розподілу потенціалів у тензометричному датчику

Таких вузлів шунтування в однопетльовій конструкції тензометричного датчика – вісім. Чотири вузли нижнього ЧЕ, у яких струми шунтування направлені від нього до тіла деталі через ізолятор з опором ΔR_2 . У чотирьох вузлах верхнього ЧЕ струми витоку спрямовані в бік нижнього через ізолятор з опором ΔR_1 (рис. 3).

Щоб встановити величини струмів i_1 та i_2 , скористаємося законом Кірхгофа та запишемо скінченно-різнісні рівняння суми струмів в усіх вузлах електричної моделі (див. рис. 4.3):

у вузлах нижньої решітки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V - \varphi_1}{R_{H1}} + \frac{\varphi_7 - \varphi_1}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_1 - \varphi_T}{\Delta R_2} - \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r_{1,2}} = 0; \\ \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r_{1,2}} + \frac{\varphi_6 - \varphi_2}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_2 - \varphi_T}{\Delta R_2} - \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{r_{2,3}} = 0; \\ \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{r_{2,3}} + \frac{\varphi_5 - \varphi_3}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_3 - \varphi_T}{\Delta R_2} - \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{r_{3,4}} = 0; \\ \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{r_{3,4}} + \frac{\varphi_8 - \varphi_4}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_4 - \varphi_T}{\Delta R_2} - \frac{\varphi_4 - \varphi_d}{R_{H2}} = 0, \end{array} \right. \quad (4.5)$$

у вузлах верхньої решітки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k \cdot V - \varphi_5}{R_{B_1}} - \frac{\varphi_5 - \varphi_3}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_5 - \varphi_6}{r_{5,6}} = 0; \\ \frac{\varphi_5 - \varphi_6}{r_{5,6}} - \frac{\varphi_6 - \varphi_2}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_6 - \varphi_7}{r_{6,7}} = 0; \\ \frac{\varphi_6 - \varphi_7}{r_{6,7}} - \frac{\varphi_7 - \varphi_1}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_7 - \varphi_8}{r_{7,8}} = 0; \\ \frac{\varphi_7 - \varphi_8}{r_{7,8}} + \frac{\varphi_8 - \varphi_4}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_8 - \varphi_D}{R_{B_2}} = 0, \end{array} \right. \quad (4.6)$$

де φ_j – потенціал у вузлі j решітки тензометра;

$r_{i,j}$ – опір ділянки решітки тензометра між вузлами i і j , довжиною $l_{i,j}$;

ΔR_1 і ΔR_2 – опори ділянок ізолятора–зв’язуючого у напрямках від верхнього

ЧЕ до нижнього та від нижнього до тіла відповідно;

$\varphi_D = 0$ – потенціал у вузлі Д решіток тензометра;

$\varphi_T = 0$ – потенціал тіла.

Надалі для спрощення висновку будемо припускати, що нижня решітка розташована посередині шару ізолятора-сполучного:

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = 0,5 \cdot R_{i3},$$

де R_{i3} – опір ізолятора-сполучного тензометра у напрямі верхні грати – тіло. Опір та довжини обох решіток однакові:

$$r_1 = r_2 = r; \quad L_1 = L_2 = L; \quad r_{i,j} = r \cdot \frac{l_{i,j}}{L} = \frac{1}{3} \cdot r.$$

Потенціал у точці Д $\varphi_D = \varphi_T$, а потенціал тіла дорівнює нулю ($\varphi_T = 0$).

Тоді рівняння (4.5) і (4.6) можна перетворити на наступне матричне рівняння:

$$A \cdot \varphi = B \cdot V, \quad (4.7)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} A_{1,1} & \frac{3}{r} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\Delta R_1} & 0 \\ \frac{3}{r} & A_{2,2} & \frac{3}{r} & 0 & 0 & \frac{1}{\Delta R_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{r} & A_{3,3} & \frac{3}{r} & \frac{1}{\Delta R_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{r} & A_{4,4} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\Delta R_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\Delta R_1} & 0 & A_{5,5} & \frac{3}{r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\Delta R_1} & 0 & 0 & \frac{3}{r} & A_{6,6} & \frac{3}{r} & 0 \\ \frac{1}{\Delta R_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3}{r} & A_{7,7} & \frac{3}{r} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\Delta R_1} & 0 & 0 & \frac{3}{r} & A_{8,8} \end{bmatrix};$$

$$\varphi = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4 \ \varphi_5 \ \varphi_6 \ \varphi_7]^T;$$

$$A_{1,1} = A_{4,4} - \left(\frac{3}{r} + \frac{1}{\Delta R_1} + \frac{1}{\Delta R_2} + \frac{1}{R_H} \right); \quad (4.8)$$

$$A_{2,2} = A_{3,3} - \left(\frac{6}{r} + \frac{1}{\Delta R_1} + \frac{1}{\Delta R_2} \right);$$

$$A_{5,5} = A_{8,8} - \left(\frac{3}{r} + \frac{1}{\Delta R_1} + \frac{1}{R_B} \right); \quad (4.9)$$

$$A_{6,6} = A_{7,7} - \left(\frac{6}{r} + \frac{1}{\Delta R_1} \right);$$

$$B = \begin{bmatrix} -1 & & & & -k & & & \\ \frac{1}{R_H} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_B} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (4.10)$$

Рівняння (4.7) має такий розв'язок:

$$\varphi = A^{-1} \cdot B \cdot V. \quad (4.11)$$

Струм шунтування верхнього ЧЕ, у першому наближенні, дорівнює сумі струмів з вузлів верхнього ЧЕ до вузлів нижнього ЧЕ.

$$I_{2ш} = \frac{\varphi_5 - \varphi_3}{\Delta R_1} + \frac{\varphi_6 - \varphi_2}{\Delta R_1} + \frac{\varphi_7 - \varphi_1}{\Delta R_1} + \frac{\varphi_8 - \varphi_4}{\Delta R_1}. \quad (4.12)$$

Струм шунтування нижнього ЧЕ, у першому наближенні, дорівнює сумі різних струмів, що виходять з вузлів нижнього ЧЕ в тіло деталі та струмів, що надходять у ці вузли з верхнього ЧЕ:

$$I_{1ш} \approx \sum_{i=1}^4 \frac{\varphi_i - \varphi_T}{\Delta R_2} + I_{ш1}. \quad (4.13)$$

Отже, відносна похибка вимірювання поперечної деформації, обумовлена шунтуванням верхнього ЧЕ, визначається відношенням струму шунтування та струму, що входить у вузол 5:

$$\Delta \varepsilon_2 \approx \frac{I_{2ш}}{I_2} \cdot 100\%. \quad (4.14)$$

Відносна похибка вимірювання поздовжньої деформації, обумовлена шунтуванням нижнього ЧЕ:

$$\Delta \varepsilon_1 \approx \frac{I_{1ш}}{I_1} \cdot 100\%. \quad (4.15)$$

Струми шунтування в окремих вузлах електричної моделі тензометричного датчика для верхнього та нижнього ЧЕ представлено такими залежностями:

$$\begin{aligned} I_{5,3} &= \frac{\varphi_5 - \varphi_3}{\Delta R_1}; & I_{7,1} &= \frac{\varphi_7 - \varphi_1}{\Delta R_1}; \\ I_{6,2} &= \frac{\varphi_6 - \varphi_2}{\Delta R_1}; & I_{8,4} &= \frac{\varphi_8 - \varphi_4}{\Delta R_1}; \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} I_{1,T} &= \frac{\varphi_1 - \varphi_T}{\Delta R_2}; & I_{2,T} &= \frac{\varphi_2 - \varphi_T}{\Delta R_2}; \\ I_{3,T} &= \frac{\varphi_3 - \varphi_T}{\Delta R_2}; & I_{4,T} &= \frac{\varphi_4 - \varphi_T}{\Delta R_2}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Виконано імітаційне моделювання показань тензометра в таких умовах:

$$V = 5 \text{ В}; k = 1,5; r = 120 \text{ Ом}; r_{i,j} = \frac{r}{3}; \Delta R_1 = \Delta R_2 = 0,5 \cdot R_{sv};$$

$$\varphi_d = \varphi_T = 0; R_{cb} = (20 \div 300) \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Розв'язання рівнянь (4.12) та (4.13) дозволить отримати сумарне значення струмів витоку в нижньому та верхньому ЧЕ тензومتра для різних значень опору ізоляції сполучного. При цьому струм шунтування в нижньому ЧЕ може бути отри- маний з урахуванням надходження струмів витоку з верхнього ЧЕ.

Надалі визначаємо величину зміни опору ЧЕ, пов'язану з його шунтуванням, за такою формулою: $\Delta R_{ш} = \frac{V}{I_{\Sigma ш}}$. Використовуючи залежність $\varepsilon_{мн} = \frac{\Delta R_{ш}}{R_n} \frac{1}{K}$, отриму- ємо значення уявної відносної деформації $\varepsilon_{ш}$, пов'язаної з шунтуванням нижнього ЧЕ тензометричного датчика. Тут K – коефіцієнт тензочутливості матеріалу ЧЕ те- нзометра, величина як правило відома, у нашому випадку для ніхрому приймається рівною 1.8, а R_n – опір нижнього ЧЕ тензовимірювального датчика за відповідної температури в експерименті.

Графіки залежностей струмів шунтування верхнього та нижнього чутливих елементів від опору сполучного, отримані в результаті моделювання, наведено на рис. 4.4.

На рис. 4.5 наведено графіки залежності похибок вимірювання тензометром поздовжньої $\Delta \varepsilon_n$ і поперечної $\Delta \varepsilon_v$ деформацій, отримані в результаті моделювання.

Отже, двошарові тензометричні датчики (що складаються з пари тензорезис- торів) є ефективним інструментом для дослідження статичних деформацій деталей за умов екстремального нагріву (понад 600 °С). Конструктивна особливість такого сенсора мінімізує струми шунтування нижнього чутливого елемента, що дозволяє суттєво зменшити похибку вимірювань, спричинену деградацією електроізоляцій- них властивостей сполучного матеріалу при високих температурах. Для оцінки то- чності вимірювань запропоновано розрахунковий метод, що базується на електри- чній моделі тензومتра, описаній системою різницевих диференціальних рівнянь у матричній формі.

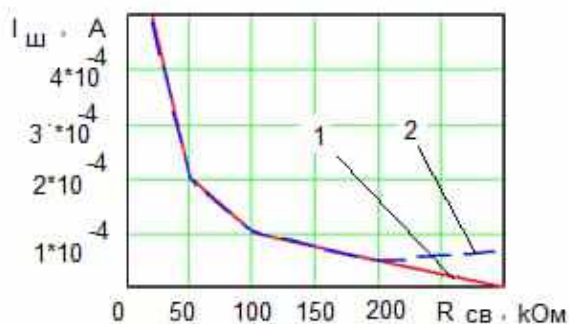


Рис. 4.4 – Залежність струмів шунтування ЧЕ від опору сполучного

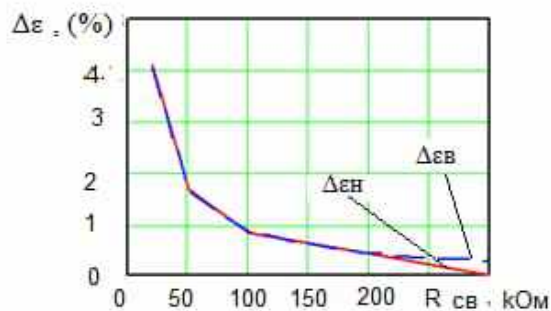


Рис. 4.5 – Залежність похибок вимірювання поздовжньої та поперечної деформацій від опору сполучного

Похибка вимірювання поздовжньої деформації (рис. 4.5), обумовлена шунтуванням, зі збільшенням опору сполучного зменшується від 4,1% (при $R_{св} = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}$) до 0,002% (при $R_{св} = 300 \cdot 10^3 \text{ Ом}$), а похибка вимірювання поперечної деформації, обумовлена шунтуванням, зменшується від 4,03% (при $R_{св} = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}$) до 0,27 % (при $R_{св} = 300 \cdot 10^3 \text{ Ом}$).

4.3 Поправки на результати вимірів ВТП від шунтування

Тензометричне дослідження напружено-деформованого стану авіаційних двигунів, енергетичних турбін і елементів космічної техніки вимагає застосування спеціалізованих високотемпературних тензорезисторів, здатних функціонувати при температурах 600–1000 °С. Однією з найважливіших проблем, що обмежує точність вимірювань у цьому діапазоні, є різке зниження електричного опору ізоляції між чутливим елементом тензорезистора та поверхнею деталі.

Зниження опору ізоляції призводить до появи паралельного шляху для протікання струму, тобто до шунтування тензорезистора. Це явище викликає як дрейф «нуля» вимірювальної системи, так і зменшення його ефективного коефіцієнта тензочутливості. Нижче змодельовано похибки шунтування та виведено формули для їх корекції.

Коефіцієнт тензочутливості тензорезистора K визначається як

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon},$$

де ε – реальна деформація.

В умовах шунтування вимірювана відносна зміна опору буде нижчою за реальну через наявність сталого паралельного опору, чутливість вимірювальної системи при цьому знижується пропорційно відношенню номінального опору тензорезистора до опору ізоляції. Розрахунковий коефіцієнт тензочутливості, скоригований на ефект шунтування, визначається наступним виразом:

$$K_{\text{еф}} = K \left(\frac{1}{1 + \frac{R_T}{R_{\text{ш}}}} \right).$$

Для отримання істинного значення **деформації** $\varepsilon_{\text{true}}$ необхідно скоригувати вимірне значення $\varepsilon_{\text{вим}}$, враховуючи два фактори: зміну початкового опору та зміну чутливості.

Помилкова «деформація» $\varepsilon_{\text{ш}}$, викликана виключно падінням опору ізоляції при постійній температурі (якщо не враховувати ТКО – температурний коефіцієнт опору), становить:

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \frac{1}{K} \cdot \frac{R_T}{R_T + R_{\text{ш}}}.$$

Оскільки $R_{\text{ш}} \gg R_T$ для більшості робочих режимів, формулу можна спростити:

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \frac{1}{K} \cdot \frac{R_T}{R_{\text{ш}}}.$$

Для врахування втрати чутливості, **істинна деформація** повинна обчислюватися за формулою

$$\varepsilon_{\text{true}} = \varepsilon_{\text{вим}} \left(1 + \frac{R_T}{R_{\text{ш}}} \right).$$

При автоматизованій обробці даних поправка додається до виміряного сигналу. Загальне виправлене значення:

$$\varepsilon_p = \left(\varepsilon_{\text{вим}} - \frac{R_T}{K \cdot R_{\text{ш}}(T)} \right) \left(1 + \frac{R_T}{R_{\text{ш}}(T)} \right).$$

Якщо $R_{\text{ш}}$ стає порівнянним з $100 R_T$, похибка сягає 1%, що є неприпустимим для прецизійних вимірювань.

Для покращення точності моделі та вимірювання пропонуються наступні кроки:

- Використання трипровідної або чотирипровідної схеми підключення дозволяє компенсувати зміну опору дротів, але не вирішує проблему шунтування самого ЧЕ.
- Встановлення двох тензорезисторів (активного та компенсаційного) в однакових температурних умовах з ідентичним матеріалом підкладки.
- Вимірювання поточного опору ізоляції R_{I3} під час експерименту та програмне введення поправок у результат вимірювання деформації згідно з розробленою електричною моделлю.
- Використання низькоомних тензорезисторів (наприклад, 120 Ом замість 350 або 1000 Ом) зменшує вплив шунтування, оскільки відношення R_T/R_{I3} стає меншим.

4.4 Аналіз передачі деформації до ВТП

4.4.1 Розрахунок передачі деформації у ВТП у системі ANSYS

Ключовим фактором ефективності тензометричного вимірювання є якість передачі деформацій від поверхні деталі до чутливого елемента крізь сполучний шар. Будь-які відхилення, зокрема надмірна товщина адгезиву, створюють ризик

спотворення даних, що критично перешкоджає достовірній ідентифікації реального деформаційного стану об'єкта.

Особливого значення точність передачі деформацій набуває при підвищених температурах, за яких суттєвий вплив на результати вимірювань справляє нерівномірність температурно-деформаційного поля в зоні контакту «деталь – датчик». Оскільки досліджуваний тензOMETричний пристрій має більшу товщину, ніж аналогічні рішення, математичне моделювання розподілу температури та деформацій стає обов'язковим інструментом для коректної оцінки похибок і аналізу взаємодії вимірювальної системи з робочою поверхнею.

Попередні розрахунки свідчать, що температурний градієнт між ЧЕ в 5 °С генерує похибку вимірювання до 1 %. Оскільки металева основа, на якій розміщено датчики, також може впливати на точність даних, доцільно порівняти два сценарії: встановлення елементів на суцільну платівку та безпосередньо на поверхню деталі.

Скінченно-елементний аналіз дозволяє оцінити розподіл напружень і деформацій у різних умовах. Це скорочує потребу в фізичних експериментах і дає змогу прогнозувати поведінку системи в умовах, недоступних для лабораторних випробувань.

Математична модель тензOMETричного пристрою (рис. 4.6) включає такі компоненти: опорну деталь розмірами 5×20×40 мм із сталі 30ХГСА; металеву платівку товщиною 0,15 мм із сталі 12Х18Н10Т; чутливі елементи з дроту діаметром 30 мкм зі сплаву Х20Н80. Зв'язуючий матеріал виконаний на основі високотемпературного цементу ВКП-26Ц, модуль пружності якого залежно від температури становить 50–80 ГПа. (рис. 4.6)

Математична модель тензOMETричного пристрою була розбита сіткою скінченних елементів методом Hex Dominant (рис. 4.7)

У середовищі Ansys (модуль Steady-State Thermal) до нижньої грані деталі (20х40 мм) було прикладено тепловий потік потужністю 50 Вт, тоді як верхня частина з розміщеним тензOMETричним пристроєм контактувала із середовищем за нормальної температури.

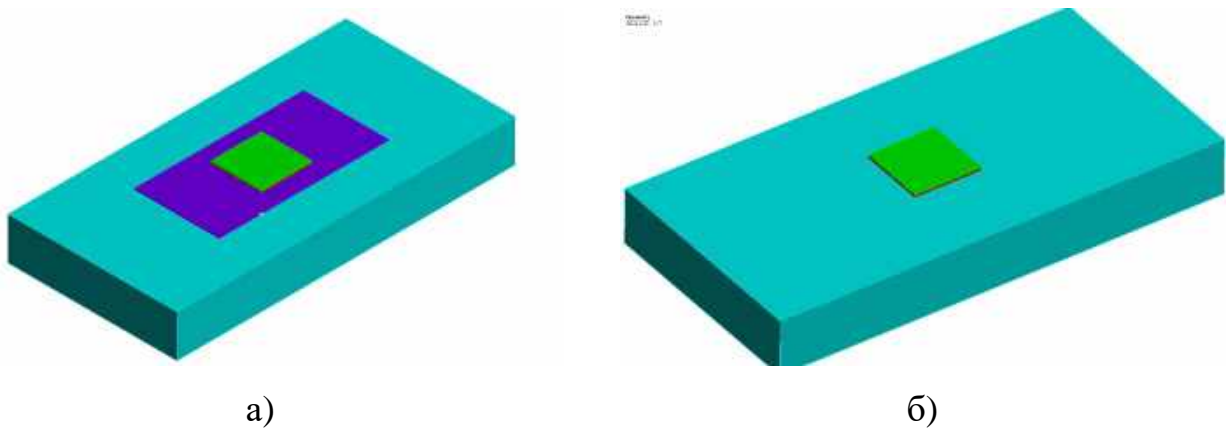


Рис. 4.6 – Математична модель тензотричного пристрою:

а) випадок з суцільною платівкою; б) чутливі елементи встановлено на деталь

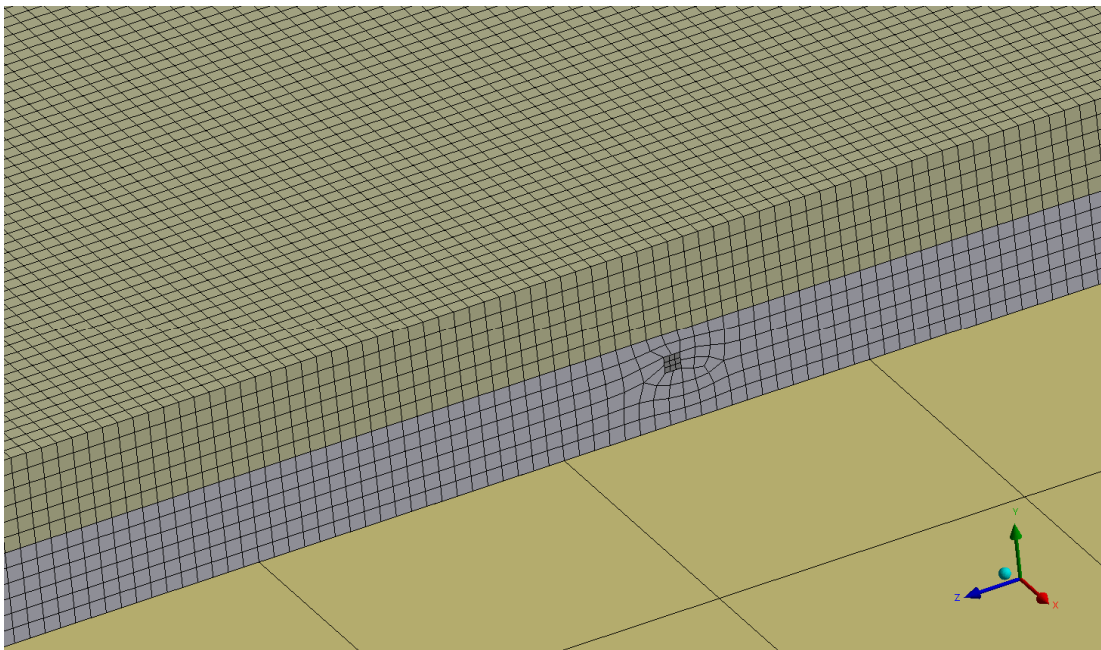


Рис. 4.7 - Сітка скінченних елементів математичної моделі

Відповідно, засобами модуля Static Structural до торцевих граней зразка (5x20 мм) було прикладено механічне навантаження 20 000 Н, що відповідає напруженню 200 МПа.

За результатами обчислювального експерименту визначено температурний градієнт моделі та розподіл відносних деформацій від деталі до ЧЕ датчика.

Установлено, що перепад температур між досліджуваною деталлю та найхолоднішою точкою тензотричного пристрою становить близько 5 °С (рис. 4.8), а між нижнім і верхнім ЧЕ – менше 2 °С (рис. 4.9)»

Відносна деформація елементів моделі, становила відповідно:

– власне деталі – 1197 мкм/м;

- металевої платівки – 1182 мкм/м;
- ізолятора-сполучного – 1105...1129 мкм/м;
- чутливих елементів – 1090...1150 мкм/м.

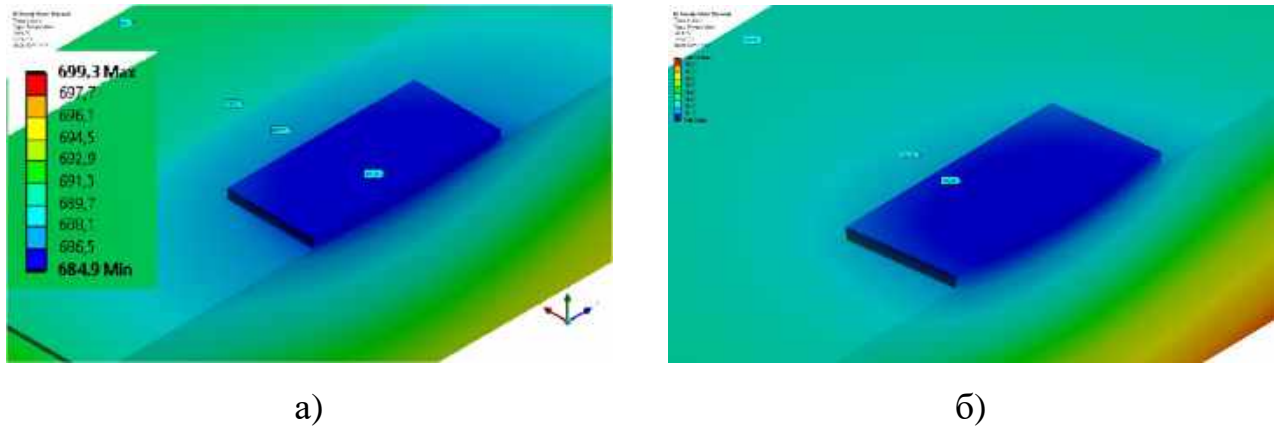


Рис. 4.8 - Результат розрахунку розподілу температури по моделі:
а) випадок з суцільною платівкою; б) чутливі елементи встановлено на деталь

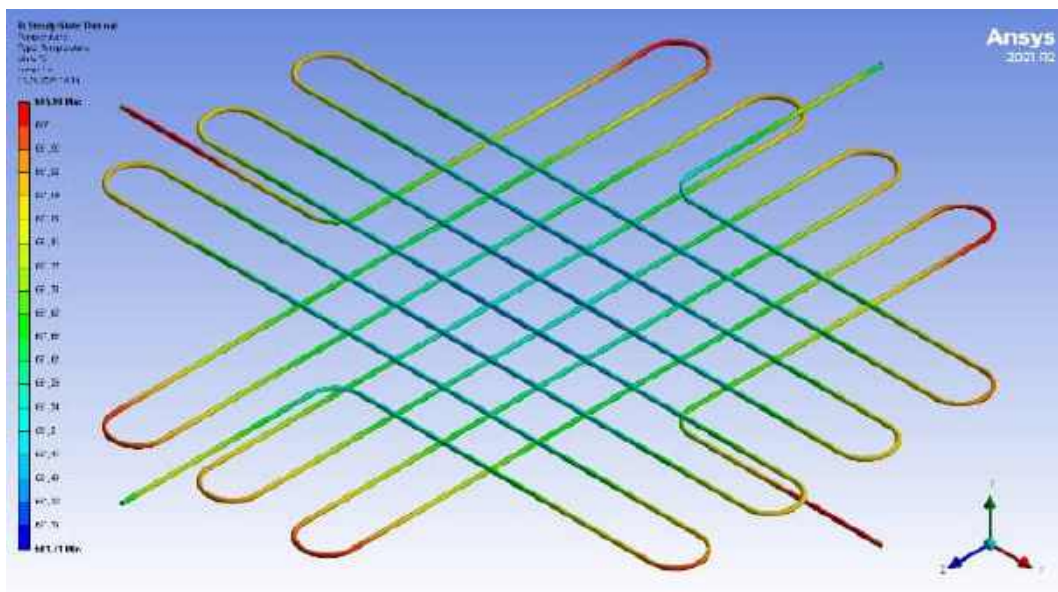


Рис. 4.9 - Температурний градієнт у нижньому та верхньому ЧЕ

Тобто ЧЕ сприймають деформацію від деталі на рівні 95 %. При необхідності можливо внесення поправки в результати вимірювань (рис. 4.10).

Запропонована методика розрахунку розподілу відносних деформацій і температури в об'ємі моделі тензOMETричного перетворювача підтвердила можливість практично повного усунення адитивної похибки, зумовленої температурними впливами. При цьому коефіцієнт передавання деформації від досліджуваної деталі до вимірювального пристрою за температури 700 °С досяг значення приблизно 0,96.

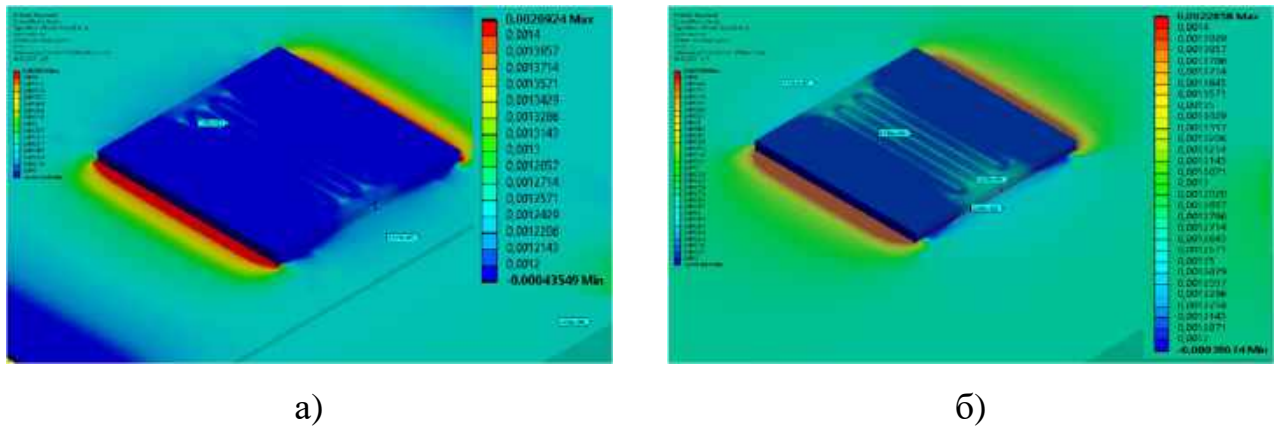


Рис. 4.10 – Відносна деформація, визначена з використанням моделі:

а) випадок з суцільною платівкою, б) чутливі елементи встановлено на деталь

4.5 Обговорення результатів

Високотемпературні тензорезистори, що застосовуються в аерокосмічній і енергетичній галузях, зазнають значних похибок через ефект шунтування чутливого елемента. Для вирішення цієї проблеми розробляють спеціальні математичні та електричні моделі, які дозволяють розраховувати корекційні коефіцієнти. Розуміння механізмів витоку струму є критично важливим для забезпечення точності вимірювань у високотемпературних умовах.

Точність тензометрії за високих температур обмежується деградацією матеріалів датчика та зміною їх фізико-хімічних властивостей. Систематизація похибок – зокрема «уявної деформації» та температурного дрейфу коефіцієнта чутливості – є ключовою умовою достовірності вимірювань. Наведено математичну модель цих похибок і методи їх усунення.

Розроблено модель шунтування ВТП, яка дозволяє враховувати похибки чутливого елемента, що виникають при температурах понад 550 °С.

Крім того, побудовано та проаналізовано модель передачі деформації від деталі до вимірювача, що дало змогу врахувати похибки, зумовлені зміною пружних властивостей матеріалів.

Розглянуто еквівалентну електричну модель ВТП із двома тензорезисторами на струмопровідній підкладці з потенціометричною реєстрацією сигналу.

Виконано розрахунки розподілу відносних деформацій і температури в об'ємі моделі тензометричного перетворювача за допомогою скінченно-елементного аналізу.

Розроблена модель дозволяє прогнозувати похибку вимірювання та вибирати оптимальні ізоляційні матеріали для специфічних умов експлуатації.

Запропоновані математичні моделі дозволяють корегувати результати на етапі постпроцесингу даних, за умови відомого значення опору ізоляції під час випробувань.

Результати, викладені в четвертому розділі роботи, опубліковано в роботах автора [література до вступу 2, 5, 9].

Література до четвертого розділу

1. Гусев, Ю. А. Шунтирование малоразмерных тензорезисторов / Ю. А. Гусев, А. В. Олейник, Д. Ф. Симбирский // Проблемы прочности. – 1972. – № 6. – С. 106–108.
2. An Introduction to Measurements using Strain Gages / K. Hoffmann // Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. – 1989. – 291 p.
3. Murray, W. M. The Bonded Electrical Resistance Strain Gage / W. M. Murray, W. R. Miller, // Oxford University Press. – 1992. – 424 p.
4. National Aeronautics and Space Administration (NASA). High-Temperature Strain Gage Installation and Measurement Techniques for Aerospace Structures. NASA Technical Memorandum. – 2014. – 45 p.
5. Sharpe, W. N. Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics / W. N. Sharpe // Springer Science & Business Media. – 2008. – 1096 p.
6. Цурпал, Г. Я. Методи вимірювання деформацій при високих температурах / Г. Я. Цурпал. - Київ: Наук. думка. – 2010. – 248 с.
7. Vishay Precision Group. Tech Note TN-504: Strain Gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature. Micro-Measurements. – 2020. – 12 p.

8. Гусев, Ю.А. Тензорезисторы с антишунтирующим экраном [Текст] / Ю.А. Гусев, А.В. Олейник, Д.Ф. Симбирский // Проблемы прочности. – 1976. – № 1. – С. 113– 116.

РОЗДІЛ 5.

ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕНЗОМЕТРИЧНОГО ПРИСТРОЮ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ГАЗОТУРБИННИХ ДВИГУНІВ

У сучасній авіаційній і енергетичній галузях точне оцінювання НДС елементів конструкцій, що функціонують в умовах інтенсивного термічного навантаження, залишається одним із ключових викликів інженерної розрахункової практики. Складність прогнозування поведінки тонкостінних компонентів, таких як диски компресорів чи елементи камер згоряння, зумовлена необхідністю врахування температурних градієнтів, що суттєво впливають на довговічність та надійність вузлів під час експлуатації при температурах до 700 °С. Удосконалення 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 ВТП і методологічного підходу до аналізу НДС матеріалів у складних термомеханічних умовах.

5.1 Методика досліджень деформації елементів ГТД

Дослідження напружено-деформованого стану конструкцій з використанням засобів CAE-аналізу, зокрема програмного комплексу ANSYS, дозволяє перенести акцент із натурних випробувань на превентивну оптимізацію конструкцій. Ключовим етапом верифікації проектних рішень є визначення вектора сумарного силового впливу на вузли кріплення. Такий підхід мінімізує невизначеність експлуатаційних навантажень, дозволяє раціонально розмістити елементи жорсткості та оптимізувати матеріаломісткість без втрати конструктивної цілісності.

Процес моделювання реалізовано за таким алгоритмом: створення 3D-моделі з подальшою ідеалізацією (виключенням другорядних конструктивних елементів, які не впливають на загальний рівень напружень), генерація сітки тетрадральних скінченних елементів другого порядку (10 вузлів), що забезпечує високу точність

розрахунків у зонах концентрації напружень, задання лінійних пружних характеристик матеріалу та прикладення робочих навантажень, обчислення результуючого вектора сил, ідентифікація гранично навантажених вузлів і оцінка працездатності конструкції.

Для експериментального підтвердження отриманих даних було розроблено тензометричний пристрій. Робота датчика базується на залежності електричного опору тензорезисторів від деформації, температури та часу.

Для аналізу електричних сигналів застосовано диференціальний підхід.

При одновісному навантаженні: компенсація температурного дрейфу реалізується шляхом диференціального вимірювання опору між верхнім і нижнім чутливими елементами (ЧЕ) (див. формулу 3.5).

При двовісному навантаженні: температурна похибка нівелюється введенням поправок ΔT (отриманих від зовнішніх термодатчиків) у рівняння стану (див. формулу 3.6).

Для усунення похибок, зумовлених опором з'єднувальних ліній, застосовано чотирипровідну (потенціометричну) схему підключення ЧЕ до вимірювальної апаратури.

Інтеграція високоточних тензометричних систем з інтелектуальними алгоритмами температурної компенсації та методами чисельного моделювання (МСЕ) утворює цілісний методологічний комплекс. Це забезпечує можливість моніторингу напружено-деформованого стану в режимі реального часу та гарантує високу інженерну точність проектних рішень на етапі конструкторської розробки.

5.2 Експериментальне визначення відносної деформації в тонкостінному нерівномірно прогрітому диску з центральним отвором з використанням ВТП

Для верифікації працездатності розробленого високотемпературного тензометра та відповідної методики проведено серію експериментальних досліджень. Метою роботи стало визначення напружено-деформованого стану тонкостінного диска (сталь 12Х18Н10Т, діаметр 382 мм, центральний отвір 20 мм, товщина 6 мм) в умовах дії радіального температурного градієнта (рис. 5.1–5.2).

температурні показники – універсальним підсилювачем SomatXR MX840B-R. Збір, візуалізація та подальша обробка масивів даних виконувалися в середовищі спеціалізованого програмного забезпечення satman®AP (версія 5.5).

На двох взаємно перпендикулярних радіусах диска розміщено 12 високотемпературних тензорезисторів, а на протилежній стороні – 10 хромель-алюмелевих термопар. Крок їхнього розміщення вздовж радіуса визначено на основі попереднього моделювання температурних полів диска. Диск із закріпленими на ньому тензомерами та термопарами наведено на рис. 5.2



Рис. 5.2 – Диск із розміщеними тензомерами та термопарами

Експериментально досліджено радіальний розподіл деформацій у диску в обох головних напрямках під час термічного навантаження пальником, що забезпечувало градієнт температур 20–700 °С уздовж радіуса.

Для аналізу було відібрано дані з 6 тензометрів та 8 термопар. Вибір зумовлено ідентичністю показів дублюючих датчиків, встановлених симетрично відносно центру диска, що дозволило оптимізувати обробку масиву вимірювань (зокрема, виключено надлишкові дані тензометрів і термопар № 5 і № 7).

Для верифікації здобутих експериментальних даних виконано два аналітичні розрахунки міцності диска. При моделюванні було використано геометричні

характеристики, властивості матеріалу та розподіл температур, що ідентичні до експериментальних умов.

5.2.1 Розрахунок розподілу відносної деформації в тонкостінному нерівномірно прогрітому диску з центральним отвором із використанням системи ANSYS

Геометричну модель тонкостінного диска розроблено в середовищі ANSYS SpaceClaim у циліндричній системі координат, де вісь Z відповідає осі обертання, вісь Y – коловому напрямку, а вісь X – радіальному.

Чисельний аналіз виконано в модулі ANSYS Workbench Mechanical із застосуванням скінченно-елементної сітки типу Hex Dominant. Сформована регулярна скінченно-елементна сітка налічує 56 347 елементів і 294 518 вузлів (рис. 5.3).

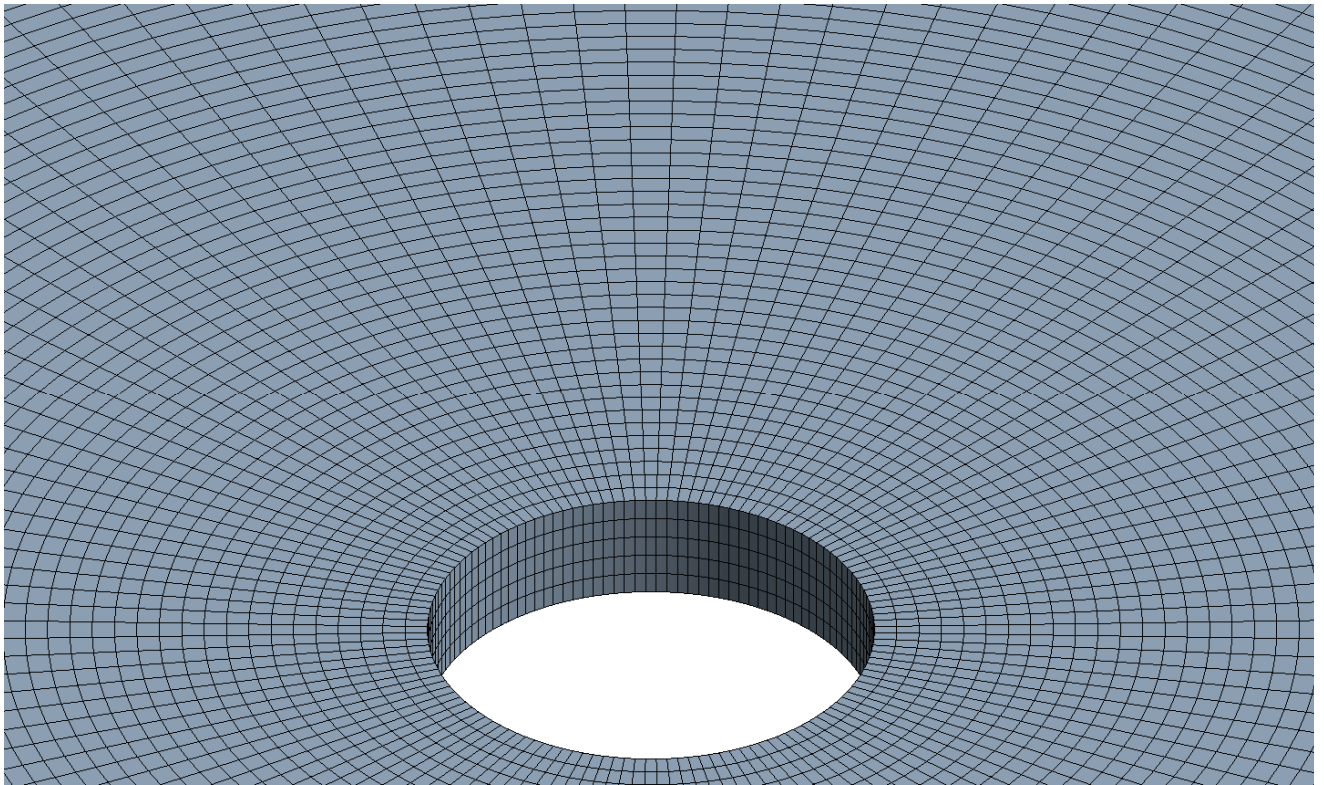


Рис. 5.3 - Твердотільна модель диска зі скінченно-елементною сіткою

Температурну залежність фізико-механічних властивостей матеріалу було визначено в модулі Engineering Data та інтегровано в налаштування розрахункової моделі (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Фізико-механічні властивості матеріалу 12X18H10T

Температура (С)	Коефіцієнт теплового розширення (1/С)	Модуль Юнга (Па)	Теплопровідність (Вт/(м С))
20	1,56E-05	1,97E+11	15
100	1,66E-05		16
200	1,70E-05		18
300	1,72E-05	1,67E+11	19
400	1,75E-05		20
500	1,79E-05	1,51E+11	21
600	1,85E-05	1,36E+11	22
700	1,90E-05		23
800	1,95E-05	1,28E+11	

Термічний розрахунок проведено в модулі Steady-State Thermal за початкової температури 20 °С. Граничні умови включали конвективний теплообмін на поверхнях (коефіцієнт теплопередачі 0,00003 Вт/мм²·°С), а також фіксовану температуру торцевої поверхні центрального отвору (700 °С) та обода диска (20 °С).

Температурні поля, розраховані в модулі Steady-State Thermal, було використано як вхідні дані для модуля Static Structural, що дозволило визначити розподіл нормальних пружних деформацій у напрямках осей X і Y

На рис. 5.4 представлено результати чисельного моделювання температурного градієнта та розподілу відносних деформацій моделі вздовж осей X і Y.

Температурні поля, змодельовані в середовищі Steady-State Thermal, демонструють високу збіжність із результатами натурного експерименту.

5.2.2 Розрахунок розподілу відносної деформації в тонкостінному нерівномірно прогрітому диску з центральним отвором з використанням аналітичної моделі навантаження диска

Зазвичай оцінка напруженого стану диска базується на припущенні про його ідеальну пружність. Проте в реальних умовах експлуатації локальні напруження можуть перевищувати межі плинності матеріалу, спричиняючи залишкові пластичні деформації. Окрім того, за високих температур критичним фактором стає

повзучість металу. Хоча ці явища суттєво впливають на міцність, у межах цього розрахунку вони не враховуються.

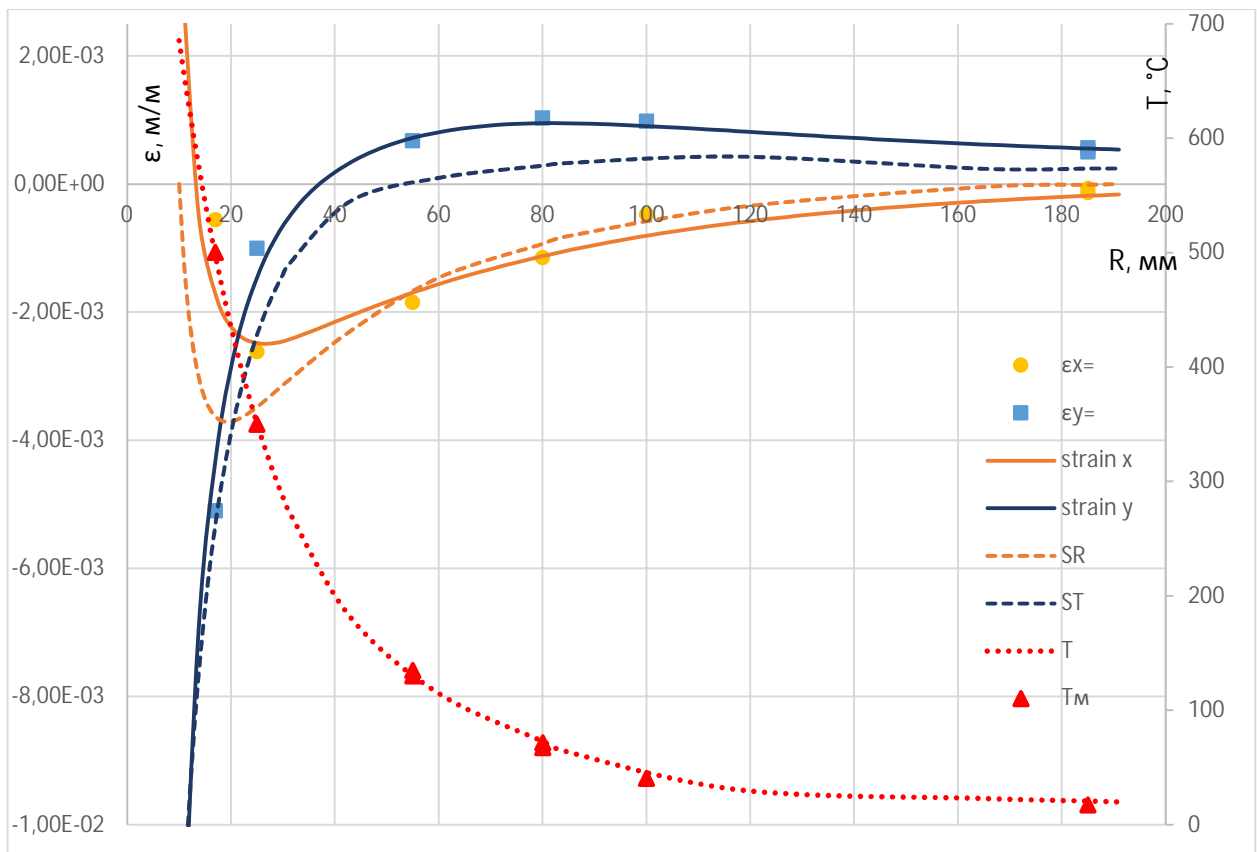


Рис. 5.4 – Розподіл відносної деформації та температури по радіусу диска

ε_x , ε_y – відносні деформації отримані з експерименту;

strain x, strain y – відносні деформації розраховані в ANSYS;

SR, ST – відносні деформації, розраховані за математичною моделлю;

T – розрахована температура; T_m – виміряна температура

Для спрощення математичної моделі розрахунок на міцність базується на таких припущеннях:

- диск вважається симетричним відносно серединної площини, перпендикулярної до осі обертання;
- диск перебуває у плосконапруженому стані;
- температура диска змінюється лише залежно від радіуса, залишаючись рівномірно по його товщині;
- напруження на будь-якому радіусі вважаються незмінними за товщиною елемента;

- локальні особливості, як отвори, бобишки, виступи чи проточки, в моделі не враховуються.

Отже, метою даного розрахунку є визначення розподілу напружень і оцінювання запасів міцності в характерних перерізах диска вздовж його радіуса.

Математична модель, запропонована в [2], описує навантаження диска, спричинені відцентровими силами власної маси та лопаткового вінця, а також температурними градієнтами (у разі нерівномірного нагрівання). В умовах експерименту, визначальним чинником стає радіальний розподіл температур. Рівняння (5.1) виведено з умови рівноваги елемента диска, обмеженого двома меридіональними площинами та двома концентричними поверхнями, а рівняння (5.2) отримано на основі аналізу деформацій цього елемента. Результатом є система двох диференціальних рівнянь, які слугують базою для розрахунку міцності диска.

$$d\sigma_R = -\sigma_R \left(\frac{dR}{R} + \frac{db}{b} \right) + \sigma_T \frac{dR}{R}; \quad (5.1)$$

$$d\sigma_T = \sigma_R \left(\frac{dR}{R} - \mu \frac{db}{b} - \mu \frac{dE}{E} \right) + \sigma_T \left(\frac{dR}{R} + \frac{dE}{E} \right) - Ed(\alpha t). \quad (5.2)$$

де σ_R і σ_T – радіальні та окружні нормальні напруження;

b, R – поточні значення товщини та радіуса диска;

E – модуль пружності матеріалу диска;

α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу диска;

μ – коефіцієнт Пуассона;

t – Температура елемента диска на радіусі R .

Систему рівнянь (5.1)–(5.2) розв’язано методом скінченних різниць, що дозволило визначити розподіл термічних напружень у диску як у радіальному, так і в коловому напрямках.

5.2.3 Порівняльний аналіз результатів експериментального та розрахункових методів розподілу відносної деформації в диску

Результати експериментальних досліджень і аналітичних розрахунків розподілу відносної деформації диска при градієнті температури 20-700 °С за його радіусом представлено на рисунку 5.4 та в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати експериментальних і розрахункових досліджень диска

R, мм	Експеримент		Математична модель				ANSYS			
	ϵ_R	ϵ_T	ϵ_R	%	ϵ_T	%	ϵ_R	%	ϵ_T	%
17*	-5,58E-04	-5,10E-03	-2,45E-03	-339,0	-4,81E-03	6,0	-1,85E-03	-231	-4,00E-03	21,5
25	-2,62E-03	-1,60E-03	-2,68E-03	-2,2	-1,86E-03	-13,9	-2,48E-03	5,3	-1,44E-03	10,0
55	-1,85E-03	6,76E-04	-1,55E-03	16,2	5,96E-04	13,4	-1,69E-03	8,6	7,26E-04	-7,3
80	-1,15E-03	1,03E-03	-9,74E-04	15,3	9,72E-04	5,9	-1,09E-03	5,2	9,50E-04	7,7
100	-7,73E-04	9,79E-04	-5,27E-04	31,8	9,28E-04	5,4	-8,00E-04	-3,4	9,04E-04	7,6
185	-1,84E-04	5,64E-04	-1,92E-04	-4,3	5,42E-04	4,0	-1,89E-04	-2,7	5,59E-04	0,8

ϵ_R і ϵ_T – радіальні та окружні деформації; % – різниця з експериментом у відсотках.

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

Аналіз значень відносних деформацій, змодельованих у середовищі ANSYS Workbench Mechanical (модулі Static Structural та Steady-State Thermal) та визначених методом скінченних різниць демонструє їх високу збіжність із результатами натурного експерименту.

5.3 Дослідження відносної деформації кронштейна кріплення жарової труби основної камери згоряння турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою (АІ-222К-25Ф)

Об'єкт: Жарова труба з обтічником (сплав ХН38ВТ-ВД [1], таблиця 5.3), ТРДД АІ-222К-25Ф (напрацювання 472 год 10 хв).

Камера згоряння – кільцева з низьким рівнем емісії, плівковим охолодженням жарової труби та 16-ма форсунками з повітряним розпилюванням палива.

Таблиця 5.3 – Механічні властивості сплаву ХН38ВТ-ВД

Температура, °С	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²
20	85	25
300	76	20
450		17,5
600	62	15
800	30	

Під час дефектації обтічника жарової труби виявлено 15 наскрізних тріщин, локалізованих у зонах зварних з'єднань із кронштейнами. Установлено, що всі тріщини мають кільцеву орієнтацію та проходять через перемички між отворами Ø15 мм і вікнами для встановлення форсунок (ширина – 24 мм). Окремої уваги потребує руйнування зварного шва кронштейна №7, через який проходить одна з тріщин.

На поверхнях сполучення всіх кронштейнів із фланцем дифузора зафіксовано сліди фретинг-зношування різної інтенсивності. Найбільш виражену деградацію матеріалу виявлено на кронштейні №4.

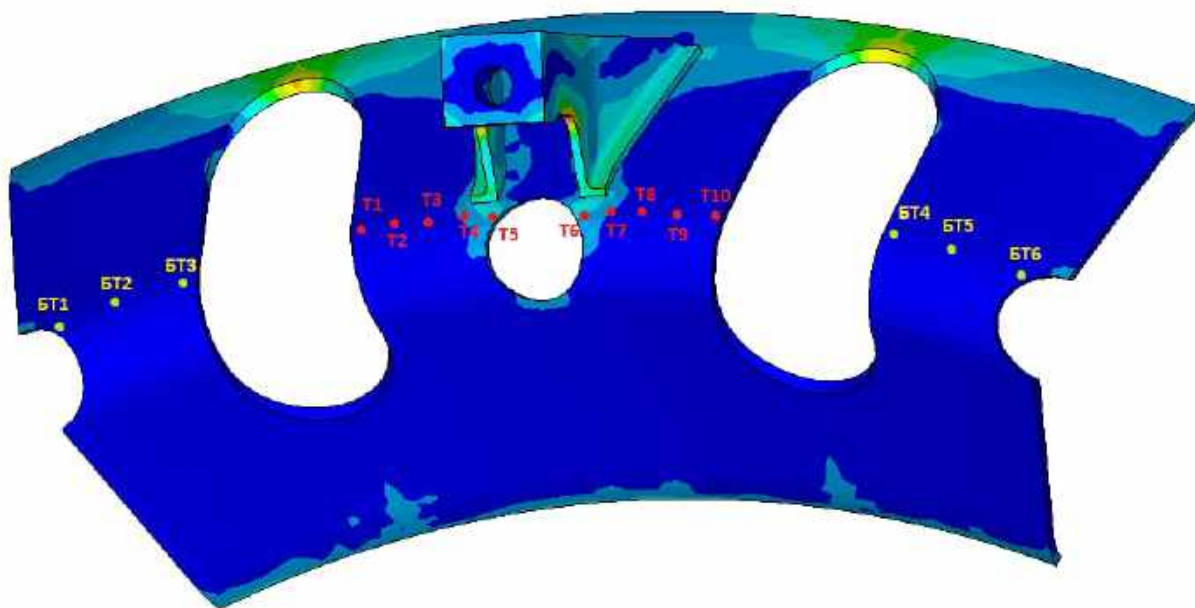
Порівняльний аналіз перехідних процесів двигуна, що досліджується (модифікація АІ-222К-25Ф), та базової версії (АІ-222-25) виявив суттєві аномалії в динаміці прийомистості («Малий газ» – «Максимальний»):

Час набору режиму скорочено до 2,5 с проти 6 с для базової модифікації, що свідчить про агресивність перехідного процесу.

На відміну від базової версії двигуна характерні значні закидання температури газів T_r при виході на режим.

Для оцінки зв'язку між зафіксованими аномаліями перехідних процесів та виявленими ушкодженнями конструкції, відділом турбін було виконано розрахунок НДС області тріщиноутворення методом скінченних елементів у середовищі ANSYS. Метою моделювання є визначення рівня статичного напруження в розрахункових перерізах обтічника при штатних режимах експлуатації.

Результати розрахунків відображено на рисунках 5.5, 5.6 та в таблиці 5.4.



Ри. 5.5 – Максимальні напруження в обтічнику на режимі «Зліт»
(відповідає варіанту 1)

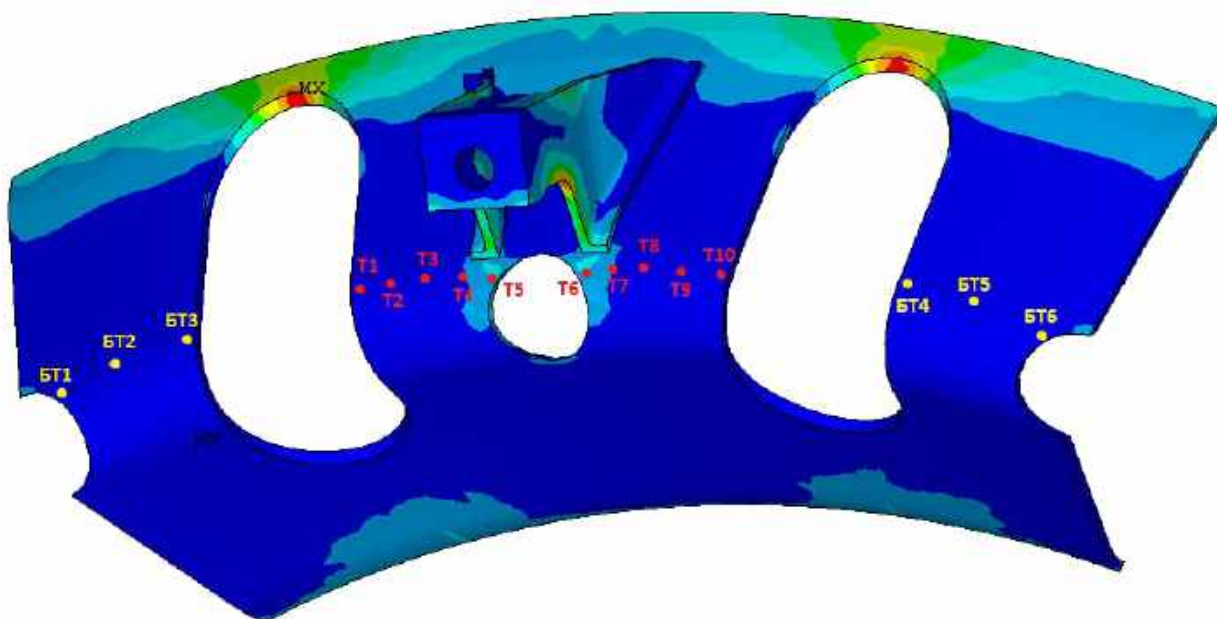


Рис. 5.6 – Максимальні напруження в обтічнику за умови найгірших можливих
комбінацій температур (відповідає варіанту 3)

Таблиця 5.4 – Максимальний рівень напружень у визначених точках обтічника згідно з рисунками 4 та 5

Точка	Рівень статичних напружень (кгс/мм ²)		
	Початковий варіант, режим	При збільшенні температури жарової	При збільшенні температури ж.т. на 100°С щодо

	«Зліт» ($T_k = 462^\circ\text{C}$) (Варіант 1)	труби на 100°C щодо Варіанту 1 (Варіант 2)	Варіанту 1 та $T_k = 383^\circ\text{C}$ на режимі МГ (Варіант 3)
BT1	0,72	1,4	1,5
BT2	0,85	1,7	1,82
BT3	1	2,3	2,71
BT4	1,07	2,01	2,55
BT5	0,81	1,9	1,8
BT6	0,6	1,6	1,7
T1	1,14	1,8	1,83
T2	1,2	2,09	2,22
T3	1,9	2,73	3,47
T4	3,6	5,2	11,8
T5	6,1	7,9	17,8
T6	6,7	9	17,1
T7	3,9	5,9	15,13
T8	1,9	3,2	11,6
T9	0,99	2,1	2,64
T10	0,86	1,3	1,59

Примітка: "BT" – точки, що знаходяться в місцях без тріщин, а "T" – точки, що знаходяться в місцях виявлення тріщин.

Для оцінки НДС та визначення динамічної міцності обтічника і його кронштейна було проведено комплексне дослідження, що поєднувало метод скінченно-елементного моделювання (МСЕ) та натурні тензометричні випробування.

Для аналізу розподілу статичних напружень та напружень, спричинених термічним навантаженням було виконано розрахунок НДС методом скінченних елементів у середовищі ANSYS (рис. 5.7).

На основі отриманих результатів визначено зони гранично допустимих напружень кронштейна обтічника (рис. 5.8).

Для оцінки динамічної напруженості зон тріщиноутворення обтічника та дослідження статичних і динамічних напружень кронштейна обтічника було проведено тензометрування.

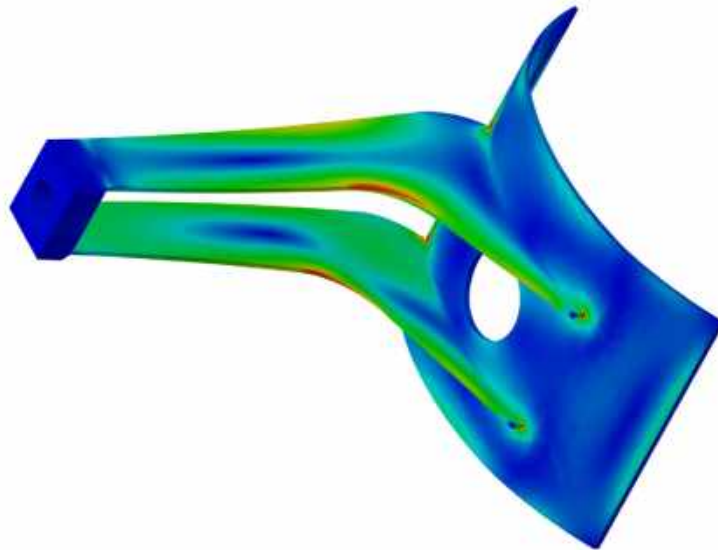


Рис. 5.7 – Розподіл напружень в кронштейні обтічника

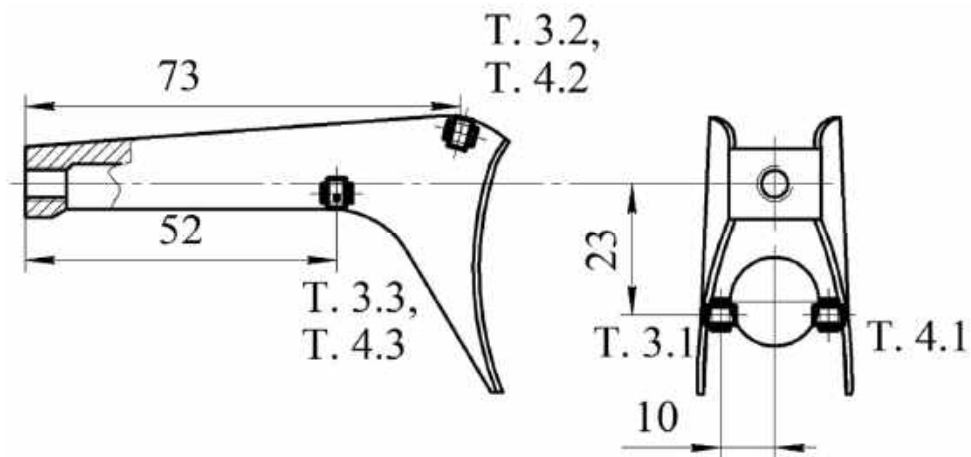


Рис. 5.8 – Схема встановлення ВТП на кронштейн обтічника жарової труби

Тензорезистори було встановлено на конструкцію обтічника та проведено серію випробувань на відкритому стенді. За результатами замірів встановлено, що максимальні динамічні напруження в критичних точках обтічника не перевищують $0,8 \text{ кгс/мм}^2$. Зазначений рівень напружень є нижчим за допустимі значення для складальної одиниці 53220301040-01, що підтверджує наявність необхідного запасу міцності конструкції.

Також, для аналізу динамічних, статичних і термічних напружень, було встановлено ВТП на кронштейн обтічника жарової труби. Результати вимірювання наведені у вигляді тензограм (рис. 5.9-5.10) та в таблиці 5.5.

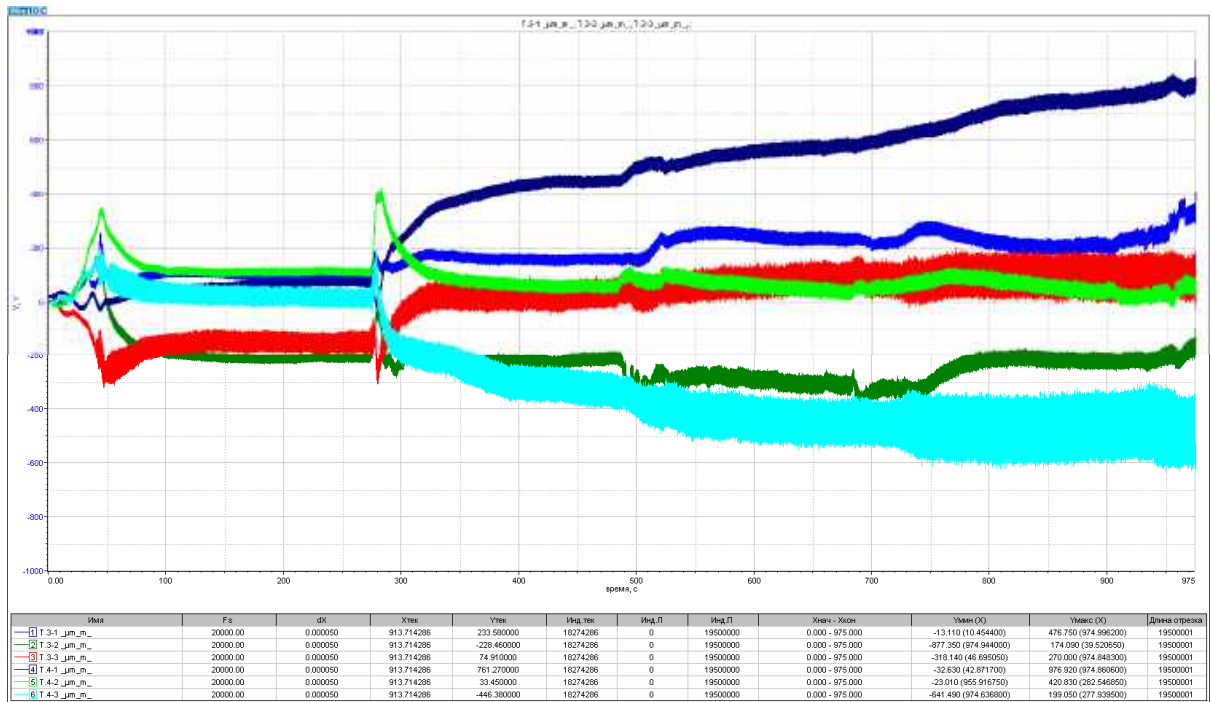


Рис. 5.9 – Тензограма кронштейна обтічника жарової труби ВТП №№ 3.1, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2, 4.3 мкм/м**

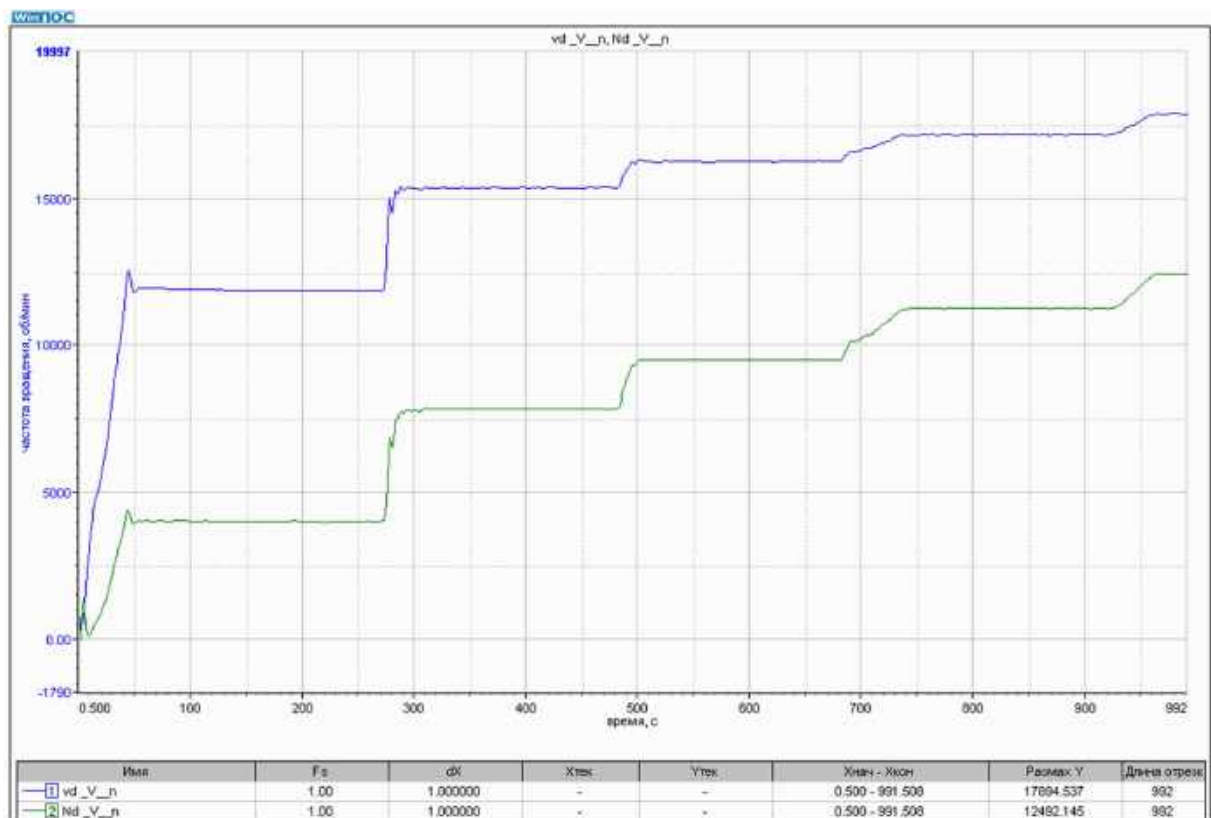


Рисунок 5.10 – Графік зміни частоти обертання роторів низького та високого тиску двигуна, об/хв

Таблиця 5.5 – Максимальний рівень динамічних і статичних напружень зафіксовано в кронштейні обтічника жарової труби

№	Динамічні напруження, $\sigma_{v \max}$		Статичні напруження, σ_{\max}	
	мкМ/м	кгс/мм ²	мкМ/м	кгс/мм ²
3.1	39	0,8	358	7,2
3.2	46,5	0,9	-314	-6,3
3.3	85,5	1,7	90	1,8
4.1	34	0,7	788	15,8
4.2	42	0,8	390	7,8
4.3	141,5	2,8	-462	-9,2

5.3.1 Аналіз результатів експериментального навантаження кронштейна жарової труби КЗ і рекомендації щодо конструктивного рішення

При роботі двигуна АІ-222К-25Ф в умовах відкритого випробувального стенду було визначено величини статичних і динамічних напружень, що діють в обтічнику жарової труби.

Рівень статичних напружень в обтічнику жарової труби (ВТП №№ 3.1, 4.1) досягає $\sigma_{\max} = 15,8$ кгс/мм², а динамічних – $\sigma_{v \max} = 0,8$ кгс/мм².

Рівень статичних напружень у кронштейні обтічника жарової труби (ВТП №№ 3.2, 4.2, 3.3, 4.3) досягає $\sigma_{\max} = 9,2$ кгс/мм², а динамічних – $\sigma_{v \max} = 2,8$ кгс/мм².

Проведені роботи дозволили виявити реальні статичні та динамічні напруження в досліджуваній деталі та оптимізувати конструкцію жарової труби.

5.4 Обговорення результатів

У результаті практичного опрацювання запропонованих пристроїв і методів експериментального дослідження НДС конструктивних елементів авіаційних двигунів і енергетичних установок отримано такі основні результати та висновки:

- 1 Виконано попередній розрахунок НДС тонкостінного диска під впливом температурного градієнта 20–700 °С методом скінченних елементів у середовищі ANSYS, а також із використанням аналітичної моделі навантаження диска методом скінченних різниць, що дозволило визначити розподіл термічних напружень у диску як у радіальному, так і в коловому напрямках.

2. Верифіковано працездатність розробленого ВТП і відповідної методики визначення результатів вимірювань. За допомогою ВТП досліджено спричинений температурними напруженнями напружено–деформований стан, тонкостінного диска в умовах дії радіального температурного градієнта. Порівняння результатів чисельного дослідження моделі та результатів експериментального дослідження визначило найбільшу розбіжність в 160 мкм/м порівняно з результатами змодельованими в середовищі ANSYS, та 300 мкм/м порівняно з результатами, отриманими аналітичним методом скінченних різниць.
3. Виконано досліджено НДС кронштейна кріплення жарової труби КЗ турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою (АІ-222К-25Ф).

Відносні деформації, змодельовані в середовищі ANSYS та визначені методом кінцевих різниць демонструють високу збіжність із результатами натурного експерименту. При градієнті температури менше 50 °С на довжину ЧЕ, похибка не перевищує 300 мкм/м.

Таким чином, досліджуваний ВТП 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.

Результати, викладені в п'ятому розділі роботи, опубліковано в роботах автора [література до вступу 6].

Література до п'ятого розділу

1. ТУ 14-1-2114-77 Листи зі сплаву марки ХН38ВТ-ВД (ЭИ703-ВД) та сталі марки 10Х11Н20Т2Р-ВД (ЭИ696А-ВД). Технічні умови
2. Розрахунок на міцність дисків компресорів та турбін: навч. посібник / Ю. С. Шошин, С. В. Єпіфанов, Р. Л. Зеленський. – Харків : ХАІ, 2007. – 28 с.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дисертаційного дослідження було вирішено актуальну науково-практичну задачу, а саме удосконалення методів визначення напружено-деформованого стану високонагрітих елементів конструкцій енергетичних установок та авіаційних двигунів.

На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень отримано наступні основні результати:

1. На основі аналізу сучасних науково-технічних джерел досліджено проблему визначення статичного напружено-деформованого стану високонагрітих деталей ГТД. Досліджено вплив статичного нагрівання на стан корпусу та ротора. Виявлено, що теплова рівновага супроводжується температурними градієнтами, які провокують появу внутрішніх зусиль. Ці зусилля можуть призвести до незворотної деформації та цілковитого руйнування конструкції. З'ясовано, що через обмежену температурну стійкість наявних тензорезисторів виникає нагальна потреба в розробці принципово нових сенсорних конструкцій для роботи в екстремальних температурних умовах. Досліджено також вимоги до сполучних матеріалів, спрямовані на забезпечення коректності вимірювань напружено-деформованого стану: мінімізація похибок при передачі деформації, здатність до роботи в умовах інтенсивних механічних та термічних впливів, високий опір ізоляції при робочих температурах, а також відповідність вимогам технологічності.
2. Запропоновано новий тензометричний пристрій, що дозволяє проводити дослідження термонапруженого стану високонагрітих елементів двигуна які знаходяться під впливом високих температур (понад 700 °C). Його конструкція базується на використанні двох чутливих елементів, розташованих паралельно до металевої платівки (що має ідентичний із деталлю коефіцієнт температурного розширення) та ізольованих високотемпературним клеєм-цементом. Ортогональне розташування елементів забезпечує високу точність вимірювань, а використання неорганічного клею гарантує надійну фіксацію та захист датчиків від агресивного середовища під час

експлуатації. Це рішення значно підвищує ефективність і стабільність моніторингу деформаційних процесів у високонавантажених вузлах авіаційної техніки.

3. Удосконалено метод виконання тензометричних досліджень високотемпературних елементів двигунів і енергетичних установок шляхом застосування зазначеного тензометричного пристрою. Представлена методика базується на аналізі рівняння стану тензорезистора, в якому опір є функцією деформації, температури та часу. Для забезпечення температурної компенсації в системі застосовуються два чутливі елементи: нижній і верхній. Експериментальне значення відносної деформації визначається шляхом обробки отриманих електричних опорів цих елементів. Процес обробки та автоматизації розрахунків реалізовано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що інтегрує математичні залежності з вхідними даними вимірювань для отримання достовірних значень деформації в умовах високих температур.
4. Розроблено модель шунтування ВТП, яка враховує похибки чутливого елемента, що виникають за температур понад 550 °С, які сприймаються вимірювальною апаратурою як уявна деформація. Крім того, побудовано та проаналізовано модель передачі деформації від деталі до вимірювача, що дозволило компенсувати похибки, зумовлені зміною пружних властивостей матеріалів. Підвищена температура впливає на всі складові вимірювальної системи – від самого датчика та адгезиву до з'єднувальних кабелів і навіть матеріалу досліджуваного об'єкта. Це створює численні джерела похибок, які можуть суттєво спотворювати результати й поставити під сумнів їхню достовірність. Двоелементна архітектура ефективно зменшує шунтуючі струми в ЧЕ, значно зменшуючи похибки вимірювання, спричинені термічною деградацією сполучної ізоляції. Крім того, новий метод розрахунку похибок, що використовує електричну модель, побудовану як система диференціальних рівнянь відносно скінченних різниць, підвищує точність оцінки статичної деформації в екстремальних температурних умовах.

5. Сформовано скінченно–елементну модель ВТП. Проведено аналіз передачі деформації у ВТП у системі ANSYS. За результатами моделювання визначено температурний градієнт моделі та розподіл відносних деформацій від деталі до чутливих елементів датчика. Установлено, що перепад температур між досліджуваною деталлю та найхолоднішою точкою тензометричного пристрою становить менше 5 °С, а між нижнім і верхнім чутливими елементами – менше 2 °С
6. Проведено верифікацію працездатності розробленого ВТП та відповідної методики розрахунку. За допомогою ВТП було досліджено напружено–деформований стан тонкостінного диска під впливом радіального температурного градієнта 20–700 °С. Відносні деформації, змодельовані в середовищі ANSYS Workbench Mechanical та визначені методом скінченних різниць мають високу збіжність із результатами натурного експерименту. Порівняння результатів чисельного дослідження моделі та результатів експериментального дослідження визначило найбільшу розбіжність в 160 мкм/м у порівнянні з результатми, отриманими результатами змодельованими в середовищі ANSYS, та 300 мкм/м в порівнянні з результатами, отриманими аналітичним методом скінченних різниць.
7. Виконано досліджено НДС кронштейна кріплення жарової труби КЗ турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою (AI-222К-25Ф).

Усі поставлені в дисертаційній роботі завдання вирішено, мету дослідження досягнуто.

ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях України категорії «Б»:

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. Гусєв, Ю. О. Вплив шунтування високотемпературних тензорозісторів на точність виміру статичних деформацій елементів ГТД / Ю. О. Гусєв, 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. Гусєв, 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 тензометричному пристрої при підвищеній температурі / 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: <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.13>.
6. Кригін, С. С. Тензометричний пристрій і метод його використання при дослідженні напружено-деформованого стану та температурних деформацій високо-нагрітих елементів газотурбінних двигунів. / С. С. Кригін, Ю. О. Гусєв, Ю. І.

Торба // Авіаційно-космічна техніка та технологія. – 2026. – № 2 (210). – С. 12-19.
doi: <https://doi.org/10.32620/aktt.2026.2.02>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Кригін С. С. Огляд тензометричних систем та похибок, які виникають при тензометруванні 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. 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.

9. Кригін С. С. Математична модель передачі температури та статичних деформацій у тензометричному 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:

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

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

ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЇ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної
роботи Національного аерокосмічного
університету «Харківський авіаційний
інститут», к.т.н., доцент



Андрій ГУМЕННИЙ

впровадження в навчальному процесі
результатів дисертаційної роботи КРИГІНА Сергія Сергійовича,
виконаної на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Комісія у складі голови – завідувача кафедри конструкції авіаційних двигунів, д.т.н., професора Сергія ЄПФАНОВА, членів доцента кафедри конструкції авіаційних двигунів, к.т.н. Сергія БЕЗУГЛОГО та ст. викладача кафедри конструкції авіаційних двигунів, PhD Олексія БОНДАРЕНКА встановила, що результати наукових досліджень КРИГІНА Сергія Сергійовича, а саме:

- 1) методологія тензометричного моніторингу елементів енергетичних установок, що ґрунтується на математичному моделюванні термонапруженого стану тензорезистора, в якому опір розглядається як багатофакторна функція деформації, термічного впливу та часу;
- 2) 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 °Сі;
- 3) 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

було впроваджено в навчальному процесі кафедри конструкції авіаційних двигунів у вигляді лекційних матеріалів і практичних робіт за навчальною дисципліною «Проектування, випробування та сертифікація об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки».

Це дозволило впровадити в навчальний процес нові науково-технічні досягнення, покращити наочність, фундаментальну та практичну спрямованість навчального процесу і в кінцевому результаті підвищити якість підготовки спеціалістів з авіаційної техніки.

Голова комісії:



Сергій ЄПФАНОВ

Члени комісії:



Сергій БЕЗУГЛИЙ

«27» травня 2026 р.



Олексій БОНДАРЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний інженер

АТ «Івченко Прогрес»

Член-кореспондент НАН України, д.т.н., проф.

А.Ф. Кравченко



АКТ № 12 від 27 травня 2026 р.

про впровадження результатів дисертаційного дослідження на тему:
 «Забезпечення вимірювання деформацій конструктивних елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурах 600-700 °С»
 провідного інженера-дослідника КРИГІНА Сергія Сергійовича
 на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування

Комісія у складі:

голови: голового конструктора Костіна М.М.членів: керівника групи к.т.н. Петрова О.В.;керівника групи к.т.н. Придорожного Р.П.

у період з 12 березня 2026 року до 29 березня 2026 року розглянула матеріали наукових досліджень КРИГІНА Сергія Сергійовича.

Комісія засвідчує:

1. Результати наукових досліджень, що проведено КРИГІНИМ Сергієм Сергійовичем, складають:

- запропоновано конструкцію високотемпературного тензOMETричного пристрою, що забезпечує вимірювання НДС елементів двигунів і енергетичних установок, що працюють при температурі до 650 -700 °С.

- створено математичну модель взаємодії нагрітих деталей з тензOMETричною системою, що дозволяє враховувати пружну взаємодію елементів та прогнозувати температурну похибку вимірювань.

- вдосконалено метод виконання тензOMETричних досліджень, шляхом визначення орієнтації чутливих елементів на поверхні деталі на основі скінченно-елементного моделювання.

- отримав подальший розвиток метод аналізу похибок вимірювань відносних статичних деформацій високотемпературних елементів двигунів і енергетичних установок з урахуванням шунтування, що дозволяє проводити випробування за більш високих температур.

2. Результати наукових досліджень використано при випробуванні та доведенні вузлів двигуна AI-222-25КФ.

3. Результати наукових досліджень вважати реалізованими.

Голова комісії:

Члени комісії: к.т.н.

к.т.н.

Костін М.М.

Петров О.В.

Придорожний Р.П.