

УДК 621.452.3

doi: 10.32620/aktt.2023.4.01

С. С. КРИГІН^{1,2}, Ю. О. ГУСЄВ¹, Ю. І. ТОРБА²¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна² ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

ТЕМПЕРАТУРНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ТЕНЗОМЕТРА ПРИ ВИМІРЮВАННІ СТАТИЧНИХ ТА ТЕРМІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРІ ДО 700 °С

Виконано огляд існуючих методів вимірювання статичних напружень при підвищених температурах, при яких проблемно користуватися класичними тензорезисторами, та способів компенсації уявної температурної деформації. А саме: використання багатокомпонентних сплавів, виготовленню активного та компенсаційного чутливих елементів з різних сплавів, які теоретично повинні компенсувати недоліки один одного. На практиці, у достатній мірі, цього можна досягти тільки у вузькому діапазоні температур. Описаний первинний перетворювач - тензометрична прямокутна розетка для вимірювання статичних та термічних напружень в деталях конструкцій, що працюють в екстремальних умовах при температурах до 700 °С. Цей датчик є двошаровою розеткою, що складається з двох чутливих елементів (ЧЕ), головні осі яких повернені відносно один одного на 90°. Нижній ЧЕ сприймає основну деформацію деталі, а верхній, розташований над нижнім, грає роль температурно-компенсуючого електроопору елемента і одночасно реєструє поперечну деформацію деталі. ЧЕ розетки були виготовлені з дроту діаметром 30 мкм сплаву Х20Н80 та закріплені між собою та на деталі за допомогою цементу Ц-165-32А. Експериментальне дослідження полягало у визначенні температурної характеристики опору як нижнього, так і верхнього ЧЕ досліджуваного тензометричного датчика, пов'язаної з температурним розширенням системи деталь-тензометр, а також із шунтуванням ізолятора-сполучного та зміною питомого опору матеріалу ЧЕ. Виконано експериментальне визначення величини уявної деформації тензометра за різних температур. З метою визначення впливу коефіцієнта лінійного розширення матеріалу деталі зміну опору ЧЕ тензометри закріплювалися на зразки різних матеріалів. Показано зміну уявної деформації тензометра в інтервалі температур від кімнатної до 700 °С. Її максимальне значення для керамічного зразка складо менше 350 мкм/м, для зразка із сталі 30ХГСА менше 1000 мкм/м, а для зразка зі сплаву ВЖЛ14Н-В1 менше 750 мкм/м. Отримано залежності, що дозволяють внесення поправок у результат реального дослідження напруженого стану деталі з метою досягнення максимальної точності вимірювань.

Ключові слова: тензометр; чутливий елемент; статична деформація; шунтування.

Вступ

При вимірі статичних деформацій деталей і конструкцій АГТД в умовах змінних температур на випробувальному стенді або на літальному апараті виникає проблема у виключенні уявних температурних деформацій.

При зміні температури досліджуваної деталі та тензометра, встановленого на неї, відбувається температурна деформація деталі, чутливої решітки тензорезистора, підкладки датчика та клею-сполучного.

Під температурною характеристикою опору тензометра розуміється зміна електроопору його ЧЕ при підвищенні температури при відсутності механічного навантаження. Ця зміна електроопору залежить від температурного коефіцієнта опору (т.к.о.) матеріалу ЧЕ. У тензометрії прагнуть застосовувати матеріали з низьким значенням т.к.о. Таким матеріалом слід назвати константан – сплав міді із нікелем.

Але температура його застосування при вимірі статичних деформацій не перевищує 250-300 °С. Ця зміна опору ЧЕ сприймається вимірювальною системою як уявна деформація. [1]

У роботі [4] для вимірювання статичних деформацій пропонується багатокомпонентний сплав Fe-Cr-Al-V-Ti-Y. При наклеюванні на жароміцний сплав на основі нікелю GH30 уявна деформація від кімнатної температури до 700 °С складала 1800 мкм/м. Саме там розглядається застосування сплаву платини з вольфрамом (9 Pt-W9,5). Компенсуючі елементи були виготовлені з дроту зі сплаву Pt-Ir20, уявна деформація для тензометра, що розглядається, у відповідному діапазоні температур становить 1000 мкм/м.

Деформація, яка сприймається тензометром, залежить також від наступних факторів:

– відповідно до коефіцієнта лінійного розширення матеріалу деталі відбувається збільшення її лінійних розмірів при нагріванні, а це призводить до

подовження ЧЕ тензометра та збільшення його електроопору. Це явище в тензометрії досліджено багатьма авторами і зокрема представлено в роботі [2];

– у роботі [3] автор стверджує, що зміна провідних характеристик випробуваних сплавів відбулася через окислення дроту ЧЕ внаслідок зміни результуючих діаметральних розмірів;

– електроізоляційні властивості різних матеріалів клею-сполучного тензометра значно зменшуються при роботі в умовах підвищеної вологості та при нагріванні до температур вище 450 500 °С, це призводить до появи струмів шунтування від ЧЕ тензометра на тіло деталі, і в свою чергу, реєструючою апаратурою сприймається як від'ємна уявна деформація, яка, може, як стверджують автори роботи [5], бути внесена в результати виміру у вигляді поправок.

При зміні температури, через присутність у системі деталь-тензорезистор кількох компонентів, що мають нелінійні характеристики, неможливо розрахувати аналітично зміну вихідного сигналу тензометра.

Внаслідок чого необхідно заздалегідь визначити величину уявної деформації тензометра на конкретній деталі, щоб згодом вводити поправки до результатів досліджень.

Об'єкт дослідження

У представленій роботі розглядається тензометр (тензометричний датчик), що є прямокутною розеткою, що складається з двох ЧЕ розташованих в ізоляторі-сполучному. Головні осі ЧЕ повернуті одна відносно іншої на 90° (рис. 1). Нижній ЧЕ тензометричного датчика встановлюється на деталі так, щоб його головна вісь збігалася з напрямком вектора дії основного силового впливу та закріплюється за допомогою ізолятора сполучного. Верхній ЧЕ, розташований над нижнім, відіграє роль температурно-компенсуючого елемента і одночасно реєструє поперечну деформацію деталі.

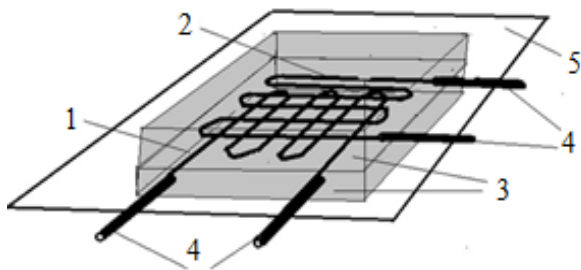


Рис. 1. Тензометричний датчик: 1, 2 – нижній та верхній ЧЕ відповідно; 3 – ізолятор-сполучне; 4 – відвідні провідники; 5 – поверхня деталі

ЧЕ датчика виготовлені з дроту сплаву ніхром (Х20Н80) діаметром 30 мкм. База ЧЕ – 3 мм, а елект-

роопір при 20 °С дорівнює 63 Ом. Коефіцієнт тензочутливості вибраного ніхрому становив 1,87.

В якості ізолятора-сполучного, для закріплення ЧЕ, використовувався високотемпературний цемент Ц-165-32А. До складу цементу входять: сполучне (етиловий ефір ортокремнієвої кислоти, спирт етиловий, борна кислота, вода дистильована), затверджувач (аміак та дистильована вода), розчинник (етилцелозоль), наповнювач (електрокорунд марки Е9А)

Експериментальне дослідження

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

А також визначити величину уявної температурної деформації тензометра в залежності від температури досліджуваної деталі.

Тензометри закріплювалися на трьох видах зразків:

– циліндричний, стандартний зразок на розтяг діаметром 10 мм, виготовлений зі сталі 30ХГСА – рис. 2;

– пластина товщиною 1,5 мм виготовлена зі сплаву ВЖЛ14Н-ВІ, що застосовується в авіаційних газотурбінних двигунах при виготовленні елементів жарових труб камер згоряння. (ОСТ 1 90126-85) – рис. 3.



Рис. 2. Препарований тензометром стандартний зразок на розтяг

Пластина товщиною 2,5 мм виготовлена з кераміки (електрокорунд зі сполучним з технічного глинозему та пластифікатора на парафіновій основі), яка застосовується для виготовлення стрижнів каналів охолодження лопаток турбін, що застосовуються при їх литті – рис. 4.

Зразки, із встановленими на них тензOMETрами, піддавалися повільному нагріванню від 20 до 700 °С, (протягом 2-х годин).

Кожен ЧЕ тензOMETра для виключення впливу з'єднувальних проводів був підключений до реєструючої апаратури за допомогою 4-х провідної, потенціометричної схеми в режимі вимірювання електричного опору, рис. 5.



Рис. 3. Препарована тензOMETром пластина зі сплаву ВЖЛ14Н-ВІ



Рис. 4. Препаровані тензOMETром керамічні пластини

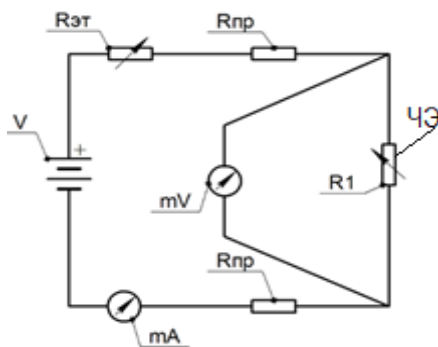


Рис. 5. Потенціометрична схема підключення чутливого елемента (R_1)

При дослідженнях застосовувалася вимірювальна система НВМ QuantumX MX1615В з наступними характеристиками:

- 24-bit дельта сигма аналогово цифровий перетворювач (ADC Delta Sigma converter);
- клас точності: 0,1;
- вимірюваний діапазон опору: 0...500 Ом;

- шум (розмах) < 0,1 Ом;
- нелінійність < 0,05.

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

За отриманими даними, були розраховані наступні параметри для кожної пари ЧЕ тензOMETрів в процесі нагрівання:

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

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(R_i - R_0)}{R_0} \quad (1)$$

Уявна температурна деформація тензOMETра залежно від температури деталі. ($\epsilon_{уявна}$)

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

де R_i – опір ЧЕ тензOMETра при определённой температурі,

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

R_0 – початковий опір ЧЕ тензOMETра при кімнатній температурі,

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

Аналізуючи результати вимірювань, була зафіксована нерівномірність отриманої досліджуваної характеристики при першому нагріванні, що, ймовірно, пов'язане з процесом спікання клею-зв'язуючого тензOMETра. 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 тензOMETра 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 тензOMETра від температури ($\Delta R/R$) = $f(t)$ – рис. 6 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, у зв'язку із зменшенням електроізолюючих властивостей останнього.

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

Графіки рис. 6 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, визначалася за формулою (2).

Зміна уявної деформації тензометра в залежності від температури для різних досліджуваних зразків представлена на рис. 7.

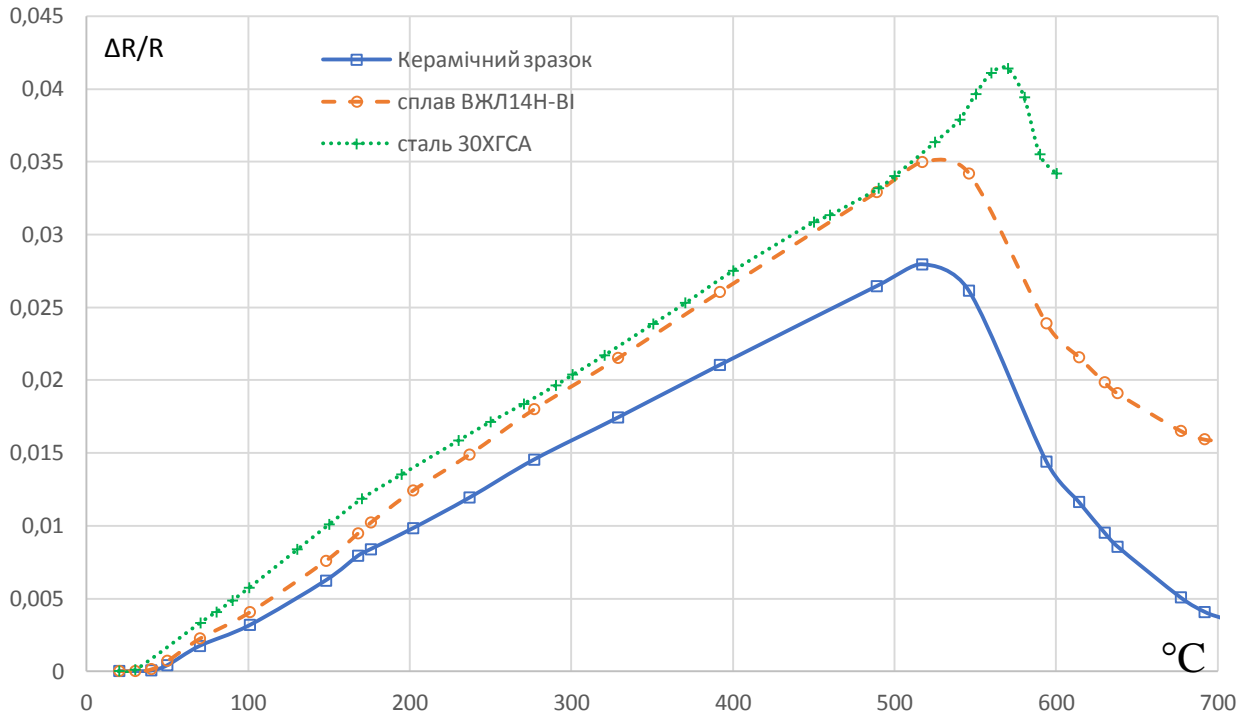


Рис. 6. Відносна зміна електроопору тензометричного датчика (тензометра) від температури

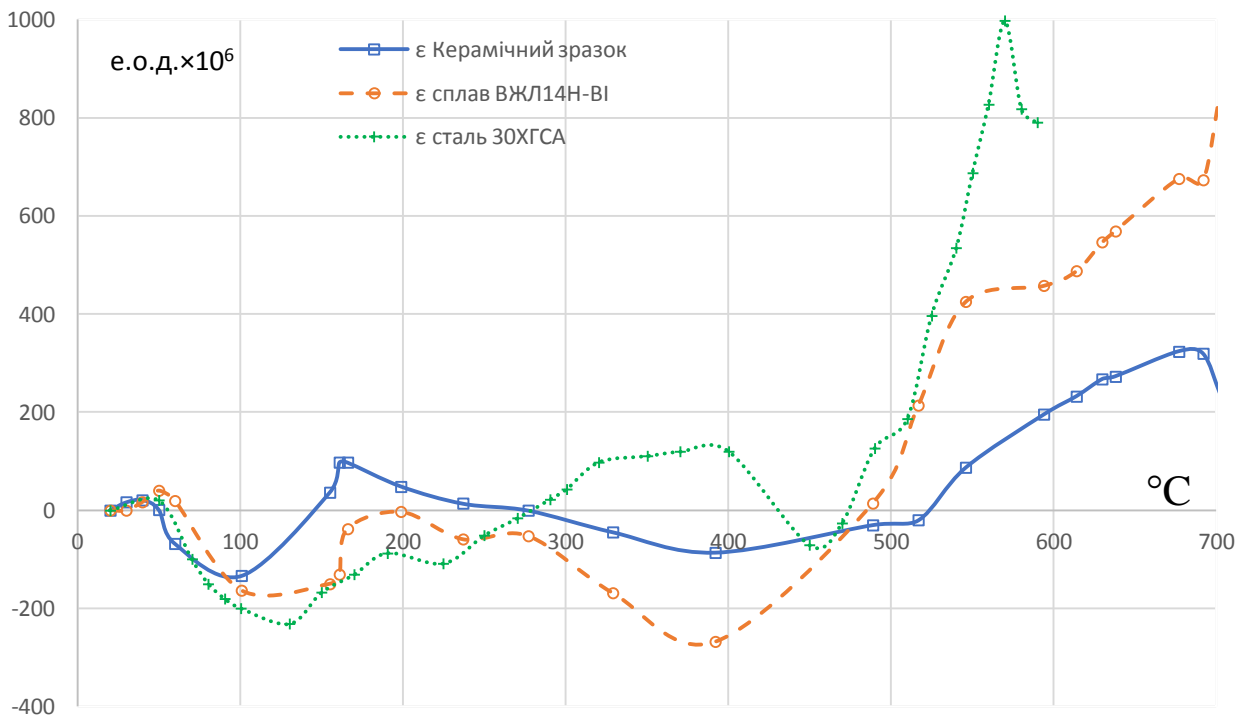


Рис. 7. Уявна температурна деформація тензометра в залежності від температури деталі (ε, е.о.д.×10⁶)

На уявну температурну деформацію тензومتра (прямокутна розетка), згідно з формулою (2), впливає незначна різниця вихідних характеристик двох ЧЕ тензومتра (див. рис. 1). Незважаючи на те, що вони знаходяться в однакових температурних умовах, вони відрізняються початковим опором, коефіцієнтом тензочутливості і просторовим розташуванням дротяних ниток. Зменшити уявну температурну деформацію тензومتра-розетки можна підбором ЧЕ.

Висновки

Була отримана температурна характеристика тензодатчика що складається з двох тензорезисторів розташованих один над одним під кутом 90° встановленого на зразках, виготовлених з різних матеріалів і різної конфігурації.

Уявна температурна деформація тензومتра при температурі до 500 °С, на всіх зразках, не перевищує 250 мкм/м.

У діапазоні від 500 до 700 °С уявна температурна деформація склала не більше:

- для зразка із сталі 30ХГСА – 1000 мкм/м;
- для керамічного зразка – 350 мкм/м;
- для зразка із сплаву ВЖЛ14Н-ВИ – 750 мкм/м.

Повністю виключити вплив температури на електроопір ЧЕ тензومتра (прямокутна розетка) не можливо. При визначенні статичної напруги у високо нагрітих елементах конструкції таким тензометром необхідно при попередньому нагріванні конструкції, без силового навантаження, отримати температурну характеристику ЧЕ. Це дозволить обчислити значення уявної деформації на різних температурних ділянках роботи конструкції та ввести поправку в отримані експериментальні значення статичної деформації.

Внесок авторів: вступ – **Ю. О. Гусєв, С. С. Кригін;** об'єкт дослідження – **Ю. І. Торба, С. С. Кригін;** експериментальне дослідження – **С. С. Кригін, Ю. І. Торба;** висновки – **Ю. О. Гусєв, С. С. Кригін.**

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису

Література

1. Holmes, H. K. *High temperature strain gage apparent strain compensation [Text]* / H. K. Holmes, T. C. Moore // *The 1992 NASA Langley Measurement Technology Conference: Measurement Technology for Aerospace Applications in High-Temperature Environments*, no. N93-13672, pp. 211-222.

2. *Strain Gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature. Technical Note, TN-504-1 [Text]*. – Measurement Group, Inc., P. O. Box 27777, Raleigh, North Carolina 27611. – 2014. – P. 1-13.

3. Bertodo, R. *Development of High-Temperature Strain Gauges [Text]* / R. Bertodo // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. – 1959. – № 173-1. – P. 605-622. DOI: 10.1243/pime_proc_1959_173_052_02.

4. Wu, Tsen-tai. *Development of Temperature-compensated Resistance Strain Gages for Use to 700°C [Text]* / Tsen-tai Wu, Liang-cheng Ma, Lin-bao Zhao // *Experimental Mechanics*. – 1981. – № 21. – P. 117-123. DOI: 10.1007/bf02326368.

5. Гусєв, Ю. А. *Влияние шунтирования высокотемпературных тензорезисторов на точность измерения статических деформаций элементов ГТД [Текст]* / Ю. А. Гусєв, А. С. Гольцов, С. С. Крыгин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 4 спецвипуск 2 (182). – С. 35-41. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup2.06.

References

1. Holmes, H. K. & Moore, T. C. High temperature strain gage apparent strain compensation. *The 1992 NASA Langley Measurement Technology Conference: Measurement Technology for Aerospace Applications in High-Temperature Environments*, no. N93-13672, pp. 211-222.

2. *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, pp. 1-13.

3. Bertodo, R. *Development of High-Temperature Strain Gauges Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1959, no 173-1, pp. 605-622. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1959_173_052_02.

4. Wu, Tt., Ma, Lc. & Zhao, Lb. Development of temperature-compensated resistance strain gages for use to 700°C. *Experimental Mechanics* March, 1981, no. 21, pp. 117-123. DOI: 10.1007/BF02326368

5. Gusev, Yu. A., Gol'tsov, A. S. & Krygin, S. S. *Vliyanie shuntirovaniya vysokotemperaturnykh tenzorезistorov na tochnost' izmereniya sticheskiх deformatsii elementov GTD [Influence of shunting of high-temperature strain gauges on the accuracy of measurement of static deformations of GTE elements]. Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 4sup2 (182), pp. 35-41. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup2.06.

**TEMPERATURE CHARACTERISTIC OF THE ELECTRICAL RESISTANCE
OF THE STRAIN GAUGE WHEN MEASURING STATIC AND THERMAL STRESSES
OF PARTS AT TEMPERATURES UP TO 700°C**

Serhiy Kryhin, Yuriy Husyev, Yuriy Torba

An overview of the existing methods of measuring static stresses at elevated temperatures, at which it is problematic to use classical strain gauges, and methods of compensating the imaginary temperature deformation was performed. Namely: the use of multi-component alloys, the manufacture of active and compensatory sensitive elements from different alloys, which should theoretically compensate for each other's shortcomings. In practice, this can be sufficiently achieved only in a narrow temperature range. The described primary transducer is a rectangular strain-gauge rosette for measuring static and thermal stresses in structural parts operating under extreme conditions at temperatures up to 700°C. This sensor is a two-layer rosette consisting of two sensitive elements (SE), the main axes of which are rotated relative to each other by 90°. The lower SE perceives the main deformation of the part, and the upper one, located above the lower one, plays the role of a temperature-compensating electrical resistance of the element and simultaneously registers the transverse deformation of the part. SE rosettes were made of a wire with a diameter of 30 microns of the X20H80 alloy and fixed to each other and to the part using Ц-165-32А cement. The experimental study consisted in determining the temperature characteristics of the resistance of both the lower and the upper SE of the studied strain gauge associated with the temperature expansion of the part-strain gauge system as well as with the shunting of the insulator-connector and the change in the specific resistance of the SE material. Experimental determination of apparent strain gauge deformation at different temperatures was performed. To determine the influence of the coefficient of linear expansion of the material of the part on the change in the resistance of the SE, strain gauges were attached to samples of various materials. The change in the apparent deformation of the strain gauge in the temperature range from room temperature to 700 °C is shown. Its maximum value for the ceramic sample was less than 350 μm/m, for the 30ХГСА steel sample it was less than 1000 μm/m, and for the ВЖЛ14Н-ВІ alloy sample it was less than 750 μm/m. Dependencies were obtained that allow corrections to be made in the result of a real study of the stressed state of the part to achieve the maximum accuracy of measurements.

Keywords: strain gauge; sensitive element; static deformation; shunt currents.

Кригін Сергій Сергійович – асп. каф. конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків; провідний інженер експериментально-випробувального комплексу ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Гусєв Юрій Олексійович – канд. техн. наук, доц., проф. каф. конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

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

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

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

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