

УДК 531.781.2

doi: 10.32620/aktt.2024.4.05

С. С. КРИГІН

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна
ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна*

СИЛОВОЕ ТАРУВАННЯ ТЕНЗОМЕТРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СТАТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ АГТД ПРИ ТЕМПЕРАТУРІ ДО 700 °С

Тензометричні датчики використовуються при вимірюванні параметрів поверхні деталей двигунів для оцінки передових матеріалів і компонентів, включаючи газові турбіни, і для забезпечення експериментальної перевірки обчислювальних моделей. Для кількісного визначення механічної напруги використовуються значення опору тензодатчика. Однак електричний опір тензодатчика також є функцією деформації та температури. Ці відхилення від ідеальної поведінки можуть бути важливими за певних обставин і можуть викликати значні помилки. ця похибка залежить від тензодатчика та від матеріалу деталі, до якого він прикріплений. При вимірі статичних деформацій деталей і конструкцій АГТД в умовах змінних температур виникає проблема у виключенні уявних температурних деформацій. При зміні температури досліджуваної деталі та тензометра, встановленого на неї, відбувається температурна деформація деталі, чутливої решітки тензорезистора та клею-сполучного. 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 X20H80 та закріплені між собою та на деталі за допомогою цементу ВКП-26Ц. Експериментальне дослідження полягало у визначенні силової характеристики опору як нижнього, так і верхнього ЧЕ досліджуваного тензометричного датчика, встановленого на зразок на розтяг, та відокремлення, за допомогою розрахунку, похибок пов'язаних із впливом температурного розширення системи деталь-тензометр, зміною питомого опору матеріалу ЧЕ, а також із шунтуванням ізолятора-сполучного. Отримані результати дозволяють використання даного датчика при дослідженні деталей АГТД з достатньою точністю.

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

Вступ

Розвиток аерокосмічних силових установок і систем виробництва електроенергії потребує вимірювання високотемпературної деформації для моніторингу стану гарячих компонентів, наприклад, камери згоряння або лопаток турбіни авіаційного двигуна, у разі відмови, через втому або повзучість після тривалої роботи в умовах вібрації та високої температури середовища [1, 2].

Щоб задовольнити нагальні потреби в дослідженнях деформацій та температури в суворих умовах у агресивних середовищах аеронавтики та аерокосмічних випробуваннях, де градієнти напружень та температури високі, використовують тензометричні датчики для вимірювання параметрів поверхні. Вони необхідні в системах двигунів для оцінки передових матеріалів і компонентів, включаючи газові

турбіни [3], і для забезпечення експериментальної перевірки обчислювальних моделей.

Для тензодатчика значення опору використовуються для кількісного визначення механічної напруги. Однак електричний опір тензодатчика також є функцією деформації та температури. Ці відхилення від ідеальної поведінки можуть бути важливими за певних обставин і можуть викликати значні помилки [4]. Крім того, слід зазначити, що ця реакція залежить не тільки від природи тензодатчика, а й від матеріалу, до якого він прикріплений.

При вимірі статичних деформацій деталей і конструкцій АГТД в умовах змінних температур виникає проблема у виключенні уявних температурних деформацій.

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

Усвідомлення впливу термічних ефектів на тензодатчики не є новим. Було запропоновано декілька рішень для подолання проблеми компенсації за допомогою ідентичних компенсаційних датчиків у мостовій схемі [5, 6]. Ці рішення, засновані на повній або напівмостовій конфігурації, зазвичай використовуються у вузькому діапазоні температур. Недоліком існуючих компенсаційних датчиків є те, що контрольний датчик і активний повинні піддаватися однакової температурі, а також контрольний датчик повинен бути ізольований від механічних напружень.

Існують також тензодатчики з самотемпературною компенсацією, для яких вимоги до відповідного ненапруженого фіктивного датчика були значно послаблені [7]. Насправді цей тип датчика компенсується для однієї температури.

Однак ці датчики залежать від температури, а модель залежності подібна до некомпенсованих датчиків. Зараз загальноприйнятою практикою під час вимірювання деформації при кімнатній або близькій до неї температурі є використання одного вимірювального приладу з компенсацією само температури у чверть мостовій конструкції, коли він з'єднаний з матеріалами з коефіцієнтами теплового розширення, для яких вони призначені. На жаль, залежно від точності, необхідної для вимірювання деформації, часто необхідно вносити поправки на уявну деформацію, навіть якщо використовуються датчики з само компенсацією температури.

При зміні температури, через присутність у системі деталь-тензорезистор кількох компонентів, що мають нелінійні характеристики, неможливо розрахувати аналітично зміну вихідного сигналу тензотра [8].

Представлене технічне рішення, тензометричний пристрій для вимірювання відносних деформацій деталей авіаційних двигунів, які знаходяться під впливом високих температур, надійно з'єднується з об'єктом дослідження за допомогою клею-цементу, що дозволило вимірювати відносні деформації з підвищеною точністю при високих температурах. При цьому компенсується адитивна температурна похибка в процесі випробувань за рахунок взаємного розташування чутливих елементів тензометричного пристрою.

Досліджуваний тензодатчик має бути придатним для використання з будь-яким типом тензорезистора, прикріпленого до будь-якого матеріалу підкладки. Іноді відомі характеристики чутливого елемента та сполучного матеріалу; використовуються коефіцієнти, надані виробником. Однак у більшості випадків характеристики сполучного матеріалу невідомі.

Помилка може бути спричинена технікою склеювання та геометричними відмінностями між еталонним і досліджуваним матеріалами. Крім того, досліджуваний матеріал часто є сплавом, який не має відповідного еталону у виробника.

Це рішення може бути адаптоване до будь-якого типу тензодатчиків, прикріплених до будь-якого типу матеріалів підкладки, і дозволяє легке підключення до комунікаційної мережі.

Схема вимірювального датчика та його оточення показано на рис. 1.

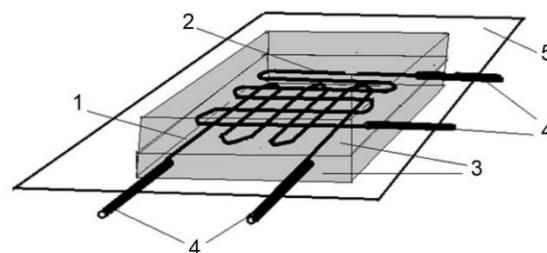


Рис. 1. Тензометричний датчик:
1, 2 – нижній та верхній ЧЕ відповідно;
3 – ізолятор-сполучне; 4 – відвідні провідники;
5 – поверхня деталі

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.

ЧЕ датчика виготовлені з дроту сплаву ніхром (X20H80) діаметром 30 мкм. База ЧЕ – 5 мм, а електроопір при 20°C дорівнює 63 Ом. Коефіцієнт тензочутливості вибраного ніхрому становив 1,87.

В якості ізолятора-сполучного, для закріплення ЧЕ, використовувався високотемпературний цемент ВКП-26Ц.

Експериментальне дослідження

Експериментальне дослідження полягало у визначенні силової характеристики досліджуваного тензометричного пристрою (опору як нижнього, так і верхнього ЧЕ), пов'язаної з статичною деформацією,

температурним розширенням системи деталь-тензометр, а також із шунтуванням ізоляції (ізолятора-сполучного) та зміною питомого опору матеріалу ЧЕ, оцінити частку похибки.

Тензометри закріплювалися на стандартних зразках на розтяг діаметром 10 мм, виготовлений зі сталі 30ХГСА (поперечний переріз 78,54 мм²)– рис. 2;

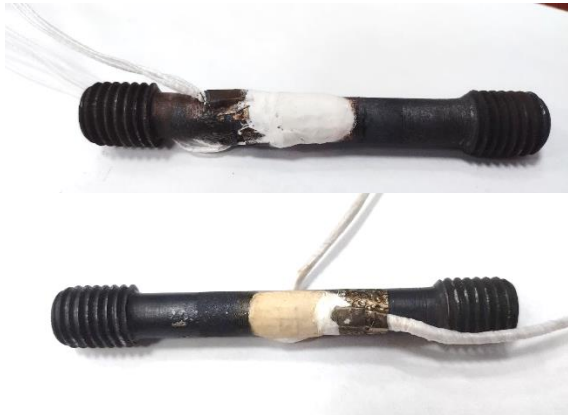


Рис. 2. Препарований тензометром циліндричний, стандартний зразок на розтяг діаметром 10 мм

Кожен ЧЕ тензометра для виключення впливу з'єднувальних проводів був підключений до реєструючої апаратури за чотирипровідною, потенціометричною схемою, в режимі вимірювання електричного опору, рис. 3.

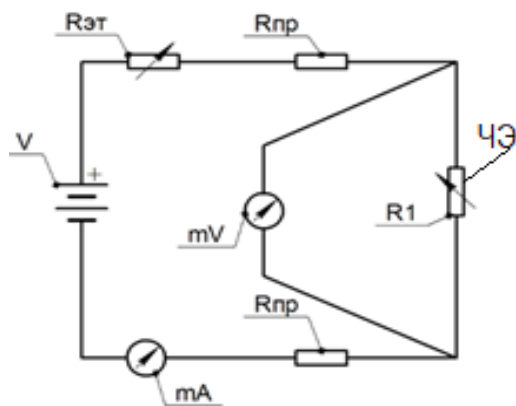


Рис. 3. Потенціометрична схема підключення чутливого елемента (R1)

Зразки, із встановленими на них тензометрами, піддавалися повільному нагріванню до температури 20, 200 та 600 °С, витримці для стабілізації температури, та навантаженню на випробувальній машині (рис. 4) силою ступенями на 400, 800, 1200 та 1600 кгс по три рази. Що відповідає напруженням зразка 5, 10, 15, 20 кгс/мм².

Модуль пружності обраного матеріалу при досліджуваних температурах становив [9]:

$$20\text{ °С} - 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа,}$$

$$200\text{ °С} - 2,03 \cdot 10^5 \text{ МПа,}$$

$$600\text{ °С} - 1,64 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Відносна деформація зразка, враховуючи модуль пружності становила відповідно:

$$\text{при } 20\text{ °С} - 240, 480, 718, 950 \text{ мкм/м;}$$

$$\text{при } 200\text{ °С} - 255, 510, 760, 1012 \text{ мкм/м;}$$

$$\text{при } 600\text{ °С} - 318, 632, 942, 1253 \text{ мкм/м.}$$

При дослідженнях застосовувалася вимірювальна система НВМ QuantumX MX1615В

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



Рис. 4. Випробувальна машина РМ-100 для досліджень на розтяг-стиск з встановленою пічкою

Під час випробування вівся постійний запис опору ЧЕ

З отриманих даних за формулою (1) розраховувалася відносна деформація зразка

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

де R_H , R_B – опір поздовжнього та поперечного ЧЕ тензометра,

R_0 – початковий опір ЧЕ тензометра при кімнатній температурі,

$K = 1,78$ – коефіцієнт тензочутливості партії ЧЕ тензометра,

μ – коефіцієнт Пуансона матеріалу деталі.

Результати дослідження відносної деформації тензометричного датчика наведені на рисунку 5.

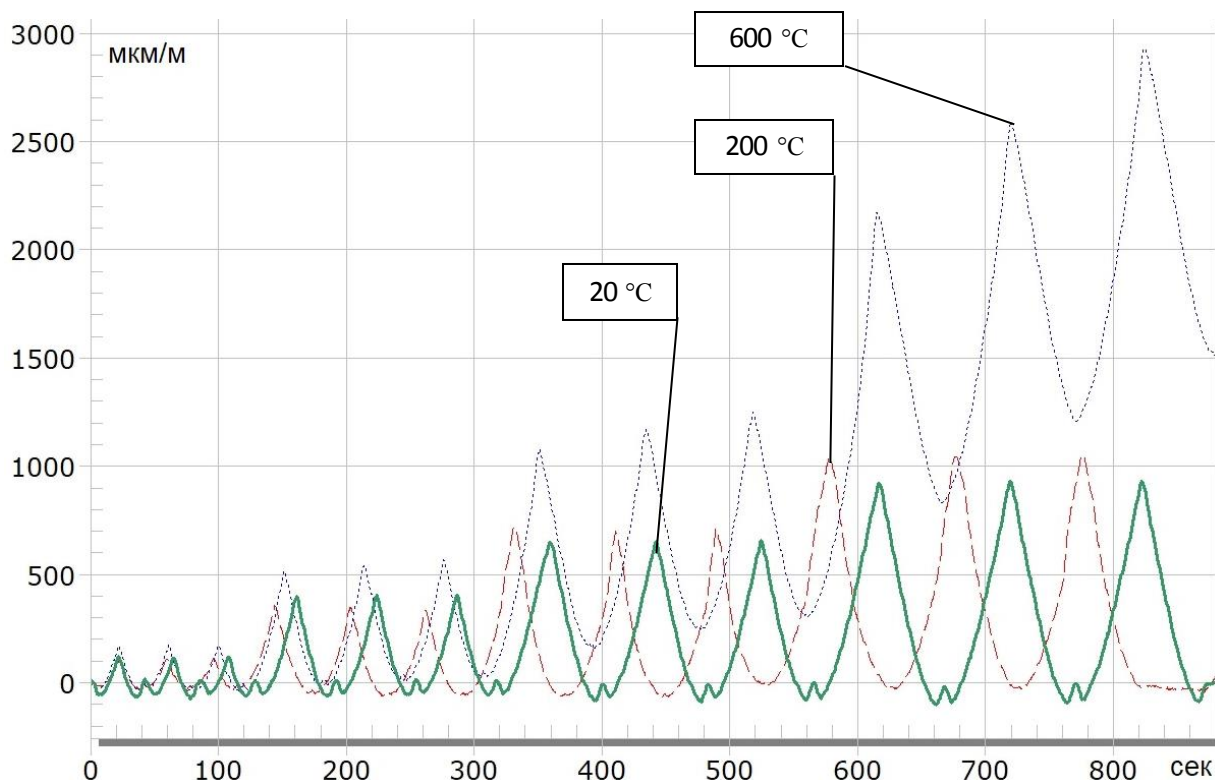


Рис. 5. Виміряна відносна деформація тензометричного датчика (тензометра) при температурах 20, 200, 600 °C (ϵ , е.о.д. $\times 10^6$)

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

Аналізуючи результати вимірювань, була зафіксована пластична деформація зразка при дослідженні з температурою 600 °C.

Приведений спосіб вимірювання та розрахунку відносних деформацій показав відповідність розрахункам та майже повну компенсацію адитивної похибки, що спричинена температурними складовими.

На уявну температурну деформацію тензометра (прямокутна розетка), згідно з формулою (1), впливає незначна різниця вихідних характеристик двох ЧЕ тензометра (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 тензометра-розетки можна підбором ЧЕ.

Майбутні роботи

Одним із цікавих удосконалень представленого датчика було б використання чутливих елементів з матеріалу з більшим коефіцієнтом тензочутливості та меншою чутливості до температури. Також мож-

ливо використання клею сполучного здатного витримувати більші механічні деформації.

Оптимізація складових датчика для відповідності коефіцієнта температурного лінійного розширення деталі та датчика.

Висновки

У цій статті представлений дизайн експериментального двошарового тензодатчика.

Була отримана силова характеристика тензодатчика, що складається з двох тензорезисторів розташованих один над одним під кутом 90° встановленого на зразках на розтяг при різних температурах.

Температури дослідження 20, 200, 600 °C

Зразки були навантажені силою, еквівалентною 5, 10, 15, 20 кгс/мм²

Для визначення статичних напружень у високо нагрітих елементах конструкцій таким тензометром необхідно виконати попереднє нагрівання конструкції або тензодатчика для стабілізації чутливих елементів.

Отримані дані з достатньою точністю відповідають розрахованим величинам.

Конфлікт інтересів

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

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Подяка

Автор висловлює подяку науковим керівникам: Гусеву Ю.А. та Торбі Ю.І.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Mouritz, A. P. *Introduction to Aerospace Materials* [Text] / A. P. Mouritz. – Woodhead Publishing, Sawston : Cambridge, UK, 2012. – P. 251. DOI: 10.1533/9780857095152.
2. *Development and application of high-temperature sensors and electronics for propulsion applications* [Text] / G. W. Hunter, J. D. Wrbanek, R. S. Okojie [et al.] // *Sensors for Propulsion Measurement Applications. Proc. of SPIE.* – 2006. – Vol. 6222. – Article No. 622209-1. DOI: 10.1117/12.668458.
3. Wu, T. *Development of temperature-compensated resistance strain gages for use to 700 °C* [Text] / Tsen-tai Wu, Liang-cheng Ma, Lin-bao Zhao // *Experimental Mechanics March.* – 1981. – Vol. 21. – P. 117–123. DOI: 10.1007/BF02326368.
4. 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.* – Hampton, Virginia. 1992. – No. N93-13672. – P. 211-222. – Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930004484/downloads/19930004484.pdf>. (accessed 10.3.2024).
5. *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.
6. Bertodo, R. *Development of High-Temperature Strain Gauges* [Text] / R. Bertodo // *Proceedings of the*

Institution of Mechanical Engineers. – 1959. – Vol. 173, iss 1. – P. 605–622. DOI: 10.1243/pime_proc_1959_173_052_02.

7. Wu, T. *Development of temperature-compensated resistance strain gages for use to 700°C.* [Text] / Tsen-tai Wu, Liang-cheng Ma, Lin-bao Zhao // *Experimental Mechanics March.* – 1981. – №. 21. – P. 117–123. DOI: 10.1007/BF02326368.

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

9. *Plastic deformation and ductile fracture of L907A ship steel at increasing strain rate and temperature* [Text] / Xue Li, Runpei Yu, Pengfei Wang [et al.] // *International Journal of Impact Engineering.* – 2023. – Vol. 174. – Article No. 104515. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104515.

References

1. Mouritz, A. P. *Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing, Sawston, Cambridge, UK, 2012, pp. 251. DOI: 10.1533/9780857095152.
2. Hunter, G. W., Wrbanek, J. D., Okojie, R. S., Neudeck, P. G., Fralick, G. C., Chen, L., Xu, J., & Beheim, G. M. Development and application of high-temperature sensors and electronics for propulsion applications. *Sensors for Propulsion Measurement Applications. Proc. of SPIE*, 2006, vol. 6222, article no. 622209-1. DOI: 10.1117/12.668458.
3. Wu, T., Ma, L., & Zhao, L. Development of temperature-compensated resistance strain gages for use to 700°C. *Experimental Mechanics*, 1981, no. 21, pp. 117–123. DOI: 10.1007/BF02326368.
4. Holmes, H. K., & Moore, T. C. High temperature strain gage apparent strain compensation. *The 1992 NASA Langley Measurement Technology Conference: Measurement Technology for Aerospace Application in High-Temperature Environments*, no. N93-13672, pp. 211-222. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930004484/downloads/19930004484.pdf>. (accessed 10.3.2024)
5. *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.
6. Bertodo, R. Development of High-Temperature Strain Gauges *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1959, vol. 173, iss. 1, pp. 605–622. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1959_173_052_02.
7. Wu, T., Ma, L., & Zhao, L. Development of temperature-compensated resistance strain gages for use to 700°C. *Experimental Mechanics*, 1981, no. 21, pp. 117–123. DOI: 10.1007/BF02326368.

8. Gusev, Yu. A., Gol'tsov, A. S., & Krygin, S. S. Vliyaniye shuntirovaniya vysokotemperaturnykh tenzorezistorov na tochnost'; izmereniya staticheskikh deformatsii elementov GTD [Influence of shunting of high-temperature strain gauges on the accuracy of measurement of static deformations of GTE elements]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya – Aerospace Engineering and Technology*, 2022, no. 4sup2 (182), pp. 35-41. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup2.06.

9. Li, X., Yu, R., Wang, P., Kang, R., Shu, Z., Yue, Z., Zhao, Z., Wang, X., & Lu, J. T. Plastic deformation and ductile fracture of L907A ship steel at increasing strain rate and temperature, *International Journal of Impact Engineering*, 2023, vol. 174, article no. 104515. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104515.

Надійшла до редакції 20.05.2024, розглянута на редколегії 15.08.2024

FORCE CALIBRATION OF TENSION METER FOR MEASURING STATIC TENSIONS OF AGTD PARTS AT TEMPERATURES UP TO 700 °C

Serhiy Kryhin

Strain gauges are used in the measurement of surface parameters of engine parts to evaluate advanced materials and components, including gas turbines, and to provide experimental validation of computational models. To quantitatively determine the mechanical stress, the resistance values of the strain gauge were used. However, the electrical resistance of the strain gauge is also a function of the strain and temperature. These deviations from ideal behavior can be important under certain circumstances and can cause significant errors. These errors depend on the strain gauge and the material of the part to which they are attached. When measuring the static deformations of parts and structures of GTEs under variable temperatures, there is a problem in excluding imaginary temperature deformations. When the temperature of the tested part and the strain gauge installed on it change, temperature deformation of the part, the sensitive grid of the strain gauge, and the adhesive connector occur. The primary transducer described herein is a tensometric rectangular socket 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 socket 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 the temperature-compensating electrical resistance of the element and simultaneously registers the transverse deformation of the part. SE sockets were made of wire with a diameter of 30 microns of X20N80 alloy and were fixed between themselves and on the parts with the help of VKP-26C cement. The experimental study consisted of determining the strength characteristic of the resistance of both the lower and upper SE of the tested strain gauge mounted on a tensile sample, and separating, by means of calculation, errors associated with the thermal expansion effect of the part-strain gauge system, the change in the specific resistance of the SE material, as well as with shunting of the insulator-connector. The obtained results allow the use of this sensor in the study of GTE parts with sufficient accuracy.

Keywords: strain gauge; sensitive element; static deformation; force tare; shunting.

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

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