

Корисна модель належить до вимірювальної техніки та призначена для одночасного дослідження температури та напружено-деформованого стану деталей, які знаходяться під впливом високих температур, зокрема за допомогою тензометричного методу.

За допомогою тензометричного методу одночасно визначають дійсні температуру та напружено-деформований стан відповідальних деталей, а саме - валів, робочих лопаток, дисків, корпусів двигуна і агрегатів, трубок паливних і оливних систем, що виникає на експлуатаційних або граничних режимах роботи авіадвигуна. Особливо складно досліджувати деталі, які являють собою криволінійні тонкостінні оболонки та знаходяться під впливом великого градієнту температур та широкого діапазону сил.

Відомий спосіб одночасного вимірювання температури та деформації деталей, що мають значний температурний градієнт, за рахунок внесення поправки на температурне прирощення опору чутливих елементів ("Тензорезисторы: теория, методики расчета, разработки.", Клокова Н.П. - М.: "Машиностроение", 1990, с. 145-146), для чого використовують тензотерморезистор, що складається з тензочутливого і термочутливого елементів, які розташовані на одній основі. Термочутливий елемент, виготовлений з термочутливого матеріалу, обрамляє з трьох сторін декількома витками тензочутливий елемент, який включають в активне плече вимірювального моста. Підключення тензочутливого і термочутливого елементів до реєстратора виконують за допомогою монтажних проводів.

Дійсно, спосіб внесення поправки на температурне прирощення опору тензочутливого елемента дозволяє підвищити точність одночасного вимірювання температури та деформації деталі за умови застосування тензочутливого і термочутливого елементів, які розташовані на одній основі, та наявності заздалегідь визначеної залежності температурної характеристики опору використаної партії тензорезисторів.

Недоліком цього способу є низька точність виміру температури за рахунок похибки, що виникає при одночасній зміні температури та деформації досліджуваної деталі, яка не враховується при розрахунку залежності температурної характеристики термочутливого елемента.

Також слід зазначити значну трудомісткість цього способу, який потребує проведення дій з вимірювання та розрахунку залежності температурної характеристики опору тензочутливого і термочутливого елементів, встановлених на досліджувану деталь.

Відомий спосіб одночасного вимірювання деформацій та температури (авторське свідоцтво СРСР № 238853, МПК GO IB 7/16, опубл. 10.03.1969 р., бюл. № 10), що складається з тензорезисторів, підсилювачів, реєстраторів та моста для вимірювання температури, в одне плече якого підключена діагональ моста для вимірювання деформацій.

Тензорезистори складають суміжні плечі моста деформацій, включеного діагоналлю живлення за трипроводною схемою в одне плече моста вимірювання температури. При деформації тензорезисторів на виході підсилювача з'являється сигнал, який залежить від температури, а при нагріванні тензорезисторів на виході підсилювача також з'являється сигнал, який залежить від деформації. Враховуючи показання моста деформації та температурного моста при спільній дії температури та силового фактора на тензорезистори та вирішуючи спільне рівняння, визначають деформацію і температуру, що спостерігалися під час реєстрації вищепоказаних сигналів.

У разі досліджування деталей, які мають складну просторову конструкцію та сприймають широкий діапазон навантажень та дію високих робочих температур (450 °C...800 °C), що призводять до неоднорідних полів температур та деформацій, використання двох тензорезисторів, підключених у діагональ моста для одночасного вимірювання деформації та температури призведе до значних похибок, тому що тензорезистори повинні сприймати однакові за величиною та різні за знаком деформації та мати однакову температуру.

Крім того, трьохпроводна схема підключення одного плеча моста тензорезисторів, при дослідженні деформації деталі, не дозволяє усунути адитивну похибку від температурного впливу на зміну опору провідників, що призведе до значної помилки вимірювання.

Проведення окремих дій з вимірювання та розрахунку залежностей температурної та деформаційної характеристик кожного тензорезистора призводить до збільшеної трудомісткості та до похибки вимірювання за рахунок одночасного впливу температури та деформації на тензорезистори.

Відомий спосіб тензометричного вимірювання відносних деформацій деталей авіаційних двигунів (патент на корисну модель UA158117, клас МПК G01B 7/16, опубл. 01.01.2025, бюл. №1), що містить два чутливих елементи, які скріплюють сполучним з металевою платівкою, яку закріплюють на поверхні досліджуваної деталі за допомогою точкового зварювання, до того ж чутливі елементи розташовують один над одним та паралельно площині металевої платівки, головна вісь одного із чутливих елементів збігається з напрямком деформації досліджуваної деталі та ортогональна головній осі другого чутливого елемента.

Взаємне просторове розташування чутливих елементів дозволяє одночасно вимірювати відносну деформацію та температуру досліджуваної деталі. Для цього використовують чутливий елемент, головна вісь якого збігається з напрямком деформації досліджуваної деталі та ортогональна головній

осі другого чутливого елемента, що сприймає поздовжню відносну та температурну деформації. Зі свого боку другий чутливий елемент сприймає поперечну відносну та температурну деформації. Деформація від досліджуваної деталі сприймається чутливими елементами та надходить у вигляді сигналу до реєструючої апаратури за допомогою провідників. За виміряною температурною деформацією визначають температуру досліджуваної деталі.

Вищезазначений спосіб дозволяє одночасно вимірювати відносну деформацію та температуру з достатньою точністю завдяки надійному скріпленню чутливих елементів з металевою платівкою сполучним, яке ізолює їх один від одного та скріплює в одне ціле, а також надійного з'єднання металевої платівки з поверхнею досліджуваної деталі за допомогою точкового зварювання.

При одночасному вимірюванні температури та деформації високотемпературних деталей за вищеписаним способом точність значним чином залежить від отримання реєструючою апаратурою сигналу, що надходить за допомогою провідників. Похибка, яка виникає від температурного впливу на зміну опору провідників, за величиною співмірна з корисним сигналом при вимірюванні деформації.

Як найближчий аналог вибраний спосіб визначення температури та деформації деталі (патент на винахід RU 2393425, МПК G01B7/16, G01K7/16, опубл. 27.06.2010, бюл. № 18), у якому використовують вимірювальний пристрій, що містить два чутливі елементи, змонтованих на одній основі, один з яких тензорезистор, встановлюють вимірювальний пристрій на деталь, піддають деталь одночасному впливу температури і впливу, що викликає деформацію, вимірюють при цьому зміну опору на кожному чутливому елементі, як другий чутливий елемент використовують тензорезистор, встановлений під кутом до першого тензорезистора, після встановлення вимірювального пристрою на деталь виконують градування вимірювального пристрою, для чого отримують залежності зміни опорів тензорезисторів від деформації деталі, отримують залежності опорів тензорезисторів від температури, далі за виміряними значеннями зміни опорів тензорезисторів, спричинених деформацією та температурою на кожному тензорезисторі окремо обчислюють зміну опору від впливу температури та деформації, після чого за отриманими залежностями змін опорів тензорезисторів від температури та від деформації деталі визначають температуру деталі та величину деформації деталі у місці встановлення тензорезисторів.

Дійсно, найближчий аналог дозволяє при вимірюванні температури та деформації деталі в умовах їх одночасної зміни виключити вплив температури на вимірювання деформації та вплив деформації на вимірювання температури, забезпечуючи тим самим підвищення точності вимірювань.

Деталі авіаційних двигунів мають складну просторову конструкцію, досліджуються у широкому діапазоні навантажень та дії високих робочих температур (450 °C...800 °C), які призводять до неоднорідних полів температур та деформацій. Застосування наведеного технічного рішення та розташування чутливих елементів пристрою на певній відстані один від одного негативно вплине на достовірність вимірювання деформацій та температури, що призведе до низької точності дослідження та матиме збільшену трудомісткість за рахунок проведення дій з вимірювання та розрахунку.

В основу корисної моделі поставлена задача створити спосіб одночасного тензометричного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей, до того ж одержати сукупний технічний результат, що містить декілька, логічно взаємозалежних, технічних результатів.

Основним технічним результатом є підвищення точності одночасного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей за рахунок взаємного розташування чутливих елементів, яке дозволяє використовувати математичні формули (залежності) вимірюваних опорів чутливих елементів від зміни температури та деформації досліджуваної деталі.

Кожний чутливий елемент монтажними провідниками приєднують до вимірювального пристрою за чотириохпровідною потенціометричною схемою у режимі вимірювання електричного опору, що дозволяє виключити адитивну похибку від температурного впливу на зміну опору провідників, яке призводить до підвищення точності одночасного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей.

До того ж повинен бути отриманий технічний результат зменшення трудомісткості одночасного визначення температури та деформації досліджуваної деталі за рахунок використання математичних формул (залежностей) вимірюваних опорів чутливих елементів від зміни температури та деформації досліджуваної деталі, що виключає додаткові технологічні операції градування кожного чутливого елемента.

У способі одночасного тензометричного вимірювання чутливих елементів, які скріплюють сполучним з металевою платівкою, яку закріплюють на поверхні досліджуваної деталі за допомогою точкового зварювання, до того ж чутливі елементи розташовують один над одним та паралельно площині металевої платівки, головна вісь одного із чутливих елементів збігається з напрямком деформації досліджуваної деталі та ортогональна головній осі другого чутливого елемента, зроблене удосконалення, згідно з корисною моделлю, кожний чутливий елемент монтажними провідниками приєднують до вимірювального пристрою за чотириохпровідною потенціометричною схемою у режимі вимірювання електричного опору. Вимірюють початкові опори кожного чутливого елемента та проводять дослідження деталі в декілька етапів, за якими деталь піддають одночасному силовому

навантаженню, що викликає деформацію, та температурному впливу і вимірюють опори чутливих елементів. Визначають зміну температури деталі за формулою:

$$\Delta T = \frac{\frac{R_H + R_H}{R_0} - 2}{2 \cdot (\alpha + (\alpha_{LD} - \alpha_{LTP}) \cdot K)},$$

а також відносну деформацію деталі за формулою:

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

де

ΔT - зміна температури деталі;

ε - відносна деформація деталі;

R_H - опір чутливого елемента, головна вісь якого збігається 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 лінійного розширення матеріалу досліджуваної деталі;

α_{LD} - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу досліджуваної деталі;

α_{LTP} - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу чутливих елементів;

μ - коефіцієнт Пуансона матеріалу деталі.

Отже, запропоноване взаємне розташування чутливих елементів, яке дозволяє використовувати математичні формули (залежності) вимірюваних опорів чутливих елементів від зміни температури та деформації досліджуваної деталі, у сукупності з підключенням кожного чутливого елемента монтажними провідниками до вимірювального пристрою за чотирьохпровідною потенціометричною схемою у режимі вимірювання електричного опору приводить до підвищення точності і зменшення трудомісткості способу одночасного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей, що заявляється.

Запропонований спосіб одночасного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей пояснюється схемою, на якій наведено взаємне розташування чутливих елементів та їх підключення до вимірювальних пристроїв.

Чутливі елементи 1 та 2 скріплюють сполучним 3 з металевою платівкою 4, яку закріплюють на поверхні досліджуваної деталі (не показано) за допомогою точкового зварювання. Чутливі елементи 1 і 2 розташовують один над одним та паралельно площині металевої платівки 4. Головна вісь чутливого елемента 1 збігається з напрямком деформації досліджуваної деталі та ортогональна головній чутливого елемента 2.

Чутливий елемент 1 монтажними провідниками 5 підключають до вимірювального пристрою 7, а чутливий елемент 2 монтажними провідниками 6 підключають до вимірювального пристрою 8.

Вимірювальні пристрої 7 і 8 виконані за чотирьохпровідною потенціометричною схемою у режимі вимірювання електричного опору.

Вимірюють початкові опори R_0 чутливих елементів 1 та 2.

Проводять дослідження деталі в декілька етапів, за якими деталь піддають одночасному силовому навантаженню, що викликає деформацію, та температурному впливу.

На кожному етапі вимірюють опір R_H чутливого елемента 1 та опір R_B чутливого елемента 2.

Визначають зміну температури деталі за формулою:

$$\Delta T = \frac{\frac{R_H + R_H}{R_0} - 2}{2 \cdot (\alpha + (\alpha_{LD} - \alpha_{LTP}) \cdot K)},$$

а також відносну деформацію деталі за формулою:

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

де

ΔT - зміна температури деталі;

ε - відносна деформація деталі;

R_H - опір чутливого елемента, головна вісь якого збігається 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 лінійного розширення матеріалу досліджуваної деталі;

α_{LD} - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу досліджуваної деталі;

α_{LTP} - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу чутливих елементів;

μ - коефіцієнт Пуансона матеріалу деталі.

Спосіб одночасного тензометричного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей було реалізовано на експериментальній випробувальній машині для досліджень на розтяг-стиск з встановленою пічкою.

Як досліджувану деталь використовували стандартний зразок на розтяг діаметром 10 мм, виготовлений зі сталі 30ХГСА.

Чутливі елементи 1 і 2 були виготовлені з дротяних тензорезисторів з базою вимірювання 5 мм, з дроту діаметром 30 мкм та матеріалу Х20Н80.

Чутливі елементи 1 та 2 розташовують один над одним та паралельно площині металевої платівки 4, яку закріплюють на поверхні досліджуваного зразка за допомогою точкового зварювання.

Головну вісь чутливого елемента 1 виставляють за напрямком деформації досліджуваної зразка та ортогонально головній осі чутливого елемента 2.

Чутливі елементи 1 і 2 скріплюють з металевою платівкою 4 сполучним - високотемпературним клеєм-цементом ВКП-26Ц гарячого затвердіння.

Чутливі елементи 1 і 2 монтажними провідниками 5 і 6 підключають до вимірювальних пристроїв 7 і 8, відповідно, за чотириохпровідною потенціометричною схемою у режимі вимірювання електричного опору, які входять до складу вимірювальної системи НВМ QuantumX MX1615В.

В першу чергу вимірюють початкові опори R_0 чутливих елементів 1 і 2, які представлені в таблиці.

Після чого зразок піддавався повільному нагріванню до заданих температур T (20, 200 та 600 °С) та витримці і стабілізації.

Контроль заданої температури T здійснювався за допомогою термопари типу L (хромель-копель), вимірюваний діапазон температур від -200 °С до +850 °С.

При кожному температурному впливі зразок ступінчасто піддавали заданому силовому навантаженню F (400, 800, 1200 та 1600 кгс) на випробувальній машині.

При цьому визначали задану відносну деформація ε зразка, від силового навантаження F за формулою:

$$\varepsilon = \frac{F}{E \cdot S},$$

де

ε - задана відносна деформація зразка

F - силове навантаження, кгс;

E - Модуль пружності матеріалу зразка, МПа;

S - поперечний переріз зразка (78,54 мм²).

Отримані параметри зразка, а саме задана температура T , силове навантаження F , відносна деформація ε , та фізико-механічні властивості матеріалів досліджуваного зразка та чутливих елементів 1 і 2 наведені в таблиці.

На кожному етапі дослідження вимірюють опір R_H чутливого елемента 1 та опір R_B чутливого елемента 2, які представлені в таблиці.

Визначають зміну температури зразка за формулою:

$$\Delta T = \frac{\frac{R_H + R_B}{R_0} - 2}{2 \cdot (\alpha + (\alpha_{LD} - \alpha_{LTP}) \cdot K)},$$

а також відносну деформацію деталі за формулою:

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

де

ΔT - зміна температури деталі;

ε - відносна деформація деталі;

R_H - опір чутливого елемента, головна вісь якого збігається 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 лінійного розширення матеріалу досліджуваної деталі;

$\alpha_{ЛД}$ - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу досліджуваної деталі;

$\alpha_{ЛТР}$ - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу чутливих елементів;

μ - коефіцієнт Пуансона матеріалу деталі.

Температуру T досліджуваного зразка розраховують, збільшуючи початкову температуру зразка, що дорівнює в наведеному прикладі 20 °С, на визначену зміну температури ΔT зразка.

Спосіб одночасного тензометричного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей, що заявляється, показав достатню відповідність розрахункових та заданих параметрів досліджуваного зразка.

Розраховані відносна деформація ε та температура T зразка наведені у таблиці.

Задана температура зразка, Т°С	Модуль пружності зразка, Е-10 ⁵ , МПа	Початковий опір R ₀ , Ом	Коефіцієнт тензочутливості, К	Температурний коефіцієнт α , 1/Град	Температурний коефіцієнт $\alpha_{1д}$, 1/Град	Температурний коефіцієнт $\alpha_{тр}$, 1/Град	Задане силове навантаження F зразка, кгс	Задана деформація зразка, $\varepsilon \cdot 10^{-6}$	Вимірний опір R _H , чутливого елемента 1, Ом	Вимірний опір R _B , чутливого елемента 2, Ом	Розрахована деформація зразка, $\varepsilon_B \cdot 10^{-6}$	Розрахована температура зразка Т°С
20	2,15	67,5	1,76	0,0001	0,000012	0,000014	400	240	67,5611	67,9404	235	20
							800	480	67,5625	67,9411	492	21
							1200	718	67,5625	67,9418	690	22
							1600	950	67,5632	67,9425	985	23
200	2,03						400	255	68,3749	68,8828	281	198
							800	510	68,4815	69,0099	520	193
							1200	760	68,4844	69,0121	721	205
							1600	1012	68,4907	69,0191	1054	215
600	1,64						400	318	69,5044	70,2229	313	606
							800	632	69,5002	70,2568	634	612
							1200	942	69,4861	70,3048	1062	636
							1600	1253	69,4705	70,3310	1284	641

Таким чином, середня абсолютна похибка вимірювання температури $\Delta T_c = 12$ °С та деформації $\Delta \varepsilon = 34 \cdot 10^{-6}$, що для даного роду технічних вимірювань задовільна.

Спосіб одночасного тензометричного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей, що заявляється, широко використовується на підприємстві при експериментальних дослідженнях деталей авіаційних двигунів, а саме встановлюються:

- дійсні умови роботи та навантаження деталей та вузлів;
- деформації і напруження у вузлах і деталях, що виникають при роботі;
- запаси міцності та вдосконалюється конструктивна форма окремих вузлів та деталей;
- ідентифікація та оптимізація математичних моделей, що використовуються для аналізу напружено-деформованого стану розрахунковими методами, встановлення масштабних факторів;
- відповідність напружено-деформованого стану розрахунковим даним;
- кількісні показники надійності деталей та вузлів при на експлуатаційних або граничних режимах роботи.

Запропонований спосіб одночасного тензометричного вимірювання температури та відносної деформації високотемпературних деталей був використаний при дослідженні напружено-деформованого стану та температури кронштейнів жарової труби турбореактивного двоконтурного двигуна AI-322, соплового апарата ступеня турбіни AI-450T та направляючого апарата ступеня компресора Д-436-148ФМ,

Запропонована корисна модель підвищила точність і зменшила трудомісткість одночасного

тензометричного вимірювання температури та відносної деформації досліджуваних високотемпературних деталей.

