

Ю. А. ГУСЕВ¹, А. С. ГОЛЬЦОВ¹, С. С. КРЫГИН^{1,2}¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина*² *ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

ВЛИЯНИЕ ШУНТИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД

Развитие газотурбинных двигателей (ГТД) различного назначения неразрывно связано с повышением их основных характеристик. При этом возрастают параметры рабочего тела, в частности, температура газового потока и интенсивность нагрузок на конструктивные элементы при возрастающей частоте вращения роторов. Прочностная надежность высоконагретых элементов ГТД является фактором, определяющим ресурс двигателя в целом. Наиболее часто встречающиеся случаи повреждения элементов ГТД обусловлены статическими напряжениями и, в основном, относятся к лопаточному аппарату, корпусам компрессоров и газовых турбин, камерам сгорания и элементам роторов, работающих в диапазоне температур 200–750 °С. Погрешности измерения статических деформаций деталей, как правило, связаны с недостаточной компенсацией температурного приращения сопротивления чувствительным элементом (ЧЭ) тензометра и с возникновением токов шунтирования между ЧЭ и телом детали через изолятор-связующее. Изменение электросопротивления ЧЭ тензометра воспринимается измерительной системой как мнимая деформация. Погрешность измерения от шунтирования значительно возрастает с ростом температуры исследуемой детали, так как при этом значительно уменьшается удельное электросопротивление изолятора-связующего. В работе рассмотрен тензометрический датчик с двумя чувствительными элементами. Нижний ЧЭ тензометрического датчика расположен в изоляторе-связующем в непосредственной близости от тела детали и воспринимает ее основную деформацию. Верхний ЧЭ расположен над нижним. Главные оси элементов повернуты относительно друг друга на 90°С и играет роль температурно-компенсирующего элемента и одновременно регистрирует поперечную деформацию детали. Представлена электрическая модель распределения потенциалов в тензометрическом датчике. Для определения величины токов шунтирования было применено правило Кирхгофа к линейной электрической цепи, и записаны конечно-разностные дифференциальные уравнения для суммы токов во всех узлах электрической модели. Конечно-разностные дифференциальные уравнения преобразованы в матричное, решение которого позволяет получить токи утечки во всех узлах электрической модели тензометра. Получены суммарные токи утечки в нижнем и верхнем ЧЭ тензометра для различных случаев, а также, относительные погрешности измерения деформации, обусловленные шунтированием.

Ключевые слова: тензометр; статическая деформация; токи шунтирования.

Введение

Значительная часть элементов ГТД работает в условиях воздействия существенных статических нагрузок, при температурах, превышающих 600...750 °С. Прочностная надежность высоконагретых элементов ГТД является фактором, определяющим ресурс двигателя в целом. Статические напряжения отдельных деталей двигателя можно определить только экспериментально, в рамках доводочных, заводских, государственных и сертификационных испытаний. В настоящее время основным средством определения статических деформаций элементов ГТД являются тензометры сопротивления

1. Постановка задачи исследования

Известно, что для измерения статических деформаций в элементах конструкций применяются тензометры с ЧЭ, выполненным из сплава карма или константана. Это сплавы меди и никеля, отличающиеся процентным содержанием основных компонентов. Малое значение их температурных коэффициентов сопротивления позволяет снизить погрешность измерения статических деформаций, до температуры, не превышающей 400 °С [1, 2].

В то же время известно, что изоляторы-связующие тензометра должны обладать высокими

электроизоляционными свойствами, уменьшение которых приводит к появлению тока утечки от ЧЭ тензометра к поверхности детали или к его шунтированию, которое весьма существенно у тензометров с электросопротивлением ЧЭ выше 200...400 Ом, обладающих высоким уровнем полезного сигнала.

У большинства тензометров сопротивление связующих значительно уменьшается при работе в условиях повышенной влажности и при нагреве до температур 500 °С и выше, что приводит к появлению токов шунтирования в тензомере. Регистрирующей аппаратурой такое уменьшение сопротивления решетки ЧЭ воспринимается как кажущаяся (мнимая) деформация, которая при определении напряженного состояния детали может составлять значительную величину. Обычно приводятся формулы для расчета погрешности, учитывающие шунтирование в направлении «чувствительный элемент – тело». Для малоразмерных тензометров, широко применяемых в настоящее время, из-за близкого расположения полос ЧЭ существует также ток шунтирования из полосы в полосу. Значение сопротивления двухполюсного тензометра с учетом двумерного шунтирования приведено в работе [3] и определяется по формуле

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

где r – полное сопротивление ЧЭ тензометров без шунтирования;

R_y, R_z – электрическое сопротивление изолятора - связующего в направлении ЧЭ – тело детали и между двумя полосами ЧЭ.

Представленная зависимость позволяет оценить долю погрешности измерения тензомером деформации, связанную с шунтированием.

Известна работа [4], в которой для уменьшения тока утечки в слой связующего между решеткой ЧЭ тензометра и поверхностью детали вводился экран, совпадающий по конфигурации с ЧЭ тензометра и препятствующий появлению токов утечки на деталь через слой связующего.

В настоящей работе рассматривается тензометрический датчик, состоящий из двух тензорезисторов с мостовой или потенциометрической схемой регистрации сигнала о деформации детали. Нижний ЧЭ тензометрического датчика расположен в изоляторе-связующем на расстоянии h_2 от тела детали и воспринимает основную деформацию детали. Верхний ЧЭ расположен над нижним. Главные оси ЧЭ повернуты относительно друг друга на 90 °С. Верхний играет роль температурно-компенсирующего элемента и одновременно регистрирует

поперечную деформацию детали. Слой связующего между чувствительными элементами составляет h_1 (см. рис. 1).

Решение задачи шунтирования в двухслойном тензометрическом датчике состоит в определении токов утечки от нижнего ЧЭ на тело детали и от верхнего к нижнему ЧЭ. Шунтирование внутри ЧЭ (от полосы к полосе) не рассматривалось в связи с большим расстоянием между ними.

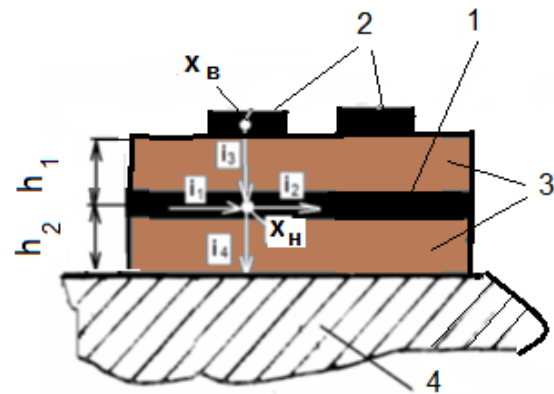


Рис. 1. Структурная схема тензометрического датчика:
1 – нижний ЧЭ; 2 – верхний ЧЭ;
3 – изолятор - связующее; 4 – тело детали

Для получения количественных соотношений элементов конструкции предлагаемого тензометрического датчика принимаем $h_1 \neq h_2$.

Рассмотрим токи в произвольной точке x_n нижнего ЧЭ тензометрического датчика (рис. 1). Пусть измерительный ток, протекающий через резистор 1, создает в точке x_n потенциал V_n , а в расположенной над ней точке x_v верхнего ЧЭ потенциал V_v (потенциал детали - 4 при этом принят за ноль или $V_T = 0$). Токи в тензомере через точку x обозначены на рис. 1 – i_1, i_2, i_3, i_4 . Если изолятор идеален, то есть токи утечки в связующем 3 отсутствуют ($i_3 = i_4$) = 0, то для тока в нижнем ЧЭ справедливо условие $i_1 = i_2$. В реальных условиях из-за существования токов утечки i_3 и i_4 закон сохранения токов в точке x_n принимает вид $i_1 = i_2 - i_3 + i_4$. Из этого выражения следует, что если токи утечки компенсируют друг друга ($i_3 = i_4$), то ток в нижнем ЧЭ сохраняется таким же, как в случае идеальной изоляции. Для возникновения тока i_3 , компенсирующего ток утечки i_4 , необходимо создать между точками x_n и x_v разность потенциалов, которая вызывала бы такой же ток, как ток, создаваемый разностью потенциалов точки x_n нижнего ЧЭ и

тела детали. Записав токи утечки через вызывающие их потенциалы и сопротивления участков связующего R_1 и R_2 получим, что для компенсации (равенства) этих токов необходимо выполнить условие,

$$(V_B - V_H) / R_1 = V_H / R_2, \quad (2)$$

где R_1 и R_2 – сопротивления, оказываемые током утечки в слоях 1 и 2 связующего.

Из выражения (2) следует, что требуемый потенциал точки экрана можно определить следующим образом:

$$V_B = V_H (\rho_1 h_1 / \rho_2 h_2 + 1). \quad (3)$$

Если слои связующего 1 и 2 выполнены из одного материала (удельные электрические сопротивления ρ_1 и ρ_2 равны), то отношение сопротивлений заменяем отношением их толщин

$$V_B = V_H \rho (h_1 / h_2 + 1), \quad (4)$$

где h_1 и h_2 – толщины первого и второго слоев связующего, считая от поверхности детали.

Для выполнения указанного условия (3) и проведения измерений тензометр включается в потенциометрическую схему измерения деформаций (рис. 2) Если заземлить концы нижнего и верхнего ЧЭ на деталь, то потенциалы их в точке Д будут равны между собой и равны нулю. В то же время сопротивление нижнего ЧЭ 1 определяется по величине тока, протекающего через него, амперметром 4, и вызванное этим током падение напряжения - вольтметром 5, что позволяет обеспечить необходимую величину разности потенциалов резисторов 1 и 2 (см. рис. 2).

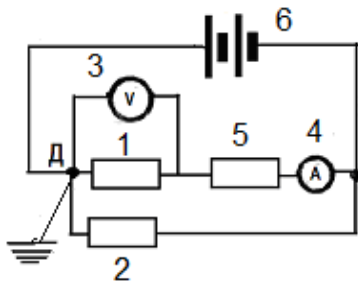


Рис. 2. Потенциометрическая схема включения тензорезистора: 1 – нижний ЧЭ; 2 – верхний ЧЭ; 3 – милливольтметр; 4 – амперметр; 5 – регулирующие сопротивления; 6 – источник напряжения

Задача исследования состоит в определении токов утечки i_3 и i_4 (шунтирования ЧЭ) в тензометрическом датчике, так как именно эти токи изменя-

ют сопротивления ЧЭ, которое воспринимается измерительной системой как мнимая деформация. Необходимо предложить метод расчета погрешности измерения статической деформации, связанной с шунтированием его ЧЭ элементов.

2. Решение поставленной задачи

В целях оценки возникающих погрешностей при измерении статических деформаций от шунтирования ЧЭ необходимо исследовать электрическую модель двухслойного тензометрического датчика, представленную на рис. 3.

В модели: $\phi_1(0) = V$, $\phi_1(L_1) = \phi_D$ – потенциалы в точках В и Д нижнего ЧЭ тензометрического датчика, а $\phi_2(0) = kV$, $\phi_2(L_2) = \phi_D$ – потенциалы в точках А и Д верхней решетки тензометра; длина нижнего и верхнего ЧЭ тензометра L_1 , L_2 – соответственно; I_1 – величина тока в точке В, а I_2 – величина тока в точке А.

Предполагается, что шунтирование в тензометрическом датчике осуществляется через узлы решеток ЧЭ, взаимно расположенных по высоте слоя изолятора-связующего.

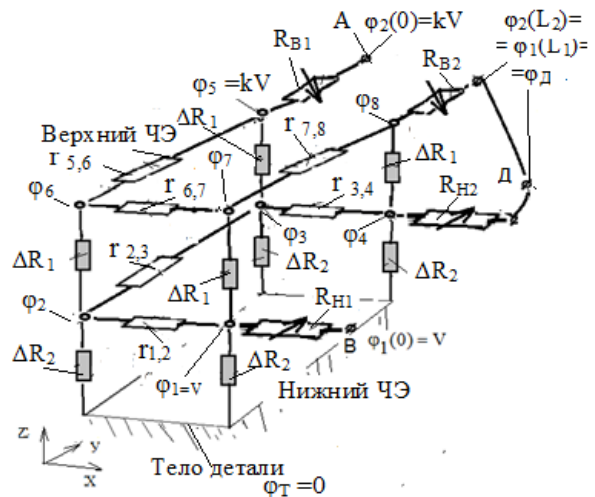


Рис. 3. Электрическая модель распределения потенциалов в тензометрическом датчике

Таких узлов шунтирования в однопетлевой конструкции тензометрического датчика – восемь. Четыре узла нижнего ЧЭ, в которых токи шунтирования направлены от него к телу детали через изолятор сопротивлением ΔR_2 . В четырех узлах верхнего ЧЭ токи утечки направлены в сторону нижнего, через изолятор сопротивлением ΔR_1 (см. рис. 3).

Чтобы установить величины токов I_1 и I_2 , воспользуемся законом Кирхгофа и запишем конечно-разностные уравнения для суммы токов во всех узлах электрической модели (см. рис.3):

– в узлах нижней решетки:

$$\begin{cases} \frac{V - \varphi_1}{R_{H1}} + \frac{\varphi_7 - \varphi_1}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_1 - \varphi_T}{\Delta R_2} - \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r_{1,2}} = 0; \\ \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r_{1,2}} + \frac{\varphi_6 - \varphi_2}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_2 - \varphi_T}{\Delta R_2} - \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{r_{2,3}} = 0; \\ \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{r_{2,3}} + \frac{\varphi_5 - \varphi_3}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_3 - \varphi_T}{\Delta R_2} - \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{r_{3,4}} = 0; \\ \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{r_{3,4}} + \frac{\varphi_8 - \varphi_4}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_4 - \varphi_T}{\Delta R_2} - \frac{\varphi_4 - \varphi_D}{R_{H2}} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

– в узлах верхней решетки:

$$\begin{cases} \frac{k \cdot V - \varphi_5}{R_{B1}} - \frac{\varphi_5 - \varphi_3}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_5 - \varphi_6}{r_{5,6}} = 0; \\ \frac{\varphi_5 - \varphi_6}{r_{5,6}} - \frac{\varphi_6 - \varphi_2}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_6 - \varphi_7}{r_{6,7}} = 0; \\ \frac{\varphi_6 - \varphi_7}{r_{6,7}} - \frac{\varphi_7 - \varphi_1}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_7 - \varphi_8}{r_{7,8}} = 0; \\ \frac{\varphi_7 - \varphi_8}{r_{7,8}} - \frac{\varphi_8 - \varphi_4}{\Delta R_1} - \frac{\varphi_8 - \varphi_D}{R_{B2}} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где: φ_j – потенциал в узле j решетки тензометра;

$r_{i,j}$ – сопротивление участка решетки тензометра между узлами i и j , длиной $l_{i,j}$;

ΔR_1 и ΔR_2 – сопротивления участков изолятора -связующего в направлениях от верхнего ЧЭ к нижнему и от нижнего к телу, соответственно;

$\varphi_D = 0$ – потенциал в узле Д решеток тензометра; $\varphi_T = 0$ – потенциал тела.

В дальнейшем для упрощения вывода будем предполагать, что нижняя решетка расположена по середине слоя изолятора-связующего:

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

где $R_{св}$ – сопротивление изолятора - связующего тензометра в направлении верхняя решетка – тело. Сопротивление и длины обеих решеток одинаковы:

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

Потенциал в точке Д $\varphi_D = \varphi_T$, а потенциал тела равен нулю ($\varphi_T = 0$).

Тогда уравнения (5) и (6) можно преобразовать в следующее матричное уравнение:

$$A \cdot \varphi = B \cdot V, \quad (7)$$

где:

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

$$\varphi = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4 \quad \varphi_5 \quad \varphi_6 \quad \varphi_7 \quad \varphi_8]^T$$

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

$$A_{2,2} = A_{3,3} = -\left(\frac{6}{r} + \frac{1}{\Delta R_1} + \frac{1}{\Delta R_2}\right) \quad (8)$$

$$A_{5,5} = A_{8,8} = -\left(\frac{3}{r} + \frac{1}{\Delta R_1} + \frac{1}{R_B}\right) \quad (9)$$

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

$$B = \begin{bmatrix} -1 \\ R_H & 0 & 0 & 0 & -k \\ & R_B & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

Уравнение (7) имеет следующее решение:

$$\varphi = A^{-1} \cdot B \cdot V. \quad (11)$$

Ток шунтирования верхнего ЧЭ, в первом приближении, равен сумме токов из узлов верхнего ЧЭ в узлы нижнего ЧЭ

$$I_{2ш} \approx \frac{\varphi_5 - \varphi_3}{\Delta R_1} + \frac{\varphi_6 - \varphi_2}{\Delta R_1} + \frac{\varphi_7 - \varphi_1}{\Delta R_1} + \frac{\varphi_8 - \varphi_4}{\Delta R_1}. \quad (12)$$

Ток шунтирования нижнего ЧЭ, в первом приближении, равен сумме разности токов, выходящих из узлов нижнего ЧЭ в тело детали и токов, поступающих в эти узлы из верхнего ЧЭ:

$$I_{ш} \approx \sum_{i=1}^4 \frac{\varphi_i - \varphi_T}{\Delta R_2} - I_{ш1}. \quad (13)$$

Следовательно, относительная погрешность измерения поперечной деформации, обусловленная шунтированием верхнего ЧЭ, определяется отношением тока шунтирования и тока, входящего в узел 5:

$$\Delta \varepsilon_2 \approx \frac{I_{2ш}}{I_2} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Относительная погрешность измерения продольной деформации, обусловленная шунтированием нижнего ЧЭ,

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{I_{ш}}{I_1} \cdot 100\%. \quad (15)$$

Токи шунтирования в отдельных узлах электрической модели тензометрического датчика для верхнего и нижнего ЧЭ представлены следующими зависимостями:

$$I_{5,3} = \frac{\varphi_5 - \varphi_3}{\Delta R_1}; \quad I_{7,1} = \frac{\varphi_7 - \varphi_1}{\Delta R_1}; \quad (16)$$

$$I_{6,2} = \frac{\varphi_6 - \varphi_2}{\Delta R_1}; \quad I_{8,4} = \frac{\varphi_8 - \varphi_4}{\Delta R_1};$$

$$I_{1,T} = \frac{\varphi_1 - \varphi_T}{\Delta R_2}; \quad I_{2,T} = \frac{\varphi_2 - \varphi_T}{\Delta R_2}; \quad I_{2,T} = \frac{\varphi_2 - \varphi_T}{\Delta R_2}; \quad (17)$$

$$I_{3,T} = \frac{\varphi_3 - \varphi_T}{\Delta R_2}; \quad I_{4,T} = \frac{\varphi_4 - \varphi_T}{\Delta R_2}.$$

3. Результаты исследований

Выполнено имитационное моделирование показаний тензометра в следующих условиях:

$$V = 5 \text{ В}; \quad k = 1,5; \quad r = 120 \text{ Ом}; \quad r_{i,j} = \frac{r}{3};$$

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = 0,5 \cdot R_{св}; \quad \varphi_d = \varphi_T = 0;$$

$$R_{св} = (20 \div 300) \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Графики зависимостей токов шунтирования верхнего и нижнего чувствительных элементов от сопротивления связующего, полученные в результате моделирования, приведены на рисунке 4.

На рисунке 5 приведены графики зависимости погрешностей измерения тензометром продольной $\Delta \varepsilon_H$ и поперечной $\Delta \varepsilon_B$ деформаций, полученные в результате моделирования.

Погрешность измерения продольной деформации (рис. 5), обусловленная шунтированием, с увеличением сопротивления связующего уменьшается от 4,1 % (при $R_{св} = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}$) до 0,002 % (при $R_{св} = 300 \cdot 10^3 \text{ Ом}$), а погрешность измерения поперечной деформации, обусловленная шунтированием, уменьшается от 4,03 % (при $R_{св} = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}$) до 0,27 % (при $R_{св} = 300 \cdot 10^3 \text{ Ом}$).

Решение выражений (12) и (13) позволит получить суммарное значение токов утечки $I_{\Sigma ш}$ в нижнем и верхнем ЧЭ тензометра для различных значений сопротивления изоляции связующего. При этом, ток шунтирования в нижнем ЧЭ $I_{\Sigma шн}$ может быть получен с учетом поступления токов утечки с верхнего ЧЭ.

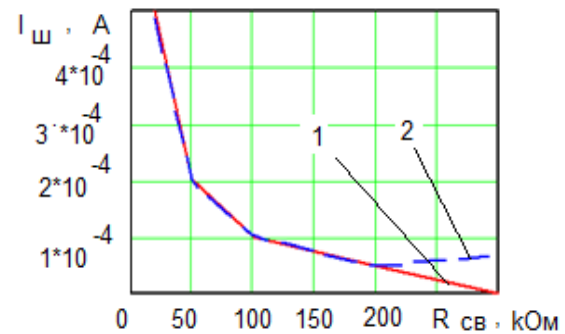


Рис. 4. Зависимость токов шунтирования ЧЭ от сопротивления изолятор-связующего

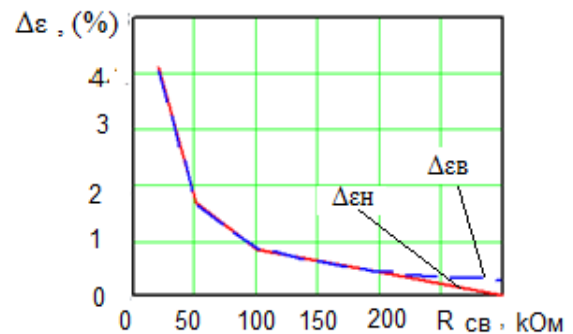


Рис. 5. Зависимость погрешностей измерения продольной и поперечной деформации от сопротивления связующего

В дальнейшем определяем величину изменения сопротивления ЧЭ, связанную с его шунтированием, по формуле: $\Delta R_{ш} = \frac{V}{I_{\Sigma шн}}$. Используя зависимость

$$\varepsilon_{мн} = \frac{\Delta R_{ш}}{R_H} \cdot \frac{1}{K} \text{ получаем значение мнимой относи-}$$

тельної деформації $\varepsilon_{ш}$, пов'язаної з шунтуванням нижнього ЧЭ тензометричного датчика. Здесь К-коэффициент тензочувствительности материала ЧЭ тензометра, величина как правило известная, в нашем случае для нихрома принимается равной 1,8, а R_n – сопротивление нижнего ЧЭ тензоизмерительного датчика при соответствующей температуре в эксперименте.

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод о возможности применения двухслойного тензоизмерительного датчика (состоящего из двух тензорезисторов) при исследовании статических деформаций деталей, работающих при температурах превышающих 600 °С. Это объясняется особенностью конструкции датчика, которая позволяет уменьшить токи шунтирования нижнего ЧЭ, и тем самым снизить погрешность измерения статической деформации детали при существенном снижении электроизоляционных свойств связующего. Предложен метод расчета погрешности измерения статической деформации, использующий электрическую модель тензометра с ее конечно-разностной системой дифференциальных уравнений и матричной формой решения.

Литература

1. Клокова, Н. П. Тензорезисторы: Теория, методика расчета, разработки [Текст] / Н. П. Клокова. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.

2. Kemp, P. Исследование свойств высокотемпературных тензодатчиков для замера статических и динамических деформаций [Текст] / Р. Кемп // *Высокотемпературные тензодатчики : сб. науч. ст.* – 1963. – С. 59–78

3. Гусев, Ю. А. Шунтирование малоразмерных тензорезисторов [Текст] / Ю. А. Гусев, А. В. Олейник, Д. Ф. Симбирский // *Проблемы прочности.* – 1972. – № 6. – С. 106–108.

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

References

1. Klokova, N. P. *Tenzorezistory: Teoriya, metodika rascheta, razrabotki* [Strain gauges: Theory, calculation technique, development]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 224 p.

2. Kemp, R. *Issledovanie svojstv vysokotemperaturnyh tenzodatchikov dlja zamera staticheskikh i dinamicheskikh deformacij* [Investigation of properties of high-temperature strain gauges for measuring static and dynamic deformations]. *Vysokotemperaturnye tenzodatchiki: sb. nauch. st. – High temperature strain gauges*, 1963, pp. 59–78.

3. Gusev, Ju. A., Olejnik, A. V., Simbirskij, D. F. *Shuntirovanie malorazmernih tenzorezistorov* [Shunting of small strain gauges]. *Problemy prochnosti – Strength issues*, 1972, no. 6, pp. 106–108.

4. Gusev, Ju. A., Olejnik, A. V., Simbirskij, D. F. *Tenzorezistory s antishuntirujushhim jekranom* [Strain gauges with antishunt shield]. *Problemy prochnosti – Strength issues*, 1976, no. 1, pp. 113–116.

Надійшла до редакції 24.05.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

ВПЛИВ ШУНТУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРУ СТАТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЕЛЕМЕНТІВ ГТД

Ю. О. Гусев, А. С. Гольцов,
С. С. Кригін

Розвиток газотурбінних двигунів (ГТД), різного призначення, нерозривно пов'язаний із підвищенням їх основних характеристик. При цьому зростають параметри робочого тіла, зокрема температура газового потоку та інтенсивність навантажень на конструктивні елементи при зростаючій частоті обертання роторів. Надійність міцності високо нагрітих елементів ГТД є фактором, що визначає ресурс двигуна в цілому. Випадки пошкодження елементів ГТД, що найчастіше зустрічаються, обумовлені статичними напруженнями, і в основному відносяться до лопаткового апарату, корпусів компресорів і газових турбін, камер згоряння і елементів роторів, що працюють в діапазоні температур 200–750 °С. Похибки вимірювання статичних деформаций деталей зазвичай пов'язані з недостатньою компенсацією температурного збільшення опору чутливим елементом (ЧЕ) тензометра і з виникненням струмів шунтування між ЧЕ і тілом деталі через ізолятор сполучне. Зміна електроопору ЧЕ тензометра сприймається вимірювальною системою як уявна деформація. Похибка вимірювання від шунтування значно зростає зі зростанням температури досліджуваної деталі, тому що при цьому значно зменшується питомий електроопір ізолятора сполучного. У роботі розглянуто тензометричний датчик із двома чутливими елементами. Нижній ЧЕ тензометричного датчика розташований в ізоляторі-сполучному безпосередньо близькості від тіла деталі і сприймає її основну деформацію. Верхній ЧЕ розташований над нижнім. Головні осі елементів повернені відносно один одного на 90°С і відіграє роль температурно-компенсуючого елемента та одночасно реєструє поперечну деформацію деталі. Подано елект-

ричну модель розподілу потенціалів у тензометричному датчику. Для визначення величини струмів шунтування було застосовано правило Кірхгофа до лінійного електричного ланцюга, і записані кінцево-різнісні диференціальні рівняння для суми струмів у всіх вузлах електричної моделі. Кінцево-різнісні диференціальні рівняння перетворені на матричне, рішення якого дозволяє отримати струми витoku у всіх вузлах електричної моделі тензометра. Отримані сумарні струми витoku в нижньому і верхньому ЧЕ тензометра для різних випадків, а також, відносні похибки виміру деформації, зумовлені шунтуванням.

Ключові слова: тензомер; статична деформація; струми шунтування.

INFLUENCE OF SHUNTING OF HIGH-TEMPERATURE STRAIN GAUGERS ON THE ACCURACY OF MEASURING STATIC DEFORMATIONS OF GTE ELEMENTS

*Yuriy Husiev, Anatoliy Hol'tsov,
Serhiy Kryhin*

The development of gas turbine engines (GTE), for various purposes, is inextricably linked with an increase in their main characteristics. Simultaneously, the parameters of the working fluid increase, in particular, the temperature of the gas flow and the intensity of loads on structural elements with an increasing frequency of rotation of the rotors. The strength reliability of highly heated GTE elements is a factor that determines the life of the engine as a whole. The most common cases of damage to GTE elements are caused by static stresses, and mainly relate to the blade apparatus, compressor and gas turbine housings, combustion chambers and rotor elements operating in the temperature range of 200–750 °C. Errors in measuring static deformations of parts are usually associated with insufficient compensation for the temperature increment of resistance by the sensitive element (SE) of the strain gauge and with the occurrence of shunt currents between the SE and the body of the part through a binder insulator. The change in the electrical resistance of the strain gauge SE is perceived by the measuring system as an imaginary deformation. The measurement error due to shunting increases significantly with an increase in the temperature of the part under study, since this significantly reduces the specific electrical resistance of the binder insulator. A strain gauge sensor with two sensitive elements is considered in this work. The lower CE of the strain gauge sensor is located in the insulator-connector directly in the vicinity of the body of the part and perceives its main deformation. The upper Euro is located above the lower. The main axes of the elements are rotated relative to each other by 90 ° C and plays the role of temperature-compensating element and at the same time registers the transverse deformation of the part. An electrical model of the potential distribution in a strain gauge is presented. To determine the magnitude of shunt currents, Kirchhoff's rule was applied to a linear electric circuit, and finite-difference differential equations for the sum of currents in all nodes of the electric model were recorded. Finite-difference differential equations are transformed into a matrix one, the solution of which allows to obtain leakage currents in all nodes of the electric model of the strain gauge. The total leakage currents in the lower and upper SE strain gauge for different cases, as well as the relative errors of deformation measurement due to shunting, are obtained.

Keywords: strain gauge; static deformation; shunt currents.

Гусев Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, проф. каф. конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Гольцов Анатолий Сергеевич – д-р техн. наук, проф., проф. каф. конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Крыгин Сергей Сергеевич – асп. каф. конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина; ведущий инженер ЭИК ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Yuriy Husiev – 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.

Anatoliy Hol'tsov – Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Aircraft Engine Design, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: goltsov43@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7265-8037.

Serhiy Kryhin – PhD Student, Department of Aircraft Engine Design, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine; Leading Research Engineer, SE "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: sergic1984@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7139-3815.