

УДК 531.787

Ю.А. ГУСЕВ, Е.А. КОНОНЫХИН, КАМБИЗ КАХРАИ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ С АНТИШУНТИРУЮЩИМ ЭКРАНОМ**

Уменьшение электроизоляционных свойств связующего тензорезистора регистрирующей аппаратурой воспринимается как кажущаяся деформация. Для уменьшения токов утечки в слое связующего между ЧЭ тензорезистора и поверхностью детали вводится экран, совпадающий по конфигурации с ЧЭ тензорезистора. Рассмотрены конструктивные особенности тензорезисторов с антишунтирующим экраном; схемы их включения в измерительные цепи; проведен анализ процесса шунтирования ЧЭ тензорезистора, с использованием аналитического метода; представлены формулы изменения сопротивления ЧЭ при его шунтировании, а также конечно-элементная модель (МКЭ) тензорезистора при различных значениях электросопротивления связующего; получены поля распределения токов утечки. Представлены результаты экспериментальной проверки явления шунтирования высокотемпературного тензорезистора и их соответствие с теоретическими исследованиями.

Ключевые слова: тензорезистор, чувствительный элемент, изолятор – связующее, антишунтирующий экран, токи шунтирования, мнимая деформация, конечно-элементная модель шунтирования тензорезистора.

Введение

Известно, что связующие тензорезисторов должны обладать высокими электроизоляционными свойствами, нарушение которых приводит к появлению тока утечки от чувствительного элемента (ЧЭ) тензорезистора к поверхности детали или к его шунтированию. Регистрирующей аппаратурой это явление воспринимается как кажущаяся деформация.

Разработка связующих с высокими электроизоляционными свойствами – проблема, препятствующая созданию некоторых практически важных разновидностей тензорезисторов. Так, шунтирование весьма существенно у высокоомных тензорезисторов (с электросопротивлением ЧЭ выше 200 – 400 Ом), обладающих высоким уровнем полезного сигнала.

У большинства тензорезисторов сопротивление связующих значительно уменьшается при работе в условиях повышенной влажности. И наконец, разработка связующих для высокотемпературных тензорезисторов — одна из наиболее сложных задач, так как электросопротивление различных цементов, эмалей и окислов металлов, служащих для закрепления ЧЭ на исследуемой детали, при нагреве до температур выше 800—1000 °С значительно снижается, что приводит к шунтированию ЧЭ тензорезистора. Регистрирующей аппаратурой такое уменьшение сопротивления решетки ЧЭ воспринимается как кажущаяся деформация [1].

Чтобы уменьшить токи утечки, в слое связующего между ЧЭ тензорезистора и поверхностью де-

тали вводится экран, совпадающий по конфигурации с ЧЭ тензорезистора.

Экран может быть расположен также над ЧЭ на поверхности связующего тензорезистора [2]. При этом он включается в электрическую схему таким образом, чтобы обеспечивать одинаковое распределение потенциалов по экрану и ЧЭ. Применение пленочной технологии имеет значительные преимущества перед обычной проволочной при изготовлении тензорезисторов с антишунтирующим экраном из-за большой эффективности экранирования.

Объект исследования

Рассмотрим некоторые примеры конструктивного выполнения пленочных тензорезисторов с антишунтирующим экраном, расположенным под ЧЭ.

Однополосный тензорезистор (рис. 1, а) имеет экран в виде проволоки, фольги или пленки металла, расположенный параллельно ЧЭ в слое связующего и имеющий с ЧЭ одну общую электрическую точку Д, которая при необходимости может быть общей и для металла детали.

ЧЭ – R_x и экран - R_э включаются в мостовую измерительную схему (рис. 2, а), дополнительное плечо которой образовано сопротивлением экрана и регулирующим сопротивлением R_p. Гальванометр при помощи переключателя П может подключаться последовательно к вершинам моста А—В и А—Е.

Схему настраивают следующим образом. Изменением величин сопротивлений R_B и R_p последовательно добиваются равенства потенциалов между

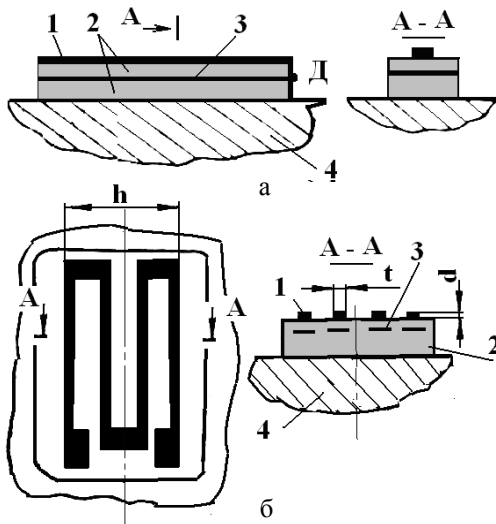


Рис. 1. Конструктивное выполнение тензорезисторов с антишунтирующим экраном:
 1 – чувствительный элемент тензорезистора;
 2 – связующее; 3 – экран; 4 – тело детали

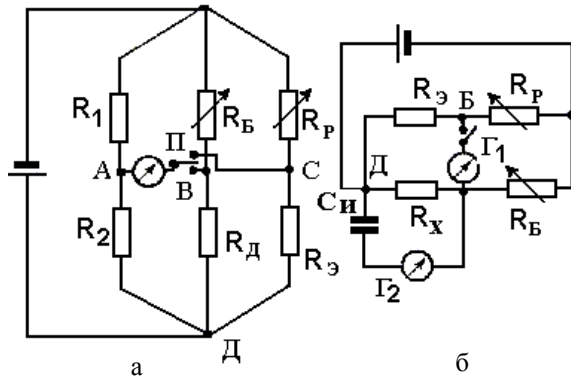


Рис. 2. Мостовая (а) и потенциметрическая (б) схемы включения тензорезистора с антишунтирующим экраном

точками А и Е, А и В, что приводит к соответствующему равенству потенциалов в точках В и Е. При этом условии, учитывая также, что точка Д является общей, распределение потенциала по экрану будет повторять распределение по чувствительному элементу тензорезистора, так как их сопротивления предполагаются равномерным по длине. Соотношение сопротивлений R_x и R_3 может быть произвольным.

Таким образом, одинаковые распределения потенциала по экрану и ЧЭ предотвращают появление тока утечки. Необходимо отметить, что вследствие шунтирования на тело детали самого экрана возможны незначительные отклонения в распределении потенциалов, что, однако, не вызывает существенного искажения антишунтирующего воздействия. Затем переключатель П присоединяет гальванометр к вершинам А и В моста, и деформация ЧЭ, приводящая к изменению его сопротивления, регистрируется обычным образом. Незначительные колебания сопротив-

ления ЧЭ - R_x (доли процента) практически не изменяют условия настройки экрана – примерно равенства потенциалов точек В и С.

В случае применения указанного тензорезистора для динамических измерений деформаций (без постоянной составляющей) можно использовать потенциметрическую измерительную схему (рис. 2, б), состоящую из сопротивлений ЧЭ- R_x и экрана – R_3 регулирующих переменных сопротивлений R_p и R_B , а также регистрирующих приборов Γ_1 и Γ_2 , источника постоянного напряжения и разделительного конденсатора $C_{и}$.

Схема работает следующим образом. Изменением сопротивлений R_p и R_B и добиваются равенства потенциалов точек А и В по гальванометру Γ_1 . В дальнейшем гальванометр Γ_1 отключается и потенциметрическая схема работает обычно, регистрируя изменение сопротивления R_x гальванометром Γ_2 . Работа экрана аналогична приведенной выше для мостовой схемы

Методы исследования

В целях оценки и учета возникающих погрешностей при измерении деформаций необходимо исследовать электрическую модель тензорезистора с антишунтирующим экраном. Электрическая модель тензорезистора с антишунтирующим экраном представлена на рис. 3.

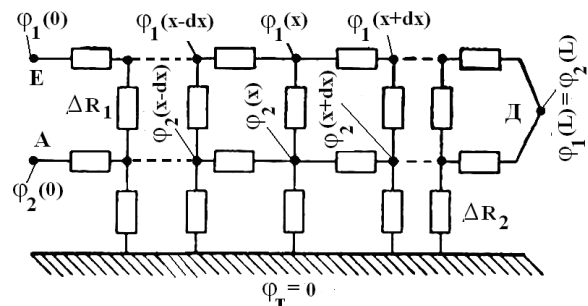


Рис. 3. Схема электрической модели тензорезистора с антишунтирующим экраном

Аналитическое определение электрического сопротивления тензорезистора r' с учетом шунтирования определяется как отношение известной приложенной к решетке разности потенциалов $\varphi_1(0) - \varphi_1(l)$ к току I через чувствительный элемент тензорезистора:

$$r' = \frac{\varphi_1(0) - \varphi_1(l)}{I} \quad (1)$$

Исходя из распределения потенциалов $\varphi_1(x) = 0$ вблизи крайней точки $x=0$ чувствительного элемента [1], определяем ток I :

$$I = \frac{1}{r} \frac{d\varphi_1(x)}{dx} = \frac{1}{r} \varphi_1(0), \quad (2)$$

где r - сопротивление ЧЭ; l - его длина.

Сопротивления четырех полосного тензорезистора (без экрана) с учетом шунтирования из полосы в полосу ЧЭ, а также его шунтирования на тело детали, определяется формулой :

$$r'_2 = r \left(1 - \frac{r}{4R_y} - \frac{r}{12R_z} \right), \quad (3)$$

где r - полное сопротивление ЧЭ тензорезистора без шунтирования;

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

Формула (3) удобна тем, что позволяет отдельно оценить погрешности в измерении за счет шунтирования из полосы в полосу Δ_1 и с учетом шунтирования на тело детали Δ_2 :

$$\Delta_1 = \frac{r^2}{4R_y} \approx \frac{3r^2 l d}{4\rho H}; \quad \Delta_2 = \frac{r^2}{12R_z} \approx \frac{r^2 t L}{12\rho d}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что толщина изоляции по разному влияет на величины Δ_1 и Δ_2 [1].

Кажущееся сопротивление ЧЭ с учетом экранирования определяется по формуле:

$$r' = r \left(1 - \frac{r^2}{180R_{CB}^2} \right), \quad (5)$$

где R_{CB} – электрическое сопротивление связующего в направлении ЧЭ – тело детали.

Если общая точка Д тензорезистора с экраном электрически связана с телом детали, то кажущееся сопротивление ЧЭ находится по формуле [2]:

$$r' = r \left(1 - \frac{4}{45} \frac{r^2}{R_{CB}^2} \right). \quad (6)$$

Из формул (3) и(5) следует, что уменьшение истинной величины сопротивления r ЧЭ при отсутствии экрана пропорциональна r/R_{CB} , а при наличии экрана пропорционально квадрату этого соотношения, что обычно более чем на два – пять порядков меньше.

В настоящее время, численные методы расчета на основе *моделей высокого уровня* позволяют с достаточной точностью определять распределение (поле) электрических токов между двумя объектами с различными потенциалами при максимальном приближении модели к реальной конструкции. Одним из таких расчетных методов стал *метод конечных элементов*. Нами был использован получивший широкое распространение для решения различных задач пакет программ – ANSYS. Твёрдотельная *двумерная* модель четырехполосного тензорезистора была выполнена с использованием программы Solid Works. Разбивка сеткой твердотельной модели

в ANSS для решения задачи распределения электрических токов не требует выполнения специальных условия.

Рассмотрена задача шунтирования тензорезистора с заведомо низким значением электроизоляционных свойств подложки - связующего. Принятые параметры тензорезистора при температуре 850 0С, представлены в разделе экспериментального исследования.

Приведен результат расчета шунтирования тензорезистора (экран расположен под чувствительным элементом) в режиме выключенного экрана (рис.4) который имеет нулевой потенциал по отношению к детали, т.к. он соединен с ней в точке Д. Как видно из рис. 4, утечка токов шунтирования из чувствительного элемента происходит через связующий материал в направлении антишунтирующего экрана на тело детали. При этом по мере увеличения потенциала в различных сечениях чувствительного элемента, происходит увеличение токов шунтирования.

При включении антишунтирующего экрана (рис. 5) распределение потенциала по длине чувствительного элемента и экрана становится одинаковым. Это вызвано особенностями подключения антишунтирующего экрана и ЧЭ. Из рис. 5 видно, что утечки тока от ЧЭ в направлении детали при этом практически отсутствуют.

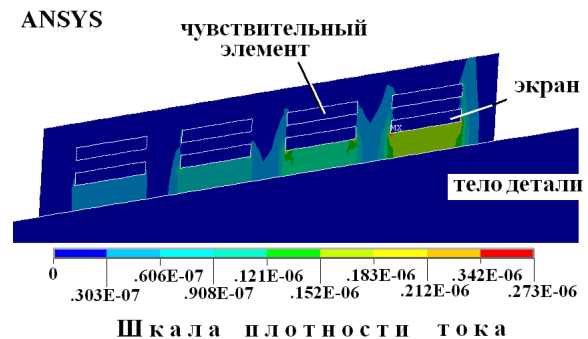


Рис. 4. Модели тензорезистора с токами шунтирования – экран не включен

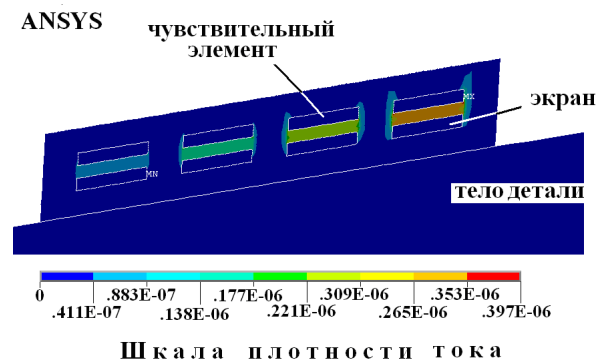


Рис. 5. Модели тензорезистора с токами шунтирования, при включенном экране

Оценить токи утечки по результатам расчета для конечно-элементной модели можно как сумму токов, вытекающих на поверхность детали:

$$I = \sum_{i=1}^n \vec{j}_i \cdot \vec{l}_i,$$

где $\vec{j}_i \cdot \vec{l}_i$ - скалярное произведение векторов плотности тока, протекающего через i -й элемент сетки, к нормали к поверхности чувствительного элемента (равного по длине участку поверхности чувствительного элемента, к которому примыкает i -й элемент конечно-элементной сетки)

Так на модели тензорезистора (рис. 4) суммарный ток шунтирования при выключенном экране составляет 0,12 мА, тогда согласно закону Ома электрическое сопротивление ЧЭ составляет при включенном экране 573 Ом, а при выключенном 566,7 Ом. Изменение сопротивления ЧЭ, воспринимаемая как кажущаяся деформация составляет 6,3 Ом.

Анализ результатов расчета позволяет сделать вывод о возможности оценки погрешности измерений деформации тензорезистором с экраном.

Экспериментальное исследование

В настоящей работе была проведена опытная проверка эффективности действия антишунтирующего экрана для четырехполосного пленочного тензорезистора, выполненного в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, б, по технологии, описанной в работе [3].

Чувствительный элемент тензорезистора представлял собой платиновую пленку, осажденную методом вжигания на слой связующего, в качестве которого служила высокотемпературная стеклокерамическая эмаль. Сопротивление ЧЭ при 20 °С составляло 230 Ом, электросопротивление между чувствительным элементом и деталью при 20 °С – более 1000 мОм. Экран, расположенный между ЧЭ и поверхностью тарировочной балки, был изготовлен аналогичным образом и имел сопротивление 130 Ом (при 20° С). Общий вид балки с нанесенным тензорезистором представлен на рис. 6.

Тензорезистор подключался по схеме, представленной на рис. 2, а.

Балку с тензорезистором помещали в муфельную печь и нагревали до температуры 850° С. При этой температуре кажущееся сопротивление чувствительного элемента равнялось 573 Ом, экрана – 324 Ом, а сопротивление связующего снижалось до 20 кОм. При выключении экрана сопротивление тензорезистора уменьшалось на 7,03 Ом. Полученный результат хорошо согласуется с расчетным (см раздел МКЭ). Эту величину в первом приближении можно считать погрешностью тензорезистора

из-за шунтирования на тело балки, она и соответствует погрешности, рассчитанной по формулам (3, 5). Изменение сопротивления ЧЭ, связанное с его шунтированием через слой связующего, приводит к появлению мнимой деформации $\varepsilon_{МН}$. Полученная опытным путем зависимость $\varepsilon_{МН} = f(t)$, t - температура тензорезистора приведена на рис. 7.

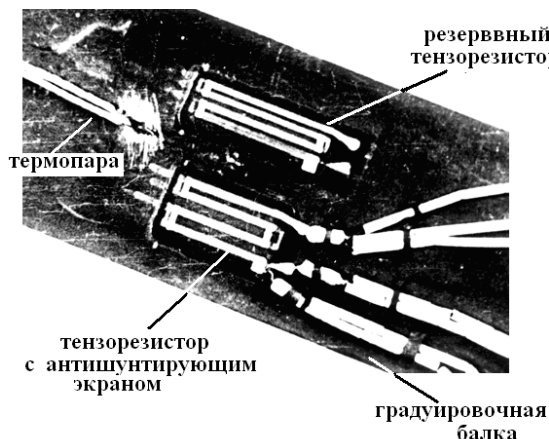


Рис.6. Общий вид градуировочной балки и тензорезистора с экраном

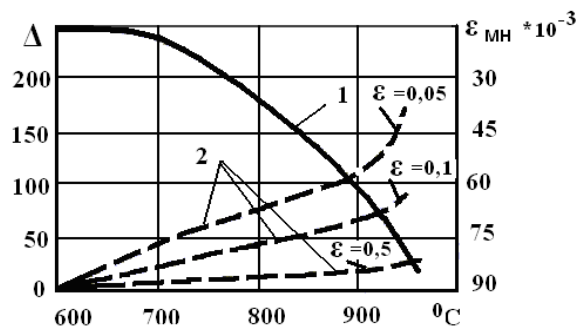


Рис 7. Зависимость мнимой деформации шунтирования (1) и погрешности измерения тензорезистора (2) от температуры

Представляет интерес оценка влияния шунтирования в различных диапазонах относительной деформации. На рис. 7 приведена величина погрешности $\Delta = \frac{\varepsilon_{МН}}{\varepsilon}$, где ε – относительная деформация, измеряемая тензорезистором. Установлено, что погрешность может почти вдвое превышать измеряемую деформацию.

Заключение

Рассмотрены некоторые закономерности устранения токов утечки от решетки тензорезистора к поверхности детали путем введения антишунтирующего экрана, расположенного в толще связующего.

Проанализированы особенности различных конструктивных схем тензорезисторов с антишун-

тирующим экраном и схем их подключения. Предложен метод расчета погрешности тензорезисторов с экраном и получены соответствующие зависимости.

Проведена экспериментальная проверка эффективности антишунтирующего экрана для высокотемпературного пленочного платинового тензорезистора.

Можно сделать вывод, что предлагаемый тензорезистор значительно уменьшает (на два - пять порядков) погрешность измерения деформации, связанную с шунтированием его ЧЭ.

В связи с этим открывается возможность применения в качестве связующего высокотемпературного тензорезистора материалов, имеющих невысокие значения электросопротивления, но надежно соединяющих ЧЭ с исследуемой деталью.

Поступила в редакцию 10.06.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, технический консультант А.В. Белогуб, ОАО «АВРАМАТ», Харьков.

ТЕНЗОРЕЗИСТОРИ З АНТИШУНТЮЮЧИМ ЕКРАНОМ

Ю.О. Гусев, Є.О. Кононихін, Кахраї Камбіз

Зменшення електроізоляційних властивостей зв'язуючого матеріалу тензорезистора реєструючою апаратурою сприймається як уявна деформація. Для зменшення струмів витоку в шарі сполучного матеріалу між ЧЕ тензорезистора і поверхню деталі вводиться екран, що співпадає по конфігурації з ЧЕ тензорезистора. Розглянуто конструктивні особливості тензорезисторів з антишунтуючим екраном; схеми їх включення в вимірювальні ланцюги; проведено аналіз процесу шунтування ЧЕ тензорезистора, з використанням аналітичного методу; представлені формули зміни опору ЧЕ при його шунтуванні, а також кінцево-елементна модель (МСЕ) тензорезистора при різних значеннях електроопору зв'язуючого; отримані поля розподілу струмів витоку. Представлені результати експериментальної перевірки явища шунтування високотемпературного тензорезистора та їх відповідність з теоретичними дослідженнями.

Ключові слова: тензорезистор, чутливий елемент, ізолятор - сполучна, антишунтуючий екран, струми шунтування, уявна деформація, звичайно-елементна модель шунтування тензорезистора.

RESISTIVE-STRAIN SENSORS WITH BYPASSING-PROTECTION SCREEN

U.A. Gusev, E.A. Kononihin, Kahrai Kambiz

Recording equipment perceives decreasing of electrical insulating properties of binder of resistive-strain sensor as an imaginary deformation. The screen is inserted in the layer of binder between the detector element of resistive-strain sensor and part surface. The configuration of this screen the same as detector element of resistive-strain sensor has. The design features of resistive-strain sensors with bypassing-protection screen and their inclusion circuit in measuring loop were considered. The analysis of bypassing process of detector element of resistive-strain sensor was carried out using analytic approach. The equations of detector element resistance changing while bypassing were presented. The finite-element model (FEM) of resistive-strain sensor with different values of binder resistance were presented as well. The fields of leakage current distribution were obtained. The bypassing effect of the high temperature resistive-strain sensor was experimentally checked, the results of this check were presented, their fitting to theoretical research were shown.

Key words: resistive-strain sensor, detector element, insulator – binder, bypassing-protection screen, bypassing currents, imaginary deformation, finite-element model of resistive-strain sensor bypassing.

Гусев Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: gusev.ua@mail.ru.

Кононихин Евгений Александрович – магистрант кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Кахраи Камбиз – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kjek@yandex.ru.

Литература

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

2. А.с.757841 СССР, МКЛ³ G0 18 7/18. Электрический тензометр [Текст] / Ю.А. Гусев, А.В. Олейник, Д.Ф. Симбирский (СССР). - № 2427441/25-28; заявл. 06.12.76; опубл. 23.08 80, Бюл. 31. - 4 с.

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

4. Пленочный тензорезистор для виброиспытаний лопаток турбин ГТД [Текст] / Ю.А. Гусев, Камбиз Кахраи, Д.Ф. Симбирский, СС. Трипольский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 8 (95). – С. 169-172.