

Федеральное государственное унитарное предприятие
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени профессора Н.Е. Жуковского»
ФГУП «ЦАГИ»

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ГЦИ СИ,
главный метролог ФГУП «ЦАГИ»

 В.В. Петроневич

ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ ФОЛЬГОВЫЕ

ФК


МЕТОДИКА ПОВЕРКИ

МП 4.28.003-2017

Заместитель начальника НИО-7


А.И. Самойленко

Начальник сектора № 3 НИО-7


С.В. Дыцков

Исполнитель:

Инженер сектора № 3 НИО-7


Д.М. Богатырев

Настоящий документ разработан в соответствии с положениями рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 51-2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Документы на методики поверки средств измерений. Основные положения», распространяется на тензорезисторы фольговые ФК (далее – тензорезисторы), при проведении первичной поверки при выпуске из производства, а также при внеочередной поверке после истечения срока годности партии или группы тензорезисторов.

Тензорезисторы фольговые ФК (далее – тензорезисторы) предназначены для измерения деформаций в деталях машин и конструкций при статических и динамических нагрузках, а также в качестве чувствительных элементов первичных преобразователей различных физических величин. Предназначены для разовой наклейки.

1 Операции и средства поверки

1.1 При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции и применены средства поверки с характеристиками, указанными в таблице 1.

Таблица 1

Наименование операции	Номер пункта документа по поверке	Наименование и тип средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего метрологические и основные технические характеристики средства поверки
Внешний осмотр	6.1	-
Опробование	6.2	Омметр цифровой ЦЗ06-1: - верхние пределы измерений 100 Ом; 1 кОм; - пределы основной относительной погрешности измерений: $\pm (0,04 + 0,0025 \cdot (\frac{R_K}{R_X} - 1)) \%$; $\pm (0,05 + 0,005 \cdot (\frac{R_K}{R_X} - 1)) \%$, R_K - конечное значение диапазона измерений сопротивления, R_X - измеряемое сопротивление Измеритель параметров изоляции МП40Х: - диапазон измерений сопротивления изоляции от 2 до 20 ГОм; - относительная погрешность измерений $\pm 3 \%$.
Определение (контроль) метрологических характеристик	6.3	
Определение среднего значения и СКО чувствительности функции преобразования при нормальных условиях	6.3.1	Установка воспроизведения и измерения деформации УГТ-1: - диапазоны измерений $\pm 3000 \text{ млн}^{-1}$; - погрешность измерений $\pm 0,45 \%$ Система измерительная тензометрическая СТММ:

Наименование операции	Номер пункта документа по поверке	Наименование и тип средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего метрологические и основные технические характеристики средства поверки
		номинальное сопротивление тензорезисторов от 100 до 1000 Ом; диапазон измерений приращения сопротивления от $0,02 \cdot R_n$ до $0,1 \cdot R_n$; погрешность измерения приращения сопротивления тензорезисторов $\pm 0,2 \%$
Определение среднего значения и СКО часовой ползучести при нормальных условиях	6.3.2	п. 6.3.1
Определение среднего значения и СКО дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре	6.3.3	Балка чистого изгиба с коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6}$ Испытательная камера КТХ-1000: - диапазон воспроизведения температуры от минус 70 ° до плюс 150 °С; - абсолютная погрешность $\pm 2,0$ °С. Система измерительная тензометрическая СТММ: номинальное сопротивление тензорезисторов от 100 до 400 Ом; диапазон измерений приращения сопротивления от $0,02 \cdot R_n$ до $0,1 \cdot R_n$; погрешность измерения приращения сопротивления тензорезисторов $\pm 0,2 \%$
Определение температурной характеристики сопротивления (ТХС), СКО погрешности аппроксимации, максимального значения и СКО максимального значения ТХС в рабочей области значений температуры	6.3.4	п. 6.3.3
Определение среднего значения и СКО воспроизводимости начального сопротивления	6.3.5	п. 6.3.3
Определение СКО и функции влияния температуры на чувствительность	6.3.6	п. 6.3.3

Примечание – Допускается применять средства поверки, не приведенные в перечне, но обеспечивающие определение (контроль) метрологических характеристик поверяемых средств измерений с требуемой точностью.

1.2 Средства измерений, применяемые при поверке, должны иметь действующие свидетельства о поверке, испытательное оборудование должно быть аттестовано.

1.3 При получении отрицательного результата любой из операций по таблице 1 поверку тензорезисторов рекомендуется прекратить; последующие операции поверки проводят, если отрицательный результат предыдущей операции не влияет на достоверность поверки последующего параметра.

1.4 По письменному заявлению владельца допускается поверять тензорезисторы только на диапазоны, которые необходимы в процессе их эксплуатации. При этом в протоколе и свидетельстве о поверке необходимо сделать соответствующую запись.

2 Требования к квалификации поверителей

2.1 В качестве персонала, выполняющего поверку, допускаются лица с высшим образованием и (или) дополнительным профессиональным образованием в области обеспечения единства измерений в части проведения поверки (калибровки) средств измерений.

2.2 Персонал, выполняющий поверку, должен иметь опыт практической работы на аналогичных средствах измерений.

2.3 К работам по поверке могут быть допущены лица, ознакомившиеся с документацией на тензорезисторы и прошедшие инструктаж по технике безопасности и безопасной работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В.

3 Требования по безопасности

3.1 Перед проведением поверки следует изучить эксплуатационную документацию на поверяемые тензорезисторы и приборы, применяемые при поверке.

3.2 Предельно допустимые концентрации растворителей (ацетона, спирта этилового и т.д.) в рабочей зоне при наклейке тензорезисторов должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.004.

3.3 Наклейка тензорезисторов должна проводиться в помещении, снабженном приточно-вытяжной вентиляцией, средствами пожаротушения и водоснабжения.

4 Условия поверки

4.1 При проведении поверки должны соблюдаться следующие условия:

Температура воздуха, °С	от 18 до 22
Изменение температуры в течение 1 часа, °С	не более 2
Относительная влажность воздуха, %	от 30 до 60
Напряжение сети переменного тока, В	от 205 до 230
Частота сети, Гц	50 ± 1

4.2 Тензорезисторы должны быть выдержаны в помещении, где будут производиться испытания, не менее 2 часов.

5 Подготовка к поверке

Перед выполнением поверки должны быть выполнены следующие подготовительные работы:

5.1 Из упаковки одиночных тензорезисторов методом случайного отбора по ГОСТ 18321 комплектуются три выборки тензорезисторов:

- не менее 10 штук для проведения операций по пункту 6.3.1;
- не менее 10 штук для проведения операций по пункту 6.3.2;
- не менее 10 штук для проведения операций по пунктам 6.3.3 и 6.3.4.

5.2 Измерить величину электрического сопротивления каждого тензорезистора с помощью омметра цифрового ЦЗ06-1 и результаты измерений занести в протокол произвольной формы. Предельное относительное отклонение сопротивления в партии от номинального не должно превышать $\pm 0,35\%$, $\pm 0,8\%$ и $\pm 1,0\%$ для групп качества А, Б и В соответственно. Не удовлетворяющие данному условию тензорезисторы должны быть отбракованы и не должны быть допущены к поверке.

5.3 Наклеить поверяемые тензорезисторы на градуировочные балки или образцы в соответствии с инструкцией по наклеиванию.

5.4 Выполнить монтаж тензорезисторов во внешнюю измерительную цепь.

6 Проведение поверки

6.1 Внешний осмотр

При внешнем осмотре тензорезисторов должно быть установлено отсутствие видимых загрязнений, расслоений, воздушных пузырьков.

6.2 Опробование

Опробование тензорезисторов производится в следующей последовательности:

- измерить электрическое сопротивление каждого поверяемого тензорезистора из выборки с помощью измерительного прибора с классом точности не менее $0,1\%$ и результаты измерений занести в протокол произвольной формы. В случае качественно проведенной операции наклеивания, изменение электрического сопротивления тензорезисторов относительно начального (п.5.2) не должно превышать $\pm 0,5\%$.

- измерить электрическое сопротивление изоляции с помощью Измеритель параметров изоляции МПТ40Х. Результаты измерений занести в протокол произвольной формы.

Электрическое сопротивление изоляции каждого тензорезистора из выборки должно быть не менее 50, 100 и 200 МОм (в зависимости от группы качества).

6.3 Определение (контроль) метрологических характеристик

6.3.1 Определение чувствительности и нелинейности функции преобразования при нормальных условиях

6.3.1.1 В соответствии с инструкцией по наклейке выполнить установку тензорезисторов на чувствительный элемент установки – балку «чистого изгиба».

6.3.1.2 Произвести три тренировочных (без измерения выходных сигналов) цикла деформирования с деформацией $\varepsilon = \pm(1100 \pm 50) \text{млн}^{-1}$ и один рабочий (с измерением выходных сигналов).

6.3.1.3 После выполнения тренировочных циклов деформирования исключить из выборки тензорезисторы, на которых образовались вздутия, отслаивания от поверхности балки. При выявлении аномальности выходного сигнала у одного тензорезистора или отклонении от среднего значения более чем на 10 % произвести его замену. При выявлении более одного такого тензорезистора, выборку забраковать и выполнить повторную наклейку.

6.3.1.4 Циклы деформирования осуществляются следующим способом:

- балку поочередно нагружают изгибающими моментами противоположных знаков, т. е. сначала изгибают в одну, а затем в противоположную сторону.

6.3.1.5 Нагрузить балку до деформации $\varepsilon = 0 \text{млн}^{-1}$ и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.3.1.6 Нагрузить балку до деформации $\varepsilon = (1000 \pm 50) \text{млн}^{-1}$ и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.3.1.7 Нагрузить балку до деформации $\varepsilon = -(1000 \pm 50) \text{млн}^{-1}$ и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.3.1.8 Произвести полное разгружение балки до деформации . Время, затрачиваемое на нагружение балки и определение выходных сигналов тензорезисторов не должно превышать 2 мин.

6.3.1.9 По полученным данным выполнить обработку результатов измерений и определить среднее значение чувствительности по формулам:

$$K_i = \frac{|\xi_i(+\varepsilon_H) + \xi_i(-\varepsilon_H)|}{|+\varepsilon_H| + |-\varepsilon_H|} \quad (1)$$

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_i \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (K_i - \bar{K})^2} \quad (3)$$

где i – номер тензорезистора, $i = 1, 2, \dots, n$; n – объем выборки;

K_i - чувствительность i – го тензорезистора;

$+\varepsilon_H$, $-\varepsilon_H$ - значение задаваемой деформации;

$\xi_i(\varepsilon_H)$ - выходной сигнал тензорезистора при значении деформации ε_H .

6.3.1.1.10 Выполнить нагружение с шагом $(500 \pm 50) \text{млн}^{-1}$ до максимального (3000млн^{-1}) и минимального (минус 3000млн^{-1}) значений деформации с определением выходных сигналов тензорезисторов.

6.3.1.1.11 По полученным для отдельных тензорезисторов значениям выходных сигналов вычисляют среднее значение выходного сигнала для каждой ступени деформации.

6.3.1.1.12 Нелинейность чувствительности определять по формуле:

$$\gamma_{MAX} = \frac{|\xi_i(+\varepsilon_j) + \bar{K} \cdot \varepsilon_j|}{\bar{K} \cdot \varepsilon_j} \cdot 100 \quad (4),$$

где \bar{K} – выборочное среднее значение чувствительности;

j – номер ступени деформации ($j=1, 2, \dots, m, m$ – число ступеней).

6.3.1.1.13 Результаты испытаний считаются положительными, если:

- среднее значение чувствительности при нормальных условиях находится в диапазоне от 1,90 до 2,30;

- среднее квадратическое отклонение чувствительности в партии для групп качества А, Б и В не более $\pm 0,02, \pm 0,03$ и $\pm 0,05$ соответственно;

- нелинейность функции преобразования при нормальных условиях для групп качества А, Б, В не более 1, 2 и 3 % соответственно.

6.3.2 Определение часовой ползучести при нормальных условиях

6.3.2.1 Нагрузить балку до деформации $\varepsilon = (1000 \pm 50) \text{ мкм}^{-1}$ за время не более 60 с и измерить начальные значения $\xi_i(0)$ выходных сигналов тензорезисторов в течение последующего времени не более 60 с.

6.3.2.2 Выдержать балку в нагруженном состоянии в течение 60 мин и измерить выходные сигналы тензорезисторов. Разгрузить балку.

6.3.2.3 По полученным данным рассчитывают среднее значение часовой ползучести и среднее квадратическое отклонение часовой ползучести по формулам:

$$P_i(\tau_j) = \frac{\xi_i(\tau_j) - \xi_i(0)}{\xi_i(0)} \cdot 100 \quad (5)$$

$$\bar{P}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (P_i - \bar{P})^2} \quad (7)$$

6.3.2.4 Результаты испытаний заносятся в протокол произвольной формы и считаются положительными, если:

- среднее значение часовой ползучести при нормальных условиях для групп качества А, Б и В превышает $\pm 0,5; \pm 1,0$ и $\pm 1,5$ %;

- среднее квадратическое отклонение часовой ползучести при нормальных условиях для групп качества А, Б и В не более $\pm 0,5; \pm 1,0$ и $\pm 1,5$ соответственно.

6.3.3 Определение дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре

6.3.3.1 Образец с установленными тензорезисторами нагревают со скоростью не более 2 °С/мин до максимальной температуры и определяют выходные сигналы тензорезисторов по истечении промежутка времени в 1 час.

6.3.3.2 Для каждого тензорезистора дрейф выходного сигнала за 1 час рассчитывают по формуле (8):

$$D_i(\tau_j) = \xi_i(\tau_j) - \xi_i(0) \quad (8)$$

6.3.3.3 По полученным данным рассчитывают выборочные средние значения дрейфа и выборочное СКО.

6.3.3.4 Результаты испытаний считаются положительными, если:

- среднее значение дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре для групп качества А, Б и В не более ± 20 ; ± 100 и ± 500 мкОм/Ом соответственно;

- - среднее квадратическое дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре для групп качества А, Б и В не более 5; 20 и 60 мкОм/Ом соответственно.

6.3.4 Определение температурной характеристики сопротивления (ТХС) и максимального значения ТХС в рабочей области значений температуры

6.3.4.1 В процессе определения ТХС балка «чистого изгиба» с установленными тензорезисторами не должна подвергаться внешней механической деформации.

6.3.4.2 Определение ТХС проводится при нагреве образца, выполняются следующие операции:

- образец охлаждают до минимальной температуры, равной минус 50 °С;
- нагревают образец со скоростью от 4 до 6 °С/мин;
- значение температуры на ступенях равно -50; -20; -10; 0; 10; 20; 40; 60; 70 °С;
- на каждой ступени измерить выходные сигналы тензорезисторов и температуру;
- время выдержки на каждой ступени не должно превышать 10 минут.

6.3.4.3 По полученным данным определяют выборочное среднее значения выходных сигналов $\bar{\xi}(t_i)$ для каждой ступени и выборочное СКО S_i для максимальной температуры 70 °С.

6.3.4.4 Используя полученные значения $\bar{\xi}(t_i)$ методом наименьших квадратов рассчитывают коэффициенты C_0, \dots, C_r аппроксимирующего полинома (9)

$$\hat{\xi}(t) = C_0 \cdot + C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t^3 \quad (9)$$

6.3.4.5 Максимальное значение ТХС в рабочей области значений температуры определяется как наибольшее абсолютное значение выходного сигнала в рабочей области значений температуры.

6.3.4.6 Результаты испытаний считаются положительными, если:

- среднее квадратическое отклонение погрешности аппроксимации для групп качества А, Б и В не более 10; 40 и 100 мкОм/Ом соответственно;

- максимальное значение ТХС в рабочей области значений температуры, для групп качества А, Б, В не более 1000; 1300; 1800 мкОм/Ом соответственно.

- СКО максимального значения ТХС в рабочей области значений температуры для групп качества А, Б и В не более 20; 50 и 100 мкОм/Ом соответственно.

6.3.5 Определение воспроизводимости начального сопротивления

6.3.5.1 Балку «чистого изгиба» с установленными тензорезисторами нагревают от температуры $t_0 = (23_{-5}^{+2})^{\circ}\text{C}$ до максимальной температуры 80°C , выдерживают при этой температуре в течение 1 ч и охлаждают до начальной температуры со скоростью не более $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

6.3.5.2 Для каждого тензорезистора воспроизводимость начального сопротивления определяют как значение выходного сигнала при температуре $t_0 = (23_{-5}^{+2})^{\circ}\text{C}$ после выполнения операций по п. 6.3.5.1.

6.3.5.3 По полученным для отдельных тензорезисторов данным определяют выборочное среднее значение воспроизводимости начального сопротивления и выборочное СКО.

6.3.5.4 Результаты испытаний считаются положительными, если:

- среднее значение воспроизводимости начального сопротивления для групп качества А, Б и В не более 20; 40 и 80 мкОм/Ом соответственно;

- среднее квадратическое отклонение воспроизводимости начального сопротивления для групп качества А, Б и В не более 30; 50 и 75 мкОм/Ом соответственно.

6.3.6 Определение СКО и функции влияния температуры на чувствительность

6.3.6.1 Установку с балкой «чистого изгиба» и установленными на нее тензорезисторами размещают в испытательной камере КТХ-1000.

6.3.6.2 При температуре $t_0 = (23_{-5}^{+2})^{\circ}\text{C}$ выполняют три тренировочных и один рабочий цикл нагружения до деформации $\varepsilon_M = \pm(1000 \pm 50) \text{ млн}^{-1}$.

6.3.6.3 Балку с тензорезисторами охлаждают до минимальной температуры со скоростью не более $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ со ступенями $-10; 2; 23; 40; 60; 70^{\circ}\text{C}$ и проводят рабочий цикл нагружения до деформации ε_M .

6.3.6.4 Для каждого тензорезистора значение функции влияния температуры на чувствительность рассчитать по формуле (10)

$$\Phi_{ij} = \frac{K_{ij}}{K_{ij0}}, \quad (10)$$

где K_{ij} - чувствительность при температуре t_j ;

j – номер ступени температуры, $j = 1, 2, \dots, m$; m – число ступеней.

6.3.6.5 По полученным данным рассчитать выборочное среднее значение функции влияния для каждой ступени и выборочное СКО для максимальной температуры. Используя полученные средние значения, методом наименьших квадратов рассчитать коэффициент B аппроксимирующего полинома первой степени по формулам (11) и (12)

$$\hat{\Phi}(t) = 1 + B \cdot t \quad (11)$$

$$S_{d\Phi} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m [\hat{Z}(\Phi_{ij}) - \bar{Z}(\Phi_{ij})]^2}, \quad (12)$$

где $\hat{Z}(\Phi_{ij})$ - расчетное значение функции влияния температуры на чувствительность;

$\bar{Z}(\Phi_{ij})$ - выборочное среднее значение функции влияния температуры на чувствительность;

m – число ступеней температуры нагрева;

i – число коэффициентов полинома;

j - номер ступени, $j = 1, 2, \dots, m$.

6.3.6.6 Результаты испытаний считаются положительными, если:

- СКО аппроксимации $S_{d\Phi}$ для групп качества А, Б и В не более $\pm 0,02$, $\pm 0,04$ и $\pm 0,07$ соответственно.

7 Оформление результатов поверки

Тензорезисторы, прошедшие поверку с положительными результатами, признаются годными, и допускаются к применению. На партию тензорезисторов выдается свидетельство о поверке, в паспорте ставится оттиск клейма о поверке.

В случае отрицательных результатов поверки в паспорте на партию тензорезисторов делается соответствующая запись, либо выдается извещение о непригодности.