

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
ФКПВ

МЕТОДИКА ПОВЕРКИ

МП 3.28.001-2015

г.р. 64192-16

Заместитель начальника НИО-7

А.И. Самойленко

Начальник сектора № 4 НИО-7

О.В. Довыденко

Инженер сектора № 4 НИО-7

М.В. Пивоварова

Инженер сектора № 3 НИО-7

Д.М. Богатырев

Начальник сектора № 3 НИО-7

С.В. Дыцков

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 ФКПВ (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 ФКПВ (далее ФКПВ) предназначены для измерения деформаций в деталях машин и конструкций, при статических и динамических нагрузках. Тензорезисторы применяются также в качестве чувствительного элемента для датчиков различного назначения, 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	-
Определение (контроль) метрологических характеристик	6.3	
Определение относительного отклонения сопротивления в партии от номинального	6.3.1	Омметр цифровой Ц306-1: - верхние пределы измерений 100 Ом; 1 кОм; - пределы основной относительной погрешности измерений $\pm (0,04 + 0,0025 (\frac{R_k}{R_x} - 1)) \%$; $\pm (0,05 + 0,005 (\frac{R_k}{R_x} - 1)) \%$, где R_k – конечное значение диапазона измерений сопротивлений, R_x – измеряемое сопротивление
Определение среднего значения и среднего квадратического отклонения (СКО) чувствительности при нормальных условиях	6.3.2	Установка воспроизведения и измерения деформации УГТ-1: - диапазоны измерений $\pm 3000 \text{ млн}^{-1}$; - пределы допускаемой относительной погрешности измерений $\pm 0,45 \%$
Определение среднего значения и СКО часовой ползучести при нормальных условиях	6.3.3	Система измерительная тензометрическая СТММ: номинальное сопротивление тензорезисторов от 100 до 400 Ом; диапазон измерений приращения сопротивления от $\pm 0,02 \cdot R_n$ до $\pm 0,1 \cdot R_n$; пределы допускаемой приведенной погрешности

Наименование операции	Номер пункта документа по поверке	Наименование и тип средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего метрологические и основные технические характеристики средства поверки
		<p>измерений приращения сопротивления тензорезисторов $\pm 0,2 \%$. Система микропроцессорная многоканальная тензометрическая ММТС-64.01: номинальное сопротивление тензорезисторов от 50 до 200 Ом;</p> <p>диапазон измерений приращения сопротивления от $\pm 1,5$ до ± 12 Ом;</p> <p>пределы допускаемой приведенной погрешности измерений приращения сопротивления тензорезисторов $\pm 0,2 \%$.</p> <p>Усилитель измерительный «MGCplus», включающий сменный измерительный модуль ML10B, соединительную плату AP14:</p> <ul style="list-style-type: none"> – класс точности 0,5; – номинальное значение сопротивления тензорезисторов: 120, 350, 700 Ом.
Определение среднего значения и СКО часовой ползучести при максимальной температуре	6.3.4	<p>Установка воспроизведения и измерения деформации УГТ-1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - диапазоны измерений $\pm 3000 \text{ млн}^{-1}$; - пределы допускаемой относительной погрешности измерений $\pm 0,45 \%$
Определение СКО погрешности аппроксимации функции влияния температуры на чувствительность	6.3.5	<p>Система измерительная тензометрическая СТММ:</p> <p>номинальное сопротивление тензорезисторов от 100 до 400 Ом;</p> <p>диапазон измерений приращения сопротивления от $\pm 0,02 \cdot R_n$ до $\pm 0,1 \cdot R_n$;</p> <p>пределы допускаемой приведенной погрешности измерений приращения сопротивления тензорезисторов $\pm 0,2 \%$. Система микропроцессорная многоканальная тензометрическая ММТС-64.01: номинальное сопротивление тензорезисторов от 50 до 200 Ом;</p> <p>диапазон измерений приращения сопротивления от $\pm 1,5$ до ± 12 Ом;</p> <p>пределы допускаемой приведенной погрешности измерений приращения сопротивления тензорезисторов $\pm 0,2 \%$.</p> <p>Усилитель измерительный «MGCplus», включающий сменный измерительный модуль ML10B, соединительную плату AP14:</p> <ul style="list-style-type: none"> – класс точности 0,5; – номинальное значение сопротивления тензорезисторов: 120, 350, 700 Ом. <p>Климатическая камера EXCAL 9600H70/30G:</p> <ul style="list-style-type: none"> - диапазон воспроизведения температуры от минус 50° до плюс 80°C; - пределы абсолютной погрешности $\pm 1^\circ \text{C}$.

Наименование операции	Номер пункта документа по поверке	Наименование и тип средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего метрологические и основные технические характеристики средства поверки
Определение СКО погрешности аппроксимации температурной характеристики сопротивления (ТХС)	6.3.6	Балка чистого изгиба с коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6}$ Климатическая камера EXCAL 9600H70/30G: - диапазон воспроизведения температуры от минус 50° до плюс 80 °С; - пределы абсолютной погрешности ± 1 °С.
Определение среднего значения и СКО часового дрейфа при максимальной температуре	6.3.7	Система измерительная тензометрическая СТММ: номинальное сопротивление тензорезисторов от 100 до 400 Ом; диапазон измерений приращения сопротивления от $\pm 0,02 \cdot R_n$ до $\pm 0,1 \cdot R_n$; пределы допускаемой приведенной погрешности измерений приращения сопротивления тензорезисторов $\pm 0,2$ %. Система микропроцессорная многоканальная тензометрическая ММТС-64.01: номинальное сопротивление тензорезисторов от 50 до 200 Ом; диапазон измерений приращения сопротивления от $\pm 1,5$ до ± 12 Ом; пределы допускаемой приведенной погрешности измерений приращения сопротивления тензорезисторов $\pm 0,2$ %. Усилитель измерительный «MGCplus», включающий сменный измерительный модуль ML10B, соединительную плату AP14: - класс точности 0,5; - номинальное значение сопротивления тензорезисторов: 120, 350, 700 Ом.

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.

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 ± 10

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 комплектуются три выборки тензорезисторов:

- 100 % партии проведения операций по пункту 6.3.1;

- не менее 10 штук для проведения операций по пунктам 6.3.2 – 6.3.7.

5.2 Перед испытаниями по пунктам 6.3.2 – 6.3.7 необходимо:

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

5.2.2 Выполнить монтаж тензорезисторов во внешнюю измерительную цепь.

6 Проведение поверки

6.1 Внешний осмотр

При внешнем осмотре тензорезисторов проводится проверка внешнего вида, комплектности, маркировки ФКПВ на соответствие технической документации фирмы-изготовителя, а также должно быть установлено отсутствие видимых загрязнений, расслоений, воздушных пузырьков.

6.2 Опробование

Опробование тензорезисторов производится после проведения операций по п. 6.3.1 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. В случае качественно проведенной операции наклеивания, изменение электрического сопротивления тензорезисторов относительно начального не должно превышать $\pm 0,5$ %.

- измерить электрическое сопротивление изоляции с помощью измерителя сопротивления изоляции с диапазоном измерений не менее 200 МОм и погрешностью измерения не более 10 %. Результаты измерений занести в протокол.

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 относительного отклонения сопротивления в партии от номинального

6.3.1.1 Проверка номинального сопротивления тензорезисторов осуществляется методом прямых измерений с помощью омметра цифрового Ц306-1. Результат измерений заносится в протокол.

6.3.1.2 Результаты испытаний считаются положительными, если максимальное относительное отклонение сопротивления в партии от номинального не превышает значений, установленных в ТУ (± 1 , ± 2 и ± 5 % для групп качества А, Б и В соответственно).

6.3.2 Определение среднего значения и СКО чувствительности при нормальных условиях

6.3.2.1 Произвести три тренировочных (без измерения выходных сигналов) цикла деформирования с деформацией $+ (1100 \pm 50)$; $- (1100 \pm 50)$ млн⁻¹.

6.3.2.2 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.

6.3.2.3 Провести один рабочий (с измерением выходных сигналов) цикл деформирования, поочередно нагружая балку изгибающими моментами противоположных знаков, т. е. сначала изгибать в одну, а затем в противоположную сторону.

6.3.2.4 Разгрузить балку ($\varepsilon = 0$ млн⁻¹) и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.3.2.5 Нагрузить балку до деформации $\varepsilon = +(1000 \pm 50)$ млн⁻¹ и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.3.2.6 Разгрузить балку до ($\varepsilon = 0$ млн⁻¹) и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.3.2.7 Нагрузить балку до деформации $\varepsilon = -(1000 \pm 50)$ млн⁻¹ и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.3.2.8 Произвести полное разгружение балки ($\varepsilon = 0$ млн⁻¹). Время, затрачиваемое на нагружение балки и определение выходных сигналов тензорезисторов не должно превышать 2 мин.

6.3.2.9 По полученным данным выполнить обработку результатов измерений и определить среднее значение \bar{K} и СКО S_K чувствительности по формулам:

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

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

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

где K_i - чувствительность i - го тензорезистора;

i - номер тензорезистора, $i = 1, 2, \dots, n$;

n - объем выборки;

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

$\xi_i(+\varepsilon_H), \xi_i(-\varepsilon_H)$ - выходные сигналы тензорезистора при значении деформации $+\varepsilon_H, -\varepsilon_H$ соответственно.

6.3.2.10 Результаты поверки считаются положительными, если определенные значения соответствуют описанию типа:

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

- СКО чувствительности в группе для групп качества А, Б и В не более 0,02; 0,03 и 0,05 соответственно.

6.3.3 Определение среднего значения и СКО часовой ползучести при нормальных условиях

6.3.3.1 Нагрузить балку с установленными тензорезисторами на установке УГТ-1 до деформации $\varepsilon = (1000 \pm 50)$ млн⁻¹ за время не более 60 с и измерить начальные значения $\xi_i(0)$ выходных сигналов тензорезисторов в течение последнего времени не более 60 с.

6.3.3.2 Выдержать балку в нагруженном состоянии в течение 60 мин, после чего измерить выходные сигналы тензорезисторов $\xi_i(1)$.

6.3.3.3 Разгрузить балку.

6.3.3.4 По полученным данным рассчитать часовую ползучесть для каждого тензорезистора Π_i , среднее значение $\bar{\Pi}$ и СКО S_{Π} часовой ползучести для группы по формулам:

$$\Pi_i = \frac{\xi_i(1) - \xi_i(0)}{\xi_i(0)} \cdot 100; \quad (4)$$

$$\bar{\Pi} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Pi_i; \quad (5)$$

$$S_{\Pi} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (\Pi_i - \bar{\Pi})^2}. \quad (6)$$

6.3.3.5 Результаты поверки считаются положительными, если:

- среднее значение часовой ползучести при нормальных условиях для групп качества А, Б и В не выходит за пределы $\pm 0,5$; $\pm 2,0$ и $\pm 10,0$ %;
- СКО часовой ползучести при нормальных условиях для групп качества А, Б и В не более 0,2, 0,5 и 1,0 % соответственно.

6.3.4 Определение среднего значения и СКО часовой ползучести при максимальной температуре

6.3.4.1 Балку с тензорезисторами нагреть до максимальной температуры (80 °С) со скоростью не более 2 °С/мин.

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

6.3.4.3 Выдержать балку в нагруженном состоянии в течение 60 мин, после чего измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.3.4.4 По полученным данным рассчитать часовую ползучесть для каждого тензорезистора, среднее значение и СКО часовой ползучести для группы при максимальной температуре по формулам (4), (5) и (6).

6.3.4.5 Результаты поверки считаются положительными, если:

- среднее значение часовой ползучести при максимальной температуре для групп качества А, Б и В не выходит за пределы ± 1 ; ± 2 и ± 5 %;
- СКО часовой ползучести при максимальной температуре для групп качества А, Б и В не более 0,5, 1,0 и 2,0 соответственно.

6.3.5 Определение СКО погрешности аппроксимации функции влияния температуры на чувствительность

6.3.5.1 Установку УГТ-1 с балкой «чистого изгиба» и установленными на нее тензорезисторами разместить в климатической камере EXCAL 9600H70/30G.

6.3.5.2 При температуре $t_0 = (23 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ выполнить три тренировочных и один рабочий цикл нагружения до деформации $\varepsilon_n = \pm(1000 \pm 50) \text{ млн}^{-1}$.

6.3.5.3 Балку с тензорезисторами охладить до температуры -10 °С, а затем нагреть до максимальной температуры со ступенями 27; 40; 80 °С. Охлаждение и нагрев проводить со скоростью не более 2°С/мин на каждую ступень. На каждой ступени провести рабочий цикл нагружения до деформации ε_n .

6.3.5.4 Для каждого тензорезистора на каждой ступени рассчитать значение функции влияния температуры на чувствительность Φ_{ij} по формуле:

$$\Phi_{ij} = \frac{K_{ij}}{K_{i0}}, \quad (7)$$

где K_{ij} - чувствительность при температуре t_j ;

j – номер ступени температуры, $j = 1, 2, \dots, 5$.

6.3.5.5 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 коэффициенты B_1 и B_2 аппроксимирующего полинома первой степени по формуле (8):

$$\hat{\Phi}(t) = B_1 + B_2 \cdot t \quad (8)$$

Рассчитать СКО погрешности аппроксимации по формуле:

$$S_{a\Phi} = \sqrt{\frac{1}{m-2} \cdot \sum_{j=1}^5 [\hat{\Phi}(t_j) - \bar{\Phi}_j]^2}, \quad (9)$$

где $\hat{\Phi}(t_j)$ - расчетное значение функции влияния температуры на чувствительность;

$\bar{\Phi}_j$ - выборочное среднее значение функции влияния температуры на чувствительность;

j - номер ступени, $j = 1, 2, \dots, 5$.

6.3.5.6 Результаты поверки считаются положительными, если СКО погрешности аппроксимации $S_{a\Phi}$ для групп качества А, Б и В не более 0,02; 0,05 и 0,10 соответственно.

6.3.6 Определение СКО погрешности аппроксимации ТХС

6.3.6.1 В процессе определения ТХС в качестве образца для установки тензорезисторов использовать балку «чистого изгиба», которая не должна подвергаться внешней механической деформации.

6.3.6.2 Определение ТХС проводить при охлаждении образца, при этом выполнить следующие операции:

- образец с установленными тензорезисторами нагреть до максимальной температуры, равной плюс 80 °С;

- охладить образец со скоростью от 4 до 6 °С/мин ступенями «+ 80, + 60, + 40, + 23, 0, - 20, - 40, - 50 °С»;

- на каждой ступени после установления температурного равновесия измерить температуру и выходные сигналы тензорезисторов, принимая за начальное сопротивление тензорезисторов его сопротивление при температуре 23 °С.

Время выдержки на каждой ступени не должно превышать 10 минут.

6.3.6.3 По полученным данным определить выборочное среднее значение выходных сигналов $\bar{\xi}(t_j)$ для каждой ступени и выборочное СКО S_i для максимальной температуры 80 °С.

6.3.6.4 Используя полученные значения $\bar{\xi}(t_i)$ методом наименьших квадратов рассчитать коэффициенты C_1, C_2, C_3 аппроксимирующего полинома

$$\xi(t) = C_1 \cdot (t - 23) + C_2 \cdot (t^2 - 23^2) + C_3 \cdot (t^3 - 23^3). \quad (10)$$

6.3.6.5 Полином (11) преобразовать в полином, приведенный к температуре 23 °С:

$$\hat{\xi}(t) = C_0 + C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t^3, \quad (11)$$

$$\text{где } C_0 = -(C_1 \cdot 23 + C_2 \cdot 23^2 + C_3 \cdot 23^3)$$

6.3.6.6 Результаты поверки считаются положительными, если СКО погрешности аппроксимации для групп качества А, Б и В не более 10; 40 и 100 мкОм/Ом соответственно.

6.3.6 Определение среднего значения и СКО часового дрейфа при максимальной температуре

6.3.6.1 Образец с установленными тензорезисторами нагреть со скоростью не более 2 °С/мин до максимальной температуры плюс 80 °С и определить значения выходных сигналов тензорезисторов $\xi_i(0)$, выдержать в течение 1 ч и определить значения выходных сигналов тензорезисторов $\xi_i(1)$.

6.3.6.2 Для каждого тензорезистора дрейф выходного сигнала за 1 час рассчитать по формуле:

$$D_i(1) = \xi_i(1) - \xi_i(0) \quad (12)$$

6.3.6.3 По полученным данным рассчитать выборочные средние значения дрейфа и выборочное СКО.

6.3.6.4 Результаты поверки считаются положительными, если:

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

- СКО часового дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре для групп качества А, Б и В не более 5; 20 и 60 мкОм/Ом 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 на партию тензорезисторов выдается извещение о непригодности, в паспорте на партию делается соответствующая запись.