

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

УТВЕРЖДАЮ

Начальник отделения измерительной
техники и метрологии -

Главный метролог ФГУП «ЦАГИ»


В.В. Петроневич

26.02.2020 г.

Государственная система обеспечения единства измерений

Тензорезисторы ТМЛ

МЕТОДИКА ПОВЕРКИ

МП 4.28.011-2020

Начальник сектора № 4 НИО-7



О.В. Довыденко

Инженер сектора № 4 НИО-7



О.Д. Прокопчик

Инженер сектора № 3 НИО-7



А.В. Черный

2020 г.

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 ТМЛ (далее – тензорезисторы), при проведении первичной поверки при выпуске из производства.

Тензорезисторы предназначены для измерения деформаций деталей машин и конструкций при статических и динамических нагрузках, а также для применения в качестве чувствительных элементов первичных преобразователей различных физических величин.

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 и опробование	6.1	<p>Вольтметр В7-78/1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - диапазон измерений от 0 до 1000 Ом; - пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений $\pm (0,0001 \cdot R_x + 0,00001 R_{пр}) \%$, где R_x – измеренное значение сопротивления, $R_{пр}$ – значение верхнего предела измерений. <p>Измеритель параметров изоляции МПТ 40Х:</p> <ul style="list-style-type: none"> - диапазон измерений сопротивления изоляции от 0 до 20 ГОм; - относительная погрешность измерений $\pm 3 \% \pm 2$ е.м.р., где е.м.р. – единица младшего разряда, индицируемая дисплеем. - пределы абсолютной погрешности воспроизведения температуры ± 1 °С
Определение среднего значения и предельного относительного отклонения сопротивления в партии	6.2	<p>Вольтметр В7-78/1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - диапазон измерений от 0 до 1000 Ом; - пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений $\pm (0,0001 \cdot R_x + 0,00001 R_{пр})$ кОм, где R_x – измеренное значение сопротивления, $R_{пр}$ – значение верхнего предела измерений; <p>Измеритель температуры и влажности ИВТМ – 7М:</p> <ul style="list-style-type: none"> диапазон измерения относительной влажности от 0 до 99 %, пределы основной абсолютной погрешности измерения ± 2 %, диапазон измерений температуры от - 20 до 60 °С, пределы абсолютной погрешности измерения температуры $\pm 0,2$ °С, диапазон измерений абсолютного давления от 840 до 1060 гПа, пределы абсолютной погрешности измерения температуры ± 3 гПа.
Определение ТХС, СКО погрешности аппроксимации ТХС, максимального абсолютного значения ТХС в рабочей области	6.3	<p>Модуль измерительный для резистивных мостовых схем NI PXI 433х:</p> <ul style="list-style-type: none"> -диапазон измерений: ± 25 мВ/В; - погрешность измерений: $\pm (0,0005 \cdot X + 0,1758)$, где X измеренное значение, мВ. <p>Термокритикамера с диапазоном температур советующим</p>

Наименование операции	Номер пункта документа по поверке	Наименование и тип средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего метрологические и основные технические характеристики средства поверки
значений температуры и СКО значения ТХС при максимальной температуре для приклеиваемых тензорезисторов		<p>рабочему диапазону тензорезисторов, точность поддержания температуры $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ в диапазоне до $223\text{ }^\circ\text{C}$ и $\pm 0,01 \cdot (t-23)\text{ }^\circ\text{C}$ в диапазоне свыше $223\text{ }^\circ\text{C}$.</p> <p>Измеритель температуры и влажности ИВТМ – 7М: диапазон измерения относительной влажности от 0 до 99 %, пределы основной абсолютной погрешности измерения $\pm 2\text{ }%$, диапазон измерений температуры от -20 до $60\text{ }^\circ\text{C}$, пределы абсолютной погрешности измерения температуры $\pm 0,2\text{ }^\circ\text{C}$, диапазон измерений абсолютного давления от 840 до 1060 гПа, пределы абсолютной погрешности измерения температуры $\pm 3\text{ гПа}$.</p>
<p>Определение индивидуальной ТХС в свободном состоянии, СКО погрешности аппроксимации индивидуальной ТХС в свободном состоянии, максимального значения индивидуальной ТХС в свободном состоянии в рабочей области значений температуры и СКО значения разностной ТХС при максимальной температуре для привариваемых тензорезисторов</p>	6.4	
<p>Определение среднего значения и СКО чувствительности при нормальных условиях, нелинейности функции преобразования при нормальных условиях</p>	6.5	<p>Установка с балками постоянного сечения, нагружаемыми по схеме чистого изгиба с относительной погрешностью: $0,8\text{ }%$ в диапазоне измерений от 0 до 1000 млн⁻¹; $0,5\text{ }%$ в диапазоне измерений от 1000 до 3000 млн⁻¹; $1,0\text{ }%$ в диапазоне измерений от 3000 до 5000 млн⁻¹.</p> <p>Модуль измерительный для резистивных мостовых схем NI PXI 433x: -диапазон измерений: $\pm 25\text{ мВ/В}$; - погрешность измерений: $\pm (0,0005 \cdot X + 0,1758)$, где X измеренное значение, мВ.</p> <p>Измеритель температуры и влажности ИВТМ – 7М: диапазон измерения относительной влажности от 0 до 99 %, пределы основной абсолютной погрешности измерения $\pm 2\text{ }%$, диапазон измерений температуры от -20 до $60\text{ }^\circ\text{C}$, пределы абсолютной погрешности измерения температуры $\pm 0,2\text{ }^\circ\text{C}$, диапазон измерений абсолютного давления от 840 до 1060 гПа, пределы абсолютной погрешности измерения температуры $\pm 3\text{ гПа}$.</p>
<p>Определение среднего значения и СКО ползучести при нормальных условиях за промежуток времени 1 ч</p>	6.6	<p>Установка с балками постоянного сечения, нагружаемыми по схеме чистого изгиба с относительной погрешностью: $0,8\text{ }%$ в диапазоне измерений от 0 до 1000 млн⁻¹; $0,5\text{ }%$ в диапазоне измерений от 1000 до 3000 млн⁻¹; $1,0\text{ }%$ в диапазоне измерений от 3000 до 5000 млн⁻¹.</p> <p>Стабильность поддержания заданного уровня деформации в течение 1 часа 2 млн^{-1}.</p> <p>Модуль измерительный для резистивных мостовых схем NI PXI 433x: -диапазон измерений: $\pm 25\text{ мВ/В}$; - погрешность измерений: $\pm (0,0005 \cdot X + 0,1758)$, где X изме-</p>

Наименование операции	Номер пункта документа по поверке	Наименование и тип средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего метрологические и основные технические характеристики средства поверки
		<p>ренное значение, мВ.</p> <p>Измеритель температуры и влажности ИВТМ – 7М: диапазон измерения относительной влажности от 0 до 99 %, пределы основной абсолютной погрешности измерения ± 2 %, диапазон измерений температуры от - 20 до 60 °С, пределы абсолютной погрешности измерения температуры $\pm 0,2$ °С, диапазон измерений абсолютного давления от 840 до 1060 гПа, пределы абсолютной погрешности измерения температуры ± 3 гПа.</p>
<p>Определение среднего значения и СКО ползучести при максимальной температуре за промежуток времени 1 ч</p>	6.7	<p>Устройство для измерения функции влияния температуры на чувствительность – установка с балкой, на поверхности которой создается деформация 0 и ± 1000 млн⁻¹.</p> <p>Неравномерность поля деформации рабочей зоны балки не должна превышать ± 20 млн⁻¹, погрешность задания значения деформации не должна превышать ± 5 млн⁻¹.</p> <p>Стабильность поддержания заданного уровня деформации в течение 1 часа:</p> <ul style="list-style-type: none"> – для температуры до 200 °С включительно 2 млн⁻¹; – для температуры свыше 200 °С включительно 5 млн⁻¹. <p>Модуль измерительный для резистивных мостовых схем NI PXI 433х:</p> <ul style="list-style-type: none"> -диапазон измерений: ± 25 мВ/В; - погрешность измерений: $\pm (0,0005 \cdot X + 0,1758)$, где X измеренное значение, мВ. <p>Термокритикамера с диапазоном температур советующим рабочему диапазону тензорезисторов, точность поддержания температуры ± 2 °С в диапазоне до 223 °С и $\pm 0,01 \cdot (t-23)$ °С в диапазоне свыше 223 °С.</p> <p>Измеритель температуры и влажности ИВТМ – 7М: диапазон измерения относительной влажности от 0 до 99 %, пределы основной абсолютной погрешности измерения ± 2 %, диапазон измерений температуры от - 20 до 60 °С, пределы абсолютной погрешности измерения температуры $\pm 0,2$ °С, диапазон измерений абсолютного давления от 840 до 1060 гПа, пределы абсолютной погрешности измерения температуры ± 3 гПа.</p>
<p>Определение среднего значения и СКО температурного коэффициента чувствительности</p>	6.8	<p>Устройство для измерения функции влияния температуры на чувствительность – установка с балкой, на поверхности которой создается деформация 0 и ± 1000 млн⁻¹.</p> <p>Неравномерность поля деформации рабочей зоны балки не должна превышать ± 20 млн⁻¹, погрешность задания значения деформации не должна превышать ± 5 млн⁻¹.</p> <p>Модуль измерительный для резистивных мостовых схем NI PXI 433х:</p> <ul style="list-style-type: none"> -диапазон измерений: ± 25 мВ/В; - погрешность измерений: $\pm (0,0005 \cdot X + 0,1758)$, где X измеренное значение, мВ. <p>Термокритикамера с диапазоном температур советующим рабочему диапазону тензорезисторов, точность поддержания температуры ± 2 °С в диапазоне до 223 °С и $\pm 0,01 \cdot (t-23)$ °С в диапазоне свыше 223 °С.</p> <p>Измеритель температуры и влажности ИВТМ – 7М: диапазон измерения относительной влажности от 0 до 99 %, пределы основной абсолютной погрешности изме-</p>

Наименование операции	Номер пункта документа по поверке	Наименование и тип средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего метрологические и основные технические характеристики средства поверки
		рения $\pm 2\%$, диапазон измерений температуры от -20 до 60 °С, пределы абсолютной погрешности измерения температуры $\pm 0,2$ °С, диапазон измерений абсолютного давления от 840 до 1060 гПа, пределы абсолютной погрешности измерения температуры ± 3 гПа.
Определение сопротивления изоляции в рабочей области значений температуры	6.9	Измеритель параметров изоляции МПТ 40Х: - диапазон измерений сопротивления изоляции от 0 до 20 ГОм; - относительная погрешность измерений $\pm 3\% \pm 2$ е.м.р., где е.м.р. – единица младшего разряда, индицируемая дисплеем. - пределы абсолютной погрешности воспроизведения температуры ± 1 °С Измеритель температуры и влажности ИВТМ – 7М: диапазон измерения относительной влажности от 0 до 99% , пределы основной абсолютной погрешности измерения $\pm 2\%$, диапазон измерений температуры от -20 до 60 °С, пределы абсолютной погрешности измерения температуры $\pm 0,2$ °С, диапазон измерений абсолютного давления от 840 до 1060 гПа, пределы абсолютной погрешности измерения температуры ± 3 гПа.

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

1.2 Средства измерений, применяемые при поверке, должны иметь действующие свидетельства о поверке, испытательное оборудование и эталоны должны быть аттестованы.

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 механических величин.

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 При проведении поверки следует соблюдать требования, изложенные в Правилах по охране труда при эксплуатации электроустановок, утвержденных приказом Министерства труда и социальной защиты № 328н от 24.07.2013 г.

3.2 Перед проведением поверки следует изучить эксплуатационную документацию на поверяемые тензорезисторы и средства поверки.

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

3.4 Монтаж тензорезисторов должен проводиться в помещении, снабженном приточно-вытяжной вентиляцией, средствами пожаротушения и водоснабжения.

4 Условия поверки

4.1 При проведении поверки должны быть выполнены следующие условия:

- температура окружающего воздуха, °С от 18 до 25;
- атмосферное давление, кПа от 96 до 104;
- относительная влажность, % от 30 до 60;

Изменение температуры и влажности за время измерений, проводимых при нормальных условиях, не должно выходить за пределы ± 2 °С и ± 5 %.

Вибрация, тряска, удары, наклоны, магнитные поля, кроме земного, должны отсутствовать.

4.2 Тензорезисторы должны быть выдержаны в помещении, где будет производиться поверка, не менее 2 часов.

5 Подготовка к поверке

Перед выполнением поверки из упаковки одиночных тензорезисторов методом случайного отбора по ГОСТ 18321 комплектуют выборку не менее 10 шт. Способ предоставления тензорезисторов на испытания – «в упаковке». Методом отбора – многоступенчатый отбор.

6 Проведение поверки

Для тензорезисторов модификации DSF операции по пп. 6.3 и 6.8 не проводят.

Так как для привариваемых тензорезисторов нормируется только индивидуальная и разностная ТХС, то операции по п. 6.3 для них не проводят.

Так как для приклеиваемых тензорезисторов индивидуальная и разностная ТХС не нормируется, то операции по п. 6.4 для них не проводят.

Измерения выходных сигналов тензорезисторов осуществляют с помощью модуля измерительного для резистивных мостовых схем.

6.1 Внешний осмотр и опробование

6.1.1 Проверку внешнего вида, комплектности, маркировки производят визуально на соответствие технической документации фирмы-изготовителя.

6.1.2 При внешнем осмотре должно быть установлено отсутствие видимых механических повреждений, загрязнений поверхностей, расслоений, воздушных пузырьков.

6.1.3 В комплектность должны входить паспорт на партию тензорезисторов, инструкция по монтажу тензорезисторов на объект, упаковка (потребительская тара).

6.1.4 В паспорте на партию тензорезисторов должны быть указаны:

- наименование или товарный знак предприятия-изготовителя;
- наименование и условное обозначение тензорезисторов;
- номер партии;
- число тензорезисторов в партии;
- условия хранения;
- номинальное сопротивление и предельные отклонения сопротивления тензорезисторов в партии;
- марка клея, используемый для монтажа приклеиваемых тензорезисторов или метод сварки, используемый для монтажа привариваемых тензорезисторов;
- свидетельство о приемке с указанием даты;
- дата выпуска;
- гарантии изготовителя.

6.1.5 На упаковке (потребительской таре) тензорезисторов должны быть указаны:

- наименование или товарный знак предприятия-изготовителя;
- условное обозначение тензорезисторов;
- номер партии;
- число тензорезисторов в партии;
- номинальное сопротивление и предельные отклонения сопротивления тензорезисторов в партии;
- среднее значение и СКО чувствительности для партии тензорезисторов;
- температурный коэффициент линейного расширения материала образца, на котором определялась ТХС.

6.1.6 Измерить измерителем параметров изоляции МІТ 40Х сопротивление изоляции тензорезисторов. При измерениях отдельные тензорезисторы не должны быть электрически соединены друг с другом. Продолжительность подключения мегомметра перед каждым измерением должна быть не менее 2 мин.

6.1.7 За сопротивление изоляции проверяемой партии тензорезисторов принять наименьшее из всех значений, полученных для отдельных тензорезисторов.

6.1.8 Результаты контроля считаются положительными, если сопротивление изоляции не менее 50 МОм.

6.2 Определение среднего значения и предельного относительного отклонения сопротивления в партии

6.2.1 Проверку среднего значения и предельного относительного отклонения сопротивления в партии осуществляют методом прямых измерений с помощью вольтметра В7-78/1. Результаты измерений заносят в протокол.

6.2.2 Результаты контроля считаются положительными, если предельное относительное отклонение сопротивления в партии не превышает указанного в паспорте значения $\pm 0,3\%$; $\pm 0,5\%$; $\pm 1,0\%$.

6.3 Определение ТХС, СКО погрешности аппроксимации ТХС, максимального абсолютного значения ТХС в рабочей области значений температуры и СКО значения ТХС при максимальной температуре для приклеиваемых тензорезисторов

6.3.1 В соответствии с инструкцией по монтажу установить тензорезисторы на образец с температурным коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

6.3.2 Образец с тензорезисторами поместить в температурную камеру установки. Измерить начальный выходной сигнал.

6.3.3 Образец с установленными тензорезисторами нагреть ступенями от температуры $(23 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ до максимальной температуры со скоростью от 1 до $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Число ступеней – не менее четырех. Время выдержки на каждой ступени – не более 10 минут.

6.3.4 На каждой ступени после установления температурного равновесия измерить температуру и выходные сигналы тензорезисторов.

6.3.5 Непрерывно охладить образец до температуры $(23 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$.

6.3.6 Образец с установленными тензорезисторами поместить в климатическую камеру.

6.3.7 Образец с установленными тензорезисторами охладить ступенями со скоростью $0,15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Число ступеней – не менее четырех. Время выдержки на каждой ступени – не более 10 минут.

6.3.8 На каждой ступени после установления температурного равновесия измерить температуру и выходные сигналы тензорезисторов.

6.3.9 Непрерывно нагреть образец до температуры $(23 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$.

6.3.10 Из значения выходного сигнала каждого тензорезистора, полученного на каждой ступени нагревания (охлаждения), вычесть его начальный выходной сигнал, измеренный по п. 6.3.1.

6.3.11 По полученным данным определить выборочное среднее значение выходных сигналов $\bar{v}_u(t_j)$, мВ/В, для каждой ступени и выборочное СКО выходных сигналов S_{u_i} , мВ/В, для максимальной температуры.

6.3.12 Используя полученные значения $\bar{v}_u(t_j)$ методом наименьших квадратов рассчитать коэффициенты D_1, D_2, D_3, D_4 аппроксимирующего полинома:

$$\hat{v}_u(t_j) = D_1 \cdot (t - t_n) + D_2 \cdot (t^2 - t_n^2) + D_3 \cdot (t^3 - t_n^3) + D_4 \cdot (t^4 - t_n^4) \quad (1)$$

6.3.13 Полином (1) преобразовать в полином, приведенный к температуре $(23 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\hat{v}_u(t_j) = D_0 + D_1 \cdot t + D_2 \cdot t^2 + D_3 \cdot t^3 + D_4 \cdot t^4, \quad (2)$$

где $D_0 = -(D_1 \cdot 23 + D_2 \cdot 23^2 + D_3 \cdot 23^3 + D_4 \cdot 23^4)$

6.3.14 Перевести значения ТХС тензорезистора, полученные по формуле 2, в единицы деформации ε_{app} , млн⁻¹:

$$\varepsilon_{app} = \frac{\hat{v}_u(t_j) \cdot 4 \cdot 10^3}{K} = C_0 + C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t^3 + C_4 \cdot t^4, \quad (3)$$

где K – среднее значение чувствительности при нормальных условиях;

6.3.15 СКО погрешности аппроксимации ТХС тензорезистора $Sa\varepsilon_{app}$, млн⁻¹, рассчитать по формуле:

$$Sa\varepsilon_{app} = \frac{4 \cdot 10^3}{K} \cdot \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{j=1}^m (\hat{v}_\delta(t_j) - \bar{v}_\delta(t_j))^2}, \quad (4)$$

где $\bar{v}_\delta(t_j)$ – среднее значение выходного сигнала на j -ой ступени, млн⁻¹;

m – число ступеней нагрева (охлаждения);

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

6.3.16 Результаты контроля считаются положительными, если:

- СКО погрешности аппроксимации ТХС не превышает указанного в паспорте значения 25 млн⁻¹; 50 млн⁻¹;

- максимальное абсолютное значение ТХС в рабочей области значений температуры не превышает указанного в паспорте значения 200 млн⁻¹; 400 млн⁻¹; 800 млн⁻¹;

- СКО значения ТХС при максимальной температуре не превышает указанного в паспорте значения 20 млн⁻¹; 50 млн⁻¹;

- среднее значение ТХС в диапазоне термокомпенсации не выходит за пределы $\pm \frac{100 \cdot K}{4 \cdot 10^3}$ мВ/В.

6.3.17 Коэффициенты аппроксимирующего полинома ТХС, СКО погрешности аппроксимации ТХС, максимальное абсолютное значение ТХС в рабочей области значений температуры и СКО значения ТХС при максимальной температуре внести в паспорт на партию тензорезисторов.

6.4 Определение индивидуальной ТХС в свободном состоянии, СКО погрешности аппроксимации индивидуальной ТХС в свободном состоянии, максимального значения индивидуальной ТХС в свободном состоянии в рабочей области значений температуры и СКО значения разностной ТХС при максимальной температуре для привариваемых тензорезисторов

6.4.1 Выполнить п.п. 6.3.2-6.3.15 для тензорезисторов в свободном (не установленном на образец) состоянии для определения индивидуальной ТХС в свободном состоянии, СКО погрешности аппроксимации индивидуальной ТХС в свободном состоянии, максимального значения индивидуальной ТХС в свободном состоянии в рабочей области значений температуры.

6.4.2 Выборку из числа тензорезисторов, для которых определена индивидуальной ТХС в свободном состоянии по п. 6.4.1, в соответствии с инструкцией по монтажу приварить на образец с температурным коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

6.4.3 Выполнить п.п. 6.3.2-6.3.15 для тензорезисторов, приваренных на образец.

6.4.4 Для каждого тензорезистора, входящего в выборку, определить индивидуальную разностную ТХС вычитанием из значений полинома, полученного по п. 6.4.3, значений полинома, полученного по п.6.4.1 для того же тензорезистора, для не менее четырех ступеней температуры, включая начальную и максимальную (минимальную) температуры.

6.4.5 По полученным данным определить выборочные средние значения разностной характеристики для каждой ступени температуры и выборочное СКО для максимальной (минимальной) температуры.

6.4.6 Используя полученные выборочные средние значения, методом наименьших квадратов рассчитать коэффициенты аппроксимирующего полинома разностной ТХС. СКО погрешности аппроксимации вычислить по формуле (4).

6.4.7 Результаты контроля считаются положительными, если:

- СКО погрешности аппроксимации индивидуальной ТХС в свободном состоянии не превышает указанного в паспорте значения 25 млн⁻¹; 50 млн⁻¹;

- максимальное значение индивидуальной ТХС в свободном состоянии в рабочей области значений температуры не превышает указанного в паспорте значения 450 млн⁻¹; 800 млн⁻¹;

- СКО значения разностной ТХС при максимальной температуре не превышает указанного в паспорте значения 50 млн⁻¹; 100 млн⁻¹;

- среднее значение ТХС в диапазоне термокомпенсации не выходит за пределы $\pm \frac{100 \cdot K}{4 \cdot 10^3}$ мВ/В.

6.4.8 Коэффициенты аппроксимирующего полинома индивидуальной ТХС в свободном состоянии, СКО погрешности аппроксимации индивидуальной ТХС в свободном состоянии, максимальное значение индивидуальной ТХС в свободном состоянии ТХС в рабочей области значений температуры и СКО значения разностной ТХС при максимальной температуре внести в паспорт на партию тензорезисторов.

6.5 Определение среднего значения и СКО чувствительности при нормальных условиях, нелинейности функции преобразования при нормальных условиях

6.5.1 В соответствии с инструкцией по монтажу установить тензорезисторы на образец с температурным коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

6.5.2 Установить образец с тензорезисторами на установку тензорезисторами вверх.

6.5.3 Произвести три тренировочных (без измерения выходных сигналов) цикла деформирования с деформацией $\varepsilon = 0; + (1100 \pm 50) \text{ млн}^{-1}$.

6.5.4 После выполнения тренировочных циклов деформирования исключить из выборки тензорезисторы, на которых образовались вздутия, отслаивания от поверхности образца. 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 установку.

6.5.5 Провести один рабочий (с измерением выходных сигналов) цикл деформирования:

6.5.5.1 Разгрузить образец до деформации $\varepsilon = 0 \text{ млн}^{-1}$ и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.5.5.2 Нагрузить образец до деформации $+\varepsilon_n = +(1000 \pm 50) \text{ млн}^{-1}$ и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.5.5.3 Разгрузить образец до деформации $\varepsilon = 0 \text{ млн}^{-1}$ и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.5.6 Установить образец с тензорезисторами на установку тензорезисторами вниз.

6.5.7 Произвести три тренировочных (без измерения выходных сигналов) цикла деформирования с деформацией $\varepsilon = 0; - (1100 \pm 50) \text{ млн}^{-1}$.

6.5.8 После выполнения тренировочных циклов деформирования исключить из выборки тензорезисторы, на которых образовались вздутия, отслаивания от поверхности образца. 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 установку.

6.5.9 Провести один рабочий (с измерением выходных сигналов) цикл деформирования:

6.5.9.1 Разгрузить образец до деформации $\varepsilon = 0 \text{ млн}^{-1}$ и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

6.5.9.2 Нагрузить образец до деформации $-\varepsilon_H = -(1000 \pm 50)$ млн⁻¹ и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

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

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

$$K_i = \frac{|v_i(+\varepsilon_H)| + |v_i(-\varepsilon_H)|}{|+\varepsilon_H| + |-\varepsilon_H|} \cdot 4 \cdot 10^3 \quad (5)$$

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_i \quad (6)$$

$$S_K = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2} \quad (7)$$

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, млн⁻¹;

$v_i(+\varepsilon_H), v_i(-\varepsilon_H)$ - выходные сигналы тензорезистора, мВ/В, при значении деформации $+\varepsilon_H, -\varepsilon_H$ соответственно.

6.5.11 Установить образец с тензорезисторами на установку тензорезисторами вверх.

6.5.12 Повторить п. 6.5.5, нагружая и разгружая образец от деформации $\varepsilon = 0$ млн⁻¹ до деформации $-\varepsilon = -(5000 \pm 50)$ млн⁻¹ и обратно ступенями по (500 ± 50) млн⁻¹, измеряя на каждой ступени выходные сигналы тензорезисторов. Время, затрачиваемое на нагружение образца и определение выходных сигналов тензорезисторов не должно превышать 2 мин на ступень.

6.5.13 Повторить п.п. 6.5.6 и 6.5.9, нагружая и разгружая образец от деформации $\varepsilon = 0$ млн⁻¹ до деформации $+\varepsilon = +(5000 \pm 50)$ млн⁻¹ и обратно ступенями по (500 ± 50) млн⁻¹, измеряя на каждой ступени выходные сигналы тензорезисторов. Время, затрачиваемое на нагружение образца и определение выходных сигналов тензорезисторов не должно превышать 2 мин на ступень.

6.5.14 По полученным данным выполнить обработку результатов измерений и определить нелинейность функции преобразования $\bar{\gamma}$ в процентах по формуле:

$$\bar{\gamma} = \max \left\{ \left| \frac{\bar{v}(\varepsilon_j) \cdot 4 \cdot 10^3 - \bar{K} \cdot \varepsilon_j}{\bar{K} \cdot \varepsilon_j} \cdot 100 \right| \right\}, \quad (8)$$

где $\bar{v}(\varepsilon_j)$ - среднее значение выходного сигнала тензорезистора для каждой ступени деформации, мВ/В;

\bar{K} - выборочное среднее значение чувствительности при нормальных условиях;

ε_j - значение деформации для каждой ступени деформации, млн⁻¹;

j – номер ступени деформации, $j = 1, 2, \dots, m$;

m – число ступеней.

6.5.15 Результаты контроля считаются положительными, если:

- среднее значение чувствительности при нормальных условиях находится в диапазоне от 1,4 до 3;

- СКО чувствительности при нормальных условиях не превышает указанного в паспорте значения 1 %; 2 %; 3 %;

- нелинейность функции преобразования при нормальных условиях не превышает указанного в паспорте значения 1 %; 2 %; 3 %; 5 %.

6.5.16 Среднее значение и СКО чувствительности при нормальных условиях, а также нелинейность функции преобразования внести в паспорт на партию тензорезисторов.

6.6 Определение среднего значения и СКО ползучести при нормальных условиях за промежуток времени 1 ч

6.6.1 Установить образец с тензорезисторами на установку тензорезисторами вверх.

6.6.2 Нагрузить образец с установленными тензорезисторами на установке до деформации $\varepsilon = +(1000 \pm 50)$ млн⁻¹ за время не более 60 с и измерить начальные значения $v_i(0)$ выходных сигналов тензорезисторов в течение последующего времени не более 60 с.

6.6.3 Выдержать образец в нагруженном состоянии в течение 60 мин, после чего измерить выходные сигналы тензорезисторов $v_i(1)$.

6.6.4 Разгрузить образец.

6.6.5 Установить образец с тензорезисторами на установку тензорезисторами вниз.

6.6.6 Нагрузить образец до деформации $\varepsilon = -(1000 \pm 50)$ млн⁻¹ за время не более 60 с и измерить начальные значения $v_i(0)$ выходных сигналов тензорезисторов в течение последующего времени не более 60 с.

6.6.7 Выдержать образец в нагруженном состоянии в течение 60 мин, после чего измерить выходные сигналы тензорезисторов $v_i(1)$.

6.6.8 По полученным данным для каждого тензорезистора рассчитать ползучесть за промежуток времени 1 ч Π_i , среднее значение $\bar{\Pi}$ и СКО S_{Π} ползучести за промежуток времени 1 ч для группы по формулам:

$$\Pi_i = \frac{v_i(1) - v_i(0)}{v_i(0)} \cdot 100 \quad (9)$$

$$\bar{\Pi} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Pi_i \quad (10)$$

$$S_{\Pi} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\Pi_i - \bar{\Pi})^2} \quad (11)$$

6.6.9 Результаты контроля считаются положительными, если:

- среднее значение ползучести при нормальных условиях за промежуток времени 1 ч не превышает указанного в паспорте значения 0,3 %; 0,5 %; 1,0 %;

- СКО ползучести при нормальных условиях за промежуток времени 1 ч не превышает указанного в паспорте значения 0,1 %; 0,25 %; 0,5 %.

6.6.10 Среднее значение и СКО ползучести при нормальных условиях за промежуток времени 1 ч внести в паспорт на партию тензорезисторов.

6.7 Определение среднего значения и СКО ползучести при максимальной температуре за промежуток времени 1 ч

6.7.1 Образец с установленными тензорезисторами нагреть в температурной камере установки до максимальной температуры со скоростью от 1 до 2 °С/мин.

Для модификации DSF: в установку поместить образец из того же материала с установленными компенсационными тензорезисторами. Образец с компенсационными тензорезисторами не должен подвергаться внешним механическим воздействиям. Испытываемые и компенсационные тензорезисторы должны быть соединены по полумостовой схеме.

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

6.7.3 Выдержать образец в нагруженном состоянии в течение 60 мин, после чего измерить выходные сигналы тензорезисторов $v_i(1)$.

6.7.4 Разгрузить образец.

6.7.5 Непрерывно охладить образец до температуры $(23 \pm 10) \text{°C}$.

6.7.6 Установить образец с тензорезисторами на установку тензорезисторами вниз.

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

6.7.8 По полученным данным рассчитать ползучесть при максимальной температуре за промежуток времени 1 ч для каждого тензорезистора, среднее значение и СКО ползучести при максимальной температуре за промежуток времени 1 ч по формулам (9), (10) и (11).

6.7.9 Результаты контроля считаются положительными, если:

- среднее значение ползучести при максимальной температуре за промежуток времени 1 ч не превышает указанного в паспорте значения 1,0 %; 3,0 %; 5,0 %;

- СКО ползучести при максимальной температуре за промежуток времени 1 ч не превышает указанного в паспорте значения 0,5 %; 1,5 %; 2,0 %.

6.7.10 Среднее значение и СКО ползучести при максимальной температуре за промежуток времени 1 ч внести в паспорт на партию тензорезисторов.

6.8 Определение среднего значения и СКО температурного коэффициента чувствительности

6.8.1 Установить образец с тензорезисторами на установку тензорезисторами вверх.

6.8.2 При температуре $t_0 = (23 \pm 2) \text{°C}$ выполнить операции по п.п. 6.5.3-6.5.5.

6.8.3 Образец с установленными тензорезисторами нагреть в температурной камере установки до максимальной температуры со скоростью от 1 до 2 °С/мин и провести рабочий цикл нагружения (с измерением выходных сигналов) до деформации ε_n .

6.8.4 Непрерывно охладить образец до температуры $(23 \pm 10) \text{°C}$.

6.8.5 Установить образец с тензорезисторами на установку тензорезисторами вниз.

6.8.6 При температуре $t_0 = (23_{-5}^{+2})$ °С выполнить операции по п.п. 6.5.7-6.5.9.

6.8.7 Для каждого тензорезистора чувствительность для температуры t_0 и для максимальной температуры рассчитывают по формуле (5).

6.8.8 Для каждого тензорезистора температурный коэффициент чувствительности η_i в процентах на градус Цельсия рассчитывают по формуле

$$\eta_i = \frac{K_{it_m} - K_{it_0}}{K_{it_0} (t_m - t_0)} \cdot 100, \quad (12)$$

где K_{it_m} - чувствительность при максимальной температуре;

K_{it_0} - чувствительность при температуре t_0 .

6.8.9 По полученным данным рассчитывают выборочное среднее значение температурного коэффициента чувствительности и выборочное СКО.

6.8.10 Результаты контроля считаются положительными, если:

- среднее значение температурного коэффициента чувствительности не превышает указанного в паспорте значения $\pm 0,1 \text{ \%}/10^\circ\text{C}^{-1}$; $\pm 0,2 \text{ \%}/10^\circ\text{C}^{-1}$; $\pm 0,3 \text{ \%}/10^\circ\text{C}^{-1}$;
- СКО температурного коэффициента чувствительности не более 0,005.

6.8.11 Среднее значение и СКО температурного коэффициента чувствительности при максимальной температуре внести в паспорт на партию тензорезисторов.

7 Оформление результатов поверки

Тензорезисторы, прошедшие поверку с положительными результатами по всем пунктам настоящей методики, признаются годными, и допускаются к применению. На партию тензорезисторов выдается свидетельство о поверке, в паспорте делается запись о положительных результатах поверки, которая заверяется подписью поверителя и знаком поверки.

В случае отрицательных результатов поверки выдается извещение о непригодности к применению.