


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

Государственная система обеспечения единства измерений

**Тензорезисторы высокотемпературные привариваемые АWH с мо-
дулем температурной компенсации**

МЕТОДИКА ПОВЕРКИ

МП 4.28.009-2019

Начальник сектора № 3 НИО-7



С.В. Дыцков

Инженер сектора № 4 НИО-7



С.Ю. Хижняк

2019 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 высокотемпературные привариваемые АWH с модулем температурной компенсации (далее – тензорезисторы), при проведении первичной поверки при выпуске из производства, а также при внеочередной поверке после истечения срока годности партии или группы тензорезисторов.

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 разового монтажа.

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	<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 2 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 $\pm 1^\circ\text{C}$
Определение (контроль) метрологических характеристик	6.3	
Определение индивидуальной разностной температурной характеристики тензорезистора, СКО погрешности аппроксимации	6.3.1	<p>Установка температурная воспроизведения и измерения деформации ТП-2 (далее – установка ТП-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - диапазон воспроизведения деформации ± 1000 млн⁻¹; - диапазон воспроизведения температуры от 20 до 600 °С; - пределы допускаемой относительной погрешности

Наименование операции	Номер пункта документа по поверке	Наименование и тип средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего метрологические и основные технические характеристики средства поверки
и СКО значения индивидуальной разностной температурной характеристики тензорезистора при максимальной температуре, максимального значения индивидуальной разностной температурной характеристики тензорезистора в рабочей области значений температур, индивидуальной температурной характеристики жаропрочного кабеля, СКО погрешности аппроксимации индивидуальной температурной характеристики жаропрочного кабеля и максимального значения в рабочей области значений температур		воспроизведения деформации $\pm 1 \%$; - пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения температуры $\pm 1 \%$; Климатическая камера КТХВ-64-С: - диапазон воспроизведения температуры: от минус 40 до плюс 80 °С; - допускаемое отклонением $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$; Печь МТП-2МР-70-1000 (далее – печь) - диапазон воспроизведения температуры от 100 до 1200 °С; - нестабильность поддержания заданного температурного режима не более 0,1 °С/мин; - перепад температур по длине печи в ее средней части не превышает $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$; Усилитель измерительный QuantumX MX1615 - диапазон измерений коэффициента преобразования $\pm 8 \text{ мВ/В}$ (напряжение датчика 2,5 В); - класс точности – 0,05; Термометр сопротивления платиновый вибропрочный эталонный ПТСВ-1-2: - диапазон измерений температуры от минус 50 до плюс 450 °С; - пределы допускаемой погрешности измерения температуры от минус 50 до 0 °С включ. – 0,02 °С; св. 0 до плюс 30 °С включ. – 0,01 °С; св. плюс 30 до плюс 450 °С включ. – 0,02 °С; Преобразователь термоэлектрический платиноводородный платиновый эталонный ППО: - диапазон измерений температуры от 300 до 1200 °С; - 2 разряд
Определение среднего значения и СКО часового дрейфа при максимальной температуре	6.3.2	Установка воспроизведения и измерения деформации УВИД-М (далее – установка УВИД-М): - диапазон воспроизведения деформации $\pm 5000 \text{ млн}^{-1}$; - пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения деформации $\pm 0,45 \%$; Установка температурная воспроизведения и измерения деформации ТП-2: - диапазон воспроизведения деформации $\pm 1000 \text{ млн}^{-1}$; - диапазон воспроизведения температуры от 20 до 600 °С; - пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения деформации $\pm 1 \%$; - пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения температуры $\pm 1 \%$. Усилитель измерительный QuantumX MX1615 - диапазон измерений коэффициента преобразования $\pm 8 \text{ мВ/В}$ (напряжение датчика 2,5 В); - класс точности – 0,05

Наименование операции	Номер пункта документа по поверке	Наименование и тип средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего метрологические и основные технические характеристики средства поверки
Определение среднего значения, СКО чувствительности и нелинейности функции преобразования при нормальных условиях	6.3.3	Установка воспроизведения и измерения деформации УВИД-М: - диапазон воспроизведения деформации $\pm 5000 \text{ млн}^{-1}$; - пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения деформации $\pm 0,45 \%$. Усилитель измерительный QuantumX MX1615 - диапазон измерений коэффициента преобразования $\pm 8 \text{ мВ/В}$ (напряжение датчика 2,5 В); - класс точности – 0,05
Определение среднего значения и СКО часовой ползучести при нормальных условиях	6.3.4	Образец с коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6}$ Установка температурная воспроизведения и измерения деформации ТП-2: - диапазон воспроизведения деформации $\pm 1000 \text{ млн}^{-1}$; - диапазон воспроизведения температуры от 20 до 600 °С; - пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения деформации $\pm 1 \%$; - пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения температуры $\pm 1 \%$; Усилитель измерительный QuantumX MX1615 - диапазон измерений коэффициента преобразования $\pm 8 \text{ мВ/В}$ (напряжение датчика 2,5 В); - класс точности – 0,05
Определение среднего значения и СКО часовой ползучести при максимальной температуре	6.3.5	Образец с коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6}$ Установка температурная воспроизведения и измерения деформации ТП-2: - диапазон воспроизведения деформации $\pm 1000 \text{ млн}^{-1}$; - диапазон воспроизведения температуры от 20 до 600 °С; - пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения деформации $\pm 1 \%$; - пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения температуры $\pm 1 \%$; Усилитель измерительный QuantumX MX1615 - диапазон измерений коэффициента преобразования $\pm 8 \text{ мВ/В}$ (напряжение датчика 2,5 В); - класс точности – 0,05; Измеритель-регулятор температуры многоканальный прецизионный МИТ 8.10: - диапазон измерений от 0 до 300 Ом; - диапазон измерений от минус 300 до плюс 300 мВ; - пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений: - от 0 до 300 Ом: $\pm (0,0005 + 10^{-5} \cdot R) \text{ Ом}$, где R – измеряемое сопротивление, Ом; - от минус 300 до плюс 300 мВ: $\pm (0,0010 + 10^{-4} \cdot U) \text{ мВ}$, где U – измеряемое напряжение, Ом; Термометр сопротивления платиновый вибропрочный

Наименование операции	Номер пункта документа по поверке	Наименование и тип средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего метрологические и основные технические характеристики средства поверки
		эталонный ПТСВ-1-2: - диапазон измерений температуры от минус 50 до плюс 450 °С; - пределы допускаемой погрешности измерения температуры от минус 50 до 0 °С включ. – 0,02 °С; св. 0 до плюс 30 °С включ. – 0,01 °С; св. плюс 30 до плюс 450 °С включ. – 0,02 °С; Платинородий-платиновый эталонный ППО: - диапазон измерений температуры от 300 до 1200 °С - 2 разряд
Определение СКО погрешности аппроксимации и среднего значения функции влияния температуры на чувствительность при максимальной температуре	6.3.6	См п. 6.3.1

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. Класс точности вторичного преобразователя должен быть не ниже 0,05.

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 и характеристики, 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 монтаже тензорезисторов должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.004.

3.3 Монтаж тензорезисторов должен 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 будет производиться поверка, 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 комплектуется выборка тензорезисторов в зависимости от объема выборки по ГОСТ 21616-91, но не менее 3 шт.

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 величину электрического сопротивления каждого тензорезистора (между проводами «Белый» и «Зеленый») с помощью вольтметра В7-78/1 и результаты измерений занести в протокол произвольной формы.

Среднее значение определяется по формуле:

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_{0_2_i} - U_{0_1_i})}{n}, \quad (1)$$

где i – порядковый номер тензорезистора;

n – количество исследуемых тензорезисторов;

$U_{0_1_i}$ - показания тензорезисторов в первом цикле измерений;

$U_{0_2_i}$ - показания тензорезисторов во втором цикле измерений.

Среднее квадратичное отклонение определяется по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}, \quad (2)$$

где i – порядковый номер тензорезистора;

n – количество исследуемых тензорезистора;

\bar{U} - среднее значение измеряемой величины.

Опробование считается пройденным положительно, если:

среднее значение сопротивления на выходе модуля температурной компенсации находится в указанном в описании типа диапазоне;

значение относительного отклонения сопротивления на выходе модуля температурной компенсации от среднего значения не превышает указанного в описании типа значения;

6.3 Определение (контроль) метрологических характеристик

Допускается изменять последовательность определения (контроля) метрологических характеристик и их совмещение.

6.3.1 Определение индивидуальной разностной температурной характеристики сопротивления (ТХС), СКО погрешности аппроксимации, СКО при максимальной температуре, максимального значения индивидуальной разностной ТХС в рабочей области значений температуры, а также индивидуальной температурной характеристики жаропрочного кабеля, СКО погрешности аппроксимации и максимального значения в рабочем диапазоне температур

6.3.1.1 Тензорезисторы в количестве 5 штук в свободном (не установленном на образец) состоянии поместить в установку ТП-2. Контроль температуры внутри установки ТП-2 осуществляется с помощью измерителя-регулятора температуры многоканального прецизионного МИТ 8.10 и термометра сопротивления платинового вибропрочного эталонного ПТСВ-1-2.

6.3.1.2 Тензорезисторы в количестве 5 штук в свободном (не установленном на образец) состоянии поместить в малоинерционной трубчатой печи МТП-2МР таким образом, что кабель расположится внутри установки, а тензорезисторы – снаружи.

6.3.1.3 Определение индивидуальной температурной характеристики жаропрочного кабеля проводить при нагреве образца, при этом выполнить следующие операции:

- образец с установленными тензорезисторами нагреть со скоростью от 1 до 2 °С/мин ступенями от + 20 до верхнего предела рабочего диапазона температур с шагом не более 25 °С (в диапазоне от -40 до 100 °С) и 40 °С (в диапазоне от -40 до 100 °С);

- на каждой ступени после установления температурного равновесия измерить температуру и выходные сигналы кабелей, принимая за начальное сопротивление кабелей их сопротивление при температуре (23 ± 10) °С;

- непрерывно охладить кабели до температуры (23 ± 10) °С.

Время выдержки на каждой ступени не должно превышать 10 минут.

6.3.1.4 По полученным данным определить выборочное среднее значение выходных сигналов $\bar{U}_{каб}(t_j)$ жаропрочного кабеля, мВ/В, для каждой ступени и выборочное СКО $S_{\sigma_{каб}}$, млн⁻¹, для максимальной температуры.

6.3.1.5 Используя полученные значения $\bar{U}_{каб}(t_j)$ жаропрочного кабеля методом наименьших квадратов рассчитать коэффициент f аппроксимирующего полинома первой степени:

$$\hat{U}_{и.с. \text{ каб}}(t_j) = f \cdot MI \cdot (T - RT), \quad (3)$$

где f – коэффициент аппроксимирующего полинома первой степени;

MI – длина нагретой части жаропрочного кабеля, м;

T – температура на каждой ступени, °С;

RT – температура при калибровке, °С.

6.3.1.6 Перевести значения индивидуальной температурной характеристики жаропрочного кабеля, полученные по формуле 5 в деформацию, млн⁻¹:

$$\varepsilon_{каб} = f \cdot MI \cdot (T - RT) \cdot \frac{4}{K_{с20}} \cdot 10^3, \quad (4)$$

где $K_{с20}$ – среднее значение чувствительности при нормальных условиях.

6.3.1.7 СКО погрешности аппроксимации индивидуальной температурной характеристики жаропрочного кабеля, млн⁻¹, рассчитать по формуле:

$$S_{\sigma_{\varepsilon_{каб}}} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (\hat{\varepsilon}_{каб}(t_j) - \overline{\varepsilon_{каб}}(t_j))^2}, \quad (5)$$

где i – число коэффициентов полинома;

$\overline{\varepsilon_{каб}}(t_j)$ – среднее значение деформации при температуре t_j , млн⁻¹;

m – число ступеней температуры нагрева;

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

6.3.1.8 В соответствии с инструкцией по монтажу приварить тензорезисторы с номерами 1,2 и 5 (далее - партия № 2) на образец с коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6}$ установки ТП-2.

6.3.1.9 Использовать образец установки ТП-2 с коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6}$.

Определение индивидуальной температурной характеристики тензорезистора проводить при нагреве образца, при этом выполнить следующие операции:

- образец с установленными тензорезисторами в свободном состоянии нагреть со скоростью от 1 до 2 °С/мин ступенями от + 20 до верхнего предела рабочего диапазона температур с шагом не более 25 (в диапазоне от минус 40 до 100 °С) и 40 (в диапазоне от 100 до 600 °С);

- на каждой ступени после установления температурного равновесия измерить температуру и выходные сигналы тензорезисторов, принимая за начальное сопротивление тензорезисторов его сопротивление при температуре $(23 \pm 10)^\circ\text{C}$;

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

Время выдержки на каждой ступени не должно превышать 10 минут.

6.3.1.10 Тензорезисторы, приваренные на образец установки ТП-2, поместить в установку КТХВ-64-С.

6.3.1.11 Использовать образец с коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6}$.

Определение индивидуальной температурной характеристики тензорезистора проводить при охлаждении образца, при этом выполнить следующие операции:

- охладить образец со скоростью $0,15^\circ\text{C}/\text{мин}$ ступенями «+ 20, 0, - 15, - 40 $^\circ\text{C}$ »;

- на каждой ступени после установления температурного равновесия измерить температуру и выходные сигналы тензорезисторов, принимая за начальное сопротивление тензорезисторов его сопротивление при температуре $(23 \pm 10)^\circ\text{C}$;

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

Время выдержки на каждой ступени не должно превышать 10 минут.

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

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

$$\hat{v}_u(t_j) = D_1 \cdot (t - t_n) + D_2 \cdot (t^2 - t_n^2) + D_3 \cdot (t^3 - t_n^3) + D_4 \cdot (t^4 - t_n^4) \quad (6)$$

6.3.1.14 Полином (8) преобразовать в полином, приведенный к температуре $(23 \pm 10)^\circ\text{C}$:

$$\hat{v}_u(t_j) = D_0 + D_1 \cdot t + D_2 \cdot t^2 + D_3 \cdot t^3 + D_4 \cdot t^4, \quad (7)$$

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

6.3.1.15 Определить индивидуальную разностную температурную характеристику тензорезистора $\hat{v}_\delta(t_j)$, мВ/В, вычитанием из значений полинома $\hat{v}_u(t_j)$, полученного по формуле (7), значений полинома $\hat{v}_{u.c}(t_j)$, полученного по формуле (2).

6.3.1.16 По полученным данным определить выборочные средние значения (из партии № 2) индивидуальной разностной температурной характеристики для каждой ступени температуры $\bar{v}_\delta(t_j)$ и выборочное СКО значения индивидуальной разностной температурной характеристики тензорезистора $S_{1\delta}$ для максимальной температуры.

6.3.1.17 Используя полученные выборочные средние значения $\bar{v}_\delta(t_j)$ из партии № 2, мВ/В, методом наименьших квадратов рассчитать коэффициенты a, b, c, d, e аппроксимирующего полинома индивидуальной разностной температурной характеристики тензорезистора:

$$\hat{v}_\delta(t_j) = b \cdot (T - t_n) + c \cdot (T^2 - t_n^2) + d \cdot (T^3 - t_n^3) + e \cdot (T^4 - t_n^4) \quad (8)$$

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

$$\hat{v}_\delta(t_j) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 + e \cdot T^4, \quad (9)$$

где $a = -(b \cdot 23 + c \cdot 23^2 + d \cdot 23^3 + e \cdot 23^4)$

6.3.1.19 Перевести значения индивидуальной разностной температурной характеристики тензорезистора, полученные по формуле 11, в деформацию, млн⁻¹:

$$\varepsilon_{\text{тп}} = (a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 + e \cdot T^4) \cdot \frac{4}{Kc20} \cdot 10^3 \quad (10)$$

6.3.1.20 Функция преобразования, млн⁻¹:

$$\varepsilon_g = \frac{\varepsilon_{MV} - \varepsilon_{\text{app}}}{\hat{\Phi}}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_{\text{app}} = \varepsilon_{\text{тп}} + \varepsilon_{\text{каб}}$;

$\varepsilon_{MV} = \frac{4 \cdot v \cdot 10^3}{Kc20}$ – измеренная деформация, млн⁻¹;

v – измеренный сигнал, мВ/В;

$\hat{\Phi}$ – функция влияния температуры на чувствительность.

6.3.1.21 СКО погрешности аппроксимации индивидуальной разностной характеристики тензорезистора, млн⁻¹, рассчитать по формуле:

$$S_{at\delta} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (\hat{\varepsilon}_\delta(t_j) - \bar{\varepsilon}_\delta(t_j))^2}, \quad (12)$$

где i – число коэффициентов полинома;

$\bar{\varepsilon}_\delta(t_j)$ – среднее значение индивидуальной разностной характеристики тензорезистора, млн⁻¹;

m – число ступеней температуры нагрева (охлаждения);

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

6.3.1.22 Результаты испытаний считаются положительными, если:

- СКО значения индивидуальной разностной температурной характеристики тензорезистора при максимальной температуре не более 50 млн⁻¹;

- СКО погрешности аппроксимации индивидуальной разностной температурной характеристики тензорезистора не более 50 млн⁻¹;

- максимальное значение индивидуальной разностной температурной характеристики тензорезистора в рабочей области значений температур не более 450 млн⁻¹;

- СКО погрешности аппроксимации индивидуальной температурной характеристики жаропрочного кабеля (1 м) не более 2 млн⁻¹;

- максимальное значение индивидуальной температурной характеристики жаропрочного кабеля (1 м) в рабочей области значений температур не более 150 млн⁻¹.

6.3.2 Определение среднего значения и СКО дрейфа при максимальной температуре

6.3.2.1 Загрузить образец с приваренными тензорезисторами из партии № 2 в установку ТП-2. Контроль температуры внутри установки ТП-2 осуществляется с помощью измерителя-регулятора температуры многоканального прецизионного

МИТ 8.10 и термометра сопротивления платинового вибропрочного эталонного ПТСВ-1-2 и преобразователя термоэлектрического платинородий-платинового эталонного ППО.

6.3.2.2 Нагреть образец от начальной температуры t_n до температуры плюс 600 °С и измерить начальное значение сигнала $\nu_i(0)$.

6.3.2.3 Выдержать образец с приваренными тензорезисторами при максимальной температуре $t = 600$ °С в течение 1 ч в установке ТП-2.

6.3.2.4 По выходным данным тензорезисторов, полученных по п.6.3.2.2 и 6.3.2.3 рассчитать дрейф выходного сигнала за 1 час по формуле:

$$D_i(1) = \nu_i(1) - \nu_i(0) \quad (15)$$

6.3.2.5 По полученным данным рассчитать средние значения дрейфа и СКО S_d .

6.3.2.6 Результаты поверки считаются положительными, если:

- СКО воспроизводимости начального сигнала после выдержки 1 ч не более 0,01 мВ/В;

- среднее значение часового дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре не более 0,012 мВ/В;

- СКО часового дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре не более 0,002 мВ/В.

6.3.3 Определение среднего значения и СКО часовой ползучести при нормальных условиях и максимальном значении температуры

6.3.3.1 В соответствии с инструкцией по монтажу приварить тензорезисторы в количестве не менее 2 шт (далее - партия № 1) на образец с коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6}$ установки УВИД-М. В качестве вторичного преобразователя использовать усилитель измерительный QuantumX MX1615.

6.3.3.2 В соответствии с инструкцией по монтажу выполнить установку образца с приваренными тензорезисторами из партии № 1 на установку УВИД-М тензорезисторами сверху.

6.3.3.3 Произвести три тренировочных (без измерения выходных сигналов) цикла деформирования с деформацией $\varepsilon = 0; + (1100 \pm 50)$ млн⁻¹.

6.3.3.4 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.

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

6.3.3.5.1 Нагрузить образец ($\varepsilon=0$ млн⁻¹) и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

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

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

6.3.3.5.6 В соответствии с инструкцией по монтажу выполнить установку образца с приваренными тензорезисторами из партии № 1 на установку УВИД-М тензорезисторами внизу.

6.3.3.5.7 Произвести три тренировочных (без измерения выходных сигналов) цикла деформирования с деформацией 0; $-(1100 \pm 50)$ млн⁻¹.

6.3.3.5.8 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.

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

6.3.3.9.1 Нагрузить образец ($\varepsilon=0$ млн⁻¹) и измерить выходные сигналы тензорезисторов.

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

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

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

$$K_i = \frac{|v_i(+\varepsilon_H)| + |v_i(-\varepsilon_H)|}{|\varepsilon_H| + |-\varepsilon_H|} \quad (16)$$

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_i \quad (17)$$

$$S_K = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2} \quad (18)$$

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.

6.3.3.11 В соответствии с инструкцией по монтажу выполнить установку образца с приваренными тензорезисторами на установку УВИД-М тензорезисторами внизу.

6.3.3.12 Произвести три тренировочных (без измерения выходных сигналов) цикла деформирования на установке УВИД-М с деформацией $0; -(5000 \pm 50)$ млн^{-1} .

6.3.3.13 Повторить п. 6.3.3.9, нагружая и разгружая образец 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.

6.3.3.14 В соответствии с инструкцией по монтажу выполнить установку образца с приваренными тензорезисторами на установку УВИД-М тензорезисторами сверху.

6.3.3.15 Произвести три тренировочных (без измерения выходных сигналов) цикла деформирования на установке УВИД-М с деформацией $0; +(5000 \pm 50)$ млн^{-1} .

6.3.3.16 Повторить п. 4.5.5, нагружая и разгружая образец 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.

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

$$\bar{\gamma} = \max \left\{ \left| \frac{\bar{v}(\varepsilon_j) - \bar{K} \cdot \varepsilon_j}{\bar{K} \cdot \varepsilon_j} \cdot 100 \right| \right\}, \quad (19)$$

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

\bar{K} – выборочное среднее значение чувствительности;

ε_j – значение деформации для каждой ступени деформации, млн^{-1} ;

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

6.3.3.18 Результаты поверки считаются положительными, если:

- среднее значение чувствительности при нормальных условиях находится в диапазоне от 1,8 до 3,6;

- СКО чувствительности не более 0,1;
- нелинейность функции преобразования не более 3 %.

6.3.4 Определение среднего значения и СКО часовой ползучести при нормальных условиях

6.3.4.1 Нагрузить образец с приваренными тензорезисторами из партии № 1 на установке УВИД-М 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. В качестве вторичного преобразователя использовать усилитель измерительный QuantumX MX1615.

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

6.3.4.3 Разгрузить образец.

6.3.4.4 В соответствии с инструкцией по монтажу выполнить установку образца с приваренными тензорезисторами из партии № 1 на установку УВИД-М тензорезисторами вниз.

6.3.4.5 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.

6.3.4.4 Повторить п 4.6.1 – 4.6.5 на установке ТП-2 с установленными тензорезисторами из партии № 2.

6.3.4.5 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:

$$\Pi_i = \frac{v_i(1) - v_i(0)}{v_i(0)} \cdot 100 \quad (20)$$

$$\bar{\Pi} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Pi_i \quad (21)$$

$$S_{\Pi} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\Pi_i - \bar{\Pi})^2} \quad (22)$$

6.3.4.6 Результаты поверки считаются положительными, если:

- среднее значение часовой ползучести при нормальных условиях не выходит за пределы 1 %;
- СКО часовой ползучести при нормальных условиях не более 0,2 %.

6.3.5 Определение среднего значения и СКО часовой ползучести при максимальной температуре

6.3.5.1 Образец с приваренными тензорезисторами из партии № 2 нагреть на установке ТП-2 до максимальной температуры плюс 600 °С со скоростью от 1 до 2 °С/мин. Контроль температуры внутри установки ТП-2 осуществляется с помощью измерителя-регулятора температуры многоканального прецизионного МИТ 8.10 и термометра сопротивления платинового вибропрочного эталонного ПТСВ-1-2. В качестве вторичного преобразователя использовать усилитель измерительный QuantumX MX1615.

6.3.5.2 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.

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

6.3.5.4 Разгрузить образец.

6.3.5.5 В соответствии с инструкцией по монтажу выполнить установку образца с приваренными тензорезисторами из партии № 2 на установку ТП-2 тензорезисторами внизу.

6.3.5.6 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.

6.3.5.7 По полученным данным рассчитать часовую ползучесть для каждого тензорезистора, среднее значение и СКО часовой ползучести при максимальной температуре по формулам (20), (21) и (22).

6.3.5.8 Результаты поверки считаются положительными, если:

- среднее значение часовой ползучести при максимальной температуре не выходит за пределы 1,5 %;
- СКО часовой ползучести при максимальной температуре не более 2 %.

6.3.6 Определение СКО погрешности аппроксимации и среднего значения функции влияния температуры на чувствительность при максимальной температуре

6.3.6.1 Образец с приваренными тензорезисторами из партии №2 нагреть нагреть со скоростью от 1 до 2 °С/мин ступенями от + 20 до верхнего предела рабочего диапазона температур с шагом не более 25 °С (в диапазоне от 20 до 100 °С) и 40 °С (в диапазоне от 100 до 600 °С) на установке ТП-2, выполняя на каждой ступени рабочий цикл нагружения и измерить выходные сигналы тензорезисторов на каждой ступени. Контроль температуры внутри установки ТП-2 осуществляется с помощью измерителя-регулятора температуры многоканального прецизионного МИТ 8.10 и термометра сопротивления платинового вибропрочного эталонного ПТСВ-1-2. В качестве вторичного преобразователя использовать усилитель измерительный QuantumX MX1615.

6.3.6.2 В соответствии с инструкцией по монтажу выполнить установку образца с приваренными тензорезисторами из партии № 2 на установку ТП-2 тензорезисторами сверху.

6.3.6.3 Для каждого тензорезистора партии № 2, для каждой ступени значение функции влияния температуры на чувствительность Φ_{ij} и среднее значение функции влияния температуры на чувствительность $\bar{\Phi}$ рассчитать по формулам:

$$\Phi_{ij} = \frac{K_{ij}}{K_{i0}}, \quad (23)$$

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_{ij}, \quad (24)$$

где K_{ij} – чувствительность при температуре t_j ;

K_{i_0} – чувствительность при температуре $t_0 = (23_{-5}^{+2})$ °С;

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

n – объем выборки;

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

6.3.6.4 По полученным данным рассчитать выборочное среднее значение функции влияния температуры на чувствительность для каждой ступени и выборочное СКО для максимальной температуры. Используя полученные средние значения, методом наименьших квадратов рассчитывают коэффициент C_k аппроксимирующего полинома первой степени по формуле:

$$\hat{\Phi} = 1 + C_k \cdot 10^{-6} \cdot (T - RT), \quad (25)$$

6.3.6.5 СКО погрешности аппроксимации функции влияния температуры на чувствительность рассчитать по формуле:

$$S_{\sigma\Phi} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (\hat{\Phi}_i - \bar{\Phi})^2}, \quad (26)$$

где i – номер тензорезистора;

m – число исследуемых тензорезисторов.

6.3.6.6 СКО значения функции влияния температуры на чувствительность при максимальной температуре рассчитать по формуле:

$$S_{\Phi} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (\hat{\Phi}_{iT_{\max}} - \bar{\Phi}_{T_{\max}})^2}, \quad (27)$$

где i – число коэффициентов полинома;

m – число ступеней температуры нагрева.

$\hat{\Phi}_{iT_{\max}}$ – значение функции влияния температуры на чувствительность i -го тензорезистора при максимальной температуре;

$\bar{\Phi}_{T_{\max}}$ – среднее значение функции влияния температуры на чувствительность при максимальной температуре;

6.3.6.7 Результаты поверки считаются положительными, если:

- СКО значения функции влияния температуры на чувствительность при максимальной температуре не более 0,1.

- СКО погрешности аппроксимации функции влияния температуры на чувствительность при максимальной температуре $S_{\sigma\Phi}$ не более 0,02.

7 Оформление результатов поверки

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

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