

УДК 620.179

Д.В. Конури́н, С.Н. Пичков, Д.Н. Шишулин

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОКАЗАНИЯ ПРИКЛЕИВАЕМЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ 300°C

ОКБМ им. И.И. Африкантова, Нижний Новгород

Представлены принцип действия и основные характеристики тензорезисторов. Дано описание экспериментальных исследований по подтверждению паспортной зависимости деформации тензорезистора ZFLA от температуры и работоспособности клея NP-50. Рассмотрен метод исключения фиктивной деформации тензорезистора от влияния температурного воздействия без применения компенсационного тензорезистора.

Ключевые слова: тензорезистор, провод, температурное воздействие, деформация, омическое сопротивление.

Тензометрические исследования являются одной из основных составных частей научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) на протяжении всей истории развития атомной энергетики, в частности, при отработке проектных решений реакторных установок (РУ). С помощью метода тензометрии решается задача определения напряженно-деформированного состояния объектов контроля с применением тензорезисторов и регистрирующей аппаратуры [1].

Принцип действия тензорезисторов основан на явлении тензоэффекта, заключающемся в изменении омического сопротивления R проводников и полупроводников при их механической деформации.

Основной характеристикой тензорезистора является его коэффициент относительной тензочувствительности, определяемый как

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon},$$

т.е. отношение относительного изменения электросопротивления $\Delta R/R$ тензорезистора к вызывающей это изменение деформации $\varepsilon = \Delta l/l$ исследуемого материала, где l – длина базы тензорезистора [2].

При испытаниях объектов контроля в большинстве случаев используют фольговые и полупроводниковые тензорезисторы.

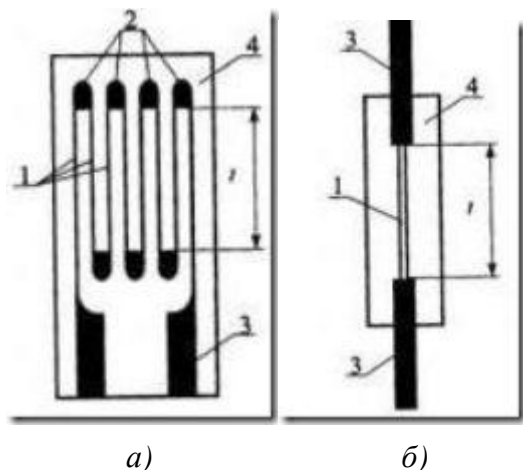


Рис. 1. Типы тензорезисторов:

a – фольговый; b – полупроводниковый; 1 – тензочувствительные элементы; 2 – низкоомные перемычки; 3 – выводные контакты; 4 – подложка («основа») и наклеенный над тензорешеткой защитный слой тонкой бумаги; l – база тензорезистора

В настоящее время большое распространение получили фольговые тензорезисторы (рис. 1, *a*) из металлической фольги толщиной не более 4...6 мкм. Вследствие низкой поперечной чувствительности и плоского сечения элементов тензорешетки, они имеют при той же площади сечения более развитую поверхность приклейки, что улучшает условия их работы.

Полупроводниковые тензорезисторы (рис. 1, *b*), по сравнению с фольговыми, обладают значительно большей тензочувствительностью, меняющейся, однако, при деформации и при изменениях температуры. Несмотря на это, они эффективно применяются в упругих элементах различных измерительных приборов (например, динамометров), где большое значение имеет их высокая чувствительность, а отмеченные недостатки могут быть компенсированы.

Как правило, тензорезисторы монтируются на объект контроля двумя способами: аппликацией клеем и точечной сваркой. Диапазон измеряемых деформаций у современных тензорезисторов составляет от ± 1000 до $\pm 300\,000$ мкм/м. Существуют различные виды тензорезисторов по диапазону рабочих температур от -269 до $+800$ °С.

На точность показаний тензорезисторов большое влияние оказывает температурное воздействие. При изменении температуры меняется начальное сопротивление тензорезистора (температурная погрешность нуля) и коэффициент тензочувствительности (температурная погрешность чувствительности). Изменение начального сопротивления наклеенного тензорезистора определяется двумя факторами: изменением удельного сопротивления ρ материала как непосредственно под действием ΔT , так и под действием дополнительного механического напряжения, появляющегося в тензорезисторе, если коэффициенты линейного расширения (КЛР) объекта контроля и тензорезистора не равны. При этом полное относительное изменение сопротивления тензорезистора составит:

$$\frac{\Delta R_T}{R} = \alpha \Delta T + (\beta_{\text{ок}} - \beta_T) K \Delta T,$$

где α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС); $\beta_{\text{ок}}, \beta_T$ – температурные коэффициенты линейного расширения (КЛР) материала объекта контроля и материала тензорезистора соответственно; ΔT – изменение температуры.

Изменение $\frac{\Delta R_T}{R}$ эквивалентно появлению некоторой фиктивной деформации, сигнал от которой невозможно отличить от сигнала действительной, активной деформации. Для устранения этого эффекта существуют два метода. Первый состоит в применении специальных термокомпенсированных тензорезисторов. Например, медь и константан имеют ТКС разных знаков, поэтому, изготавливая решетку тензорезистора из двух материалов и подбирая сопротивление их частей соответствующим образом, можно получить нулевое приращение $\frac{\Delta R_T}{R}$ в некотором диапазоне ΔT .

Второй метод устранения фиктивной деформации от температуры заключается в применении компенсационного тензорезистора, который устанавливается в непосредственной близости от рабочего тензорезистора, но не подвергается деформациям. В результате, из значений рабочего тензорезистора вычитаются значения компенсационного тензорезистора, тем самым, исключая влияние температуры на показания рабочего тензорезистора.

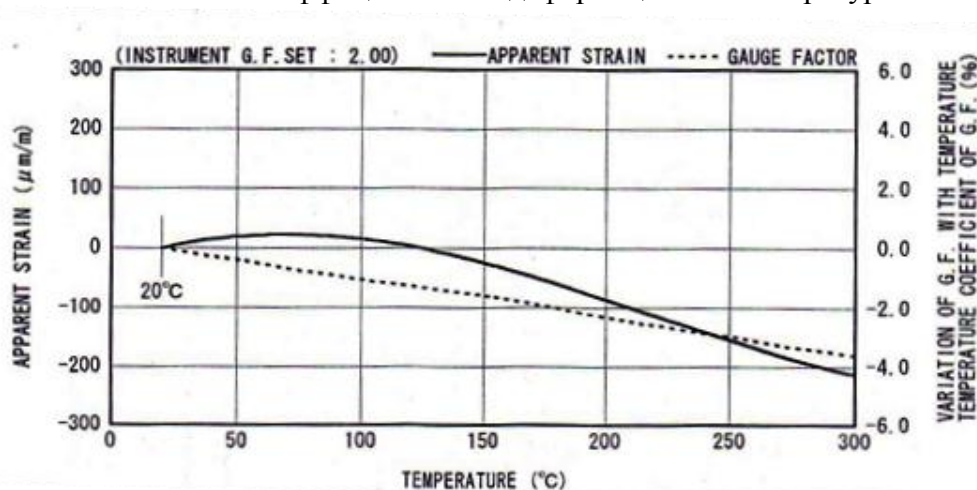
Авторами было проведено исследование влияния температурного воздействия на показания тензорезистора. Цель работы заключалась в подтверждении паспортной зависимости деформации тензорезистора от температуры, работоспособности клея, а также в поиске решения по исключению фиктивной деформации тензорезистора от влияния температуры.

Объектом исследований являлся тензорезистор типа ZFLA. Основные технические характеристики тензорезистора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики тензорезистора ZFLA

Номинальное электрическое сопротивление R , Ом	120
Диапазон измерения деформации, млн ⁻¹	±10000
Абсолютная погрешность измерения деформации, млн ⁻¹	44
Диапазон рабочих температур, °С	от -196 до +300
Интервал термокомпенсации, °С	от -10 до +100
Среднее значение чувствительности K	2,02

Зависимость коэффициента K и деформации от температуры

Тензорезистор приклеивался на стальную балку с помощью двухкомпонентного клея холодного отверждения. И тензорезистор, и клей применялись авторами впервые. Исследования имели большую важность, поскольку стояла задача разработки систем высокотемпературного тензометрирования оборудования РУ без применения точечной сварки для монтажа тензорезисторов.

Производилась сварка выводов тензорезистора с высокотемпературными проводами марки ПОЖ. Осуществлялось подключение тензорезистора к усилителю измерительному MGCplus для усиления и обработки сигнала.

Для нагрева балки с тензорезистором использовалась печь с программным обеспечением для контроля термического цикла, с помощью которой производился нагрев балки со скоростью 1,7 °С/мин до 300 °С.

По результатам первоначальных испытаний тензорезистора была установлена зависимость деформаций тензорезистора от температуры. Показания деформаций значительно превышали паспортные значения.

Таблица 2

Значения температурного коэффициента сопротивления для различных материалов

№ п/п	Наименование материала	Температурный коэффициент сопротивления, 1/°С
1	Медь	0,004
2	Железо	0,006
3	Алюминий	0,0039
4	Манганин	0,000015

Анализируя полученные результаты, было сделано предположение, что значительную часть деформаций от нагрева составляет фиктивная деформация провода тензорезистора, вследствие изменения его сопротивления. Металлы имеют свойство менять омическое со-

противление при изменении температуры. При изменении температуры на 1°C сопротивление $1\ \text{Ома}$ проводника повышается на величину ТКС, если ТКС положительный, и понижается – если отрицательный. Значения ТКС некоторых материалов приведены в табл. 2. Используемые провода при испытаниях – медные, поэтому сопротивление повышается на определенное значение, тем самым растут показания деформаций тензорезистора.

Для подтверждения влияния изменения сопротивления провода от температуры на показания тензорезистора было принято решение подключить к усилителю измерительному, и поместить в печь дополнительный провод в непосредственной близости от провода тензорезистора. При этом для работы измерительной цепи аппаратуры в дополнительный провод, выходящий из печи, было впаяно сопротивление $120\ \text{Ом}$.

После испытания тензорезистора с дополнительным проводом были получены данные, представленные на рис. 1. Из полученных результатов видно, что значительную часть деформаций составляют деформации от нагрева провода. После исключения фиктивной деформации от нагрева провода, вычислив разницу между значениями тензорезистора с проводом и дополнительным проводом, была получена кривая, аналогичная представленной в паспорте на тензорезистор (рис. 2). Также из графика (рис. 2) видно, что термокомпенсация тензорезистора работает до 180°C , на это указывает то, что деформации, возникающие в данном диапазоне температуры, находятся в пределах абсолютной погрешности тензорезистора.

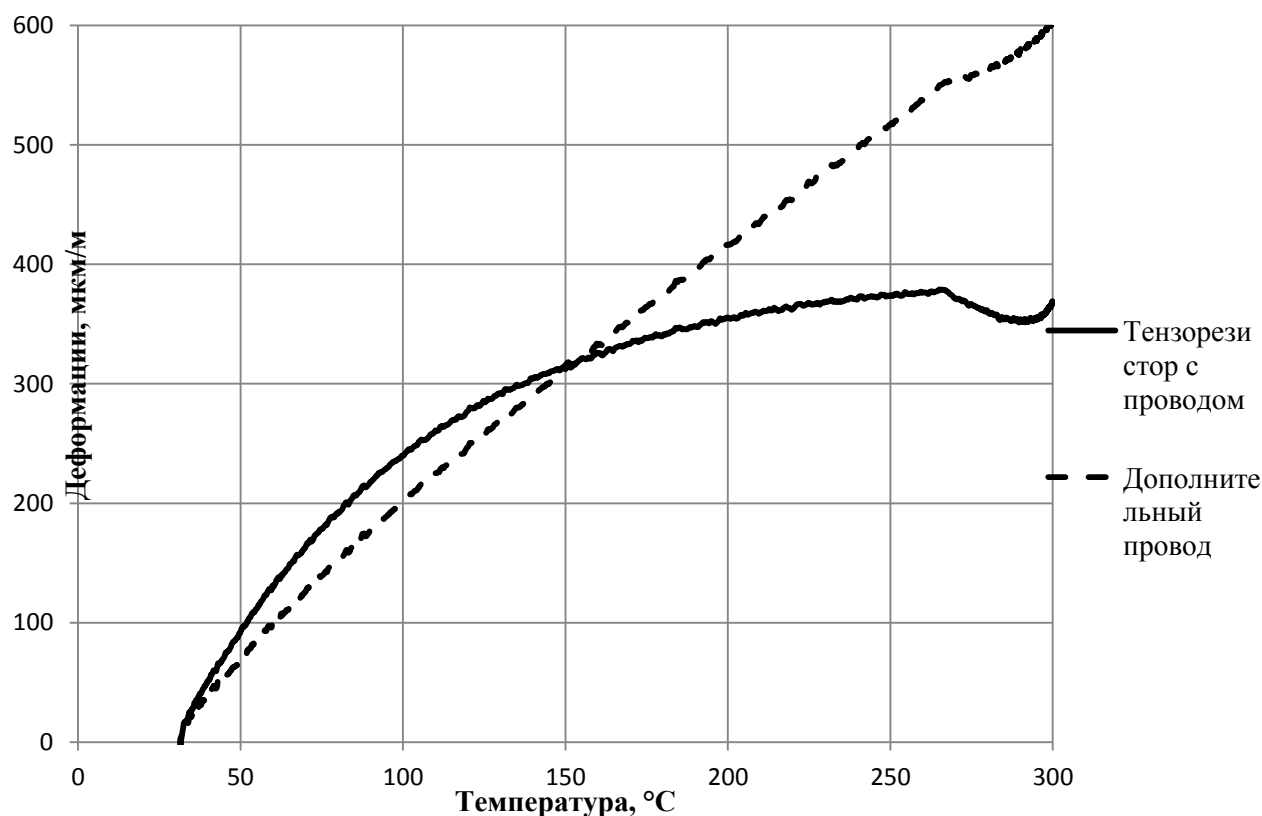


Рис. 1. Экспериментальная зависимость деформации тензорезистора и дополнительного провода от температуры

Следовательно, на основе полученных данных можно сделать вывод, что для учета влияния температуры на показания рабочего тензорезистора, необходимо и достаточно применять дополнительный дублирующий провод вместо компенсационного тензорезистора, как рекомендуется в большинстве источников литературы. При этом исключение фиктивной деформации производится вычитанием из показаний рабочего тензорезистора показаний дополнительного провода и значений градуировочной характеристики влияния температуры на показания тензорезистора (рис. 2).

В результате проведенных исследований влияния температурного воздействия на показания тензорезистора видно, что экспериментальные данные по зависимости деформаций тензорезистора от влияния температуры соответствуют паспортным значениям. Подтверждена работоспособность клея при кратковременной (~5 ч) выдержке при 300°C. Найдено решение по учету влияния температуры на показания приклеиваемого тензорезистора для испытаний оборудования РУ при 300°C.

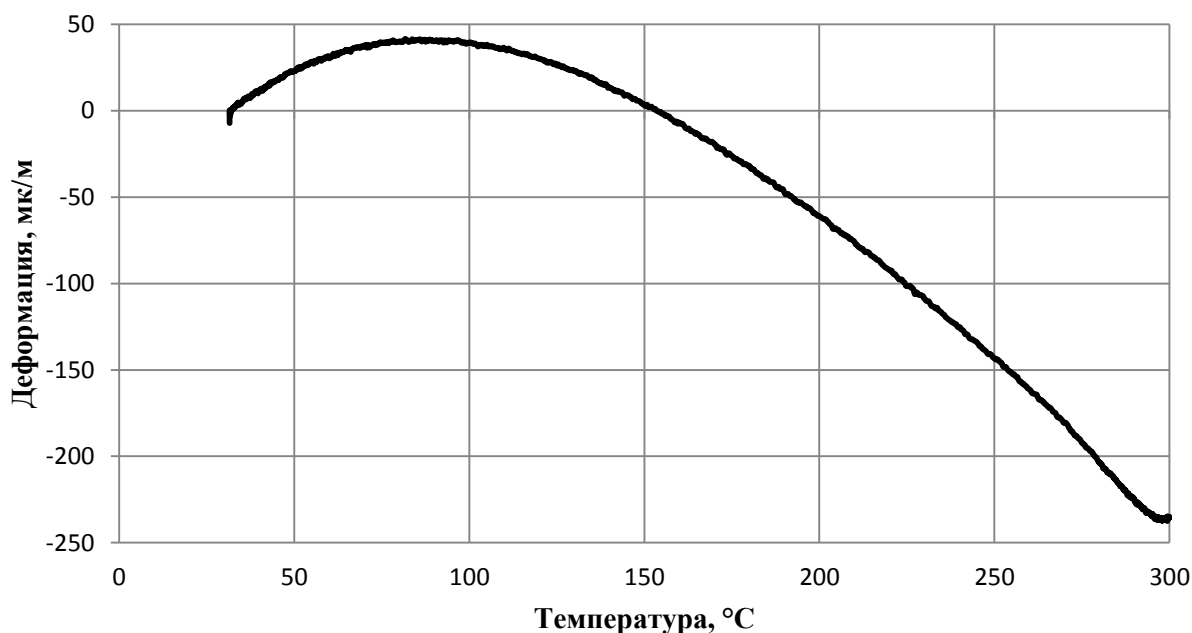


Рис. 2. Экспериментальная зависимость деформации тензорезистора от температуры

Библиографический список

1. Дайчик, М.Л. Методы и средства натурной тензометрии: справочник / М.Л. Дайчик, Н.И. Пригоровский, Г.Х. Хуршудов. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Тензометрия в машиностроении / под ред. Р.А. Макарова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.

Дата поступления
в редакцию 02.06.2015

D.V. Konurin, S.N. Pichkov, D.N. Shishulin

ASSESSMENT OF THE TEMPERATURE AT THE EFFECTS INDICATIONS GLUED STRAIN GAGES FOR TESTS AT 300 °C

OKBM Afrikantov, Nizhny Novgorod

Subject: The article presents the operating principle and main characteristics of the strain gauges. The description of experimental studies to validate the rating depending on the deformation of strain gage ZFLA of temperature and performance adhesive NP-50.

Results: The method of exclusion dummy strain gage from the influence of temperature effects without compensating strain gage.

Key words: strain gage, wire, thermal effects, deformation, ohmic resistance.