

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

В. А. МЕХЕДА

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2011

УДК СГАУ: 539.3/9(075)

ББК 30.121

М 55

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. М. А. Петровичев

канд. техн. наук А. М. Панькин

Мехеда В.А.

М 55 **Тензометрический метод измерения деформаций:** учеб. пособие /
В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. –
56 с.

ISBN 978-5-7883-0838-8

Рассматриваются физические основы тензометрического метода измерения деформаций, приводятся материалы, из которых изготавливаются тензорезисторы. Анализируются различные схемы включения тензорезисторов в измерительный мост. Даются практические рекомендации по увеличению чувствительности тензомоста к измеряемым деформациям и по снижению температурных погрешностей. Рассматриваются различные варианты измерения деформаций растяжения-сжатия, изгиба, кручения, которые используются при конструировании тензодатчиков. Затрагиваются вопросы измерения нелинейных деформаций. Описывается процедура расчета напряжений по показаниям тензорезеток.

Пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Соппротивление материалов», «Строительная механика», «Прочность конструкций» и «Экспериментальная механика». Оно может быть использовано в лабораторном практикуме прочностного направления, а также инженерами, аспирантами и научными работниками.

УДК СГАУ: 539.3/9(075)

ББК 30.121

ISBN 978-5-7883-0838-8

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СПЛАВОВ.....	5
1.1 Малые деформации.....	5
1.2 Большие деформации.....	7
2 ТИПЫ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ.....	8
2.1 Проволочные тензорезисторы.....	8
2.2 Фольговые тензорезисторы.....	10
2.3 Полупроводниковые тензодатчики.....	11
2.4 Жидкометаллические тензодатчики.....	11
2.5 Высокотемпературные датчики.....	12
3 МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И НАКЛЕЙКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ.....	12
3.1 Материалы для изготовления тензорешеток.....	12
3.2 Материалы подложек.....	14
3.3 Клеи для установки тензорезисторов.....	14
3.4 Герметики.....	17
4 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ.....	17
5 РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ТОЧКЕ ПО ПОКАЗАНИЯМ ТЕНЗОРОЗЕТОК.....	19
5.1 Обработка показаний трехэлементной прямоугольной розетки.....	20
5.2 Обработка показаний дельта-розетки.....	21
5.3 Обработка показаний двухэлементных розеток.....	22
6 СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОСТ.....	23
6.1 Мост Уитстона.....	23
7 ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	26
7.1 Ограничение саморазогрева датчика.....	26
7.2 Температурная деформация системы «датчик-деталь».....	27
7.3 Влияние соединительных проводов.....	29
8 ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРОСТОГО ВИДА.....	36
8.1 Измерение деформаций растяжения-сжатия.....	36
8.2 Измерение деформаций изгиба.....	39
8.3 Измерение деформаций сдвига.....	41
8.4 Схемы избирательной чувствительности тензометрического моста к деформациям от изгиба и растяжения-сжатия стержня.....	42

8.5	Схема измерения нелинейной деформации при изгибе образца.....	43
9	ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	45
9.1	Измерение больших деформаций.....	45
9.2	Измерения в зонах больших градиентов деформации.....	46
9.3	Измерение деформаций деталей из низкомодульных материалов.....	47
9.4	Длительные измерения.....	47
9.5	Измерения в процессе длительного повторяющегося циклического деформирования.....	48
9.6	Массовое тензометрирование.....	49
10	ТАРИРОВКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ.....	50
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	54

ВВЕДЕНИЕ

Среди различных экспериментальных методов измерения деформаций подавляющее большинство исследователей отдает предпочтение измерениям с применением тензодатчиков или тензорезисторов, поскольку они наилучшим образом удовлетворяют критерию стоимость-эффективность, обладая оптимальным сочетанием характеристик.

Тензорезисторы широко применяются в качестве чувствительных элементов датчиков, разработанных для измерения сил, перемещений, моментов, давления и др.

1 АНАЛИЗ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СПЛАВОВ

Изменение электрического сопротивления проводника при его растяжении или сжатии, названное тензоэффектом, было открыто в 1856 году английским ученым физиком У. Томсоном, лордом Кельвином (W.Thomson, Lord Kelvin; 1824-1907). Проведем анализ тензоэффекта при малых и больших деформациях.

1.1 Малые деформации

Известно, что величина электрического сопротивления проводника R определяется соотношением

$$R = \rho \frac{l}{F}, \quad (1.1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника,

l – его длина,

F – площадь поперечного сечения.

Рассматривая сопротивление R как функцию трех переменных, найдем его дифференциал:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial F} dF = \frac{l}{F} d\rho + \frac{\rho}{F} dl - \rho \frac{l}{F^2} dF. \quad (1.2)$$

Разделив (1.2) на (1.1), перейдем к относительному изменению сопротивления:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dF}{F}. \quad (1.3)$$

Полученное соотношение показывает, что относительное изменение сопротивления проводника зависит от суммы относительных изменений: удельного сопротивления материала, длины и площади проводника.

Первый член правой части (1.3) в соответствии с исследованиями де Фореста равен:

$$\frac{d\rho}{\rho} = m\varepsilon, \quad (1.4)$$

где m – коэффициент пропорциональности.

Современная физика объясняет это явление изменением числа электронов, приходящихся на единицу объема проводника при упругом деформировании последнего.

Второй член – это относительное удлинение проводника:

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon. \quad (1.5)$$

Для провода круглого поперечного сечения

$$\frac{dF}{F} = \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r}. \quad (1.6)$$

По определению коэффициент Пуассона есть отношение поперечной деформации к продольной $\mu = -\frac{dr/r}{\varepsilon}$. Тогда (1.6) перепишем в следующем виде:

$$\frac{dF}{F} = -2\mu\varepsilon. \quad (1.7)$$

Подставив (1.4), (1.5) и (1.7) в (1.3), получим

$$\frac{dR}{R} = (m + 1 + 2\mu)\varepsilon. \quad (1.8)$$

Величину $S = \frac{dR/R}{dl/l} = m + 1 + 2\mu$ называют коэффициентом тензочувствительности металла к деформации.

Коэффициент тензочувствительности S характеризует интенсивность изменения относительного сопротивления проводника dR/R в зависимости от действующей относительной деформации dl/l .

Первый член в коэффициенте S определяется изменением удельного сопротивления металла проводника при его деформировании, а два других – изменением его геометрии (dl и dF). При малых упругих деформациях коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Следовательно, вклад в коэффициент тензочувствительности

тельности изменения геометрии проводника при деформировании различных металлов одинаков и равен примерно $1+2\mu = 1,6$.

Переходя к конечным величинам, получим основное уравнение тензоэффекта:

$$\frac{\Delta R}{R} = S\varepsilon. \quad (1.9)$$

В табл. 1 представлен перечень сплавов, которые широко применяются в производстве тензорезисторов [1]. Для этих сплавов в области **упругого деформирования** коэффициент тензочувствительности S больше чем 1,6 за счет вклада в тензоэффект члена, связанного с изменением удельного сопротивления сплава $(d\rho/\rho)/(dl/l)$.

Таблица 1. *Химсостав и коэффициент тензочувствительности сплавов, используемых в изготовлении тензорезисторов*

Наименование сплава	Химсостав, %	S
<i>Константан</i>	<i>45Ni, 55Cu</i>	<i>2,1</i>
<i>Карма</i>	<i>74Ni, 20Cr, 3Al, 3Fe</i>	<i>2,0</i>
<i>Изоэластик</i>	<i>36Ni, 8Cr, 0,5Mo, 55,5Fe</i>	<i>3,6</i>
<i>Нихром V</i>	<i>80Ni, 20Cr</i>	<i>2,1</i>
<i>Платиновольфрам</i>	<i>92Pt, 8W</i>	<i>4,0</i>
<i>Армюр Д</i>	<i>70Fe, 20Cr, 10Al</i>	<i>2,0</i>

1.2 Большие деформации

При **больших деформациях** методика анализа тензочувствительности должна быть изменена, поскольку в проводнике преобладают пластические деформации.

Введём в уравнение (1.1) объем проводника $V = F \cdot l$:

$$R = \rho \frac{l^2}{V}. \quad (1.10)$$

Дифференцирование и деление на R позволяют получить

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + 2\frac{dl}{l} - \frac{dV}{V}. \quad (1.11)$$

Поскольку при пластическом деформировании объем проводника практически не изменяется, то $dV \rightarrow 0$ и $\partial\rho \rightarrow 0$ и уравнение (1.11) сводится к виду

$$\frac{dR}{R} = 2\frac{dl}{l}. \quad (1.12)$$

Если пластические деформации достаточно малы по величине, то тензочувствительность сплава составляет $S = 2$.

Если пластические деформации достаточно велики, то изменение сопротивления определяется путем интегрирования уравнения (1.12), а вместо дифференциала dR надо использовать приращение сопротивления ΔR :

$$\int_{R_0}^R \frac{dR}{R} = 2 \int_{l_0}^l \frac{dl}{l}, \quad \ln \frac{R}{R_0} = 2 \ln \frac{l}{l_0} \quad \text{или} \quad \ln \left(1 + \frac{\Delta R}{R_0} \right) = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right)^2.$$

Следовательно,

$$\frac{\Delta R}{R_0} = 2 \frac{\Delta l}{l_0} + \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right)^2. \quad (1.13)$$

Вводя выражение $S = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$, аналогичное выражению (1.9), легко получить

$$S = 2 + \varepsilon,$$

где $\varepsilon = \Delta l/l$ – есть деформация.

При достаточно больших пластических деформациях тензочувствительность сплава S линейно зависит от деформации ε .

2 ТИПЫ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

2.1 Проволочные тензорезисторы

Первые конструкции проволочных тензометров сопротивления представляли собой проволочную нить, натянутую на несущей рамке, которая крепилась на исследуемом объекте с помощью ножевых фиксаторов и крепежных приспособлений. Эти датчики выдерживали многократное использование, однако были большими и громоздкими, имели ограниченные динамические характеристики и вызывали трудности при монтаже.

В 1937 году американцы Е. Симмонс и А. Рюдз почти одновременно и независимо друг от друга стали наклеивать тонкие проволочки на поверхность исследуемых материалов и при этом установили, что проволока точно повторяет деформации образцов, а ее сопротивление изменяется пропорционально изменению растягивающих и сжимающих деформаций. Так было положено начало изготовлению проволочных тензодатчиков сопротивления. Поэтому датой рождения проволочной тензометрии принято считать 1937 год.

Приклеиваемые тензорезисторы – одноразовые датчики. Их нельзя снять с детали, протарировать и опять установить на неё. Их метрологические характеристики определяют косвенным путем. Из большой партии одинаковых дат-

чиков, изготовленных строго по одной и той же технологии, осуществляют статистическую выборку, определяют метрологические характеристики датчиков выборки и распространяют эти характеристики на всю партию.

Проволочный тензорезистор массового применения (рис.1) представляет собой плоскую петлеобразную проволочную обмотку 2 прямоугольной формы (решетку), к концам 4 которой припаяны или приварены относительно толстые выводы из медной проволоки 5. Проволочная решетка с помощью специального клея 3 закрепляется на тонкой прямоугольной полоске 1 из бумаги, клеевой или лаковой пленки, служащей для решетки подложкой (основой).

Чтобы деформации наклеенной проволочной решетки в точности повторяли деформации поверхности детали, проволока должна быть очень тонкой. Слой эластичного клея, которым проволочная решетка крепится к основе, способен деформировать проволоку только при условии, если сила сцепления клея с проволокой значительно превосходит те усилия, которые необходимы для продольного растяжения или сжатия проволоки, т.е. при достаточно большом отношении поверхности склеивания к площади поперечного сечения проволоки.

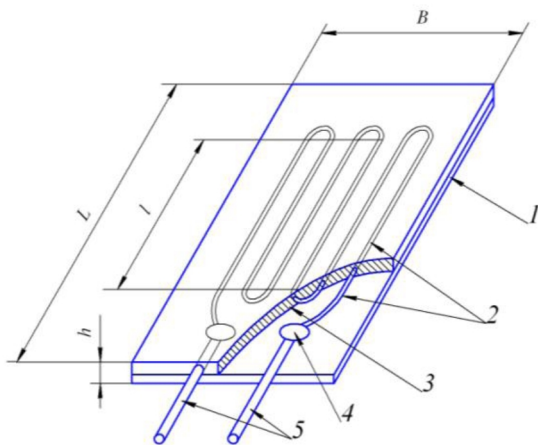


Рис. 1. Конструкция проволочного тензорезистора

Наивыгоднейшим считается диаметр проволоки $d = 0,02...0,025$ мм, когда указанное отношение составляет 160...200. Обычно применяют проволоку диаметром 0,02...0,05 мм. При такой толщине проволоки деформации, приводящие к разрушению (растрескиванию) клеевого слоя, намного превосходят измеряемые деформации и тензорезистор работает нормально даже при деформациях, превышающих предел текучести металлов.

Чувствительность проволочной решетки практически одинакова как при растяжении, так и при сжатии. Объясняется это тем, что тонкие проволочные нити по всей своей длине находятся в прочном слое клея и при действии сжимающей деформации не теряют устойчивость, так как составляют единое целое вместе с клеевой пленкой и деталью.

К концам проволочной решетки припаяются или привариваются медные выводы. Они должны обладать достаточной механической прочностью, хоро-

шо контактировать с концами проволоочной решетки и быть удобными для подключения к ним проводов измерительной схемы.

Тензочувствительную решетку проволоочного тензорезистора удерживает на себе и электрически изолирует ее от материала испытуемой детали основа (подложка). Она должна быть эластичной, механически прочной, хорошо приклеиваться к различным материалам, обладать хорошей влагостойкостью и высокими изолирующими качествами, не изменять своих свойств в заданном интервале температур, не обладать гистерезисом и ползучестью.

2.2 Фольговые тензорезисторы

Дальнейшим развитием проволоочных тензорезисторов явились фольговые тензорезисторы (рис. 2). Они изготавливаются прогрессивным методом фотолитографии из очень тонкой (около 0,0036 мм) фольги. Поскольку тонкая фольга легко повреждается, до начала фотографического процесса и травления на нее наносят тонкую пленку, которая служит несущей основой как в процессе производства, так и после при наклейке тензорезистора на деталь.

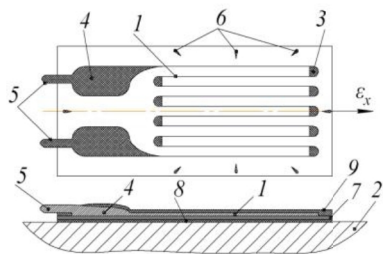


Рис. 2. Фольговый тензорезистор

Фольговые тензорезисторы обладают несомненными преимуществами по сравнению с проволоочными и фактически вытеснили последние из обращения.

Во-первых, они имеют прямоугольную форму поперечного сечения нитей чувствительной решетки 1 при малой толщине.

С одной стороны, при этом увеличивается площадь сцепления решетки с поверхностью исследуемой детали 2, что делает более прочным соединение тензорезистора с деталью, улучшает передачу деформации к чувствительной решетке, повышает стабильность и надежность производимых измерений.

С другой стороны, увеличивается теплоотдача с решетки на деталь. Дело в том, что в процессе измерений для увеличения снимаемого сигнала через тензорезистор пропускается ток высокой плотности (свыше 45 ампер на квадратный миллиметр) и решетка разогревается.

Во-вторых, метод фотолитографии позволяет автоматизировать процесс производства и получать тензорезисторы самых различных конфигураций с широкими поперечными перемычками 3.

Наличие широких перемычек делает фольговые тензорезисторы практически нечувствительными к поперечной деформации детали, что является их несомненным преимуществом по сравнению с проволоочными датчиками.

Фольговые тензорезисторы имеют широкие контактные площадки 4 для надежной припайки выводных проводов 5.

Наличие выправленных меток 6 на подложке 7 позволяет надежнее контролировать положение тензорезистора на детали в процессе его установки.

Между деталью и подложкой расположен тонкий клеевой слой 8. Сверху датчик имеет слой покрытия 9.

В зависимости от числа чувствительных решеток, размещенных на одной основе, фольговые тензорезисторы делятся на одноэлементные и многоэлементные. Многоэлементные тензорезисторы могут иметь две, три или четыре решетки.

2.3 Полупроводниковые тензодатчики

Эти датчики были получены в качестве побочного результата исследований фирмы Bell Telephone Laboratories в области полупроводниковых материалов и соединений, которые впоследствии привели к созданию транзистора. Исследования полупроводниковых свойств кремния и германия и первые разработки лабораторных датчиков создали основу для промышленного изготовления полупроводниковых тензодатчиков, которые получили распространение в 1960-е годы. Основное достоинство этих датчиков – высокое значение коэффициента тензочувствительности (от 20 до 200) за счет составляющей $(dp/p)/(dl/l)$.

2.4 Жидкометаллические тензодатчики

Сплавы, используемые для изготовления фольговых тензорезисторов, характеризуются предельной деформацией около $\pm 5\%$. Для практических приложений, связанных с измерением больших деформаций, при которых возможны удлинения около 100%, были разработаны жидкометаллические тензодатчики, которые состоят из резиновой трубки, наполненной ртутью или галлиево-индиево-оловянным сплавом. Трубке придают конфигурацию решетки и прикрепляют ее к образцу. При действии деформаций объем внутренней полости трубки остается постоянным, поскольку коэффициент Пуассона резины близок к 0,50. Сопротивление жидкометаллического тензодатчика при растягивающих деформациях увеличивается, поскольку длина трубки увеличивается, а диаметр (при постоянном объеме) уменьшается. Жидкометаллические тензодатчики из-за относительно большого диаметра трубки обладают очень малым электрическим сопротивлением и, кроме того, отличаются нелинейным откликом на возрастающие деформации.

2.5 Высокотемпературные датчики

Высокотемпературные тензорезисторы, предназначенные для использования при температурах 400...800° С, изготавливают в виде проволочной решетки 1, закрепленной с помощью специального жаропрочного цемента 2 в трубке 3 на фольге 4 из нержавеющей стали.

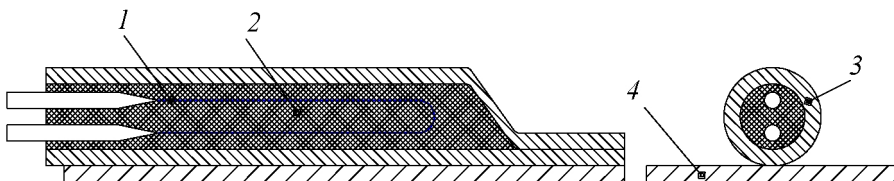


Рис. 3. Высокотемпературный датчик

3 МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И НАКЛЕЙКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

3.1 Материалы для изготовления тензорешеток

Материалы для тензорешеток должны удовлетворять следующим требованиям [3]:

- иметь высокое удельное сопротивление, позволяющее изготавливать малобазные тензорезисторы с достаточно большим сопротивлением;
- обладать высокой и стабильной чувствительностью к деформации;
- изменения сопротивления, вызванные деформацией, должны подчиняться линейному закону в достаточно широком диапазоне;
- быть нечувствительным к влиянию температуры, т.е. температурный коэффициент сопротивления должен быть близким к нулю;
- термоЭДС в паре с медью должна быть как можно меньше, что очень важно при питании тензорезисторов постоянным током;
- температурные коэффициенты линейного расширения материала проволоки и материала исследуемой детали, на которую наклеивается тензорезистор, должны быть равными или незначительно отличаться, в противном случае изменения температуры будут вызывать кажущуюся деформацию и, следовательно, создавать погрешности при измерениях;
- не иметь гистерезиса;
- обладать технологичностью, позволяющей изготавливать фольгу микронных размеров;
- иметь высокое отношение предела пропорциональности к модулю упругости;

- сплавы, применяемые для изготовления высокотемпературных тензорезисторов, должны хорошо противостоять окисляющему воздействию внешней среды.

Перечень сплавов, используемых для изготовления тензорешеток, приведен в табл. 1. Рассмотрим основные достоинства и недостатки этих сплавов.

Константан. В настоящее время большинство тензорезисторов изготавливается из этого сплава в силу следующих его достоинств:

- постоянство коэффициента тензочувствительности в весьма широком диапазоне деформаций (до 8%);
- в отожженном состоянии константан может быть использован при измерении деформаций до 20%; однако в этом случае у константана обнаруживается изменение начального сопротивления, свидетельствующее о систематическом изменении сопротивления при каждом цикле нагружения;
- отсутствие существенных изменений при переходе от упругого деформирования к пластическому;
- константан обладает, кроме того, высоким удельным сопротивлением ($\rho = 0,49 \text{ мкОм/м}$);
- обладает высокой температурной стабильностью;
- возможность создания температурно-компенсированных тензодатчиков путем согласования коэффициента температурного расширения датчика с аналогичным параметром технического материала (в диапазоне от 0 до $100 \cdot 10^{-6} \cdot 1/^\circ\text{C}$).

Обычно тензорезисторы изготавливаются из мягкого отожженного константана. Основными его недостатками являются:

- низкий коэффициент тензочувствительности (около 2,1);
- большая термоЭДС в паре с медью (порядка 47 мкВ/ $^\circ\text{C}$). Правда, последний недостаток сказывается только при питании тензомоста постоянным током при наличии разности температур между выводами.

Карма. Сплав карма также широко применяется, причем по сравнению с константаном он обладает тремя преимуществами:

- во-первых, он может быть температурно компенсирован в более широком диапазоне температур;
- во-вторых, никельхромовая основа сплава карма обеспечивает тензодатчикам более высокие усталостные характеристики;
- в-третьих, сплав проявляет высокую временную стабильность и поэтому предпочтителен при измерении статических деформаций на

протяжении длительных периодов времени – от нескольких месяцев до нескольких лет.

Главный недостаток сплава карма – трудность пайки выводных проводников к контактным площадкам датчика.

Изоэластик. Этот сплав обладает высокой тензочувствительностью ($S = 3,6$) и наиболее высокими усталостными характеристиками среди сплавов, применяемых для изготовления датчиков.

Поскольку сплав исключительно чувствителен к температуре, он не может быть температурно компенсирован, и, таким образом, сфера его применения ограничена динамическими или статическими измерениями, при которых нестабильность, вызванная температурой, не имеет существенного значения.

Сплавы нихром V, платиновольфрам и армюр Д применяют в узкоспециальных приложениях, связанных с высокими температурами, при которых приобретает существенное значение устойчивость к окислению.

3.2 Материалы подложек

При работе в условиях нормальной влажности и температуры до 80°C удовлетворительными качествами обладает тонкая (толщиной не более 0,05 мм) бумага. В отечественных тензорезисторах используют чертежную прозрачную бумагу, чертежный пергамин, папиросную и сигаретную бумаги.

Более высокими качествами (меньшей ползучестью, лучшей влагостойкостью и большим сопротивлением изоляции) обладают тензорезисторы на пленочной основе. Для изготовления пленочной основы используются полимеризующиеся клеи и лаки (например, клеи БФ-2 и ВС-10Т, электроизоляционный лак ВЛ-4 или ВЛ-931, циакрин и т. д.). "Ползучесть" пленочной основы в 2...3 раза меньше, чем бумажной, поэтому для длительных измерений статических деформаций более предпочтительны тензорезисторы на пленочной основе.

В тензорезисторах, предназначенных для использования при повышенных температурах (до 250° С), в качестве основы применяют специальную жаростойкую бумагу (с добавлением асбестовых волокон) или папиросную бумагу, пропитанную термостойким клеем.

3.3 Клеи для установки тензорезисторов

Заводы – изготовители тензорезисторов по заказу потребителя вместе с партией датчиков поставляют клей для их установки с подробной инструкцией по нанесению клея и его сушке. Метрологические характеристики датчиков определяются на заводах с использованием эталонных метрологических установок.

Для решения конкретных задач тензометрирования выпускаются датчики с различной комбинацией составляющих системы «тип решетки – тип подложки – тип клея».

Срок хранения клея обычно значительно меньше срока хранения тензорезисторов. Замена клея на другой тип требует проведения самых серьезных метрологических исследований. Многие клеи общего назначения могут не обладать достаточной стабильностью, гарантирующей точное измерение деформаций.

В табл. 2 приведены различные типы клеев, которые поставляют изготовители тензодатчиков.

Рассмотрим их основные характеристики.

Циакрин. Клеи на основе цианоакрилата не требуют ни нагревания, ни отвердителя для инициирования полимеризации. Отвердевание (полимеризация) цианоакрилатных клеящих веществ начинается от каталитического воздействия адсорбированной в воздухе воды с относительной влажностью между 40 и 70%. При относительной влажности воздуха ниже 30% реакция ощутимо замедляется, в предельных случаях она может не пойти. Влажность выше 80% вызывает мгновенное (ударное) затвердевание. Полимеризация протекает до конца только в тонких пленках. Толстые слои клеящего вещества затвердевают не полностью или вообще не затвердевают. По этой причине непригодны для склеивания сильно шероховатые соприкасающиеся поверхности. Схватывание ускоряется, если материалы обладают щелочными свойствами. Материалы с кислотными свойствами могут не только затягивать процесс отвердевания, но и препятствовать ему. В этом случае для ускорения полимеризации на одну из поверхностей может быть нанесен нейтрализатор.

Для начала полимеризации необходимо незначительное давление на датчик. Минутного нажатия большим пальцем и двухминутной паузы перед удалением фторопластовой прокладки оказывается достаточным для последующей полимеризации во время подключения сигнальных проводов. Окончательное отвердевание наступает спустя приблизительно 24 часа.

Поскольку прочность клея снижается с течением времени в результате поглощения влаги, необходимо защищать датчик от влаги при его длительной эксплуатации.

Эпоксидный клей состоит из смолы и отвердителя, который вступает в реакцию со смолой, обеспечивая полимеризацию. При наклейке датчиков нашли применение эпоксидные клеи с очень низкой вязкостью, что позволяет наносить их очень тонким слоем. По этой причине эпоксидные клеи экономичны в использовании. Предпочтительны эпоксидно-фенольные смолы, так

как они образуют очень тонкие высокопрочные, однородные пленки со слабо выраженными ползучестью и гистерезисом. Чтобы гарантировать полную полимеризацию, эпоксидные клеи обычно полимеризуются при повышенных температурах в течение нескольких часов. Для приготовления эпоксидного клея, применяемого в конкретных практических задачах тензометрии, выпускаются дозированные наборы компонентов. Рабочий диапазон температур эпоксидных клеев определяется их составом.

Т а б л и ц а 2. *Клеи для установки тензорезисторов*

Тип клея	Рабочий диапазон температур, °С	Максимальная температура полимеризации, °С	Рабочий диапазон деформирования, %	Давление, кПа	Примечание
Циакрин, (Z-70 фирмы НВМ)	-32...+65	Комнатная	До 6	Нажатие пальца	Требуется герметизация
Полиимид	-269...+315	260	2	275	Однокомпонентный
Эпоксидный клей (EP-310 фирмы НВМ)	-269...+260	-	3...10	100...500	Двух-трех компонентный
УВС-10С	-70...+200	215	±0,3	600...800	Однокомпонентный
БФР-2Н	-70...+200	215	±0,3	600...800	Однокомпонентный
Керамическое связующее (фосфат алюминия с кремнием)	-269...+650	315	-	-	-

Полиимид представляет собой однокомпонентный полимер, который может применяться в чрезвычайно широком диапазоне температур от -269 до +399°С. Полиимид отверждается под давлением 275 кПа при температуре 260°С. Этот клей эффективен при измерении деформаций в условиях повышенных температур и обеспечивает при комнатной температуре измерение деформаций, превышающих 2%.

Керамические связующие, используемые для монтажа тензодатчиков, обычно состоят из смеси фосфата алюминия и кремния. Применение связующего, как правило, осуществляется в два этапа. На первом этапе наносится на деталь и высушивается тонкая пленка, являющаяся изолятором. На датчик со съемной несущей подложкой затем наносится второе покрытие. Керамика отверждается без повышения давления при температуре около 315°C. Рабочий диапазон температур керамических связующих простирается от -269 до +650 °C.

3.4 Герметики

Если испытания объектов проводятся при повышенной влажности и в течение длительного времени, то тензорезисторы, как правило, следует защищать от воздействия влаги. Влага проникает в материалы подложки и клея и они набухают. Ухудшаются их механические характеристики: снижается прочность, уменьшается модуль упругости, из-за размягчения связующих увеличивается ползучесть датчиков. Кроме того, изменяются параметры электрической изоляции тензорезисторов от объекта испытаний.

В зависимости от температуры и времени действия влажной среды для герметизации тензорезисторов используют различные влагозащитные покрытия. В условиях повышенной влажности при нормальной температуре защиту тензорезисторов можно обеспечить нанесением нескольких слоев (от 2 до 15) влагостойких клеев БФ-2, БФ-4, №88, ВК-32 и др.

При очень высокой влажности применяют покрытия на основе битума, каучука, воска, эпоксидных смол. Покрытие не должно вызывать коррозию объекта. Хорошую изоляцию от влаги обеспечивает выпускаемый промышленностью кремнийорганический компаунд Виксинт К-68.

4 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

БАЗА l – длина чувствительного элемента решетки тензорезистора в мм. Выпускаются датчики с базой от 0,2 до 150 мм.

НОМИНАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ R – значение активного сопротивления чувствительного элемента (решетки) тензорезистора в Ом. Сопротивление тензорезисторов промышленного производства составляет 10...1000 Ом.

РАБОЧИЙ ТОК ПИТАНИЯ I_p – допустимый ток в мА, при котором не происходит заметного нагрева тензорезистора, могущего повлиять на свойства тензочувствительного элемента (решетки), основы и клеевого соединения.

Чем больше ток, проходящий через решетку тензорезистора, тем выше уровень электрических сигналов, в которые преобразуется измеряемая дефор-

мация. Поэтому с точки зрения увеличения чувствительности измерительной схемы желательно пропускать через тензорезистор как можно больший ток.

ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЯЕМОЙ ДЕФОРМАЦИИ $\varepsilon_{\max}$ – наибольшее значение относительной деформации в мкм/м (или в процентах), в отношении которой завод-изготовитель гарантирует надежную работу тензорезисторов и строгую линейность их характеристики преобразования. Правильно наклеенный тензорезистор обладает практически линейной характеристикой и обеспечивает достаточно высокую точность измерений, если деформация не превышает уровня $\pm 0,3\%$.

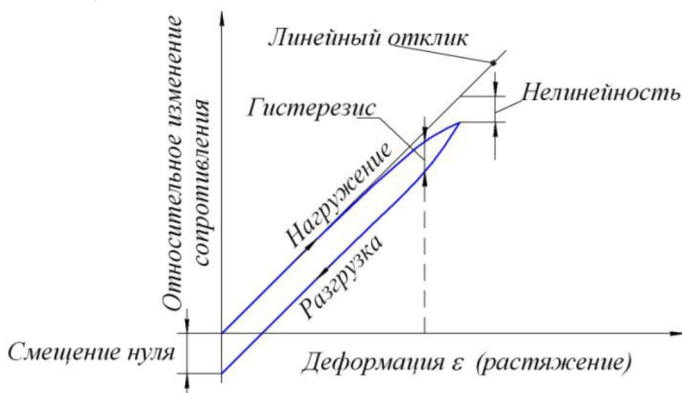


Рис. 4. Характеристика циклического деформирования тензорезистора (масштаб условный)

Тем не менее имеют место небольшие отклонения от линейности при циклическом деформировании, причем кривая разгрузки располагается ниже кривой нагрузки, образуя петлю гистерезиса (рис. 4).

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ, или чувствительность тензорезистора, определяется как отношение относительного приращения сопротивления наклеенного тензорезистора к относительной деформации образца, измеренной в направлении оси тензорезистора:

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

Этот важнейший параметр датчика отражает поведение системы «решетка – основа – клей» и несколько отличается от аналогичного параметра для материала решетки, который был введен ранее и обозначался буквой S .

НЕЛИНЕЙНОСТЬ – под нелинейностью понимается максимальное отклонение реальной передаточной функции от аппроксимирующей прямой линии (рис. 4).

СМЕЩЕНИЕ НУЛЯ – отрицательный выходной сигнал датчика после снятия нагрузки.

ГИСТЕРЕЗИС представляет собой разность значений выходного сигнала тензорезистора при одних и тех же уровнях входного сигнала, полученных при нагружении и разгрузке объекта.

Наибольший гистерезис наблюдается в первом цикле нагружения. В последующих циклах петля гистерезиса сужается, стабилизируется. Если позволяет ситуация, то на практике производят предварительную «тренировку» датчика, нагружая его четырьмя-пятью циклами деформации уровнем 125% от максимально допустимой. Таким образом, удастся снизить нелинейность датчика в несколько раз.

РАБОЧИЙ ДИАПАЗОН ТЕМПЕРАТУР – диапазон температур, при котором гарантируется работоспособность датчика.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ α , или термочувствительность наклеенного тензорезистора – коэффициент, равный относительному изменению сопротивления наклеенного тензорезистора при изменении температуры на 1 °С.

НАРАБОТКА ДО УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ – число циклов нагружения наклеенного тензорезистора знакопеременной деформацией определенного уровня, при котором наблюдается развитие усталостных разрушений датчика.

5 РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ТОЧКЕ ПО ПОКАЗАНИЯМ ТЕНЗОРОЗЕТОК

Плоское напряженное состояние на поверхности детали характеризуется тремя составляющими тензора напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} . Подсчитать эти составляющие можно по трем измеренным компонентам тензора деформаций ε_x , ε_y и γ_{xy} при известных постоянных материала: модуле упругости E и коэффициенте Пуассона μ :

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x), \quad \tau_{xy} = G\gamma_{xy}, \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (5.1)$$

Однако деформацию сдвига γ_{xy} напрямую измерить нельзя, потому что тензорезисторы реагируют лишь на линейные деформации ε_x , ε_y и не чувствительны к деформациям сдвига.

Задачу решают следующим образом. В точке тела измеряют линейные деформации ε_α , ε_β и ε_γ в трех направлениях под углами α , β , и γ относительно оси x (рис. 5). Такая система датчиков называется «розеткой».

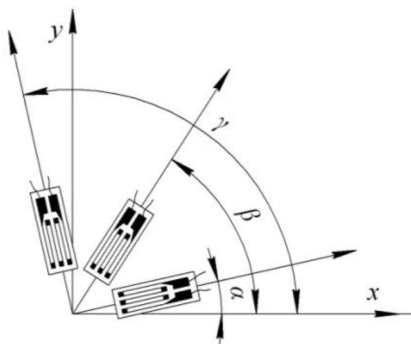


Рис. 5. Ориентация датчиков относительно оси x

Уравнения преобразования деформаций при повороте осей координат имеют вид

$$\begin{aligned}\varepsilon_\alpha &= \varepsilon_x \cos^2 \alpha + \varepsilon_y \sin^2 \alpha + \gamma_{xy} \cos \alpha \sin \alpha, \\ \varepsilon_\beta &= \varepsilon_x \cos^2 \beta + \varepsilon_y \sin^2 \beta + \gamma_{xy} \cos \beta \sin \beta, \\ \varepsilon_\gamma &= \varepsilon_x \cos^2 \gamma + \varepsilon_y \sin^2 \gamma + \gamma_{xy} \cos \gamma \sin \gamma.\end{aligned}\quad (5.2)$$

Из решения системы уравнений (5.2) находят искомые деформации ε_x , ε_y и γ_{xy} (в декартовой системе координат), зная показания ε_α , ε_β и ε_γ тензорозетки.

5.1 Обработка показаний трехэлементной прямоугольной розетки

На практике применяют различные конструкции тензорозеток. Тензорезисторы в прямоугольной трехэлементной розетке расположены под углами 45° друг к другу (рис. 6).

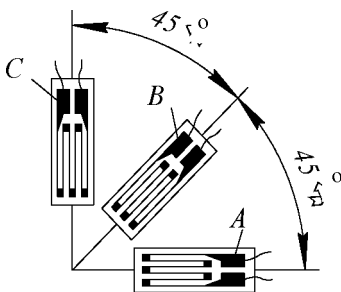


Рис. 6. Прямоугольная трехэлементная тензорозетка

Трехэлементные прямоугольные розетки используют в тех случаях, когда хотя бы приблизительно известно направление главных напряжений на поверхности детали. Датчики А и С ориентируют по этим направлениям.

Для прямоугольной трехэлементной розетки в соответствии с рис. 6 угловые направления датчиков имеют следующие значения $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\gamma = 90^\circ$. Тогда из уравнений системы (5.2) следует:

$$\begin{aligned}\varepsilon_\alpha &= \varepsilon_x, & \varepsilon_\beta &= (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \gamma_{xy}) / 2, \\ \varepsilon_\gamma &= \varepsilon_y.\end{aligned}\quad (5.3)$$

Для вычисления деформации сдвига γ_{xy} из соотношений (5.3) получаем следующее выражение:

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_\beta - \varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma. \quad (5.4)$$

Угол, определяющий направление главных деформаций относительно оси x , находим из уравнения [1]

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} = \frac{2\varepsilon_\beta - \varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma}{\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma}. \quad (5.5)$$

Уравнению (5.5) удовлетворяют два угла: α^* и $\alpha^{**} = \alpha^* + \pi/2$. Подсчитаем деформации ε^* и ε^{**} по направлениям α^* и α^{**} :

$$\varepsilon^* = \varepsilon_x \cos^2 \alpha^* + \varepsilon_y \sin^2 \alpha^* + \gamma_{xy} \sin \alpha^* \cos \alpha^*,$$

$$\varepsilon^{**} = \varepsilon_x \cos^2 \alpha^{**} + \varepsilon_y \sin^2 \alpha^{**} + \gamma_{xy} \sin \alpha^{**} \cos \alpha^{**}.$$

То же самое запишем через показания тензорозетки:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\alpha \cos^2 \alpha^* + \varepsilon_\gamma \sin^2 \alpha^* + (2\varepsilon_\beta - \varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma) \sin \alpha^* \cos \alpha^*,$$

$$\varepsilon^{**} = \varepsilon_\alpha \cos^2 \alpha^{**} + \varepsilon_\gamma \sin^2 \alpha^{**} + (2\varepsilon_\beta - \varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma) \sin \alpha^{**} \cos \alpha^{**}.$$

Большую из этих деформаций принято считать главной деформацией ε_1 . В соответствии с этим:

$$\text{если } \varepsilon^* > \varepsilon^{**}, \text{ то } \varepsilon_1 = \varepsilon^*, \varepsilon_2 = \varepsilon^{**}, \alpha_1 = \alpha^*, \alpha_2 = \alpha^{**},$$

$$\text{если } \varepsilon^* < \varepsilon^{**}, \text{ то } \varepsilon_1 = \varepsilon^{**}, \varepsilon_2 = \varepsilon^*, \alpha_1 = \alpha^{**}, \alpha_2 = \alpha^*.$$

Теперь, зная значения главных деформаций ε_1 и ε_2 , определяем главные нормальные и максимальное касательное напряжения в точке:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2), \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1), \quad \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}. \quad 5.6$$

5.2 Обработка показаний дельта-розетки

В дельта-розетке датчики расположены под равными углами друг к другу (рис. 7).

Дельта-розетку применяют в тех случаях, когда направление главных напряжений неизвестно даже приблизительно. Дельта-розетка позволяет получить хорошие результаты даже при наиболее неблагоприятной ориентировке тензорезисторов относительно главных напряжений.

Согласно рис. 7, для дельта-розетки направления тензорезисторов характеризуются следующими углами: $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $\gamma = 120^\circ$.

Обработка показаний дельта-розетки производится по такому же алгоритму, как и обработка показаний трехэлементной прямоугольной розетки.

Главные деформации ε_1 , ε_2 в точке, их ориентация относительно оси x , угол α и главные напряжения через показания датчиков дельта-розетки ε_α , ε_β и ε_γ описываются следующими выражениями [1]:

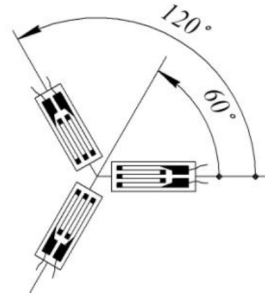


Рис. 7. Дельта-розетка

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3} + \sqrt{\left(\varepsilon_\alpha - \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma}{\sqrt{3}}\right)^2},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3} - \sqrt{\left(\varepsilon_\alpha - \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma}{\sqrt{3}}\right)^2},$$

$$\alpha = \arctg \frac{(\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma) / \sqrt{3}}{\varepsilon_\alpha - (\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma) / 3},$$

$$\sigma_1 = E \left[\frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3(1-\mu)} + \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\left(\varepsilon_\alpha - \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma}{\sqrt{3}}\right)^2} \right],$$

$$\sigma_2 = E \left[\frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3(1-\mu)} - \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\left(\varepsilon_\alpha - \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma}{\sqrt{3}}\right)^2} \right].$$

5.3 Обработка показаний двухэлементных розеток

Двухэлементные розетки применяются в том случае, если направление главных напряжений (деформаций) на поверхности детали известно. Например, в оболочках вращения, работающих под давлением, направление меридиональных и окружных напряжений

заранее известно. При наклеивке тензорезисторы розетки (рис. 8,а) ориентируют по направлениям главных напряжений (деформаций). Используя формулы (5.6), подсчитывают главные напряжения σ_1 и σ_2 .

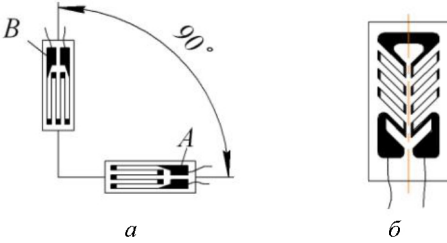


Рис. 8. Двухэлементная тензорозетка

Розетку рис. 8,б применяют в том случае, если на поверхности детали имеет место чистый сдвиг (рис. 9). Такая ситуация наблюдается, например, при кручении валов (рис. 9,б). На поверхности вала измеряют главные деформации $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$, которые действуют под углами $\pm 45^\circ$ к его продольной оси, и подсчитывают главные напряжения:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 - \mu\varepsilon_1) = \frac{E}{1+\mu} \varepsilon_1,$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) = \frac{E}{1-\mu^2} (-\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_1) = -\frac{E}{1+\mu} \varepsilon_1.$$

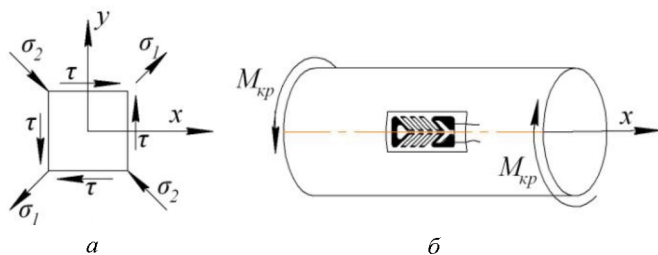


Рис. 9. Схема чистого сдвига

При чистом сдвиге касательные напряжения численно равны главным напряжениям $\tau = \sigma_1 = -\sigma_2$.

6 СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОСТ

6.1 Мост Уитстона

Измерение деформации с помощью тензорезистивных преобразователей – одно из самых сложных в технике электрических измерений. Сложность определяется малым диапазоном изменения сопротивления тензорезистора под воздействием деформации. Изменения сопротивления тензодатчика чрезвычайно малы и составляют для 100-Ом датчика около 0,0002 Ом на деформацию 1 мкм/м. Таким образом, деформация 1000 мкм/м (соответствующая приращению напряжения в стали примерно 200 МПа) изменяет сопротивление 100 Ом датчика на 0,2 Ом. Для преобразования столь малых изменений сопротивления в выходные сигналы напряжения, которые могут регистрироваться, в измерительных приборах широко используется в основном мостовая схема.

Измерительный мост принято изображать в виде ромба, стороны которого называют плечами, а точки соединения плеч – вершинами или узлами моста. Мост Уитстона с питанием от источника постоянного напряжения состоит из трех функциональных частей (рис. 10). Это источник напряжения U , четыре резистора (R_1, R_2, R_3, R_4), образующие мост, и регистрирующая схема, включающая резистор нагрузки R_M . В приведенных ниже уравнениях полагается $R_M = \infty$, так, что ток, протекающий через

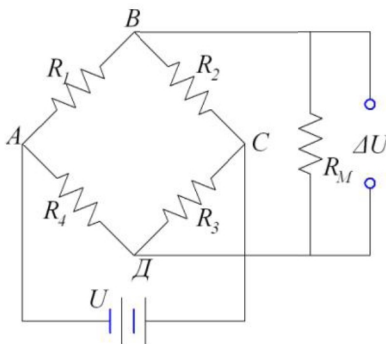


Рис. 10. Мост Уитстона

мост, не отвлекается в нагрузку. Такая ситуация наблюдается, когда сигнал с мостовой схемы поступает на вход электронного усилителя или аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Выходное напряжение моста Уитстона (разность напряжений точек В и Д) определяется соотношением

$$\Delta U = \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U. \quad (6.1)$$

Из уравнения (6.1) следует, что $\Delta U = 0$, если выполняется условие

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ или } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}. \quad (6.2)$$

При соблюдении равенства (6.2) мост называется сбалансированным. Это означает, что малое напряжение разбаланса, вызванное изменением сопротивления, измеряется относительно нулевого или почти нулевого уровня. Этот малый сигнал легко может быть усилен до высокого уровня для последующей регистрации.

Выходное напряжение ΔU возникает при изменении сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 , на величины $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$. Такие изменения сопротивления возникают, например, вследствие деформации или изменения температуры тензорезисторов.

В соответствии с уравнением (6.1) изменение выходного напряжения ΔU , вызванное указанными малыми изменениями сопротивлений, составляет [1]

$$\Delta U = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1 - \eta) U, \quad (6.3)$$

где член η , характеризующий погрешность (нелинейность моста), описывается соотношением [1]

$$\eta = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4}}{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} + 2}. \quad (6.4)$$

В дальнейшем будем рассматривать частный, но наиболее часто встречающийся на практике случай, когда в измерительный мост включаются датчики из одной партии, т.е. имеющие одинаковое номинальное сопротивление $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ и одинаковый коэффициент тензочувствительности $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$.

Выразим изменения относительных сопротивлений тензодатчиков через действующие на них деформации:

$$\frac{\Delta R_i}{R} = k \varepsilon_i, \quad (6.5)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$.

После подстановки (6.5) в выражения (6.3) и (6.4) получим

$$\Delta U = k (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) (1 - \eta) U, \quad (6.6)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + 2/\kappa}. \quad (6.7)$$

Поскольку изменения сопротивления тензорезисторов малы, то и нелинейность функционирования измерительного моста незначительна. Так, при одном активном датчике нелинейность моста η не превышает 1%, если деформация не превышает 10 000 мкм/м.

Из выражений (6.3), (6.4), (6.6) и (6.7) следуют важные для практических приложений свойства измерительного моста:

- Деформации, действующие на тензорезисторы противоположных плеч, суммируются в пределах измерительного моста.
- Деформации, действующие на тензорезисторы смежных плеч моста, вычитаются в пределах измерительного моста.
- Погрешность моста η (нелинейность) пропорциональна алгебраической сумме всех деформаций, воспринимаемых тензорезисторами.

В зависимости от количества тензорезисторов, включаемых в измерительный мост, возможны три модификации мостовой схемы [2]: «четверть моста», «полумост» и «полный мост» (рис. 11).

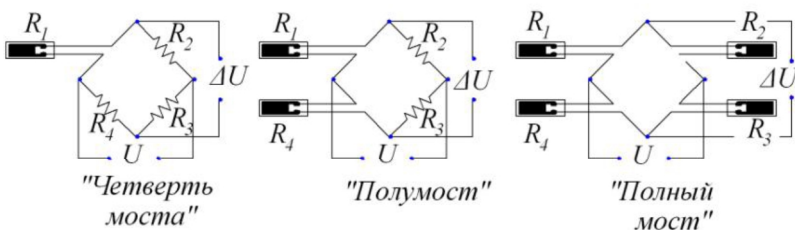


Рис. 11. Модификация измерительного моста

Тензорезисторы обычно выносятся за пределы измерительного устройства и располагаются на исследуемом объекте, тогда как резисторы, дополняющие мост, как правило, расположены в измерительном устройстве.

В плечи моста тензорезисторы можно включать последовательно, параллельно и смешанно.

7 ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Изменение относительного сопротивления тензорезистора в эксперименте, как правило, зависит от двух факторов: уровня измеряемой деформации и величины изменения температуры в месте установки датчика. Изменение температуры тензорезистора в месте его установки зависит как от *колебаний температуры окружающей среды* в процессе измерений, так и от *саморазогрева датчика*, вызываемого проходящим через него электрическим током. Чаще всего влияние температуры является нежелательным фактором.

7.1 Ограничение саморазогрева датчика

Разогрев датчика определяется количеством тепла, выделяемого на решетке током, и условиями охлаждения. В свою очередь, условия охлаждения зависят от размеров детали и ее теплопроводности, площади поверхности, занимаемой нитями решетки, отношения поверхности решетки к ее объему, толщины клеевого слоя и его теплопроводности, температуры окружающей среды и скорости движения потоков воздуха, "омывающего" деталь в месте размещения тензорезистора, и ряда других факторов.

Способность датчика рассеивать тепловую энергию оценивается таким показателем, как удельная мощность рассеивания $W = P/F$, где P – электрическая мощность, рассеиваемая датчиком, а F – площадь поверхности его тензорешетки.

Допустимая величина W определяет величину допустимого тока через тензорезистор. Удельная мощность рассеивания в первую очередь зависит от толщины детали и теплопроводности её материала. Деталь выступает в роли теплового резервуара (радиатора).

В табл. 3 приведены значения допустимой удельной мощности рассеивания в зависимости от свойств детали [1].

Т а б л и ц а 3. *Допустимые удельные мощности рассеивания*

Характеристика объекта измерения	W , Вт/мм ²
Массивный алюминиевый или медный прокат	0,008...0,016
Массивный стальной прокат	0,003...0,008
Тонкий стальной прокат	0,0015...0,003
Стеклопластик, стекло, керамика	0,0003...0,0008
Ненаполненные пластмассы	0,00003...0,00008

При определении рабочего тока питания датчика исходят из плотности тока 45 А/мм^2 для проволочных тензорезисторов и 60 А/мм^2 – для фольговых, если металлическая деталь массивна.

7.2 Температурная деформация системы «датчик-деталь»

При изменении температуры датчика и детали наблюдаются следующие механизмы, способные влиять на результаты измерений.

1. Изменяется коэффициент тензочувствительности S материала тензорешетки. Для сплавов константан и карма эта зависимость представляет собой линейную функцию, показанную на рис. 12.

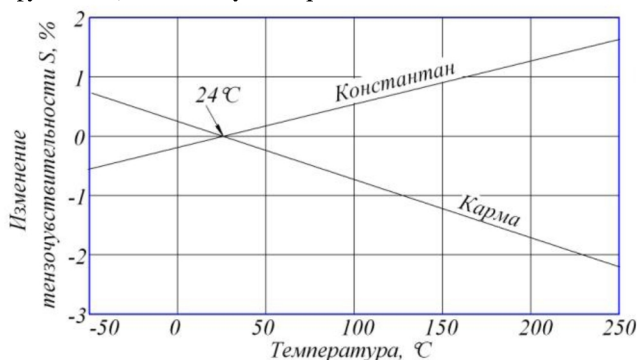


Рис. 12. Зависимость тензочувствительности сплавов константан и карма от температуры

Как видно из графиков, изменение коэффициента тензочувствительности на один градус очень мало и составляет $+0,00735$ для константана и $-0,00975$ для сплава карма. Эти изменения при обычном анализе напряжений не учитываются (изменение менее 1% для $\Delta T = 100^\circ\text{C}$).

2. С изменением температуры удлиняются (или сокращаются) решетка датчика $\Delta l_p = \alpha \Delta T l$ и деталь $\Delta l_o = \beta \Delta T l$.

Здесь l – база тензорезистора, α и β – коэффициенты теплового расширения материалов решетки и детали соответственно.

Поскольку обычно жесткость детали намного выше, чем жесткость тензорешетки, то в последней возникнет механическая деформация:

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta l_o - \Delta l_p}{l} = (\beta - \alpha) \Delta T.$$

Датчик реагирует на деформацию ε_T точно так же, как и на деформацию образца ε , обусловленную нагрузкой, что порождает дополнительную компоненту выходного сигнала, соответствующую температуре.

3. Температурное воздействие изменяет сопротивление тензорешетки:

$$\Delta R = \gamma R \Delta T,$$

где γ – температурный коэффициент сопротивления материала решетки.

Наиболее существенны эффекты, обозначенные номерами 2 и 3. Суммируя их, получим изменение сопротивления наклеенного на деталь датчика от температуры:

$$\frac{\Delta R}{R} = (\beta - \alpha) S \Delta T + \gamma \Delta T. \quad (7.1)$$

Даже если коэффициенты теплового расширения материалов датчика и образца одинаковы $\alpha = \beta$, кажущаяся деформация не равна нулю и определяется вторым членом уравнения. Температурная компенсация датчика достигается лишь при условии, что оба члена в уравнении (7.1) либо равны нулю, либо взаимно уничтожаются.

Последнее условие удается реализовать в процессе производства тензорезисторов. Дело в том, что величины α и γ весьма чувствительны к легированию сплава и к режиму его холодной обработки в процессе прокатки фольги. Наличие вариаций в величинах α и γ от одной плавки к другой и от одного рулона к другому позволяет подбирать датчики, изготовленные на базе сплавов константан и карма, применительно к различным конструкционным материалам. Такие датчики называют температурно-компенсированными датчиками. Температурно-компенсированные датчики для конкретного конструкционного материала подбирают по так называемому S-T-C коду (self-temperature compensation code), который численно равен коэффициенту теплового расширения конструкционного материала, увеличенному в миллион раз.

S-T-C коды для некоторых конструкционных материалов приведены в табл. 4. Там же указана их температурная характеристика теплового расширения α .

Таблица 4. *S-T-C коды для различных материалов*

Материал	Коэффициент теплового расширения α	<i>S-T-C код</i>
Ферритовая сталь	$10,8 \times 10^{-6}$	10,8
Алюминий	23×10^{-6}	23
Полимер	65×10^{-6}	65
Аустенитная сталь	16×10^{-6}	16
Титан	9×10^{-6}	9
Молибден	$5,4 \times 10^{-6}$	5,4
Кварц	$0,5 \times 10^{-6}$	0,5

К сожалению, добиться полной температурной компенсации в широком диапазоне температур не удастся из-за нелинейных членов, которых нет в уравнении (7.1). Типичные температурно-компенсированные датчики обнаруживают присутствие кажущейся деформации, изменяющейся с температурой так, как показано на рис. 13.

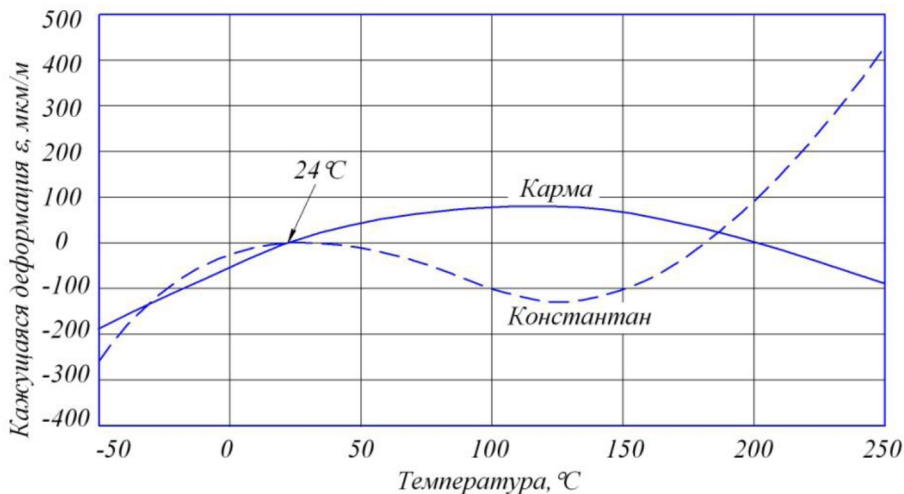


Рис. 13. Зависимость кажущейся деформации от температуры для сплавов константан и карма

Кажущаяся деформация, вызванная изменением температуры в несколько градусов в окрестности уровня 24°C , достаточно мала [менее $0,5 \text{ мкм}/(\text{м}\times^{\circ}\text{C})$]. Однако при существенных изменениях температуры кажущаяся деформация становится значительной, что требует соответствующей коррекции.

С этой целью осуществляют измерения температуры вблизи датчика и используют зависимость кажущейся деформации от температуры, аналогичную графику на рис. 13.

7.3 Влияние соединительных проводов

На исследуемых объектах больших размеров длина соединительных проводов от датчика до измерительного устройства может быть значительной (рис. 14).

С соединительными проводами могут быть связаны две проблемы – снижение уровня сигнала и температурная чувствительность.

Уменьшение уровня сигнала происходит потому, что снижается изменение относительного сопротивления плеча моста $\Delta R_1 / (R_1 + 2R_L)$. Здесь предпола-

гается, что оба соединительных провода ab и cd линии связи имеют одно и то же сопротивление R_L . В качестве соединительных используют медные многожильные провода сечением $0,1 \dots 0,75 \text{ мм}^2$. Чтобы снижение уровня сигнала было меньше 1%, отношение R_L / R_1 не должно превышать 0,005. Для датчика сопротивлением 100 Ом R_L должно быть меньше 0,5 Ом. Таким сопротивлением обладает медный провод сечением $0,2 \text{ мм}^2$ и длиной около шести метров.

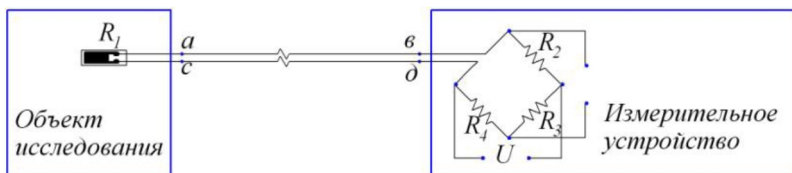


Рис. 14. Схема с протяженной линией соединительных проводов в одном плече измерительного моста

С повышением температуры удельное сопротивление большинства металлов увеличивается. В связи с этим изменение температуры на величину ΔT приведет к изменению сопротивления соединительного провода:

$$\Delta R = \rho_0 \frac{l}{F} \alpha \Delta T.$$

К примеру, соединительный медный провод сечением $0,2 \text{ мм}^2$ и длиной шесть метров при изменении температуры ΔT на один градус изменит свое сопротивление на величину

$$\Delta R = 0,017 \frac{6}{0,2} 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 0,00219 \text{ Ом}.$$

Здесь $\rho_0 = 0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ – удельное сопротивление меди при 20°C ,

$\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ – температурный коэффициент электрического сопротивления меди.

Представим реакцию измерительного моста на температурное изменение сопротивления соединительных проводов в виде кажущейся деформации. Допустим, используется датчик с номинальным сопротивлением 100 Ом и коэффициентом тензочувствительности 2. Тогда для линии из двух проводов получим

$$\varepsilon_T = \frac{2\Delta R}{kR} = \frac{2 \cdot 0,00219}{2 \cdot 100} = 22 \text{ мкм} / \text{м}.$$

Очевидно, следует избегать применения длинных соединительных проводов малого сечения. Изменение сопротивления соединительных проводников (цепей питания датчика) от температуры приводит к изменению чувствительности схемы, что требует проведения повторных калибровок канала измерений.

Эти выводы справедливы в случае питания измерительного моста регулируемым напряжением. Если мост питается регулируемым током, то имеет место независимость чувствительности измерительного канала от изменения сопротивления соединительных проводников, но при этом, как правило, тензометрическая аппаратура не позволяет производить балансировку измерительного моста. В дальнейшем будем рассматривать работу измерительного моста при питании его регулируемым напряжением.

Существуют различные схемы подключения тензорезисторов к измерительному мосту. Рассмотрим их преимущества и недостатки.

Схема «Четверть моста», двухпроводное подключение. Эта схема изображена на рис. 14. Такое подключение является наиболее надежным и экономичным из-за малого количества проводов, но может быть использовано только в случае, когда используются самотермокомпенсированные датчики и температура окружающей среды практически не изменяется. Если же температура среды в процессе измерений непостоянна, то температурное изменение сопротивления соединительных проводов воспринимается измерительным устройством как деформация испытываемого объекта.

Схема «Четверть моста», трехпроводное подключение (рис.15). Это один из самых широко распространенных вариантов схемной компенсации температурного изменения сопротивления соединительных проводов.

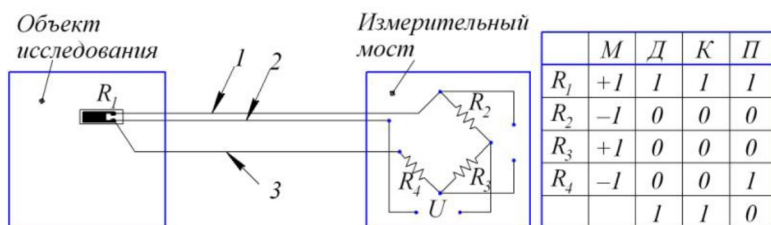


Рис. 15. «Четверть моста», трехпроводное подключение

Соединительные линии 1 и 3 выполняют идентичными проводами одинаковой длины. Поскольку эти линии включены в смежные плечи измерительного моста, то изменение их сопротивления от температуры не будет отражаться на результатах измерения. Линия 2 входит в диагональ питания моста, что уменьшает её температурное влияние на результаты измерений.

Чувствительность измерительного моста к измеряемым деформациям и к кажущимся деформациям от изменения температуры конструкции и соединительных проводов можно оценить с помощью таблицы свойств измерительного моста (рис. 15).

В первом столбце таблицы последовательно перечисляются плечи измерительного моста R_1 , R_2 , R_3 и R_4 (*принят обход по часовой стрелке*). Каждая строка таблицы отражает свойства конкретного плеча моста.

Второй столбец (М) отражает свойство измерительного моста суммировать изменения относительного сопротивления противоположных плеч моста и вычитать изменения сопротивления смежных плеч. Действительно, в формулах (6.3) и (6.6) знаки плюс и минус перед составляющими изменения относительного сопротивления или измеряемой деформации чередуются.

Третий столбец (Д) отражает относительный уровень измеряемой деформации с учетом её знака для каждого плеча измерительного моста. Если в плечо включено пассивное сопротивление или компенсационный датчик, то в соответствующей строке проставляется ноль. В случае схемы «четверть моста» в строке, соответствующей активному датчику, проставляется плюс единица, а в остальных строках столбца – нули (включены пассивные сопротивления).

Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в дальнейшем на конкретных примерах.

Четвертый столбец (К) позволяет оценить чувствительность моста к температурным деформациям нагрева системы «датчик – конструкция». Если в плечо включен активный или компенсационный тензорезистор – проставляем плюс единицу. Если резистор плеча изолирован от влияния температуры или находится внутри измерительного прибора – проставляем ноль. Также проставляем ноль в случае использования самотермокомпенсированных датчиков.

Пятым столбцом (П) оценивается чувствительность моста к температурным изменениям в соединительных линиях. При наличии соединительного провода в плече – проставляем плюс единицу в соответствующей строке пятого столбца, иначе – ноль.

При наличии таблицы оценка чувствительности измерительного моста к измеряемым деформациям, к влиянию температуры превращается в простую арифметическую процедуру. Расчеты производятся по простым формулам и вносятся в последнюю строку таблицы.

Оценка чувствительности моста к измеряемым деформациям:

$$D = \sum_{i=1}^N D_i M_i = D_1 M_1 + D_2 M_2 + D_3 M_3 + D_4 M_4,$$

где i – номер строки.

Для схемы рис. 15

$$D = (+1) \cdot (+1) + (-1) \cdot (0) + (+1) \cdot (0) + (-1) \cdot (0) = 1.$$

Оценка чувствительности моста к кажущейся деформации от нагрева системы «датчик – конструкция»:

$$K = \sum_{i=1}^N K_i M_i = K_1 M_1 + K_2 M_2 + K_3 M_3 + K_4 M_4.$$

Оценка чувствительности моста к изменению сопротивления соединительных проводов от нагрева:

$$\Pi = \sum_{i=1}^N \Pi_i M_i = \Pi_1 M_1 + \Pi_2 M_2 + \Pi_3 M_3 + \Pi_4 M_4.$$

Анализируя итоговые результаты нижней строки таблицы, делаем вывод: схема «четверть моста» с трехпроводным подключением датчика обладает обычной для одиночного датчика чувствительностью к измеряемым деформациям, чувствительна к температурным деформациям системы «датчик – конструкция» и нечувствительна к температурному изменению сопротивления соединительных проводов.

Схема «полумост», **трехпроводное подключение** (рис 16). Обычно второй тензорезистор (R_4) в такой схеме является компенсационным датчиком, т.е. датчиком, наклеенным на ненагруженный образец, изготовленный из такого же материала и находящийся в таких же температурных условиях, что и материал исследуемой конструкции.

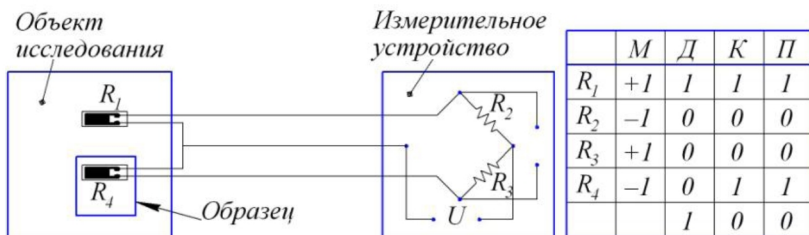


Рис. 16. Схема «полумост» с трехпроводным подключением датчиков

Как видно из табл. рис.16, такая схема обладает теми достоинствами, что исключает температурные погрешности от нагрева конструкции и соединительных проводов, но требует дополнительной калибровки канала измерений из-за температурного изменения сопротивления соединительных линий цепи питания датчиков.

Схема «полумост», **пятипроводное подключение** (рис 17).

Как следует из формулы (6.3), напряжение на выходе моста ΔU зависит от напряжения питания моста U .

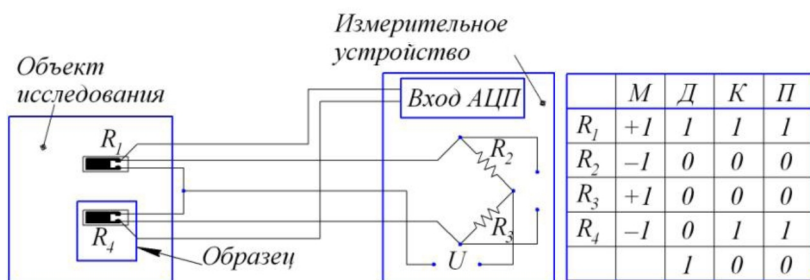


Рис. 17. Схема «полумост» с пятипроводным подключением датчиков

В рассматриваемой схеме, в отличие от предыдущей, напряжение питания моста U контролируется аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Далее предусматривается введение программным образом поправки на колебания напряжения питания. Такая схема обеспечивает надежные, высокоточные измерения в условиях изменяющейся температуры.

Схема «полный мост», четырехпроводное подключение датчиков (рис. 18). В этом случае измерительный мост не восприимчив к температурным изменениям в датчиках, наклеенных на деталь, и к температурному изменению сопротивления соединительных проводов при условии, что все проводные линии идентичны.

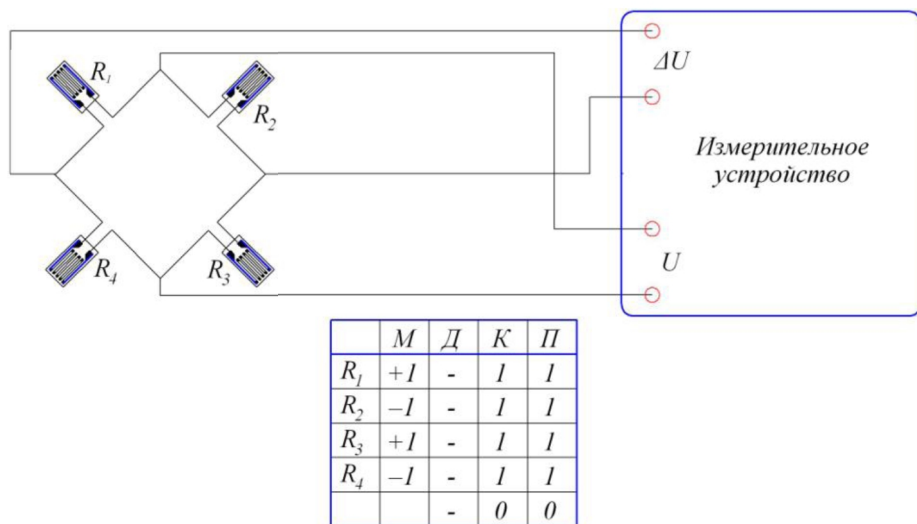


Рис. 18. Полный мост, четырехпроводное подключение

Чувствительность моста к деформациям может изменяться от нуля (мост не реагирует на изменение сопротивления тензорезисторов) до учетверенной чувствительности по сравнению со схемами рис. 14 и 15. Результат зависит от уровня измеряемых деформаций каждым тензорезистором и от знака деформаций, а также от того, в какие плечи моста включены тензорезисторы. Так, если все четыре датчика будут испытывать деформацию одинаковой величины и знака, то измерительный мост будет нечувствителен к измеряемым деформациям. Другие случаи использования полного моста в схемах для измерения деформаций изгиба, растяжения-сжатия и кручения будут рассмотрены ниже.

Схема нечувствительна к изменению сопротивления соединительных проводов от температуры и к температурным деформациям конструкции, если изменение температуры в местах наклейки всех датчиков одинаково.

Схема «полный мост», шестипроводное подключение тензорезисторов (рис. 19).

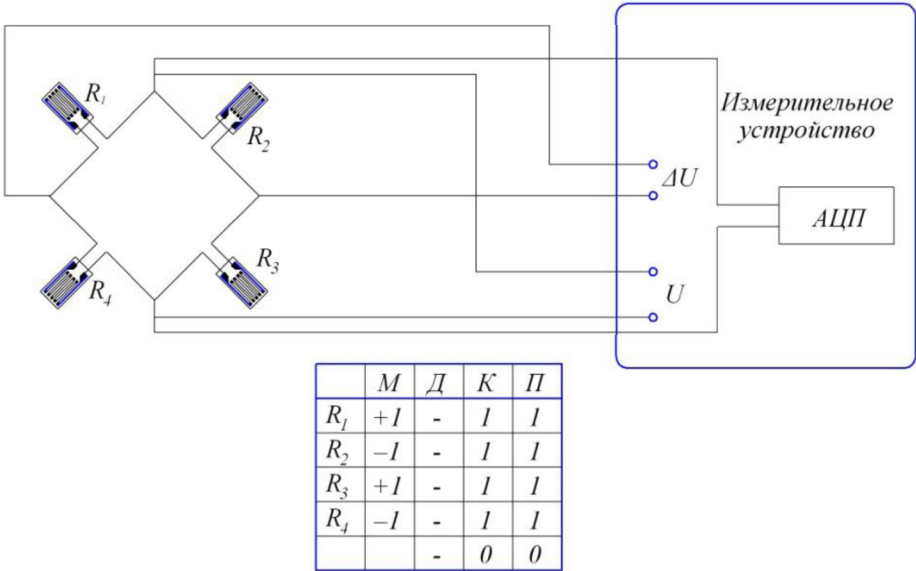


Рис. 19. Полный мост, шестипроводное включение

Схема шестипроводного подключения к измерительному мосту отличается от предыдущей большей точностью измерений, так как введена цепочка измерения напряжения питания моста с использованием АЦП.

8 ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРОСТОГО ВИДА

Под такими деформациями будем подразумевать деформации, возникающие при растяжении-сжатии стержней, изгибе балок, кручении валов. Такого вида деформации создаются в упругих телах тензометрических датчиков силы, перемещения, моментов, ускорения, давления и др.

8.1 Измерение деформаций растяжения-сжатия

Рассмотрим несколько вариантов измерения деформации растяжения-сжатия. В дальнейшем на схемах и в тексте для краткости будем показывать только растяжение.

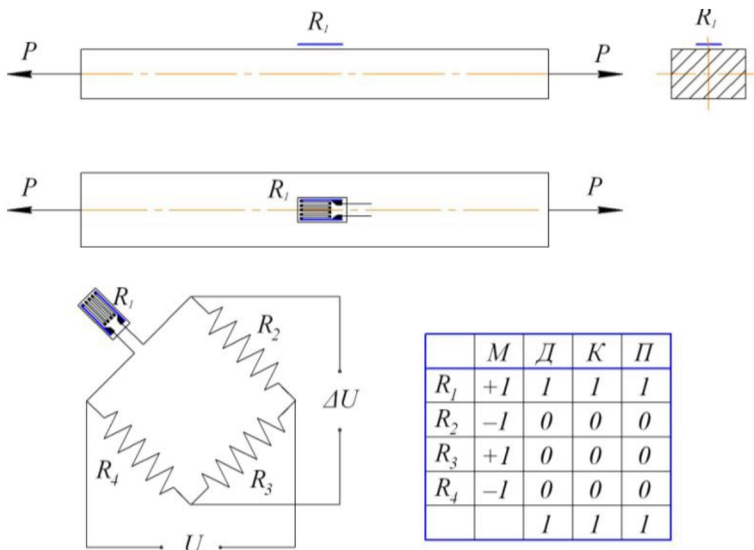


Рис. 20. Растяжение образца. Схема «четверть моста».
Датчик ориентирован вдоль оси образца

Вариант 1. Используется один тензорезистор R_1 , наклеенный в продольном направлении растягиваемого образца (рис.20).

Схема экономичная. Требуется одного датчика и минимального количества соединительных проводов.

Недостатки. Тензомост чувствителен к нагреву конструкции и соединительных проводов. В процессе измерений колебания температуры недопустимы.

Вариант 2. «Полумост». Один тензорезистор R_1 установлен в продольном направлении образца, другой R_4 – в поперечном. Датчики включены в смежные плечи моста (рис. 21).

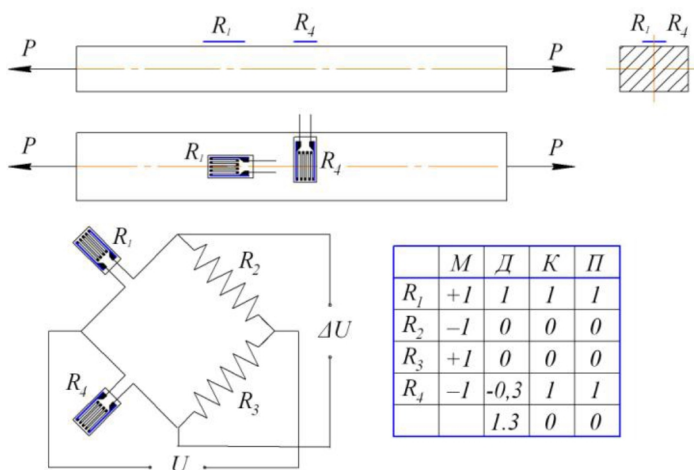


Рис. 21. Растяжение образца. Вариант 2. «Полумост».
Один датчик наклеен вдоль, а другой – поперек оси образца

Анализ таблицы позволяет сделать вывод: измерительная схема нечувствительна к нагреву конструкции и соединительных проводов. Чувствительность моста к механической деформации ε выше в $(1 + \mu)$ раз по сравнению с предыдущим случаем. Здесь $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона.

Вариант 3. «Полный мост» (рис 22). Два датчика наклеены на противоположные поверхности образца в продольном направлении. Соблюдается симметрия расположения датчиков относительно оси поперечного сечения образца.

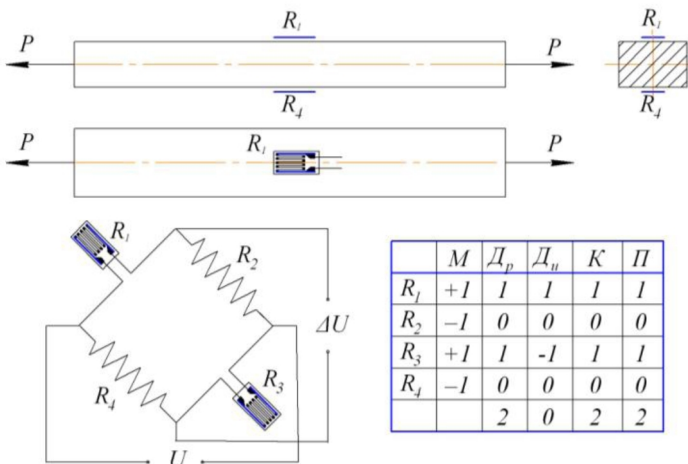


Рис. 22. Растяжение образца. Вариант 3. «Полный мост».
Два датчика включены в противоположные плечи моста

Схема находит применение, когда в эксперименте трудно обеспечить соосность внешних нагрузок P , особенно при сжатии. В этом случае деформации растяжения-сжатия сопровождаются нежелательными деформациями изгиба.

По сравнению с первым вариантом рассматриваемая схема обладает двумя преимуществами:

- В два раза более высокой чувствительностью к продольным деформациям;
- Схема нечувствительна к изгибным деформациям образца.

К таким выводам можно прийти, если учесть, что деформации растяжения-сжатия под тензорезисторами равны по величине и знаку, а деформации изгиба – равны по величине, но по знаку – противоположны. Столбец деформаций $\mathcal{D}$ в таблице анализа заменяем двумя столбцами $\mathcal{D}_p$ и $\mathcal{D}_u$, отражающими соответственно относительный уровень и знак деформаций растяжения и изгиба под тензорезисторами. Перемножая компоненты столбцов M и $\mathcal{D}_p$ с подсуммированием произведений получаем 2, что свидетельствует об удвоенной чувствительности тензометрической схемы к деформациям растяжения. Аналогичная процедура со столбцами M и $\mathcal{D}_u$ даст ноль. Схема нечувствительна к деформациям изгиба.

Вариант 4. «Полный мост» (рис. 23). Используются четыре датчика. Два из них измеряют продольную деформацию образца, а два других – поперечную

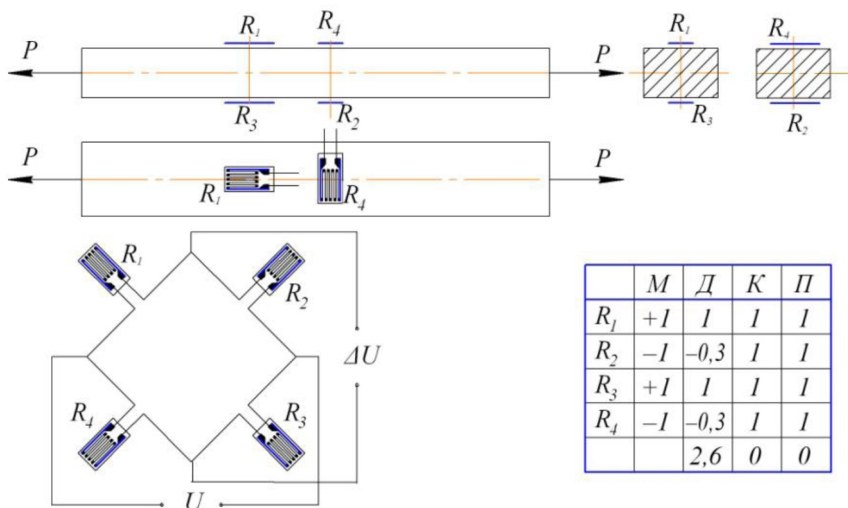


Рис. 23. Растяжение образца. Вариант 4. «Полный мост».
Вдоль и поперек оси образца наклеено по два датчика

Это наилучший вариант измерения деформаций растяжения-сжатия. Как видно из таблицы, чувствительность схемы достигает величины 2,6 при отсутствии чувствительности к температурным изменениям в конструкции и соединительных проводах.

8.2 Измерение деформаций изгиба

Вариант 1. Схема «Четверть моста» (рис.24).

Наиболее экономичная схема по количеству используемых датчиков и количеству соединительных проводов, однако чувствительна к температурным изменениям в конструкции и соединительных проводах.

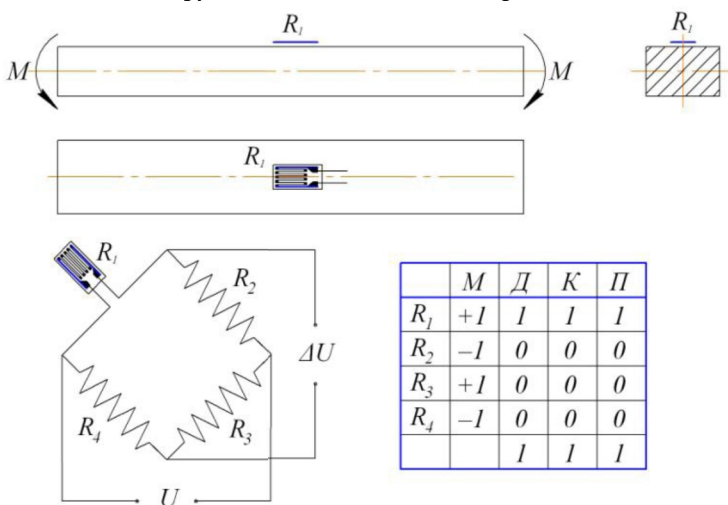


Рис. 24. Изгиб. Схема «четверть моста»

Вариант 2. Схема «полумост» (рис.25).

Самая распространенная схема измерения изгибных деформаций в силу следующих достоинств:

- Схема имеет удвоенную чувствительность к деформациям;
- Схема нечувствительна к температурным изменениям в исследуемой конструкции и соединительных проводах;
- Схема отличается высокой линейностью измерительного моста, поскольку сумма воздействующих на тензорезисторы деформаций равна нулю. Такой вывод следует из формулы (6.4), характеризующей степень нелинейности моста. Практически это сводится к тому, что подобные схемы допускают измерение больших деформаций до 50%, а обычные схемы – до 2% без заметных нелинейных искажений.

Вариант 3. Схема «полный мост» (рис.26).

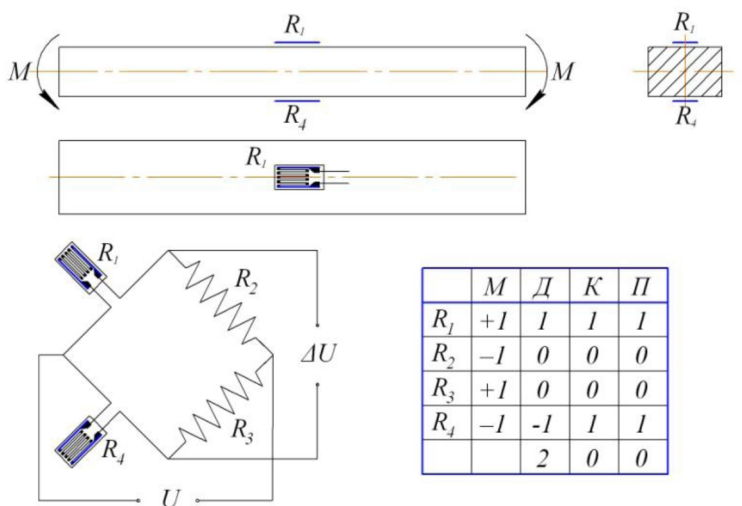


Рис. 25. Изгиб. Вариант 2. Схема «полумост»

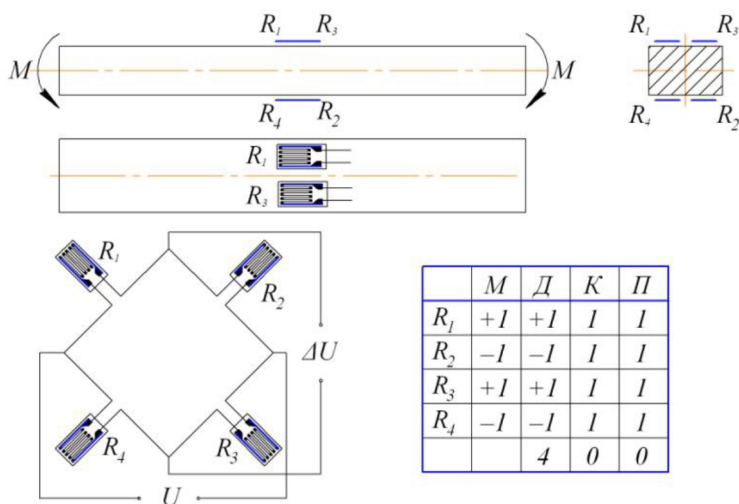


Рис. 26. Изгиб. Схема «полный мост»

В этом случае к достоинствам предыдущей схемы добавляется ещё более высокая чувствительность к измеряемым деформациям, равная 4.

8.3 Измерение деформаций сдвига

При кручении валов, труб деформации сдвига на их поверхности измеряют двумя (полумост) или четырьмя (полный мост) датчиками, ориентированными под углами $\pm 45^\circ$ к продольной оси конструкции (рис. 27 и 28).

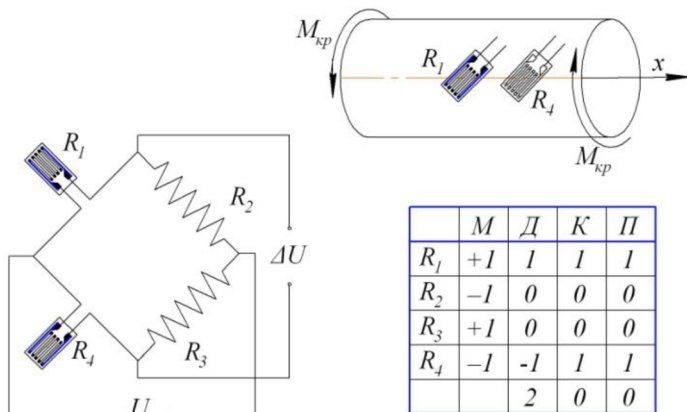


Рис. 27. Измерение деформаций двумя датчиками при кручении стержня

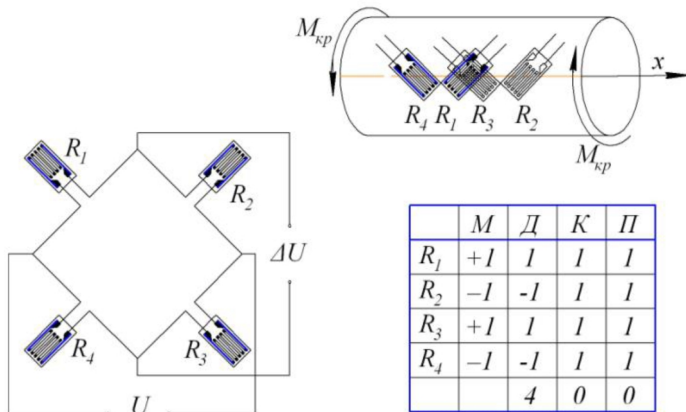
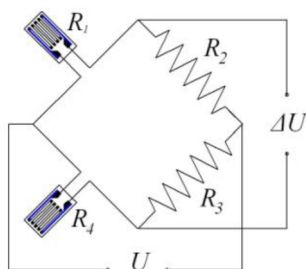
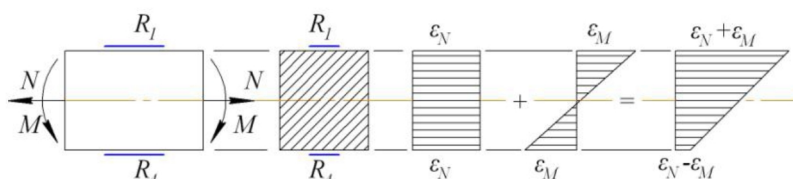


Рис. 28. Измерение деформаций четырьмя датчиками при кручении стержня

Схемы исключают чувствительность измерительного моста к температурному изменению сопротивления соединительных проводов и к температурным деформациям датчиков и конструкции. Мостовая схема имеет вдвое большую чувствительность к измеряемой деформации, чем полумостовая.

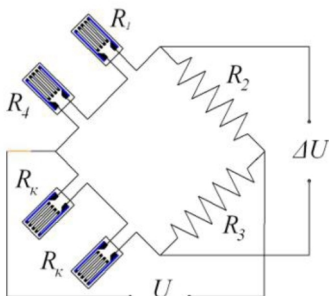
8.4 Схемы избирательной чувствительности тензометрического моста к деформациям от изгиба и растяжения-сжатия стержня

Допустим, круглый стержень одновременно подвергается осевому нагружению и изгибу (рис. 29). Два тензорезистора R_1 и R_4 наклеиваются на стержень диаметрально противоположно. Тогда, согласно рисунку, в месте наклейки тензорезистора R_1 деформации растяжения ε_N и изгиба ε_M суммируются $\varepsilon_1 = \varepsilon_N + \varepsilon_M$. В диаметрально расположенной точке R_4 они вычитаются $\varepsilon_4 = \varepsilon_N - \varepsilon_M$.



	M	$\mathcal{L}_N$	$\mathcal{L}_M$	K	Π
R_1	$+1$	1	1	1	1
R_2	-1	0	0	0	0
R_3	$+1$	0	0	0	0
R_4	-1	1	-1	1	1
		0	2	0	0

a)



	M	$\mathcal{L}_N$	$\mathcal{L}_M$	K	Π
R_1	$+1$	$0,5$	$0,5$	$0,5$	1
R_4	$+1$	$0,5$	$-0,5$	$0,5$	1
R_2	-1	0	0	0	0
R_3	$+1$	0	0	0	0
R_K	-1	0	0	$0,5$	$0,5$
R_K	-1	0	0	$0,5$	$0,5$
		1	0	0	0

б)

Рис. 29. Схема раздельного измерения деформаций растяжения-сжатия и изгиба с термокомпенсацией: а – измерение деформации изгиба; б – измерение деформации растяжения-сжатия

Вариант 1. Схема избирательной чувствительности тензомоста к деформациям от изгиба (рис. 29, схема а). Датчики R_1 и R_4 включены в смежные плечи измерительного моста. Аналогичная схема изображена на рис. 25. Как видно из соответствующей таблицы, мостовая схема имеет удвоенную чувствительность к деформациям изгиба (см. столбец D_M) и нечувствительна к деформациям растяжения-сжатия (итоговый результат по столбцу D_N равен нулю)

Вариант 2. Схема избирательной чувствительности тензомоста к деформациям растяжения (рис. 29, схема б). В первое плечо измерительного моста последовательно включены два датчика R_1 и R_4 . В результате по сравнению с обычным включением полное сопротивление плеча удваивается и эффективность отдельного датчика снижается в два раза. Действительно, если номинальные сопротивления датчиков одинаковы $R_1 = R_4 = R$, то для плеча с последовательно включенными датчиками имеем:

$$\frac{\Delta R_1 + \Delta R_4}{(R_1 + R_4)} = \frac{\Delta R_1 + \Delta R_4}{2R} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R} + \frac{1}{2} \frac{\Delta R_4}{R}.$$

В четвертое плечо моста включены два компенсационных датчика R_K .

Вывод:

- схема избирательно выделяет деформации растяжения (сжатия), но нечувствительна к деформациям изгиба;
- схема нечувствительна к колебаниям температуры конструкции и соединительных проводов.

8.5 Схема измерения нелинейной деформации при изгибе образца

Полную деформацию образца можно представить в виде суммы линейной и нелинейной составляющих $\varepsilon = \varepsilon_l + \varepsilon_{нел} = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{нел}$. Нелинейная деформация содержит информацию, как правило, о необратимых процессах в образце. При циклическом нагружении – это информация о ходе усталостных процессов, об уровне демпфирующих свойств материала. Поскольку тензорезистор измеряет деформацию поверхности – это информация о процессах в поверхностном слое образца.

При малых уровнях напряжений нелинейная составляющая весьма мала на фоне большой упругой деформации, что затрудняет её измерение. Схема рис. 30 позволяет в пределах измерительного моста формировать сигнал нелинейной деформации в соответствии с формулой $\varepsilon_{нел} = \varepsilon - \varepsilon_l$.

В месте установки датчиков R_2, R_3 и R_4 на балку постоянного поперечного сечения (рис. 30) деформация в три раза меньше, чем в месте наклейки датчика R_1 в соответствии с размерами плеч от точки приложения нагрузки P до мест наклейки тензорезисторов. Подсчитаем чувствительность моста к деформациям по данным таблицы рис. 30:

$$\Delta = (+1) \cdot (+1) + (-1) \cdot (+1/3) + (+1) \cdot (-1/3) + (-1) \cdot (+1/3) = 0 .$$

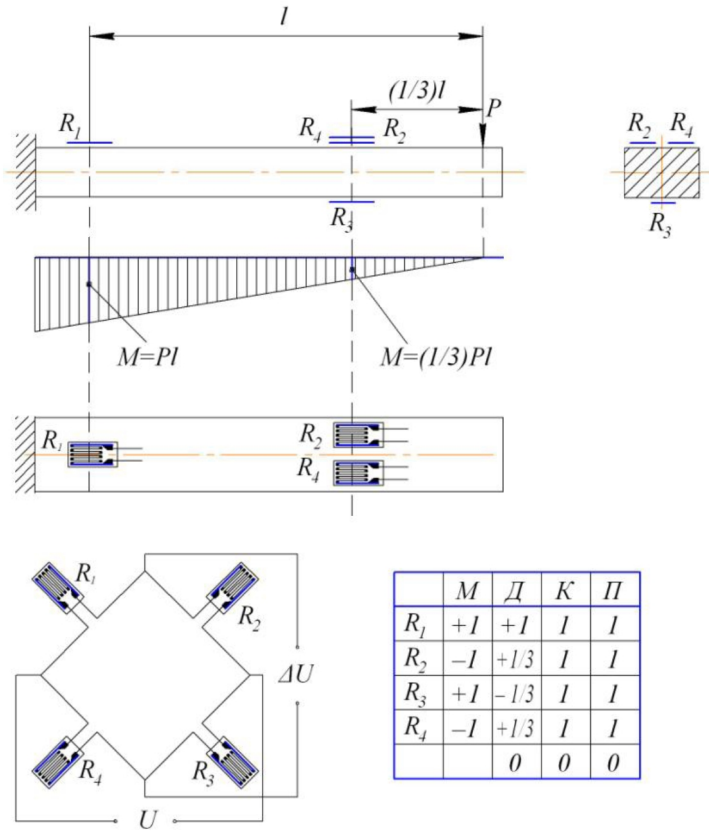


Рис. 30. Схема измерения нелинейной деформации при изгибе образца

Пока деформация в месте наклейки датчика R_1 будет линейной (упругой), сигнал на выходе тензометрического моста отсутствует.

9 ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

9.1 Измерение больших деформаций

Под большой деформацией понимается наибольшее значение относительной деформации, в отношении которой завод-изготовитель гарантирует надежную работу тензорезисторов и строгую линейность их характеристики преобразования.

Как показали опыты, отожженная константовая проволока может выдерживать при строгой линейности преобразования деформации до 10%, а дважды отожженная – до 20% [1].

Сплавы константан и карма, используемые в тензорезисторах общего назначения на несущей основе из полиимида, могут применяться для измерения деформаций в пределах $\pm 5\%$ и $\pm 1,5\%$ соответственно [1]. Эти пределы деформирования соответствуют диапазону упругого деформирования металлических и керамических элементов конструкций, в которых деформации текучести или разрушения обычно не превышают 1%. Указанные пределы, однако, легко могут быть превышены при исследовании пластических деформаций, существенно превышающих предел текучести конструкционного материала. В таких случаях обычно используются датчики больших деформаций, которые содержат решетку из дважды отпущенной константовой фольги с основой из полиимида, способной к значительному удлинению. Для крепления датчиков к конструкции используют эпоксидные смолы, модифицированные уретаном. Соблюдение необходимых мер предосторожности при подготовке поверхности конструкции, зачистке обратной стороны датчика, составлении пластифицированного высокоэластичного клея и фиксации подводящих проводов (не вносящей существенной концентрации напряжений) позволяет достичь деформации около 20% до возникновения трещин в паяных контактах или на концах решетки датчика. При больших деформациях необходим учет поведения тензочувствительности датчика, которая становится функцией измеряемой деформации ($S = 2 + \varepsilon$), и для учета этой нелинейности необходима коррекция получаемых результатов.

Для проволочных и фольговых тензорезисторов отечественного производства верхний предел измеряемой деформации, ниже которой завод-изготовитель гарантирует линейность характеристики преобразования, принят равным ± 3000 мкм/м ($\pm 0,3\%$).

9.2 Измерения в зонах больших градиентов деформации

Пусть требуется измерить величину деформации ε_x в некоторой точке A на поверхности детали l (рис 31). Используя направляющие метки 2 тензорезистора, наклеим его так, чтобы центральная точка чувствительной решетки совпала с точкой A , а направление чувствительных нитей – с направлением деформации ε_x .

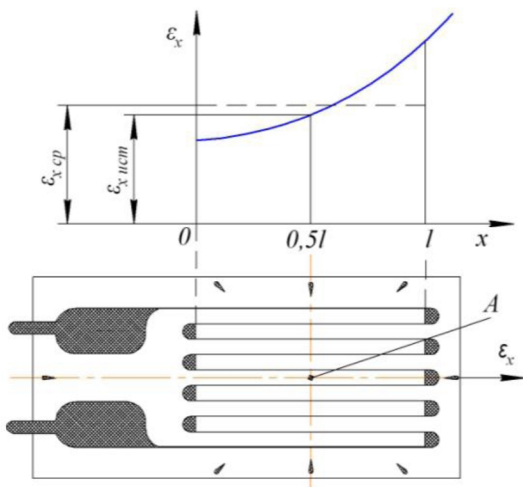


Рис. 31. Тензорезистор в зоне концентратора деформаций

Допустим, что поле деформаций детали в продольном направлении датчика изменяется по следующему закону:

$$\varepsilon_x = a + bx + cx^2.$$

Истинная деформация в точке A , положение которой определяется координатой $x=0,5l$, будет

$$\varepsilon_{x_{ист}} = a + b \frac{l}{2} + c \left(\frac{l}{2} \right)^2.$$

Здесь l – база тензорезистора.

В тензорезисторе формируется сигнал, пропорциональный средней деформации

на площади под его тензорешеткой:

$$\varepsilon_{x_{сп}} = \frac{1}{l} \int_0^l (a + bx + cx^2) dx = a + b \frac{l}{2} + c \frac{l^2}{3}.$$

Истинная и измеренная деформации отличаются на величину

$$\Delta = \varepsilon_{x_{сп}} - \varepsilon_{x_{ист}} = c \frac{l^2}{12}.$$

Полученный результат показывает, что абсолютная погрешность измерений обусловлена нелинейным членом и существенно зависит от базы тензорезистора l .

Следовательно, чем интенсивнее изменяется поле деформаций, тем предпочтительнее использовать тензорезисторы с меньшей базой и шириной. Погрешность измерений отсутствует, если поле деформаций детали постоянно или изменяется по линейному закону или закону плоскости.

9.3 Измерение деформаций деталей из низкомодульных материалов

Под эффектом подкрепления понимают влияние наклеенного тензорезистора на НДС исследуемого объекта. Если объект массивный и выполнен из материала с высоким модулем упругости E , то эффект подкрепления датчика пренебрежимо мал. Это наиболее часто встречающаяся ситуация.

Другое дело, если объект изготовлен из пластмассы, оргстекла, бумаги или других низкомодульных материалов и имеет малую толщину.

Возможно локальное подкрепление объекта, когда влияние тензорезистора проявляется лишь в области, прилегающей к нему. Например, когда тензорезистор располагается на краю тонкой пластины (рис. 32,а).

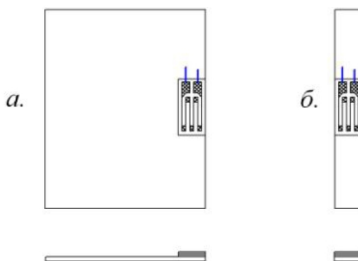


Рис. 32. Эффект подкрепления тонкой пластины датчиком

Глобальное подкрепление имеет место при малых размерах элемента конструкции.

Этот случай показан на рис. 32,б, когда ширина тонкой пластины соизмерима с шириной датчика.

В расчетах степени подкрепления используют эффективный модуль упругости тензорезистора как многослойной конструкции, изготовленной из разных материалов. Эффективный модуль упругости различных типов тензорезисторов колеблется в пределах от 8 до 20 ГПа.

Эффект подкрепления приводит к тому, что тензорезистор «показывает» заниженное значение деформации в исследуемом объекте.

9.4 Длительные измерения

Под длительными измерениями понимают измерения, которые проводят на протяжении месяцев и даже лет без разгрузки объекта и повторной проверки уровня нуля.

Дрейф нуля тензометрической измерительной системы в целом обусловлен следующими обстоятельствами:

- влиянием влаги или изменением влажности на клей и основу тензорезистора, так как изменяются их электроизоляционные и механические свойства;
- происходит изменение внутренних напряжений (релаксация) в основе, клее и материале решетки;

- возможна нестабильность параметров резисторов в пассивных плечах измерительного моста;
- возможна нестабильность источника питания (временной дрейф уровня напряжения).

Датчики общего назначения из сплава константан на полимерной основе за 30 суток измерений дают смещение нуля на 270 мкм/м при условии, что они были тщательно герметизированы от действия влаги [1].

Добавление «жесткого» наполнителя (стекловолокна) в фенольную основу константанового датчика позволяет снизить дрейф нуля до 100 мкм/м за 50 суток [1].

Наилучшие результаты при длительных измерениях показывают датчики из сплава карма, имеющие эпоксидно-фенольную основу, усиленную стекловолокном. За 900 суток смещение нуля такого датчика составило 30 мкм/м [1].

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности длительных измерений с помощью тензодатчиков при использовании решеток из сплава карма в сочетании с несущими основами из эпоксидно-фенольной смолы, усиленной стекловолокном, и хорошо отвержденного эпоксидного клея. Для ослабления влияния влаги конструкция тензодатчика должна быть влагозащищенной. Для сохранения стабильности моста в течение длительного времени в мостовой схеме требуется применение герметизированных резисторов.

9.5 Измерения в процессе длительного повторяющегося циклического деформирования

Длительное воздействие циклических деформаций вызывает в тензорезисторах необратимые изменения. Усталостное разрушение датчика начинается, как правило, в районе контактных площадок, имеющих повышенную жесткость на растяжение (вместе со слоем припоя) после подсоединения сигнальных проводов. Усталостные процессы приводят к появлению в сигнале тензорезистора смещения нуля, вызывают изменение чувствительности датчика к деформациям. Причем оба эти явления начинают проявляться практически одновременно. Заметное искажение сигнала датчика наблюдается после некоторого числа циклов, зависящего от уровня деформации. Так, константановые датчики марки 2ФКПА -3-100 ГВ, наклеенные лаком ВЛ-931, имеют ресурс 1000 циклов при деформации $\varepsilon = \pm 3000 \text{ мкм/м}$, а при деформации $\varepsilon = \pm 2000 \text{ мкм/м}$ ресурс увеличивается до 100 000 циклов.

Повысить ресурс датчика можно, обеспечив его полную герметизацию. Наилучшие показатели имеют датчики из сплавов карма и изоэластика, основа которых сделана из эпоксидно-фенольной смолы, усиленной стекловолокном [1].

9.6 Массовое тензометрирование

Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций сопряжено с установкой на них большого числа тензорозеток и одиночных тензорезисторов. При статических испытаниях самолетов число наклеенных датчиков деформации исчисляется тысячами [4]. Такую ситуацию называют массовым тензометрированием.

Проблему массового тензометрирования решают введением в измерительную цепь переключателя датчиков, который позволяет последовательно опрашивать все датчики, используя один и тот же тензоусилитель, АЦП, регистрирующее устройство.

Наиболее простым решением является однополюсный переключатель (рис. 33). С помощью его в плечо измерительного моста, заменяя один тензорезистор другим, последовательно подсоединяются все опрашиваемые датчики.

Контакты переключателя могут быть серьезным источником погрешностей, так как сопротивление контакта в плече моста суммируется с сопротивлением опрашиваемого тензорезистора. Контакты переключателя делают посеребренными или позолоченными. Чтобы их сопротивление сохранялось постоянным после многочисленных срабатываний, контакты подвергают периодической очистке для удаления грязи и окислов.

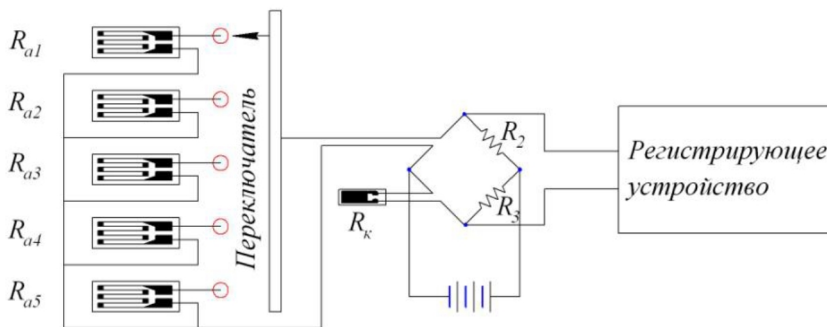


Рис. 33. Подключение тензорезисторов к измерительному мосту через однополюсный переключатель

Более дорогостоящей схемой является трехполюсное переключение (рис. 34). В этом случае на каждый активный датчик формируют отдельный мост. Переключателем подсоединяют к тензоусилителю целые мосты тремя контактами, но эти контакты выведены за пределы измерительного моста и, следовательно, не оказывают сильного влияния на результаты измерений. Четвертый вывод мостов объединен общим проводом и входит в цепь питания.

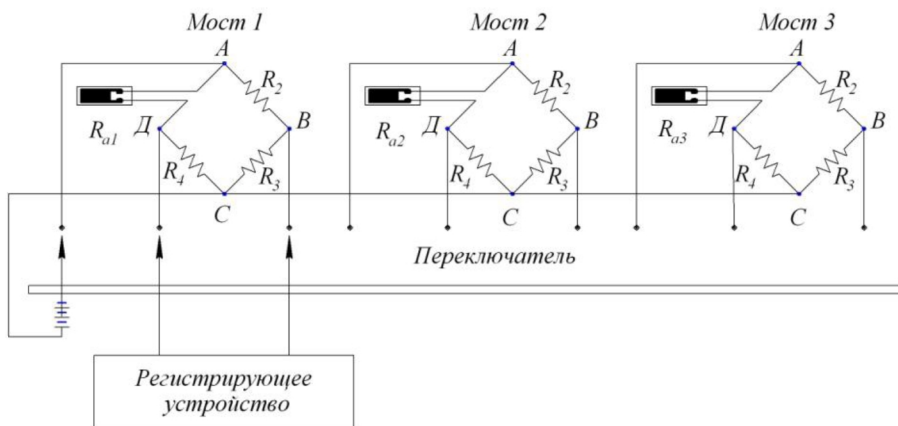


Рис. 34. Схема подключения измерительных мостов трехполюсным переключателем

Дополнительное преимущество данной схемы заключается в том, что допустима первоначальная балансировка каждого моста. Тогда отсчет показаний возможен относительно сбалансированного состояния.

Основной недостаток схемы – дополнительные затраты на резисторы, образующие индивидуальные тензометрические мосты – по три высокоточных температурно-стабильных резистора на мост. Однако эти затраты являются однократными, поскольку если использовать партии тензорезисторов близкого номинального сопротивления, то сформированные мосты могут использоваться неоднократно.

10 ТАРИРОВКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Тарировка (градуировка) позволяет установить чувствительность тензометрической системы к измеряемой величине, проверить работу системы во всем диапазоне изменения входной величины.

Тарировка осуществляется следующим образом: на вход измерительной системы (рис. 35,б) подают заранее известные значения измеряемой величины, например, деформации, а на выходе фиксируют реакцию системы на эти воздействия.

Источником эталонной деформации чаще всего служат тарировочные балки консольного типа (рис. 35,а) или на двух опорах. Их изготавливают из высокопрочных материалов, отличающихся высокими упругими свойствами и линейностью характеристики деформирования до деформаций не менее 0,3%.

Если, например, используется балка постоянного поперечного сечения, то легко подсчитать уровень деформации в точке расположения центра чувствительной решетки тензорезистора:

$$\varepsilon = \frac{M}{WE} = 6 \frac{Pl}{bh^2 E}.$$

Необходимо знать с достаточной степенью точности значение модуля упругости E материала балки. Тензорезисторы на балке и на исследуемом объекте должны быть из одной партии, т.е. иметь одинаковый коэффициент тензочувствительности и другие характеристики.

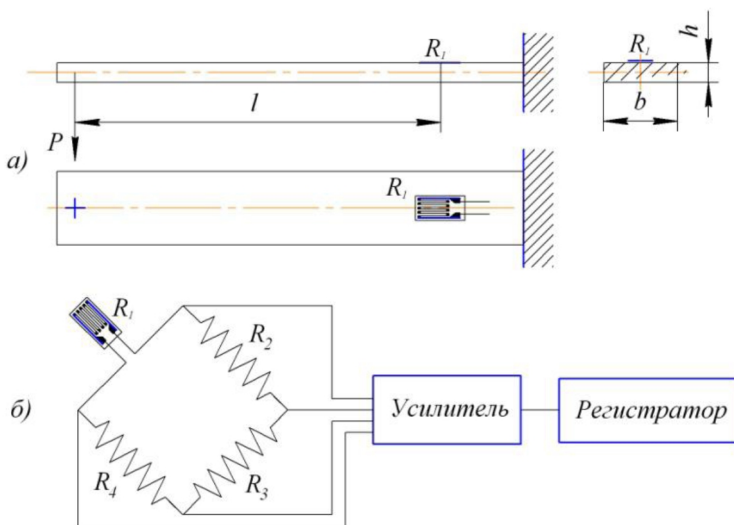


Рис. 35. Использование консольной балки для тарировки измерительной системы

По результатам тарировки строится график (рис. 36), позволяющий судить о степени линейности измерительной характеристики системы во всем диапазоне изменения измеряемой деформации.

Следует отметить, что измерительный мост (количество включенных активных датчиков, их место в измерительном мосте), а также длина соединительных проводов и их сечение при тарировке должны быть такими же, как и в проводимом эксперименте. От величины сопротивления соединительных проводов зависит чувствительность измерительного моста к деформациям (см. пункт 7.3). Описанная тарировка носит название механической. Она проводится вначале экспериментов и является достаточно трудоемкой.

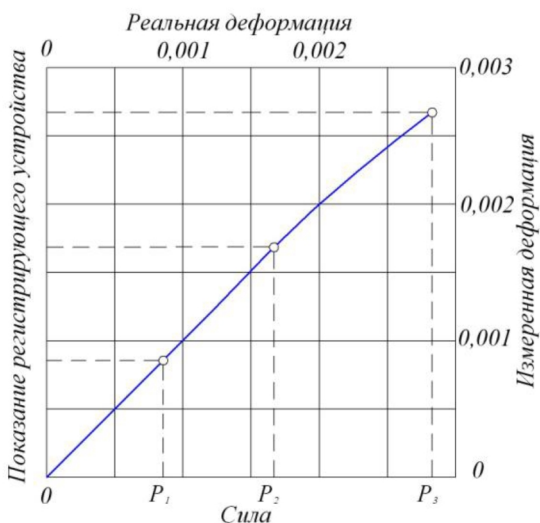


Рис. 36. Тарировочный график

В дополнение к механической тарировке на практике широко применяют менее трудоемкую так называемую электротарировку. При электротарировке изменение относительного сопротивления плеча измерительного моста, вызванное деформированием тензорезистора, заменяют шунтированием тензодатчика высокоомным эталонным резистором (рис. 37,а). Используя различные эталонные резисторы, можно быстро имитировать стандартные деформации 100, 200, 500, 1000 и 2000 мкм/м.

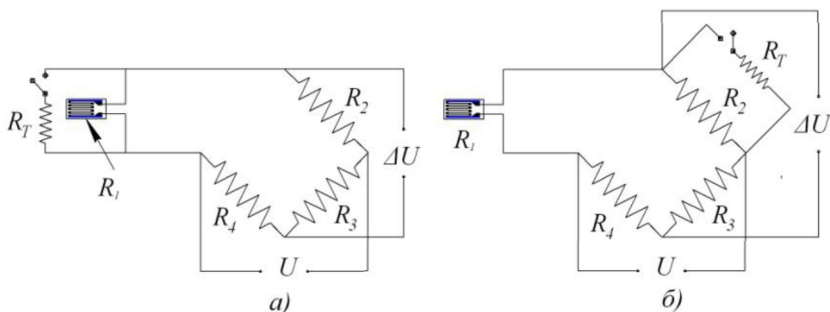


Рис. 37. Варианты схем электротарировки

Аппаратно более удобно шунтировать не активный тензодатчик, а пассивный резистор, например R_2 (рис. 37,б), но при этом не будет учитываться влияние сопротивления соединительных проводов. После тарировки тензодатчика дальнейшая ежедневная тарировка может производиться путем шунтирования резистора R_2 , поскольку сопротивление соединительных проводов не изменяется. Современная тензометрическая аппаратура позволяет проводить электротарировку программно в процессе основных измерений [4].

Для поддержания постоянной чувствительности измерительной системы к измеряемой величине проводят калибровку каналов. В отличие от электротайрировки, при калибровке после подачи эталонного сигнала на вход измерительного канала на выходе устанавливают определенный уровень выходного сигнала, изменяя коэффициент усиления системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальная механика [Текст] : монография в 2 кн: Кн. 1 / пер. с англ.; под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 552 с.
2. Серьезнов, А. Н. Методы и средства измерений в прочностном эксперименте [Текст] / А. Н. Серьезнов, А. К. Шашурин. – М.: Изд-во МАИ, 1990. – 200 с.
3. Шушкевич, В. А. Основы электротензометрии [Текст] / В. А. Шушкевич. – Минск: Высшая школа, 1975. – 352 с.
4. Аэродинамика и прочность конструкций летательных аппаратов [Текст]: тр. Всерос. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию отделений аэродинамики летательных аппаратов и прочности авиационных конструкций (15 – 17 июня 2004 г.) / под ред. д-ра техн. наук А. Н. Серьезнова. – Новосибирск: СибНИА, 2005. – 348 с.

Учебное издание

Мехеда Виллий Андреевич

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Учебное пособие

Редактор Т. К. К р е т и н и н а
Доверстка Т. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 21.10.11. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 3,5

Тираж 100 экз. Заказ Арт. С-4/2011

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

В. А. МЕХЕДА

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

САМАРА 2011