ЛЕКЦИЯ №8,9

ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

(ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ)

(ТЕНЗОДАТЧИКИ)

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Тензорезисторы используются для измерения деформации в твёрдых телах.

На их основе строят **датчики веса, давления, силы, перемещения, момента, ускорения, вибрации, натяжения, крутящего момента, остаточных напряжений** в механических конструкциях и деталях машин после их обработки и т.д.

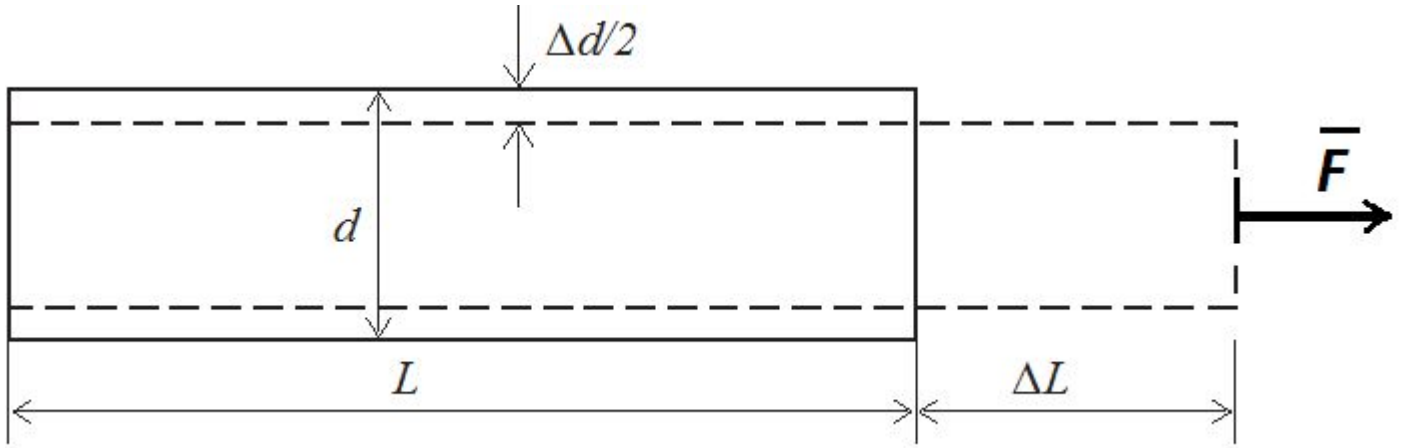
Принцип действия тензорезистора основан на изменении электрического сопротивления твёрдого тела при его деформации приложенной силой

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Сопротивление твёрдого тела длиной ***L*** с площадью поперечного сечения ***S*** определяется формулой , где ***ρ*** – удельное сопротивление. При приложении к телу растягивающей силы ***F*** происходит деформация: увеличивается длина тела на **Δ*L*** и уменьшается площадь поперечного сечения на **Δ*S***. У большинства тел **изменяется также удельное сопротивление на величину Δ*ρ*.**

В случае когда эти приращения малы, путём логарифмирования и последующего дифференцирования обеих частей формулы для ***R*** получим:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta S}{S}$$



ТЕНЗОДАТЧИКИ

Площадь поперечного сечения проводника пропорциональна его характерному поперечному размеру (в случае круглого сечения S = πd^2/4, для прямоугольного сечения **c×d** площадь **S = kd^2**, если **c = kd**), то при **Δd << d** в обоих случаях можно получить соотношение:

$$\frac{\Delta S}{S} = 2\frac{\Delta d}{d}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \left(1 + 2\mu\right)\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \left(1 + 2\mu\right) \cdot \varepsilon$$

, где $\boldsymbol{\mu}$ – коэффициент Пуассона, для металлов равный $\boldsymbol{\mu}$ **= 0,25…0,4**;

$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{\Delta L/L}$ – относительное удлинение (относительная деформация) тела.

Величина **ε** является безразмерной, но поскольку она измеряется тысячными и миллионными долями, для удобства оперирования числами используют безразмерные единицы измерения, такие как мм/м, мкм/м, а в зарубежной литературе чаще всего применяется единица **микрострейн** (равная 1е – 6).

ТЕНЗОДАТЧИКИ

У металлов удельное сопротивление меняется слабо, поэтому:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \left(1 + 2\mu\right) \cdot \varepsilon$$

, т.е. ***относительное изменение сопротивления линейно зависит от относительного изменения длины***.

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Чувствительность тензорезистора к изменению его длины характеризуется коэффициентом относительной тензочувствительности GF (Gauge Factor):

$$GF = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon = \left(1 + 2\mu\right) + \frac{\Delta \rho}{\rho \cdot \varepsilon}$$

Коэффициент тензочувствительности GF для большинства металлических тензодатчиков примерно равен **2**, для **платины GF = 6,1.** Для некоторых специальных сплавов он может доходить до **10**.

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Для измерения силы с помощью тензорезисторов используют закон Гука. Согласно закона, при упругой деформации механическое напряжение σ пропорционально относительной деформации *ε*:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon$$

, где ***K*** – модуль упругости (***E***).

Напряжением ***σ*** называется физическая величина, численно равная упругой силе ***F***, приходящейся на единицу площади поперечного сечения тела ***S***:

$$\sigma = F/S$$

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Используя приведённые соотношения, можно выразить величину силы через относительное изменение сопротивления тензорезистора в виде:

$$F = S \cdot \sigma = S \cdot K \cdot \varepsilon$$

Подставляя вместо ε его значение, получим:

$$F = S \cdot K \cdot \frac{\Delta R / R}{GF}$$

Измерение силы с помощью тензорезистора сводится к измерению его сопротивления или напряжения на выходе измерительного моста, которое зависит от сопротивления.

ТЕНЗОДАТЧИКИ

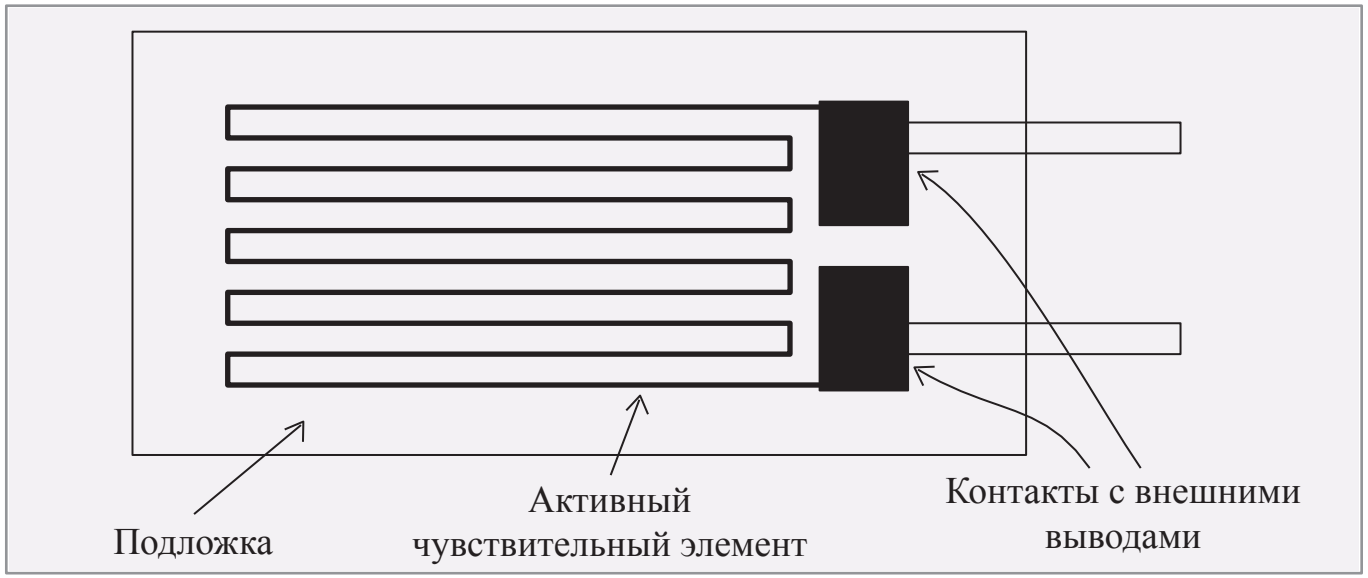
При испытаниях автомобилей преимущественное применение нашли ***проволочные*** , ***фольговые*** и ***полупроводниковые*** тензорезисторы .

Основные преимущества: **малые размеры, простота крепления, безинерционность, универсальность использования, дешевизна** и целый ряд других преимуществ тензодатчиков послужили широкому внедрению этого метода в практику экспериментальных исследований, а **в отдельных случаях использование тензодатчиков является единственно возможным способом получения достоверных экспериментальных данных.**

Овладение техникой тензометрирования требует глубоких знаний по упругим и пластическим деформациям материалов, по напряженности различных конструкций, знаний по теории измерений.

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Конструктивно металлический датчик на основе тензорезистора (тензодатчик) состоит из очень **тонкого провода или чаще из металлической фольги, сформированной в виде змейки и нанесённой на подложку (носитель), которая непосредственно приклеивается к испытываемому телу. Типовая длина тензодатчиков колеблется от 0,2 мм до 10 см.**

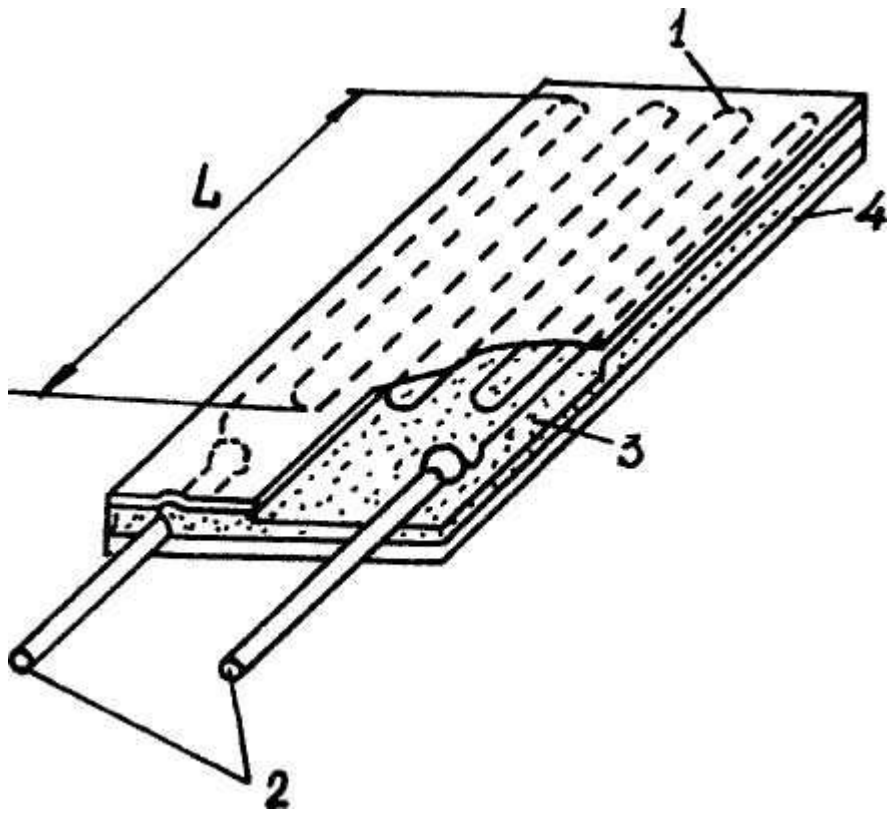


Структура металлического тензодатчика

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Схема построения проволочного тензорезистора

Тонкий провод, уложенный в виде плоской петлеобразной обмотки, образует рабочую решётку 1 тензорезистора, к концам которой пайкой или сваркой присоединены выводы 2 из медной проволоки толщиной 0,3…0,4 мм для впаивания датчиков в измерительные цепи. Решётка с помощью клеевого слоя 3 закреплена на основе 4 (подложке) из тонкой бумаги или плёнки толщиной 0,01…0,02 мм.



ТЕНЗОДАТЧИКИ

Змеевидная структура датчика обеспечивает большое относительное изменение длины фольги в направлении вдоль датчика и очень малое изменение при растяжении датчика в поперечном направлении. Поэтому коэффициент Пуассона в такой структуре минимален.

Серийные тензодатчики имеют сопротивление от 30 Ом до 3 кОм при типовых значениях 120 Ом, 350 Ом и 1 кОм. Материалами для них служат **константан** (45% Ni, 55% Cu), **платина и её сплавы, нихром** (80% Ni, 20% Cr), **манганин** (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni), **никель** и др.

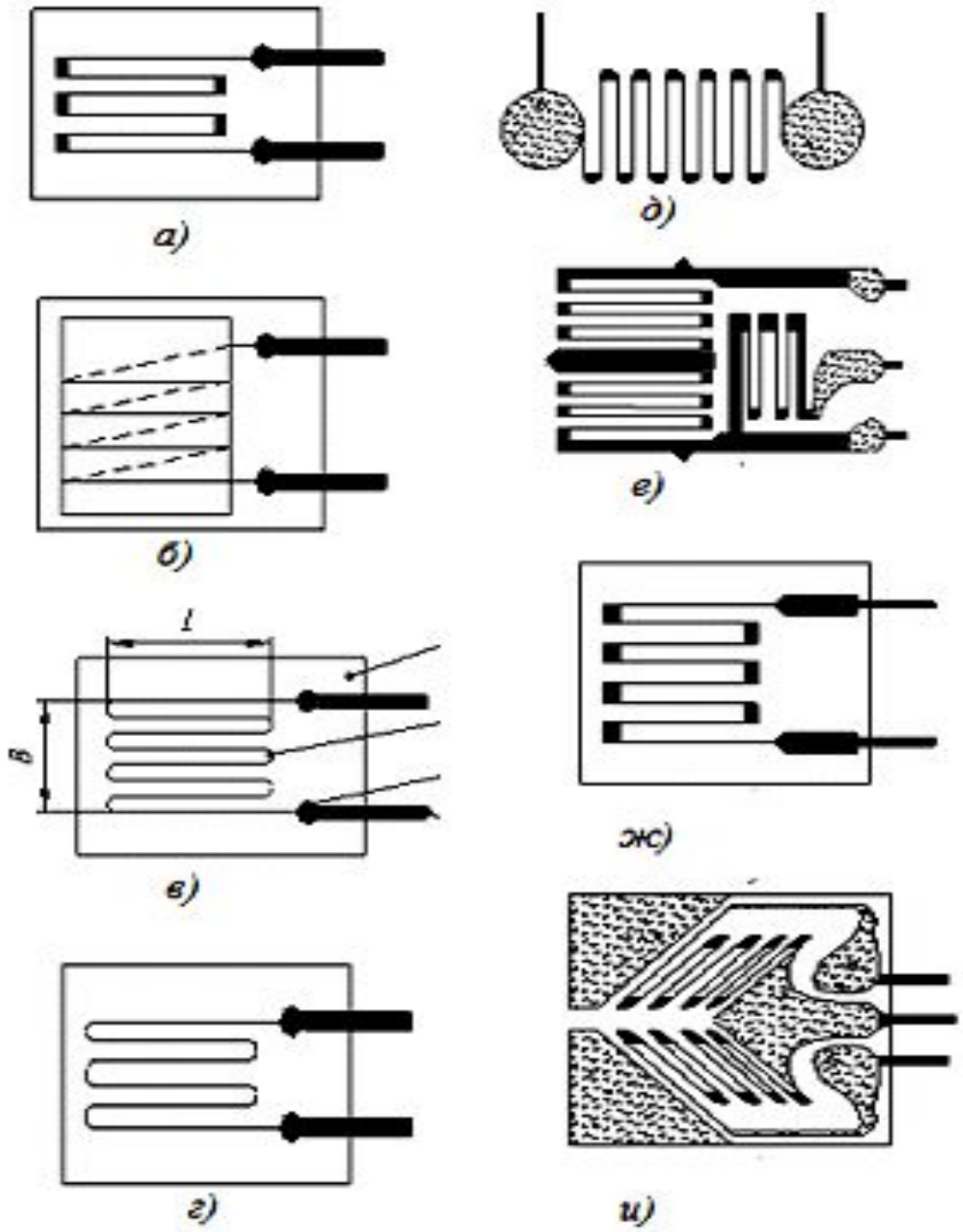
Для точной передачи растяжения образца через подложку на металлический проводник очень важно правильно прикрепить датчик к испытываемому образцу. Для этого лучше всего пользоваться информацией, предоставляемой изготовителем тензодатчика.

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Тензодатчики, изготовленные **из проволоки (а, б, в, г)**, называются **проволочными тензометрами сопротивления**, а выполненные **фотохимическим способом (методом офсетной печати) из металлической фольги (д, е, ж, и) – фольговыми.**

При одинаковой площади поперечного сечения рабочей решетки у проволочных и фольговых датчиков последние имеют больший её периметр. Благодаря этому **фольговые датчики лучше охлаждаются, воспринимают больший допустимый ток и обеспечивают более высокую точность измерений**. Однако **проволочные датчики менее восприимчивы к качеству крепления на поверхности испытываемой детали, более надёжны работе.**

Фольговые датчики в зависимости от конфигурации и назначения подразделяются на короткобазные (д), двухстороннего действия (е), решётчатые одноосные (ж) и “рыбий скелет” (и). Кроме того, для измерения давлений выпускаются мембранные фольговые датчики, выполненные в виде бифилярной спирали.



ТЕНЗОДАТЧИКИ

Полупроводниковые тензорезисторы изготавливаются на основе ***германия*** или ***кремния***. В отличие от металлических тензорезисторов **у полупроводниковых чувствительность определяется**, главным образом, **зависимостью удельного сопротивления полупроводника от деформации.**

Изменение геометрических размеров полупроводниковых материалов очень слабо влияет на коэффициент тензочувствительности. **Удельное сопротивление полупроводника существенно зависит от ориентации продольной оси тензорезистора относительно кристаллографического направления и вида примесей.**

У полупроводников *n-типа* знак тензоэффекта отрицательный, *p-типа* – положительный. Абсолютное значение коэффициента тензочувствительности GF у этих датчиков доходит до 200 и более единиц.

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Кремниевые тензорезисторы превосходят по своим эксплуатационным характеристикам германиевые и поэтому находят более широкое применение. **База выпускаемых тензорезисторов составляет 3...7 мм, толщина пластинки полупроводника 0,03...0,05 мм, сопротивление 55...75 Ом.**

Преимущества: малые габариты, высокая чувствительность, возможность получения на одном кристалле сложных тензометрических схем, позволяют решать такие задачи измерений, для которых проволочные и фольговые тензодатчики не годятся.

Недостатки: разброс тензочувствительности, некоторую нелинейность характеристики, чувствительность к температуре и другим внешним факторам, малую механическую прочность, высокую стоимость и плохую взаимозаменяемость.

ТЕНЗОДАТЧИКИ

По величине номинального сопротивления **тензодатчики делятся на:** ***высокоомные*** с сопротивлением R = 400...1000 Ом, ***низкоомные*** с сопротивлением R = 50...400 Ом и ***малоомные*** (мощные) с сопротивлением R = 1,5...10 Ом.

Целесообразность применении каждого из этих датчиков зависит от поставленной задачи и способов её решении. **Например, мощные датчики применяются при составлении измерительных схем без применения усилителей, что удобно при проведении дорожных испытаний с монтажом аппаратуры в кабине или салоне автомобиля.**

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Обозначение тензорезисторов промышленного производства (выпускаются Томским заводом математических машин) ***состоит из букв и цифр***. **Первая буква** указывает тип тензорезистора (П – проволочный, Ф – фольговый), **вторая буква** – материал решетки (К – константан), **третья** – материал подложки (Б – бумага, П – пленка), **четвёртая** – тип решетки (П – прямоугольная, Р – розеточная, М – мембранная, С – специальная). **Далее в обозначении следуют цифры, показывающие длину базы в миллиметрах и номинальное сопротивление решетки в Омах**.

Для фольговых тензодатчиков перед цифрами есть еще одна буква, обозначающая один из пяти подтипов решетки (А, Б, В, Г и Д). **Последняя буква** указывает способ наклейки (Х – холодная наклейка допускает нагрев не более 30° С, Г – горячая наклейка допускает нагрев до180° С,). **Например, маркировка 2ПКБ-10-100Х(Г) означает проволочный константановый на бумажной основе, с базой решётки 10 мм, номинальным сопротивлением 100 Ом с рекомендуемой холодной наклейкой и допускаемой горячей наклейкой.**

Полупроводниковые тензорезисторы на основе кремния **("кремнисторы")** обозначаются **КТД** (кремниевый тензорезистор с проводимостью p-типа), **КТЭ** (кремниевый тензорезистор с проводимостью n-типа).

Характеристики некоторых типов константановых тензорезисторов

Обозначение тензорезистора	*База, мм*	*Номинальное сопротивление, Ом*	*Размеры, мм*		*Примечание*
			длина	*ширина*	
		Проволочные			
2ПКБ-5-50Х(Г)	5	50	17	8	Бумажная основа
2ПКБ-10-100Х(Г)	10	100	22	10	
2ПКБ-20-100Х(Г)	20	100	32	9,1	
2ПКБ-30-40Х(Г)	30	400	42	10	
2ПКП-5-50	5	50	17	8	Пленочная основа
2ПКП-10-100	10	100	22	10	
2ПКП-15-200	15	200	27	10	
2ПКП-20-100	20	100	32	9,1	
2ПКП-30-400	30	400	42	10	
		Фольговые			
2ФКПА-1-50Х(Г)	1	50	7	5	Прямоугольная решётка подтип А
2ФКПА-3-100Х(Г)	3	100	9	6	
2ФКПА-5-200Х(Г)	5	200	11	6	
2ФКПА-10-150Х(Г)	10	150	15	1	
2ФКПА-15-200Х(Г)	15	200	20	12	
2ФКПА-20-300Х(Г)	20	300	30	15	
2ФКРВ-3-100Х(Г)	3	100	9	7	Розеточный подтип В подтип Г
2ФКРВ-10-100Х(Г)	10	100	23	21	
2ФКРГ-10-100Х(Г)	10	100	32	32	
2ФКМВ-10-100Х(Г)	10	100	12	12	Мембранный подтип В
2ФКМВ-20-100Х(Г)	20	100	24	24	

Характеристики некоторых полупроводниковых тензорезисторов

Тип тензорезистора	***Номинальное сопротивление, Ом***	***База, мм***	***Тип проводимости***
КТД-1	110	7 + 0,5	*p-тип*
КТД-2	220	7 ± 0,5	*p-тип*
КТД-3	330	7 ± 0,5	*p-тип*
КТДМ-1	55	3 ± 0,5	*p-тип*
КТЭ-1	90	7 ± 0,5	*n-тип*
КТЭМ-1	45	3 ± 0,5	*n-тип*

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Длина чувствительного элемента тензодатчика и длина его подложки изменяются в зависимости от температуры. Поэтому несмотря на специальные меры, принимаемые при изготовлении тензодатчиков их производителями, существует проблема снижения температурной чувствительности.

Температурная чувствительность определяется двумя физическими явлениями:

- **зависимостью омического сопротивления материала тензорезистора от температуры;**
- **паразитным тензорезистивным эффектом, который возникает вследствие несогласованности температурных коэффициентов расширения тензорезистора и материала объекта, на который наклеен тензорезистор.!**

Работа тензодатчиков определяется одиннадцатью характеристиками

1) Коэффициент относительной тензочувствительности GF:

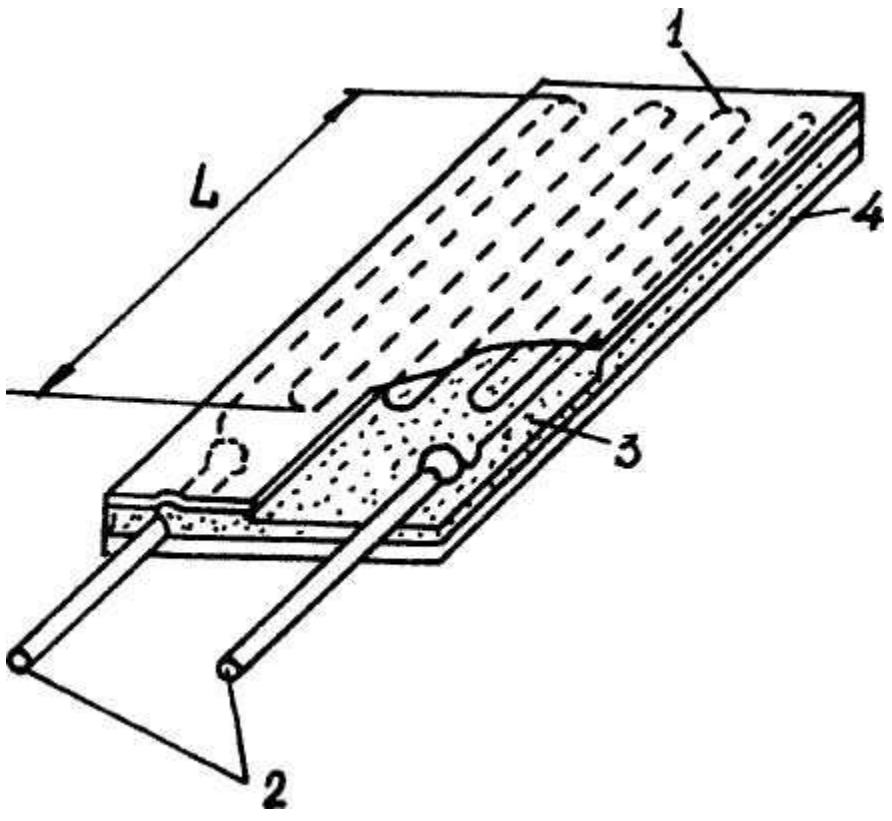
$$GF = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon = (1 + 2\mu) + \frac{\Delta\rho}{\rho \cdot \varepsilon}$$

В области упругих деформаций величина **Δρ/ρ** оказывает небольшое влияние на коэффициент тензочувствительности. При проведении высокоточных экспериментов необходимо учитывать зависимость изменения удельного сопротивления, от деформации и вносить соответствующие поправки в коэффициент тензочувствительности. Величина коэффициента **GF** с учетом отношения **Δρ/ρ** может **увеличиваться на 5...15 %.**

ТЕНЗОДАТЧИКИ

В датчике с проволочной или фольговой решеткой не вся уложенная по базе рабочая часть полностью участвует в деформации. Участки решетки, образующие закругления петель, реагирует на продольную деформацию только частично, в результате чего коэффициент продольной тензочувствительности снижается.

Наличие закруглений приводит к другому нежелательному явлению – участки решетки в закруглениях реагирует не только на продольную, но и на поперечную деформацию. Датчик приобретает поперечную чувствительность, которая является причиной погрешностей при измерениях.



2) База датчика *L*(мм)

Практически **база проволочных датчиков** сопротивления колеблется в пределах **5...30 мм, и фольговых – 1…20 мм**. Чем меньше база датчика, тем на меньшем участке детали можно измерять деформацию, а это иногда очень важно. С другой стороны, чем больше база, тем меньше сказывается на показаниях датчика влияние закруглений рабочей решетки.

Если размеры детали, на которую крепится датчик, не лимитируют его базу, следует выбирать её величину L по возможности большей.

3) Величина номинального сопротивления датчика R (Ом)

По номинальному сопротивлению тензодатчики подразделяются на **высокоомные, низкоомные и мощные**. Чаше всего используются датчики с сопротивлением 50...400 Ом, т.к. в этих пределах номинальное сопротивление подбирается согласно характеристикам измеряемой деформации, выбранной измерительной аппаратуры и типа измерительной схемы.

Как правило, изготовитель поставляет датчики партиями, которые разбиты на группы в отдельных пакетах. Разброс датчиков по сопротивлению в группе не превышает 5 %.

Для упрощения измерительной аппаратуры необходимо, чтобы величина приращения сопротивления тензодатчика от деформации была по возможности больше. Это может быть достигнуто при увеличении номинального сопротивления датчика. При одних и тех же габаритах тензодатчика и одном и том же материале рабочей решётки **увеличение номинального сопротивления возможно лишь за счёт уменьшения диаметра проволоки** (или площади поперечного сечения фольговых витков) **и более плотной навивки чувствительной решетки**. Уменьшение площади поперечного сечения витков решётки и зазора между соседними петлями из условия нагрева датчика вызывает снижение в нём допустимого тока.

В современных датчиках зазор между соседними нитками рабочей решетки примерно в 10...20 раз больше площади поперечного сечения витка.

4) Удельное электрическое сопротивление материала датчика ρ (Ом·мм²/м)

Удельное электрическое сопротивление материала проволоки или фольги должно быть по возможности большим, чтобы при заданных номинальном сопротивлении и базе датчика иметь меньше закруглений рабочей решетки, что положительно сказывается на точности измерений.

5) Величина термоэлектродвижущей силы *E* (МкВ/1° С)

Термоэлектродвижущая сила у датчика возникает в паре константан – медь (материал датчика – медные коммутирующие выводы) замкнутого контура при изменении температуры.

Это отрицательная характеристика датчика, непосредственно влияющая на погрешности измерений. Величина термоэлектродвижущей силы имеет очень маленькое значение и в процессе тензометрических измерений не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на точность результатов.

Этой характеристикой можно пренебрегать.

6) Температурный коэффициент электрического сопротивления α (1/1° С)

При изменении температуры материал датчика меняет свое внутреннее электрическое сопротивление.

Для датчиков, изготовленных не из полупроводниковых материалов, этим коэффициентом можно тоже пренебрегать без потери точности измерений, так как при реальных температурных режимах работы агрегатов автомобилей его величина очень мала и не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на процесс измерений.

7) Температурный коэффициент линейного расширения β (l/l ° C)

Из числа внешних факторов, оказывающих сильное влияние на работу датчика, наибольшее значение имеет температура окружающей среды.

При разности температурных коэффициентов линейного расширения материала исследуемой детали и наклеенного на неё датчика с изменением температуры последний будет испытывать неизмеряемую деформацию.

Относительное сопротивление датчика ΔR/R в этом случае будет равно:

ТЕНЗОДАТЧИКИ

$$\frac{\Delta R}{R} = \left[\alpha + GF \cdot \left(\beta_M - \beta_Д\right)\right] t$$

, где **α – температурный коэффициент электрического сопротивления материала датчика (1/1° С),**

GF – коэффициент тензочувствительности датчика,

$\beta_м$ и $\beta_д$ – коэффициенты линейного расширения соответственно материала детали и материала решётки датчика (1/1°С),

t – изменение температуры (град).

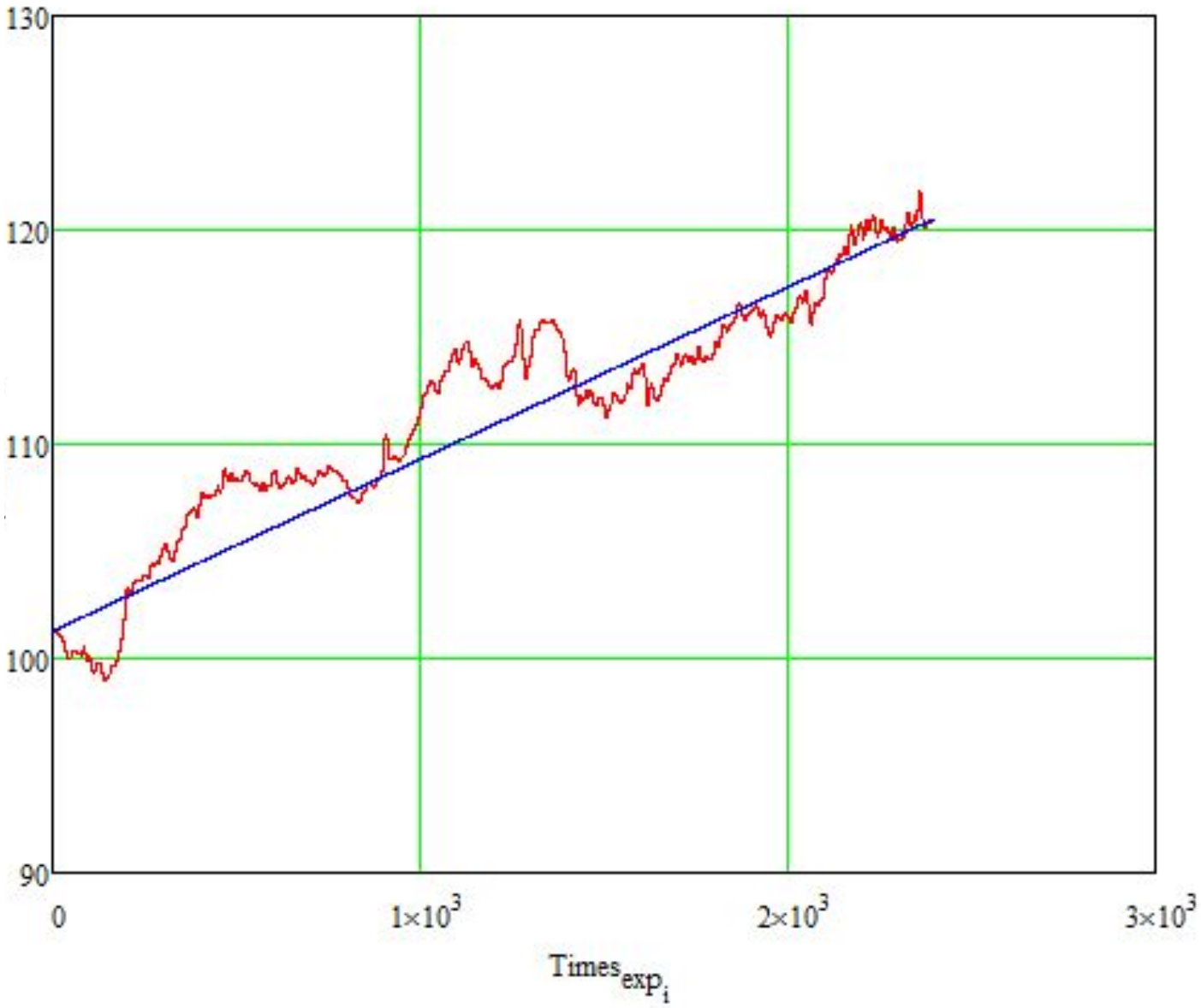
ТЕНЗОДАТЧИКИ

Если испытывается <u>стальная деталь</u>, имеющая $\boldsymbol{\beta_М}$ = (10...11)*10-6, то при повышении температуры окружающей среды на + 1° С константановый датчик, наклеенный на неё, у которого $\boldsymbol{\beta_Д}$ = (14...15)*10-6, будет показывать напряжение сжатия **6...10 кг/см² (0.588…0.981МПа).**

<u>Для алюминиевых сплавов</u>, у которых $\boldsymbol{\beta_М = (20...25) *10^{-6}}$, при нагреве на 1° С датчик будет испытывать напряжение растяжения, которое эквивалентно напряжению растяжения детали в **4...7 кг/см² (0.392…0.686 МПа).**

Изменение температуры оказывает существенное влияние на работу датчиков. В практике тензометрирования <u>применяют специальные методы компенсации температурных воздействий, предусматриваемые в измерительных схемах.</u>

ТЕНЗОДАТЧИКИ



8) «Ползучесть» показаний датчика

Под «ползучестью» показаний датчика понимается постепенное изменение сопротивления датчика при длительном статическом нагружении. «Ползучесть» оценивается в процентах изменения первоначального сигнала за 1 час нагружения. Для динамических измерений оценка «ползучести» проводится в течение 5...10 мин. «Ползучесть» является следствием несовершенства соединения датчика с испытываемой деталью и во многом определяется свойствами клея, качеством наклейки и сушки. **Величину «ползучести» в 3...5 % за 1 час при статическом нагружении можно считать приемлемой.**

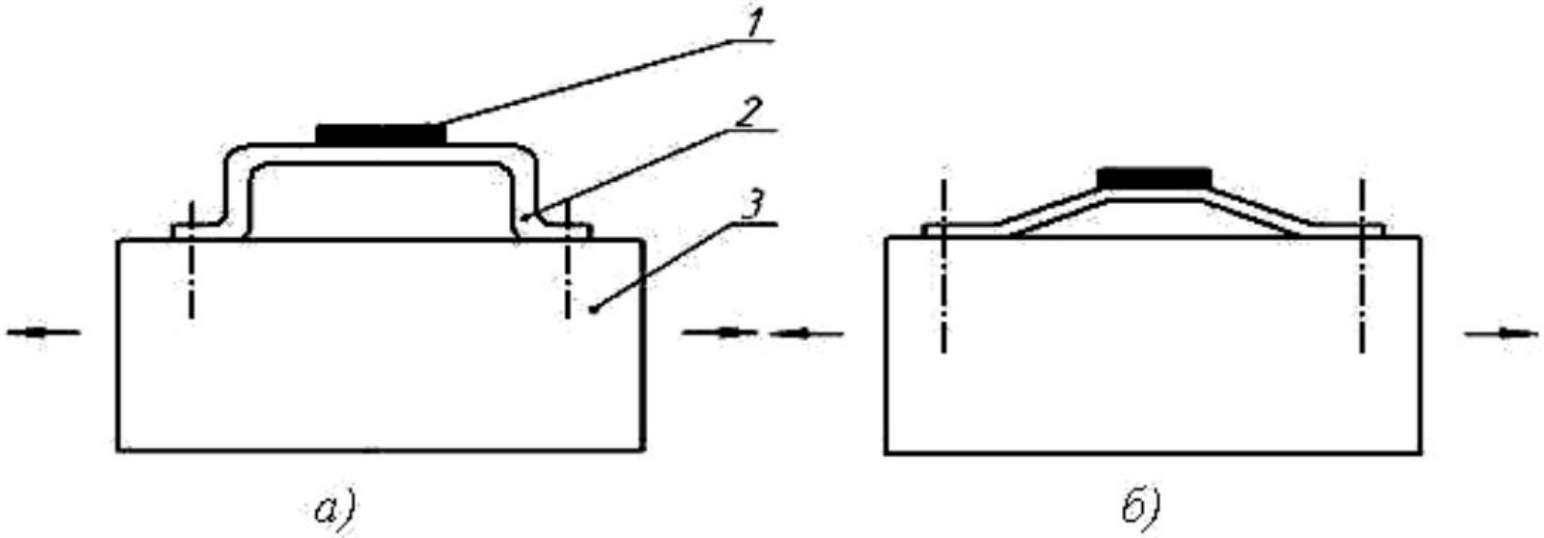
Для уменьшения «ползучести» в клеящие составы обычно добавляются твердые присадки. **Например, для клея БФ-2 хорошие результаты получаются с присадкой окиси титана (T_2O_2). В практике измерений на 100 весовых частей клея БФ-2 добавляется 4 весовых части окиси титана и 30 частей этилового спирта.**

9) Пределы измеряемой деформации ε

С помощью проволочных и фольговых датчиков сопротивления можно измерять деформации растяжения и сжатия в широких пределах. **При относительных деформациях до 10 % характеристика датчиков – линейная.**

Для расширения пределов измеряемых деформаций применяются различные скобы 2 (рис. а б) с датчиками 1, которые крепятся к испытываемой детали 3.

Линейность характеристики датчика зависит в основном от свойств подложки и применяемого клеящего состава. **Для датчиков на бумажной подложке верхний предел деформации не должен превышать 1,5 %, а на пленочной основе – 10 %.**



10) Предельно допустимая частота измеряемого процесса f , Гц.

При высокой частоте измеряемого процесса величина относительной деформации датчика неодинакова на различных участках рабочей решётки**. На выходе датчика можно замерить лишь среднюю величину деформации всего датчика, которая будет разной в различные периоды времени. Поэтому для каждого типа датчика существует предел частоты измеряемого процесса, который можно определить по выражению:**

ТЕНЗОДАТЧИКИ

$$f = \frac{V}{\pi \cdot L} \cdot \sqrt{6\nu}$$

,где **V** – скорость распространения волны деформации, (для стали V = 5000 м/с);

L – база датчика,(м) ;

ν – относительное отклонение измеряемой величины от относительной деформации испытываемой детали.

Для датчиков с базой L = 20 мм допустимая частота измеряемого процесса составляет f = 27600 Гц, а для датчиков с базой l = 5 мм – уже f = 100000 Гц.

Обычно при испытаниях автомобилей измеряются процессы с частотой, не превышающей 600 Гц.

11) Величина допустимого рабочего тока Ig , мА, протекающего по датчику

Для нормальной работы датчика необходимо выполнить условие равновесия между теплом, которое выделяет датчик при прохождении через него рабочего тока, и теплом, отводимым от него в окружающую среду. Если тепло, отводимое от датчика, будет меньше тепла, которое он вырабатывает, произойдёт его перегрев, и он выйдет из строя (перегорит).

Количество тепла, которое вырабатывает датчик в единицу времени при его включении в измерительную схему, зависит: **от типа схемы, тензометрического усилителя, от термического эквивалента работы, напряжения на зажимах источника питания и силы тока в решетке датчика.**

Чем больше теплопроводность материала и размеры детали, на которую наклеен рабочий датчик, тем лучше условия для его охлаждения и больше плотность допустимого тока.

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Тепло, выделяемое датчиком при его работе в измерительной схеме:

$$Q = A \cdot U \cdot I_g$$

, где **Q** – количество тепла, (кал),

U – напряжение, (В),

$\mathbf{I_g}$ – сила тока, (А),

A = 0.2389 – термический эквивалент работы, (кал/Дж).

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Количество тепла, отводимого от датчика в единицу времени, подсчитывается по выражению:

$$Q_{отв} = K \cdot \left(t - t_0\right) \cdot \pi \cdot d$$

, где **К** – коэффициент теплопередачи, (кал/см²·с·град),

t – температура датчика, (град),

$\mathbf{t_0}$ – температура окружающей среды, (град),

πd – периметр сечения рабочей решётки датчика.

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Когда тепло, выделяемое датчиком, полностью от него отводится, имеем:

$$A \cdot \rho \cdot \frac{L}{F} \cdot I_g^2 = K \cdot \left(t - t_0\right) \cdot \pi \cdot d$$

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$I_g = \sqrt{\frac{K \cdot \left(t - t_0\right) \cdot \pi^2 \cdot d^3}{4A \cdot \rho \cdot L}}$$

Значения Ig для некоторых проволочных датчиков

Диаметр проволоки, мм	Допустимый ток датчика, мА		
	Константан	Железо-хром-алюминиевый сплав № 2	Платино-иридиевый сплав
0.0500	100	70	210
0.0250	35	25	90
0.0125	12.5	9	35

Параметры тензометрических датчиков силы

Форма датчика

Для применения тензометров в конкретных случаях очень важен тип датчика, т.е. его форма и возможности закрепления. **От формы датчика и материала, из которого он изготовлен, зависят такие параметры, как точность, величина перегрузки** и т. п. Поэтому существуют разные типы датчиков, но обычно они являются модификациями нескольких основных типов, таких как мембранные, гибкие, колонные и др.

Диапазон измерения

Основным параметром тензометрического датчика является его диапазон измерения, который можно повысить максимально на 30–50%.

Более ***высокая перегрузка датчика****, хоть и на краткое время, почти всегда ведет к его* ***повреждению****.* Такой датчик уже **нельзя исправить**, поскольку при этом происходит нарушение структуры материала.

Это необходимо всегда иметь в виду, применяя датчики в среде, где возможны биение и вибрации.

Температурные характеристики

С ростом или падением температуры изменяется как сигнал ненагруженного датчика (ошибка нуля), так и сигнал нагруженного датчика (ошибка чувствительности). Обе ошибки указываются в процентах диапазона.

Пример: Пусть датчик имеет ошибку нуля, например 0,01% GF/°C. Если он имеет чувствительность 2 мВ/В и питается напряжением в 10 В, то при изменении температуры на 20 °C сигнал ненагруженного датчика может измениться на (2x10)x0,01x20 = 0,04 мВ.

Аналогично подсчитывается и ошибка чувствительности.

Точность датчика

У датчиков для измерения силы точность характеризуется с помощью класса точности, который указывает процентную ошибку датчика, относящуюся к его диапазону. Это общеизвестный способ.

Иначе рассчитывается **точность датчиков**, применяемых **для взвешивания**. У этих датчиков **точность указывается при помощи так называемого проверочного деления.** Однако существует отношение между обоими способами.

Например: датчик имеет точность, установленную при помощи проверочного деления, и это значение —3000 делений (класс точности C3). В этом случае процентная погрешность (класс точности) будет: (1/(2x3000))x100 = ±0,017% GF.

Более подробную информацию об ошибках датчиков, предназначенных для взвешивания, можно найти в международных рекомендациях OIML R60.

Диапазон температуры

Часто для тензодатчиков приводятся даже **три диапазона температуры: компенсированный, рабочий и для хранения.** Компенсированный диапазон температуры соответствует диапазону, при котором производитель испытывал датчик, и поэтому все его параметры гарантированы. Рабочий диапазон температуры обычно больше компенсированного. Датчик и в этом диапазоне можно применять без риска его повреждения, но все параметры датчика уже не гарантируются. При диапазоне температуры хранения датчик применять не рекомендуется, т.к. может произойти его повреждение.

Иные параметры

Другими важными параметрами являются:

- **входное сопротивление** (с точки зрения обработки сигнала)
- **изоляционное сопротивление** (с точки зрения безопасности)
- **степень защиты** (с точки зрения условий труда)

Клеящие составы

Существует большое количество разнообразных клеящих составов, используемых для крепления проволочных, фольговых и полупроводниковых тензодатчиков. В основном они предназначены **для работы в нормальных климатических условиях** и требуют определённого времени для затвердевания.

Для специальных условий работы (высокие температуры, химические среды, масляные или водяные пары и пр.) используются соответствующие специальные клеи.

Лучше всего использовать клеящие составы, рекомендуемые предприятием, изготавливающим тензодатчики.

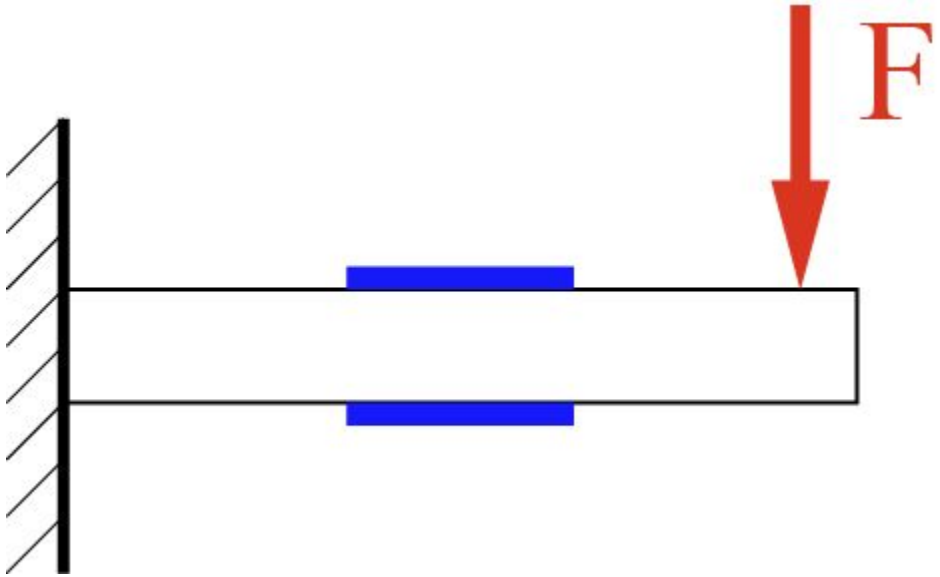
Клеящие составы

При выборе клея следует обращать внимание на следующие его свойства:

1) возможность использования с материалом испытываемой детали (инертность к материалу детали и подложки датчика);
2) механическую прочность;
3) модуль упругости при сдвиге;
4) характеристики пластической деформации;
5) время затвердевания;
6) стабильность свойств;
7) термостойкость при сушке;
8) устойчивость к воздействию влаги и различных сред;
9) сопротивление изоляции
10) срок использования.

Технология наклейки тензодатчиков

1. На детали определяется зона расположения датчиков. Эта зона должна обеспечивать деформацию, характерную для испытываемой детали.



2. Выделенная поверхность очищается от грязи, ржавчины, покрытия и пр.

3. Грубая поверхность зачищается до тех пор, пока не исчезнет “чернота”. Зачистка по мере необходимости производится наждачным кругом, напильником, наждачной бумагой, ***но не полируется***, так как большинство клеев плохо держится на полированной поверхности и при деформации отскакивают. Обработанная поверхность должна быть 5-го или 6-го класса чистоты с пересекающимися рисками, видимыми невооруженным глазом. Грубые борозды и риски на обработанной поверхности не допускается.

Подготовленная поверхность должна быть в несколько раз больше площади датчика.

4. Для правильной ориентации датчика при наклейке на обработанной поверхности с помощью линейки и чертилки наносится ось деформации, причём на месте расположения рабочей решётки датчика ось не проводится.

Иногда на подготовленную поверхность наклеивается миллиметровая бумага с окном, прорезанным по размеру датчика. Этот способ позволяет точно наклеить датчик и использовать бумагу в качестве изолятора под выводами решётки.

5. Непосредственно перед наклеиванием поверхность очищается от пыли, жира и влаги. Дышать на обрабатываемую поверхность нельзя из-за попадания влаги, которая ухудшает качество приклеивания датчика.

Сначала поверхность обрабатывается чистым неэтилированным бензином, а затем спиртом, эфиром, ацетоном или дихлорэтаном. Следует иметь в виду, что последний обладает высокой степенью токсичности.

Бензин используется для обезжиривания поверхности, остальные вещества – для удаления влаги.

Порядок наклейки датчиков

1. **Грунтовка поверхности испытываемой детали**, которая производится путём нанесения кисточкой или кусочком твердой бумаги на подготовленную поверхность тонкого слоя клея.

Одновременно грунтуется рабочая сторона датчиков. Готовность загрунтованного слоя обычно определяется лезвием ножа, касаясь края загрунтованного участка.

Если клей не прилипает к лезвию и не тянется за ним, поверхность можно считать готовой к наклейке датчиков.

Порядок наклейки датчиков

2. Наклейка датчиков производится сухими и чистыми руками (лучше в перчатках) или специальным инструментом, предварительно протерев их бензином и влагоудаляющим составом. Если поверхность, на которую накладывается датчик, неровная, то желательно заранее придать датчику соответствующую форму, аккуратно изогнув его на исследуемой поверхности.

Затем датчик берётся за выводы и вновь покрывается тонким слоем клея, после чего прикладывается к поверхности, соблюдая ось деформаций. Затем на датчик накладывается триацетатная (полиэтиленовая) плёнка, к которой клеящие составы не прилипают, и специальным валиком выдавливаются из-под датчика излишки клея и воздушные пузырьки. **Очень плохо оставлять толстую клеевую подушку и совершенно недопустимо в ней наличие воздушных пузырьков. В тоже время не следует сильно давить на датчик, чтобы не повредить подложку, рабочую решётку и клеящий состав.**

Порядок наклейки датчиков

Как было указано ранее, перед наклейкой датчика желательно наклеить полоски бумаги под его выводы, чтобы избежать замыкания последних на деталь.

Если имеется возможность, следует осуществить прижим наклеенного датчика грузами, струбцинами, винтами, пружинами, магнитами, резиновыми стяжками.

Предварительно датчик покрывается триацетатной пленкой, войлоком или губчатой резиной.

Усилие прижатия должно быть равномерным и обеспечивать давление в 3...5 кг/см^2. Если нет возможности использовать постоянный прижим, можно выдержать датчик 5…10 минут в прижатом состоянии и через 15 минут повторить операцию выдавливания клея, но с меньшей интенсивностью.

Порядок наклейки датчиков

В случае малейшей неуверенности в качестве наклейки лучше всего датчики снять и повторить все операции при переклейке.

Для изоляции коммутируемых выводов датчика в непосредственной близости от него часто наклеивается контактная колодочка (см. рис).

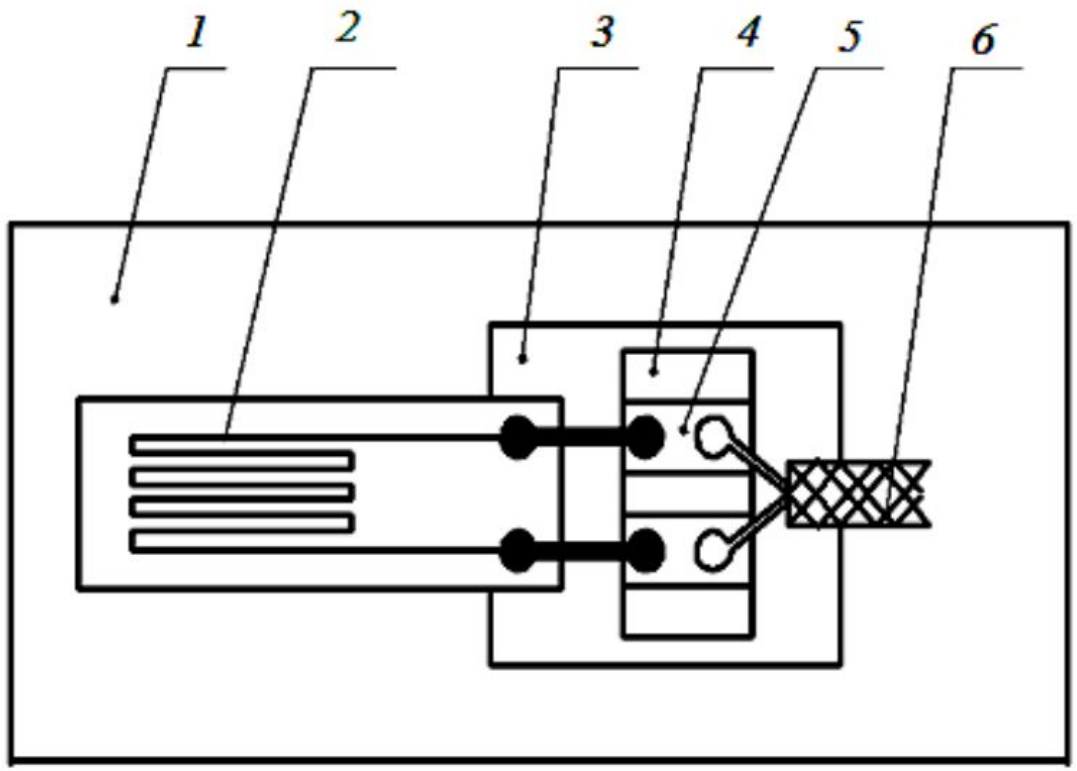


Схема соединения тензодатчика

3. Проверка работоспособности датчиков производится спустя 1 час после их наклейки.

Следует проверить датчики на обрыв и на замыкание с поверхностью детали. Проверку необходимо выполнить осторожно, не задевая самого датчика. Переклеивать нужно только те датчики, у которых сильно отличается от остальных сопротивление изоляции. Пока клей полностью не затвердел, датчики будут показывать заниженное сопротивление изоляции.

Сопротивление изоляции следует проверять приборами, дающими возможность отсчитывать не менее 20…50 мегОм и имеющими рабочее напряжение не более 50 вольт.

4. Сушка датчиков (затвердевание клея) в основном зависит от клеевого состава, размеров и формы испытываемой детали.

Для ускорения сушки детали небольших размеров (валы, тяги, кольца, рычаги, шестерни и т. п.) лучше всего нагревать в термостатных печах или сушильных шкафах.

Датчики на крупных объектах можно нагревать электролампами, излучателями, инфракрасными нагревателями, но не вентиляторами, которые нарушают режим сушки.

Если в первом случае можно сократить время сушки за счёт высокотемпературного нагрева, то во втором случае срок полного затвердевания клея увеличивается. **Рекомендуемая скорость повышения температуры нагрева составляет один градус в минуту.**

5. Проверка сопротивления изоляции производится после окончательного затвердевания клея. Это выполняется для того, чтобы впоследствии избежать нежелательных “наводок” и необъяснимых отклонений в показаниях.

У датчиков, рассчитанных на статические измерения, сопротивление изоляции должно быть не менее 50 мегОм, а у датчиков, предназначенных ещё и для динамических измерений – не менее 6 мегОм.

Для датчиков с номинальным сопротивлением от 100 Ом до 400 Ом, используемых для чисто динамических процессов, сопротивление изоляции допускается иметь до 2 мегОм. Контактные колодки вместе с соединительными проводами должны иметь общее сопротивление изоляции не менее 3мегОм.

6. Проверка качества приклейки можно осуществлять несколькими способами. Если допускают размеры детали, то качество наклеивания можно проверять с помощью “свидетелей”, то есть датчиков, наклеенных на деталь вместе с основными, но подлежащих отрыву. Если они легко отслаиваются, качество наклеивания следует признать неудовлетворительным.

1. Хорошо наклеенный датчик можно снять, только соскабливая его ножом.

2. Можно проверять качество наклеивания иголкой, вводя её остриё под край. датчика. Датчик считается хорошо приклеенным, если острие иглы не проходит под датчик, не отслаивает его, а рвёт.

Порядок наклейки датчиков

Необходимо иметь в виду, что при наклеивании происходит **начальная деформация датчика**. Он получает предварительное напряжение растяжения. Происходит это потому, что клей высыхает вначале по краям и прикрепляет периметр датчика к детали. По мере затвердевания клея объём датчика уменьшается, и он получает предварительное растяжение в пределах 0,02…0,05 %.

Снимают эту деформацию датчика трёхкратным циклом: нагрузка – разгрузка.

Хорошим способом проверки качества наклейки является использование тензоусилителя.

Рабочий и компенсационный датчики соединяются с тензоусилителем, и он балансируется на ноль. После нажатия на рабочий датчик стрелочный прибор усилителя должен отразить разбаланс моста. После снятия нажима стрелка должна вернуться на ноль. В противном случае датчик либо не просох, либо плохо наклеен. Оставлять такие датчики для экспериментов не рекомендуется.

Порядок наклейки датчиков

Иногда после затвердевания клея под датчиком появляются белесые и тёмные (“ржавые”) пятна или даже целые участки.

Белесые пятна появляются, когда при наклейке на поверхность детали попала влага (может быть даже от дыхания человека, наклеивающего датчики).

Темные пятна появляются на плохо обработанной поверхности, у которой в выемках скопились сгустки клея, которые затем потемнели. Иногда это бывает результатом плохих свойств клея.

Наличие белесых пятен нежелательно, так как они увеличивают «ползучесть» клея, а вот небольшое количество тёмных пятен (не более пяти) допускается.