

8. ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИИ

Знание механических напряжений, которые возникают в конструкции при определенных условиях эксплуатации, является главным условием обеспечения надежности ее функционирования. Напряжения в материале вызывают его деформацию, а соотношения между двумя этими величинами — напряжениями и деформациями — определяются из теории сопротивления материалов. Поэтому измерение деформаций в соответствующим образом выбранных областях позволяет вычислить вызывающие их напряжения. Датчики деформаций могут служить, кроме того, измерителями удлинений; наиболее часто используют резисторные датчики, которые приклеиваются на образец и деформируются вместе с ним. При этом малые размеры таких датчиков (в зависимости от модели от ~ 1 мм до ~ 1 см) обеспечивают весьма точные измерения. Другой тип измерителей удлинений, применяемый, главным образом, в строительстве, — это вибрирующая струна, представляющая собой металлическую нить, натянутую между двумя точками исследуемой конструкции, на расстоянии порядка десятка сантиметров; ее частота колебаний зависит от натяжения и меняется также при перемещении точек крепления.

Применение датчиков деформаций не ограничивается определением напряжений. В самом деле, любые физические величины, особенно механические, действие которых на образец вызывает его деформацию, могут быть преобразованы с помощью измерителей удлинений; это относится к давлению, ускорению, моменту сил. Датчик деформаций и исследуемый образец составляют, таким образом, совокупный измеритель воздействующей физической величины.

8.1. Определение соответствующих механических величин

Деформация ϵ — это отношение приращения Δl размера к первоначальному значению этого размера l , $\epsilon = \Delta l/l$.

Упругая деформация — деформация, которая исчезает после устранения силы, ее вызывающей.

Напряжение σ — сила на единицу площади сечения, $\sigma = F/s$.

Предел упругости — максимальное напряжение, не вызывающее остаточной деформации, большей 0,2%. Порядок величины предела упругости (в Н/мм²): для стали 200÷800; для меди 30÷120; для свинца 5÷10.

Закон Гука. В области упругости деформации пропорциональны напряжениям.

Модуль Юнга Y определяет деформацию в направлении действия силы:

$$\epsilon_{\parallel} = (1/Y) (F/s) = (1/Y) \sigma.$$

Порядок величин модуля Юнга (в кН/мм²): для стали 180÷290; для меди 99÷140; для свинца 5÷18.

Коэффициент Пуассона ν определяет деформацию, перпендикулярную направлению действия силы:

$$\epsilon_{\perp} = -\nu \epsilon_{\parallel}.$$

В области упругости ν обычно близко к 0,3.

8.2. Основные положения

Резисторные датчики являются пассивными, так как они преобразуют в изменение сопротивления их собственную деформацию, практически равную деформации образца в области закрепления датчика.

Обычно датчик состоит из сетки, образованной нитевидными проводниками с удельным сопротивлением ρ , площадью поперечного сечения нити s и длиной nl , где l — длина одного нитевидного элемента, n — их количество; для металлических датчиков n обычно составляет от 10 до 20 (рис. 8.1, а), и равно 1 для полупроводниковых (рис. 8.1, б).

Проводник закрепляется на изолирующей подложке — бумаге или пластике, — которая наклеивается на исследуемый образец (рис. 8.1, в). Поэтому датчик испытывает такую же деформацию $\Delta l/l$, как и образец, в направлении, параллельном нитям.

Сопротивление датчика определяется выражением $R = \rho nl/s$; под действием деформации сопротивление датчика изменяется на ΔR :

$$\Delta R/R = \Delta l/l - \Delta s/s + \Delta \rho/\rho.$$

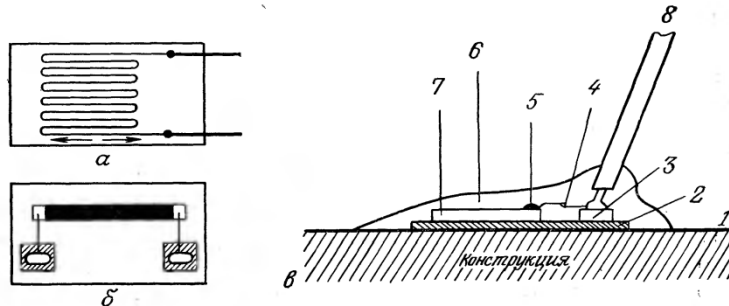


Рис. 8.1. Резисторные датчики.

а — проводочный датчик; б — полупроводниковый вырезанный датчик; в — расположение датчика на поверхности образца. 1 — изучаемая поверхность; 2 — клей; 3 — контакт; 4 — провод; 5 — спайка; 6 — защитный слой; 7 — датчик; 8 — кабель.

Продольная деформация нити приводит к изменению ее поперечных размеров — сторон a и b в случае прямоугольного сечения, диаметра d для круглого сечения; поперечная деформация пропорциональна продольной:

$$\Delta a/a = \Delta b/b = \Delta d/d = -\nu (\Delta l/l),$$

где ν — коэффициент Пуассона, который, как указывалось, близок к 0,3 в области упругих деформаций.

Поскольку $s = ab$ (или $s = (\pi/4) d^2$), имеем

$$\Delta s/s = -2\nu (\Delta l/l).$$

Металлические и полупроводниковые датчики различаются как выражениями для изменения удельного сопротивления $\Delta \rho/\rho$, так и его величиной. Для металлических датчиков используется формула Бриджмена, связывающая изменение удельного сопротивления с изменением объема V :

$$\Delta \rho/\rho = C (\Delta V/V),$$

где C — константа Бриджмена.

Поскольку $V = snl$, $\Delta V/V = (1 - 2\nu) (\Delta l/l)$ и

$$\Delta \rho/\rho = C (1 - 2\nu) (\Delta l/l),$$

получаем

$$\Delta R/R = \{(1 + 2\nu) + C (1 - 2\nu)\} (\Delta l/l) = K (\Delta l/l),$$

где K — коэффициент преобразования датчика — выражается формулой $K = 1 + 2\nu + C(1 - 2\nu)$. Учитывая численные значения

($\nu = 0,3$, $C \approx 1$), получаем, что коэффициент преобразования K металлического датчика составляет около 2.

Для полупроводниковых датчиков удельное сопротивление зависит от напряжения σ и коэффициента пьезорезистивности π . Соответствующее выражение имеет вид

$$\Delta \rho/\rho = \pi \sigma = \pi Y (\Delta l/l),$$

где Y — модуль Юнга. Коэффициент пьезорезистивности π зависит а) от ориентации резистивных полосок относительно кристаллографических осей, с одной стороны, и напряжения, с другой; б) от типа (p или n) и концентрации примеси.

Таким образом, для полупроводникового датчика изменение сопротивления можно записать так:

$$\Delta R/R = \{(1 + 2\nu) + \pi Y\} (\Delta l/l), \text{ откуда } K = 1 + 2\nu + \pi Y.$$

В обычных условиях использования полупроводниковых датчиков член πY значительно превосходит остальные, поэтому на практике можно принимать $K = \pi Y$. Коэффициент преобразования K полупроводниковых датчиков достигает абсолютных значений от 100 до 200, а его знак определяется типом примесей. Итак, полупроводниковые датчики предназначены главным образом для измерения очень малых деформаций, но по сравнению с металлическими датчиками они обычно менее линейны и более чувствительны к температуре. Такие датчики находят применение в измерителях сил, ускорения, момента сил, давления; предварительная градуировка позволяет получать требуемые результаты.

Металлические датчики используются в широких температурных диапазонах для точного измерения деформаций значительной величины.

Сопротивления металлических и полупроводниковых датчиков имеют стандартные значения, определяемые с точностью от $\pm 0,2$ до $\pm 10\%$ и лежащие в интервале $100 \div 5000$ Ом.

8.3.2. Материалы и модели

Для изготовления металлических резисторных датчиков обычно используются сплавы на основе никеля; в табл. 8.1 указаны наиболее часто используемые составы и соответствующие коэффициенты преобразования датчиков.

Разные сплавы различаются как термическими зависимостями своих коэффициентов объемного расширения и сопротивления, так и устойчивостью к высоким температурам. Высокая температурная зависимость параметров сплавов «изоэластик» и «нихром» делает их непригодными для статических измерений.

Проволочные датчики (рис. 8.2, а). Для таких датчиков диаметр проволоки составляет ~ 20 мкм, а толщина подложки — около 0,03 мм для пластика (полиимида или эпоксиды) и 0,1 мм для бумаги.

Датчики из фольги (рис. 8.2, б). Изготавливаются по той же технологии, что и печатные платы. Это позволяет:

— сократить размеры и обеспечить более точные измерения, когда существует градиент деформаций;



Рис. 8.2. Типы металлических датчиков.
а — проволочный датчик; б — датчик из фольги.

8.6.2. Устройство полупроводниковых датчиков

Различают два вида полупроводниковых (пьезорезистивных) датчиков в зависимости от способа производства: вырезанные и диффузионные.

Вырезанные датчики образуются полоской, вырезанной механически или фотохимически из монокристалла легированно-

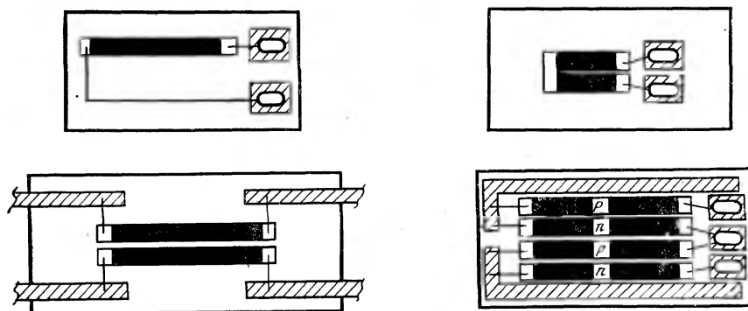


Рис. 8.7. Вид пьезорезистивных датчиков с вырезанными из монокристалла кремния полосками.

го кремния (рис. 8.7). Полоска вырезается параллельно диагонали кристаллического куба для кремния p -типа и его ребру для кремния n -типа. Длина такой полоски от 10^{-1} мм до нескольких миллиметров, толщина $\sim 10^{-2}$ мм. Полоска наклеивается на пластиковую подложку.

Такие датчики, сделанные из одной полоски, практически не имеют поперечной чувствительности.

Диффузионные датчики. Сопротивление датчиков получают диффузией добавок в какую-то часть монокристалла предварительно легированного кремния (рис. 8.8).

8.9.1. Измерения с помощью моста Уитстона

Измерительные схемы. В соответствии с числом используемых датчиков и действием, которое они испытывают, различают шесть схем, описанных в табл. 8.3.

Эти шесть схем можно разделить на три группы, в каждой из которых полумост строится следующим образом:

Группа 1: рабочий датчик R_c и постоянное балластное сопротивление R_0 .

Группа 2: рабочий датчик R_c и эталонный (термокомпенсирующий) датчик R_{co} .

Группа 3: два рабочих датчика, $R_c(+)$ и $R_c(-)$, сопротивления которых меняются в противоположных направлениях.

Для каждой группы возможны две схемы в зависимости от того, сформирован ли другой полумост из балластного сопротивления R_0 или же оба полумоста симметричны (одинаковые элементы на противоположных плечах), что удваивает, по сравнению с предыдущим случаем, чувствительность моста.