

Разработка конструкции и технологии изготовления тензодатчика с повышенной чувствительностью и точностью измерений для электронных весов

Леонид БОРЫНЯК,
д. ф-м. н., профессор
Юрий НЕПОЧАТОВ
nepandey@yandex.ru

В настоящее время для высокоточного статического взвешивания в различных производствах, научных лабораториях и в быту широко используются электронные весы. В состав конструкции электронных весов входят тензометрические датчики силы, узлы встройки, электронный преобразователь сигналов тензодатчиков и дисплей для отображения информации о результатах взвешивания. Основным элементом весов является тензодатчик, который предназначен для преобразования создаваемого усилия при деформации твердого тела в электрический сигнал, пропорциональный нагрузке.

Введение

Тензодатчик обеспечивает измерение веса от грамма до сотни тонн и применяется как измерительный элемент в платформенных, бункерных, крановых весах, в дозаторах, испытательном и научном оборудовании. На упругом элементе датчика, изготавливаемом, как правило, из стали или алюминиевых сплавов, размещаются чувствительные элементы из проводниковых и полупроводниковых тензорезисторов, которые используются также для измерения полей деформаций при статических, динамических и ударных нагрузках исследуемых деталей и натурных конструкций, в динамометрах и датчиках давления.

Постановка задачи

Принцип измерения деформаций с помощью тензорезисторов состоит в том, что при деформации изменяется их активное сопротивление. Конструктивно тензорезистор представляет собой элемент из тензочувствительного материала на подложке, закрепляемой с помощью связующего (клея, цемента и т. п.) на исследуемой детали [1]. При этом деформация исследуемой конструкции, переданная материалом связующего подложки на чувствительный элемент, приводит к изменению его сопротивления, функционально зависимо от деформации вдоль главной оси тензорезистора. Однако использование в качестве связующей основы с металлом

полимерного материала, обладающего не только упругими, но и высокими эластичными и пластическими свойствами, приводит к зависимости констант упругости связующей основы от времени — релаксационным явлениям. При этом соответственно изменяются во времени возникающие при передаче деформации сдвиговые напряжения и их распределение по длине чувствительного элемента. Следовательно, при этом меняется коэффициент передачи деформации и выходной сигнал датчика. Причем, изменения во времени вносят заметный вклад в погрешность измерения, что затрудняет создание датчиков высокой точности. Релаксационные процессы в связующем полимерном слое определяют такие характеристики, как ползучесть и механический гистерезис, которые искажают измеряемые значения чувствительности, приводят к нелинейности статической характеристики преобразования. А при длительной деформации в полимерном материале протекают процессы перемещения внутри молекул, комплексных групп и т. д., а также перемещения самих молекул, частиц и целых комплексов, которые приводят к необратимым пластическим течениям материала и связанной с этим длительной ползучести. Из теории полимеров [2, 3] известно, что гистерезисные явления в них определяются различными причинами, важнейшими из которых являются релаксационные процессы, связанные с временными процессами вязкоупругости и текучести. И такой вид гистерезиса проявляется при любом цикле нагрузки-

разгрузки. Кроме этих явлений гистерезис в полимерных связующих может определяться также механическими процессами, связанными с разрушением молекул и молекулярных связей, а также тепловыми эффектами при деформации. Все это в совокупности ограничивает чувствительность и точность тензодатчиков, у которых тензорезисторы прикреплены к упругому элементу с помощью полимерных материалов.

Чтобы определить степень влияния, которое оказывает приклеивание тензорезистора на точность метода оценки напряжений и деформаций, проведем следующий расчет. Пусть в результате силового воздействия в образце упругого элемента толщиной δ_y , появилось нескомпенсированное напряжение, которое вызывает изгибающий момент ΔM . Тогда в соответствии с теорией упругости изгибающее напряжение $\Delta\sigma$ на поверхности упругого элемента равно:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta M}{J} \times \frac{\delta_y}{2},$$

здесь J — момент инерции поперечного сечения образца, который определим из выражения:

$$J = \frac{t \times \delta_y^3}{12}.$$

Относительная деформация $\Delta\varepsilon$ на поверхности, соответствующая $\Delta\sigma$, будет равна:

$$\Delta\varepsilon = \frac{E \times \Delta M}{J} \times \frac{\delta_y}{2}.$$

При присоединении к упругому элементу с помощью клея толщиной δ_k тензорезистора толщиной δ_T общая толщина в месте приклейки составит $\delta_y + \delta_k + \delta_T$. Деформация элемента $\Delta \epsilon_1$ в этом случае составит:

$$\Delta \epsilon_1 = \frac{E \times \Delta M}{J_1} \times \frac{(\delta_y + \delta_k + \delta_T)}{2}$$

Здесь J_1 — момент инерции для сечения сложного профиля — находится по известным соотношениям теории сопротивления материалов:

$$J_1 = \frac{t \times \delta_y^3}{12} + \frac{t_T + \delta_T^3}{12} + \frac{(\delta_y + \delta_k + \delta_T)^2 \times \delta_T \times t_T}{4}$$

Совершенно очевидно, что относительная ошибка, обусловленная приклеиванием тензорезистора ξ , имеет систематический характер и определяется как

$$\xi = \frac{\Delta \epsilon - \Delta \epsilon_1}{\Delta \epsilon} \times 100\% = \left[1 - \frac{\delta_y + \delta_k + \delta_T}{\delta_y} \times \frac{J}{J_1} \right] \times 100\%$$

Для различных размеров упругих элементов, толщины слоя клея и толщины тензорезисторов ошибка, рассчитанная по формулам для ξ , J и J_1 , колеблется от 4% до 10%.

Целью нашей работы является создание тензодатчика, обладающего более высокой чувствительностью и точностью измерений, а также технологии его изготовления.

Исследования по разработке конструкции и технологии изготовления тензодатчика с повышенной чувствительностью и точностью

Для исключения погрешностей измерения, вносимых полимерным слоем клея, мы предложили использовать вместо клея слой изоляционного материала, выращенного на поверхностях упругого элемента. С этой целью упругий элемент изготавливали из группы металлов и сплавов, легко образующих окислы, например, алюминия, титана, циркония, тантала, ниобия, феррохрома или ферроникеля. Сначала упругий элемент профилировали, выполнив в нем гантелеобразную выборку со сквозными отверстиями на утолщенных периферийных частях. Затем все стороны упругого элемента шлифовали, окисляли, а узкие стороны полировали, наносили слой окиси кремния, подполировывали до половины толщины, а потом осаждали слой тензочувствительного материала и материала контактных площадок, из которых методами фотолитографии формировали тензорезисторы. Причем первый слой изоляционного покрытия, касающийся поверхности упругого элемента, был изготовлен за одно целое

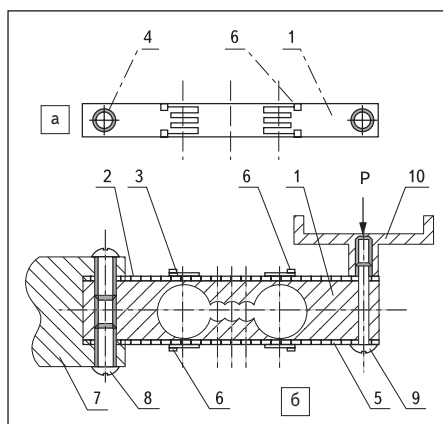


Рис. 1. Внешний вид разработанного тензодатчика: а) вид сверху на упругий элемент с напыленными тензорезисторами на многослойном изоляционном покрытии; б) вид тензодатчика в поперечном сечении

с его телом и формировался за счет окисления самого материала, из которого он выполнен, а последующие — нанесением с применением технологических процессов тонкопленочной технологии, разработанных для интегральных схем (термическое напыление в вакууме и фотолитография).

На рис. 1 изображена разработанная конструкция упругого элемента 1 с утолщенными на концах частями 2 и утонченными в центре частями 3, полученными путем фрезерования гантелеобразной выборки металла в теле упругого элемента. На концах упругого элемента выполнены отверстия 4 с резьбой для закрепления с одного конца чашки для размещения нагрузки (взвешиваемых грузов), а с другой — для прикрепления к корпусу электронных весов. На противоположных поверхностях упругого элемента 1 имеется изоляционное многослойное покрытие 5, на котором на одинаковом расстоянии от центра размещены две пары соосно расположенных тензорезисторов 6. Одним концом упругий элемент 1 консольно закрепляется в корпусе электронных весов 7 двумя винтами 8. К противоположному свободному концу элемента 1 винтом 9 прикреплена чашка 10.

Разработанная конструкция упругого элемента, представленного на рис. 1, работает следующим образом. Взвешиваемый объект, располагаемый на чашке 10, воздействует на утолщенные части 2 свободного конца упругого элемента 1, в результате чего возникает сила, которая деформирует упругий элемент 1. При этом возникшие напряжения и деформации в утонченных частях 3 упругого элемента 1 передаются через изоляционные слои 5 тензорезисторам 6. Тензорезисторы воспринимают деформации, и их сопротивление изменяется пропорционально измеряемому весу. Так как тензорезисторы соединены в мостовую схему, то на выходе последней сформируется выходной сигнал,

пропорциональный сумме изменений сопротивлений отдельных тензорезисторов, который преобразуется электронной схемой в удобный для использования результат взвешивания в цифровой форме на индикаторной панели.

В зависимости от материала, из которого выполнялся упругий элемент, нами было опробовано 3 варианта технологии его изготовления:

- 1) из алюминиевого сплава АМГ-3;
- 2) из титанового сплава ВТ20;
- 3) из феррохрома марки 30ХГСА.

Из всех перечисленных вариантов, как наиболее приемлемый с точки зрения технологичности и стоимости, был выбран вариант изготовления упругого элемента из алюминиевого сплава АМГ-3.

Формирование методом фотолитографии тензорезисторов из тонких пленок, напыленных на предварительно нанесенные многослойные неорганические изоляционные покрытия, позволило выполнять тензорезисторы любой геометрии и с минимальной базой, и при этом снизить погрешность до 0,1%. Монолитное соединение с поверхностью упругого элемента в месте измерения, малые масса и толщина тензорезистора обеспечили практическую безынерционность измерения деформаций.

По сравнению с традиционными фольговыми тензорезисторами при одинаковых значениях номиналов и базы коэффициент чувствительности K у сформированных по описанной технологии тензорезисторов, представляющий собой отношение относительного изменения сопротивления $\Delta R/R$ к относительной деформации $\epsilon = \Delta S/S$ в направлении базы измерений, составил $3,5 \pm 2\%$, тогда как у фольговых тензорезисторов значение K равнялось $1,5 \pm 2\%$.

С ростом температуры окружающей среды у наклеенных фольговых тензорезисторов чувствительность существенно изменялась по сравнению с напыленными на упругий элемент.

Нанесение тензорезисторов на многослойные изоляционные покрытия позволило осуществлять длительные измерения статических и динамических деформаций и расширить температурный диапазон применения упругого элемента до 600°C .

В процессе выполнения настоящей работы для повышения технологичности изготовления и качества, а также снижения трудоемкости и стоимости, нами были разработаны групповые процессы изготовления упругих элементов с многослойным изоляционным покрытием и напыленными тензорезисторами.

С этой целью была создана в виде одного металлического основания групповая заготовка (рис. 2), содержащая 6 упругих элементов. Тонкими пунктирными линиями на рис. 2 показано расположение единичных упругих элементов на металлическом основании.

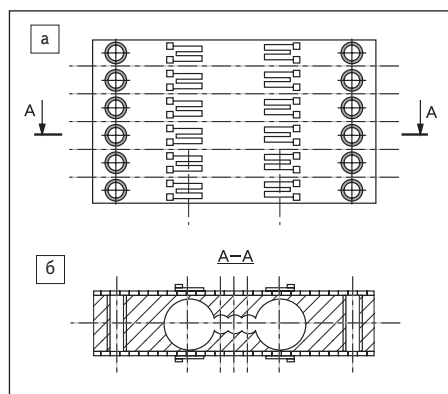


Рис. 2. Групповая заготовка для получения 6 упругих элементов:
а) вид сверху;
б) вид в поперечном сечении А–А

Подготовленную таким образом групповую заготовку помещали в специально разработанную оправку (рис. 3).

После завершения технологического цикла изготовления осуществлялась резка групповой заготовки на отдельные упругие элементы. С целью снижения износа режущего инструмента перед резкой проводили снятие изоляционного покрытия струей песка с помощью специальных трафаретов, которые плотно прижимались к групповым заготовкам, а обработку струей песка проводили в местах под прорезями, при этом полностью удалялся изоляционный слой и обнажалось металлическое основание. После завершения технологического цикла формирования тензорезисторов на высокооборотном станке

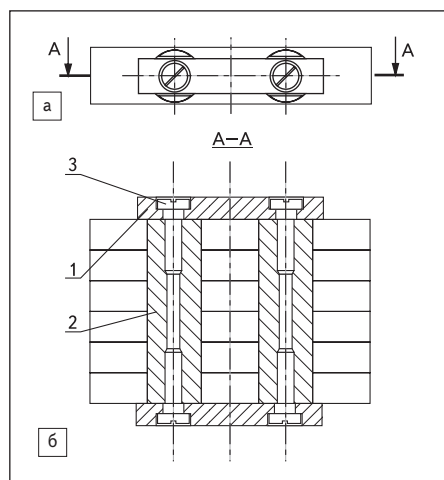


Рис. 3. Оправка для напыления слоя окиси кремния, тензорезистивного слоя и контактных площадок:
а) вид сверху;
б) вид в поперечном сечении А–А

в специальной оправке с использованием тонкого стального диска с нанесенной алмазной крошкой разрезали металлическое основание на отдельные упругие элементы.

Предложенная технология изготовления с использованием групповых процессов позволила повысить качество и производительность за счет лучшей воспроизводимости технологических слоев и параметров тензорезисторов, и тем самым повысить технологичность устройства. Кроме того, использование групповых методов изготовления упругих элементов привело к снижению процента брака и себестоимости.

Заключение

Применение вместо приклеивания технологических процессов формирования тензорезисторов из тонких пленок, напыленных на предварительно нанесенные неорганические многослойные изоляционные покрытия, которые обладают хорошей адгезией к металлу до 10–30 кг/см², высокой теплостойкостью (до 300–350 °С) и сопротивлением изоляции порядка 15–20 МОм, позволило исключить релаксационные процессы и ползучесть, которые имели место в случае приклейки тензорезисторов на органической пленке к упругому элементу, а также повысить чувствительность и точность измерений.

Проведенные исследования и измерения показали, что длительные (в течение 100 часов) действия знакопеременной деформации на упругие элементы с нанесенными на них тензорезисторами не приводят к изменению чувствительности тензорезисторов. Это позволяет использовать такие элементы в конструкциях устройств, предназначенных для работы в условиях длительного воздействия циклической нагрузки, которые имеют место в электронных весах.

Литература

1. Клокова Н. П. Тензорезисторы. М.: Машиностроение. 1990.
2. Алфей Т. Механические свойства полимеров. М.: Изд-во иностранной литературы. 1952.
3. Постников В. С., Гордиенко Л. К. Механизм релаксационных явлений в твердом теле. М.: Наука. 1972.