

УДК 681.5

*Гильфанов К.Х.,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»*

*ФГБОУ ВО «КГЭУ»*

*Россия, г. Казань*

*Газизуллин И.М.,*

*учебное заведение ФГБОУ ВО «КГЭУ»*

*студент*

*1 курс магистратуры, Институт теплоэнергетики*

*Россия, г. Казань*

## **ОБЗОР ТЕНЗОДАТЧИКОВ**

***Аннотация:** В статье рассматриваются основные знания, связанные с приборами для измерения силы и системами реализации силы. Кратко рассмотрена система измерения силы и ее основные характеристики. Начиная с истории и заканчивая современным развитием, был дан обширный обзор приборов для измерения силы.*

***Ключевые слова:** Тензодатчик, эластичное устройство, полупроводник, упругий элемент, тензометр, пьезоэлектрический эффект.*

***Annotation:** The article discusses the basic knowledge associated with force measurement instruments and force realization systems. The force measurement system and its basic characteristics are briefly reviewed. Beginning with the history and ending with the modern development, an extensive overview of force measurement instruments has been given.*

***Key words:** Load cell, elastic device, semiconductor, elastic element, strain gauge, piezoelectric effect.*

Система измерения силы состоит из преобразователя и связанных с ним приборов. Датчик подвергается воздействию измеряемой силы, и некоторое окончательное изменение элемента измеряется соответствующим прибором. Прибор может каким-либо образом питать преобразователь, а также обрабатывать выходные данные преобразователя до того, как датчик отобразит их на индикаторе для считывания пользователем. Строго говоря, устройство-преобразователь получает физический стимул и изменяет его на другой измеряемый физический [1].

Тензодатчики очень часто используются для измерения силы. Многие тензодатчики используют гибкие несущие компоненты или комбинации компонентов. Усилие, приложенное к эластичному элементу, заставляет его изгибаться, что затем воспринимается вспомогательным датчиком, который преобразует его в измеряемый выходной сигнал. Этот тип преобразователя обычно называется эластичным устройством и составляет основную часть всех обычно используемых тензодатчиков. Существует много различных элементов упругого преобразователя, но обычно они состоят из колец, цилиндров или балок. Было обнаружено, что тензодатчики стрелочного типа или тензометрические тензодатчики широко используются в различных областях применения в различных диапазонах (от нескольких ньютонов до мега Ньютонов). Эта возможность сделала эти тензодатчики самым надежным средством измерения силы на протяжении десятилетий.

Это наиболее распространенные датчики нагрузки и являются хорошим примером эластичных устройств. Они стали наиболее широко используемыми из всех систем измерения силы и могут использоваться в качестве стандарта передачи силы с цифровыми индикаторами высокого разрешения.

Каждое устройство основано на эластичном элементе, который включает в себя множество тензодатчиков сопротивления. Каждый тензодатчик реагирует на локальную деформацию в своем месте, и измерение силы зависит от интеграции этих индивидуальных измерений деформации.

Номинальная мощность тензодатчиков нагрузки колеблется от 5 Н до более чем 50 МН [2].

Форма упругого элемента, используемого в тензодатчике, зависит от многих факторов, включая диапазон измеряемых усилий, ограничения по размерам и конечную.

Ограничения по размерам и конечную производительность и производственные затраты. Каждый элемент предназначен для измерения силы, действующей вдоль его главной оси, и на него не влияют другие силы (например, боковые нагрузки). Стрелки на рисунке указывают главную ось каждого элемента.

Материалом, используемым для упругих элементов, обычно является инструментальная сталь, нержавеющей сталь, алюминий или бериллиевая медь, цель состоит в том, чтобы показать линейную зависимость между напряжениями (силой) в рабочем диапазоне. Он имеет низкий гистерезис и низкую деформацию ползучести (выход). Также должна быть высокая степень повторяемости между циклами приложения усилий, чтобы гарантировать, что тензодатчик является надежным измерительным устройством. Для того чтобы получить эти характеристики, материал обычно подвергается специальной термической обработке. Это может включать циклы термообработки ниже нуля для достижения максимальной стабильности [3].

### **Полупроводниковый тензометрический датчик**

Он изготавливается из n- или p-полупроводниковых кремниевых полосок. По сравнению с проволочными манометрами или манометрами из фольги, выходная мощность полупроводникового манометра очень высока. Коэффициент калибровки - это мера выхода при заданной деформации. Для полупроводников типичное значение составляет 100-150, а для проволоки и фольги - 2-4. Выход полупроводниковых датчиков имеет нелинейную зависимость от деформации, но у них практически отсутствует ползучесть или гистерезис, и они имеют чрезвычайно большой усталостный ресурс. Высокая

чувствительность измерителя к температуре означает, что измеритель должен быть тщательно подобран для любого конкретного тензодатчика, и обычно они подбираются на компьютере во время изготовления, но для комплектного датчика все равно может потребоваться высокий уровень температурной компенсации. Этот тип измерителя широко используется в "маленьких" датчиках, таких как тензодатчики, акселерометры и датчики давления, и их чувствительные элементы могут быть микро-обработаны с использованием одного куска кремния.

### **Тонкопленочные тензодатчики**

Тонкопленочные тензодатчики изготавливаются путем напыления или испарения тонких пленок металлов или сплавов на эластичные элементы. При изготовлении тонкопленочных тензометрических систем проходят несколько стадий испарения и напыления, и могут иметь до восьми слоев материала.

Существует множество тонкопленочных тензометрических датчиков нагрузки, охватывающих диапазон от 0,1 Н до 100 Н в конфигурациях с одной или двумя изгибающимися балками. Благодаря технологии производства, эти устройства являются высокорентабельными при массовом производстве. Это делает их очень подходящими для крупносерийной продукции, такой как магазинные весы и датчики давления.

### **Проволочные тензорезисторы**

Проволочные тензорезисторы являются первоначальным типом тензорезисторов сопротивления, хотя они были широко заменены недорогими фольговыми или пленочными типами. Однако проволочные тензорезисторы по-прежнему широко используются в высокотемпературных датчиках и анализе напряжений, и могут быть изготовлены из различных материалов. Диаметр проволоки обычно составляет от 20 мкм до 30 мкм, и она может быть приклеена к подложке с помощью керамических материалов. Редко используется свободная форма, при которой проволока наматывается вокруг изолирующего штифта, закрепленного на упругом элементе.

Номинальное сопротивление тензометра зависит от его типа и применения. Диапазон сопротивления проволочного тензометра составляет от 60  $\Omega$  до 350  $\Omega$ , фольгового и полупроводникового - от 120  $\Omega$  до 5 k $\Omega$ , а сопротивление пленочного типа - около 10 k $\Omega$ . Размер, самонагрев и требования к мощности являются важными критериями выбора. Если вы хотите соединить несколько тензодатчиков вместе, может быть важно согласование сопротивления.

Тензодатчик представляет собой своего рода высокоточный механический измерительный элемент с широким спектром применения. Его основной задачей является преобразование деформации поверхности детали в электрический сигнал, который вводится в соответствующие приборы для анализа. В природе все объекты, кроме сверхпроводников, обладают электрическим сопротивлением, а разные объекты имеют разную электропроводность. Сопротивление объекта связано со свойствами материала и геометрией объекта, и тензорезистивный датчик использует эту характеристику сопротивления проводника [4].

Наиболее важным компонентом тензодатчика является чувствительная решетка. Чувствительную сетку можно рассматривать как проволоку с сопротивлением, и изменения в ее свойствах материала и геометрии приведут к изменению сопротивления проволочной сетки.

### **Пьезоэлектрический кристаллический датчик**

Пьезоэлектрический эффект можно разделить на положительный пьезоэлектрический эффект и обратный пьезоэлектрический эффект. Положительный пьезоэлектрический эффект означает, что, когда кристалл подвергается воздействию внешней силы в фиксированном направлении, внутри кристалла возникает электрическая поляризация, и на двух поверхностях одновременно генерируются заряды противоположных знаков. Когда внешняя сила устраняется, кристалл возвращается в незаряженное состояние. Когда меняется направление внешней силы, меняется и полярность заряда; количество заряда, генерируемого кристаллом,

пропорционально величине внешней силы. Большинство пьезоэлектрических датчиков изготовлены с использованием положительного пьезоэлектрического эффекта.

Обратный пьезоэлектрический эффект относится к явлению, при котором приложение переменного электрического поля к кристаллу вызывает механическую деформацию кристалла, также известную как электрострикционный эффект. Преобразователи, изготовленные с обратным пьезоэлектрическим эффектом, могут использоваться в электроакустической и ультразвуковой технике. Существует пять основных форм силовой деформации пьезоэлектрических чувствительных компонентов: тип деформации по толщине, тип деформации по длине, тип объемной деформации, тип сдвига по толщине и тип плоского сдвига. Пьезоэлектрические кристаллы анизотропны, и не все кристаллы могут создавать пьезоэлектрические эффекты в этих пяти состояниях. Например, кварцевый кристалл не обладает пьезоэлектрическим эффектом объемной деформации, но обладает хорошим пьезоэлектрическим эффектом деформации толщины и деформации длины.

Когда к определенному кристаллическому материалу прикладывается сила, на поверхности кристалла образуется заряд, пропорциональный скорости изменения силы. Для использования этого устройства необходим усилитель заряда, который интегрирует заряд для получения сигнала, пропорционального приложенной силе и достаточно большого для измерения. Для применения пьезоэлектрического эффекта используется кварц, выращенный в естественных условиях, но сегодня чаще всего применяется искусственный кварц. Поэтому такие устройства часто называют кварцевыми тензодатчиками, хотя здесь чаще используется термин пьезоэлектрический кристалл.

Датчики на пьезоэлектрических кристаллах отличаются от большинства других технологий измерения тем, что они являются активными

чувствительными элементами. Не требуется источник питания, а деформация генерируемого сигнала мала, что дает преимущество высокочастотной характеристики измерительной системы, не вызывая геометрических изменений в траектории измерения силы [5].

С помощью этих устройств можно измерять чрезвычайно быстрые события (например, ударные волны в твердых телах или силу удара принтеров и давление пуансона); в противном случае такие измерения были бы невозможны. Электрический заряд пьезоэлектрического датчика очень мал, и в качестве электрического интерфейса ему требуется высокоомный кабель. Очень важно использовать подходящий кабель, который поставляется вместе с датчиком.

#### **Использованные источники:**

1. Кандил А. и Заид А. И. Соображения при проектировании и изготовлении тензодатчика для измерения динамических сжимающих нагрузок // Система генерации и возобновляемые источники энергии Технологии (PGSRET).
2. Сейф М. Осман, Эбтисам Х. Хасан, Х. М. Эльхаким, Р.М. Рашад и Ф. Кута, Концептуальный дизайн тензодатчика большой емкости // 16-й Международный конгресс по метрологии.
3. Джозеф Х. Антковяк, Джозеф Дж. Ренсис Геометрические нелинейности в конструкции датчиков силы // Достижения в области инженерии Публикации по программному обеспечению Elsevier. 1994. С. 12-15.
4. Фан-Ше Лин., Тшен-Чан Лин. Конструкция Г-образного тензодатчика для взвешивания в двух диапазонах // Международный Журнал сельскохозяйственной инженерии. 2017. С. 80-84.
5. Джоселин М. Клюгер., Фемистоклис П. Сапсис., Александр Х. Слокум. Датчик нагрузки с высоким разрешением и большим диапазоном усилия с помощью нелинейных консольных балок // Elsevier publications, Precision Engineering Volume. № 43. 2016. С. 241-256.