# Лекція 6. 22.09.21 18:30-19:50. Ауд 8

# Розділ 4. ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ТП) ТЗА

## 4.1. Загальна характеристика ТП

Тензометричні перетворювачі ТЗА ґрунтуються на використанні зміни електричного опору провідних матеріалів (металів і напівпровідників) при розтягу та стиску їх у межах пружних деформацій.

У практиці вимірювальних перетворювачів тензоефект застосовується в двох напрямках [4; 16; 17; 29; 30; 35; 43; 45; 46; 50; 51; 57; 67; 70;75; 76]:

– використання тензоефекту об'ємно стискаємого або розтягуємого тензочутливого матеріалу. Вхідна величина такого перетворювача – тиск газу або рідини, що його оточують. На цьому принципі будуються перетворювачі високих і надвисоких тисків, які виготовляють у вигляді безкаркасної обмотки, намотаної звичайно з манганінового дроту. Перетворювачами низьких тисків є германієвий або кремнієвий тензорезистор;

– застосування тензоефекту лінійно розтягуємого або стискаємого тензочутливого матеріалу. Перетворювачі цієї групи можуть бути виконані у вигляді наклеюваних дротяних, фольгових, плівкових або так званих вільних (навісних) ТП. Їх використовують для вимірювання малих переміщень, деформацій або зусиль, які спричинюють деформацію деталей.

Переваги ТП: малі маса і габаритні розміри; можливість вимірювати сталі та змінні деформації; можливість розміщувати їх у важкодоступних місцях; простота конструкції і дешевизна виконання.

Основні недоліки ТП: наявність поперечної тензочутливості для дротяних ТП, яка становить 0,25–1% (у фольгових і ненаклеюваних ТП вона практично відсутня); мала потужність вихідного сигналу ТП.

Клас точності вимірювальних пристроїв з тензоперетворювачами лежить у межах 0,2–1,5% [57; 67; 70].

Найчастіше застосовуються в промисловості такі різновиди ТП: провідникові (дротяні та фольгові); напівпровідникові; плівкові.

Провідникові дротяні ТП найпоширеніші.

## 4.2. Дротяні ТП

Дротяні ТП у загальному випадку (рис. 4.1) являють собою ряд петель тонкого тензочутливого дроту 1 (решітку) (число петель від 2 до 80) діаметром 0,01...0,05 мм з високоомного сплаву, наклеєних на ізоляційну підкладку (паперову прокладку) 2 і згори заклеєних також ізоляційною підкладкою (захисним папером). На рис. 4.1 позначено: *b* *–* ширина решітки; *l*б – довжина петлі або база ТП; *l*б=5...25 мм; *t –* ширина петлі або крок петлі; *t* ≥2*d*=0,8...10 мм; *d –* діаметр дроту ТП.

Для зміцнення місця закріплення вивідних кінців згори та знизу ТП приклеюють смужки паперу і роблять розвантажувальну петлю (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Конструкція наклеюваного дротяного
тензоперетворювача

До кінців дроту приєднані паянням або зварюванням виводи 3 із мідного проводу.

Опір таких ТП дорівнює 20...500 Ом.

Найчастіше для дротяних ТП застосовують такі матеріали: константан, ніхром, манганін, вісмут. Проте, найпоширенішими у вітчизняній тензометрії є ТП із спеціального константанового дроту діаметром 0,025...0,035 мм.

Характеристики матеріалів, що найчастіше застосовуються в ТП, наведено в табл. 4.1 [67; 70].

Електроізоляційні підкладки, між якими розміщують дріт ТП, виконують із цигаркового паперу, лакової плівки або цементу, скріплених між собою клеєм, лаком або цементом. Перетворювачі називають відповідно паперовими, лаковими або цементними.

Таблиця 4.1

Характеристики тензочутливих матеріалів

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | *S* | *d,* мкм | *ρ*, Ом⋅мм2/м | *αR* ⋅ 10-6, 1/°С |
| Константан МНМц-40-1,5 | 2,1 | 10; 20; 30 | 0,46...0,52 | –20...110 |
| Сплав НМ23ХЮ | 2,2±0,05 | 10;20; 30 | 1,45...1,60 | <35 |
| Матеріал | *Е,* Па | σB, Па | *ε lmax*, % | *αl* ⋅ 106, 1/°С | *tmax*, °С |
| Константан МНМц-40-1,5 | 1,48⋅1011 | 65⋅107 | – | 14...15 | 500 |
| Сплав НМ23ХЮ | 2,1⋅1011 | (130-150)хх107 | >18 | 11,5 | 500 |

Щоб отримати ТП з малою базою (1...3 мм), їх роблять двошаровими і виготовляють намотуванням тензочутливого дроту 1 (рис. 4.2) на трубчастий паперовий каркас 2, який після проклеювання розплющується і наклеюється на підкладку 3.



Рис. 4.2. Конструкція двошарового наклеюваного
дротяного тензоперетворювача

Дротяні ТП бувають наклеювані і ненаклеювані. ТП наклеюють на зачищену поверхню деталі, що випробується.

Звичайно, до якості клею ставлять найвищі вимоги, оскільки найдрібніші бульбашки повітря в шарі клею різко зменшують чутливість ТП відносно розрахункового значення.

Із наявністю клею пов'язане явище повзучості ТП: поступове зменшення сприймаємої ТП деформації у разі сталої деформації випробовуваної деталі.

Явище повзучості зумовлене релаксацією напруги в клейовому шарі, який передає деформацію від деталі, що випробується, до ТП. Повзучість характеризується повільною зміною опору після зняття навантаження.

В якості клеючих речовини залежно від умов роботи використовують різноманітні клеї та цементи [57; 67; 70]:

– за умов нормальних температур – ацетатно-целулоїдні та бакелітові клеї, клеї на основі органічних смол, кремненітрогліфталеві клеї тощо;

– за умов підвищених температур (до 700...800°С) – кремнійорганічні цементи та спеціальні цементи на основі рідкого скла або полісилоксани з різними наповнювачами.

Дротяний ТП реагує лише на складову вхідного сигналу деформації вздовж петель.

Ця властивість використовується для визначення напряму деформації за її складовими, які вимірюються за допомогою двох датчиків, наклеєних поруч, але з взаємно перпендикулярним розміщенням петель.

Особливість наклеюваних ТП полягає в тому, що це перетворювачі разової дії, тобто вони не можуть бути переклеєні з об'єкта на об'єкт.

Тому функція перетворення робочого ТП не може бути визначена, а для її оцінювання знаходять функцію перетворення аналогічного (так званого градуювального) перетворювача з тієї ж самої партії.

Такий спосіб оцінювання характеристик робочих ТП можливий лише в тому випадку, коли властивості перетворювачів всієї партії цілком ідентичні, а залишкові деформації, що спричинені твердненням клею під час приклеювання робочих і градуювальних перетворювачів, також однакові. Похибка від неідентичності в разі ретельного приклеювання ТП і доброякісного клею звичайно не перевищує 1,5 %.

## 4.3. Ненаклеювані (вільні) ТП

Ненаклеювані, або так звані вільні ТП, використовуються для багаторазового вимірювання малих деформацій, переміщень і сил. Найчастіше вільні ТП використовуються в датчиках тиску.

Конструктивно вільні ТП для вимірювання деформацій і малих переміщень виконуються у вигляді одного або ряду тензочутливих дротів, закріплених кінцями на дві спільні струмоізольовані пластини або планки, які можуть кріпитися до деталі або вузлів, що випробуються, і деформацію або переміщення яких потрібно вимірювати. Відносне переміщення планок є вхідною величиною таких перетворювачів – наприклад, у датчиках тиску одна планка нерухома, а друга переміщується під дією перетворюваного тиску.

При цьому ділянки дроту можуть з'єднуватися як паралельно (рис. 4.3, а), так і послідовно (рис. 4.3, б).

Для вимірювання сили Київським інститутом автоматики розроблено вільний ТП (рис. 4.4). Він виконаний у вигляді мембрани 1 з жорстким центром, яка кріпиться фланцем до основи 2 гвинтами. До мембрани прикріплені стояки 3, навколо яких намотано дріт 4 з тензоматеріалу, кінці його виведено на клеми. Якщо прикласти силу *Р,* мембрана деформується, стояки розходяться в боки і дріт з тензоматеріалу розтягується.

У процесі проектування такого ТП слід враховувати, що за максимального зусилля межа пружної деформації ТП не повинна перевищуватися. Згідно з цими міркуваннями матеріал для вільних ТП вибирають з найбільшою межею пружної деформації.

Переваги ненаклеюваних ТП – відсутність поперечної тензочутливості, можливість використання для багаторазових вимірювань, відсутність повзучості.

Недолік ненаклеюваних ТП – їх складніше, порівняно з дротяними і фольговими ТП, використовувати для вимірювання деформацій у важкодоступних місцях.

В якості тензочутливого дроту в ненаклеюваних ТП найчастіше використовують тензометричний константановий дріт або дріт зі сплаву НМ23ХЮ. Основні характеристики цих дротів наведено в табл. 4.1.

## 4.4. Фольгові ТП

Фольгові ТП являють собою тонку стрічку товщиною 0,01...0,02 мм з фольги, на якій частину металу вибрано (наприклад, травленням) так, що частина, яка залишилася, утворює показану на рис. 4.5 решітку з виводами.

Ця решітка закріплюється (найчастіше приклеюється) між плівками з лаку. Форма петель може бути довільною.

Завдяки потовщенням ТП працюватиме при поздовжній деформації (по осі *Оу*) і не працюватиме в разі поперечної деформації (по осі *Ох*) (рис. 4.5).



Рис. 4.3. Конструкція вільного тензоперетворювача із з'єднанням:
а – паралельним; б – послідовним

Фольгові ТП виготовляють таким чином. Спочатку наносять фотоемульсію, роблять з негативу відбиток решітки на фользі, проявляють, дублять (роблять рисунок кислотостійким), наносять на зворотний бік шар лаку, а потім травильною кислотою вибирають зайвий метал і отримують тензорезистор потрібного рисунку.



Рис. 4.4. Конструкція вільного тензоперетворювача
для вимірювання зусиль

Замість методу травлення можуть бути використані фотомеханічні процеси і методи офсетного друку, що застосовуються в поліграфії. Переваги фольгових ТП:

– відсутність поперечної тензочутливості;

– менші, порівняно з дротяними ТП, маса та габаритні розміри;

– кращі умови охолодження, завдяки чому через фольгові ТП можна пропускати значно більші струми, ніж через дротяні;

– безінерційність, тобто можливість вимірювати швидкозмінні деформації;

– забезпечення кращої якості приклеювання до деталі, що випробовується, порівняно з дротяними ТП;

– можливість розміщення у важкодоступних місцях;

– наявність найсучаснішої технології виготовлення;

– простота конструкції та дешевизна виготовлення.



Рис. 4.5. Фольговий тензоперетворювач

Недоліки фольгових ТП: обмежене застосування, оскільки на їх виході малопотужний сигнал (необхідно використовувати високоточну, часто досить громіздку вторинну апаратуру); порівняно низький опір, який не перевищує 50 Ом.

## 4.5. Плівкові ТП

Плівкові ТП мають досить широке застосування. Метод виготовлення плівкових ТП: тензочутливий матеріал наноситься на плівку вакуумною возгонкою і подальшою конденсацією на плівці. Для виготовлення плівкових ТП застосовують як металеві (наприклад, титаноалюмінієвий сплав), так і напівпровідникові (германій, кремній) матеріали.

Переваги та недоліки плівкових ТП такі самі, як і фольгових. При виготовленні фольгових і плівкових ТП можна передбачити будь-який рисунок їх решітки (їх істотна перевага), що дає змогу застосовувати їх для дослідження механічних напружень деталей найрізноманітнішої конфігурації.

## 4.6. Напівпровідникові ТП

Напівпровідникові ТП – це тонкі (до 0,01 мм) пластини або стрижні з напівпровідникового матеріалу. До кінців такої пластини спеціальним методом кріплять металеві виводи. Напівпровідникові ТП приклеюють по всій довжині або по кінцях до поверхні, що контролюють.

Перевага напівпровідникових ТП – дуже висока чутливість, яка досягає кількох сотень одиниць і є на один-два порядки вищою, ніж у дротяних ТП.

Недоліки напівпровідникових ТП: низька механічна міцність; значний гістерезис; нестабільність характеристики.

Матеріали напівпровідникових ТП: найчастіше використовуються такі напівпровідники, як германій, кремній, сурм'янистий індій; штучні суміші “тензоліти” (графіт з тонким кварцовим піском і смолою, графіт з крейдою та шеланом або каніфоллю, вугілля або сажа з бакелітовим лаком).

Широкого застосування набули напівпровідникові монокристалічні ТП. Матеріали, що використовуються в них, мають кубічну кристалічну решітку, в якій розрізняють три кристалографічні напрями, позначувані індексами Міллера. Напрям, позначений індексом [111], збігається з діагоналлю куба, [110 ] – з діагоналлю грані і [100 ] – з ребром куба.

Чутливість напівпровідникового ТП залежить від орієнтації його чутливого елемента (нитки) відносно кристалографічних напрямів, тобто в напівпровідниках на відміну від металів спостерігається анізотропія тензоефекту. Сучасна напівпровідникова тензометрія має кілька напрямів. Перший з них пов'язаний з розвитком поодиноких наклеюваних тензорезисторів. Поодинокі напівпровідникові тензорезистори – аналоги провідникових. Тепер випускають досить багато типів наклеюваних напівпровідникових ТП з підкладками і без підкладок типів Ю-8 і Ю-12. Конструктивно вони оформлені у вигляді гантелеподібної пластини кремнію 1 (рис. 4.6), вирізаної в кристалографічному напрямі найбільшого тензорезистивного ефекту. На кінці пластини наносять контактний шар 2 і термокомпресією або іншим способом приєднують виводи 3.



Рис. 4.6. Напівпровідниковий тензоперетворювач типу Ю-8

Коефіцієнт тензочутливості таких елементів, наклеєних на сталь 45 лаком ВЛ-931 при температурі 25±10°С і відносній деформації до 0,1%, становить 110±20; база *l*б = 5...7 мм, номінальний електричний опір 100...200 Ом.

До переваг таких ТП належить висока чутливість, мініатюрність, можливість отримати високий рівень вихідного сигналу. Проте їм притаманні і істотні недоліки: складність монтажу, великий вплив температури, пружна недосконалість, великий розкид метрологічних характеристик, внаслідок чого вони поступаються за точністю дротяним тензорезисторам. Похибка поодиноких напівпровідникових ТП становить 0,5–1%.

Другий напрямок, що грунтується на досягненнях фізики твердого тіла й відповідній технології, передбачає створення інтегрального тензомодуля. В такому ТП (рис. 4.7) пружний елемент 1 виконується з монокристалічного напівпровідника (звичайно кремнію), на якому дифузією або іонним легуванням формують тензочутливу схему 2. При цьому тензорезистор – єдина ланка пружного елемента і похибки через пружну недосконалість відсутні. Чутливий елемент ізолюють від тіла пружного елемента за рахунок запірних властивостей *р – п* переходів. Залежно від призначення тензомодулі виготовляють у вигляді балок, стовпчиків або мембран.

Перетворювачі з інтегральними тензомодулями відрізняються від поодиноких напівпровідникових ТП вищою точністю. Проте широке застосування інтегральних тензомодулів можливе лише в разі їх масового випуску і в мікромініатюрному виконанні, що є досі складним технічним завданням. Певні обмеження на їх використання накладає і крихкість матеріалу чутливого елемента.



Рис. 4.7. Тензомодуль мембранного датчика тиску

Останнім часом виник ще один напрямок напівпровідникової тензометрії, пов'язаний із застосуванням напівпровідникових мостових тензорезисторних структур [111], які являють собою монолітне з'єднані в схему одинарного мосту напівпровідникові тензорезистори. Мостова тензорезисторна структура у вигляді квадрату (рис. 4.8, а) універсальна для пружних елементів, що працюють на розтяг, стиск або на згин, а структура на рис. 4.8, б – для мембранних датчиків тиску. Габаритні розміри таких перетворювачів становлять 2...6 мм при товщині 20...25 мм.

Датчики, виконані на основі мостових тензорезисторних структур, точніші порівняно з поодинокими напівпровідниковими резисторами (їх похибка 0,1–0,2%), а порівняно з тензомодулями – технологічніші й універсальніші.

Використання тензорезистивного ефекту в *р–п* переході через великі технологічні складності й невідтворюваність метрологічних характеристик досі не дало істотних результатів.



Рис. 4.8. Напівпровідникові мостові тензорезистивні структури