**Лекція 9**

## 4.7. Основні техніко-метрологічні характеристики ТП

До основних техніко-метрологічних характеристик ТП належать тензочутливість, повний опір, повзучість, механічний гістерезис, температурна нестабільність, динамічні характеристики.

Тензочутливість визначається головним чином тензорезистивними властивостями матеріалу чутливого елемента, проте значною мірою залежить від конструкції перетворювача, матеріалу основи, виду і умов полімеризації клею та інших факторів.

Тензочутливість готових ТП практично не піддається точному розрахунку, оскільки вона може істотно відрізнятися від тензочутливості вихідного матеріалу.

Значення коефіцієнта тензочутливості перетворювача залежить від впливу технологічних факторів на відтворення тензорезистивних властивостей матеріалу, а також від зігнутості в місцях заокруглення дроту, особливо в дротяних ТП. У цих місцях утворюються ділянки, що не сприймають деформацію в напрямі осі бази. Зменшення чутливості, спричинене цим фактором, тим більше, чим менша вимірювальна база (у двошарових перетворювачів із зменшеною базою чутливість може зменшитися на 20–30%). Істотний вплив на результуючу чутливість має поперечний тензоефект, зумовлений наявністю ділянок дроту, які перпендикулярні до осі бази перетворювача і сприймають поперечну деформацію. Цього недоліку практично повністю позбавлені фольгові та плівкові ТП, в яких переріз провідного шару в місці згину може бути значно збільшений.

Основна характеристика чутливості матеріалу до механічної деформації – коефіцієнт відносної тензочутливості *S*. Він визначається як відношення відносної зміни опору до відносної зміни довжини провідника:



Найпростішим ТП, який служить для вимірювання зусиль, є дріт, що розтягується силами *Рx* (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Найпростіший тензоперетворювач для   
вимірювання зусиль

Опір дроту



де *ρ –* питомий електричний опір матеріалу; *l* – довжина провідника; *q* – площа поперечного перерізу провідника ТП.

Прологарифмувавши вираз для *Rx,* дістанемо:



Диференціюючи цей вираз і записуючи в часткових прирощеннях, маємо



або



Водночас відомо, що



де *σ* – коефіцієнт Пуассона, що характеризує відносну зміну площі поперечного перерізу дроту при розтягу або стиску (величина стала в межах пружних деформацій і додатна для всіх металів, крім нікелю). Тоді



Звідси коефіцієнт відносної тензочутливості ТП



Чутливість ТП завжди більша за одиницю і визначається властивостями ТП. Типові перерізи ТП зображено на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Поперечний переріз тензодроту

Для провідникових ТП



для напівпровідникових ТП



Сила *Рx* пов'язана з подовженням дроту за законом Гука



де *Е –* модуль пружності матеріалу дроту. Тоді



Матеріал деталі, що досліджується, і дроту ТП має зазнавати механічних напружень, які не перевищують межі пружних деформацій, в противному разі в ньому відбудуться необоротні деформації. Тому допустиме значення напружень не перевищує 20–30% межі пружності.

Оскільки значення відносної деформації Δ*l*/*l* в межах пружних властивостей матеріалу не перевищує 2,5⋅10-3, то при *S*=0.5...4 відносна зміна опору Δ*Rx*/*Rx*=(1,25...10)⋅10-3, тобто не перевищує 1%.

З огляду на це опір ТП повинен задовольняти дві вимоги: мати високу часову стабільність; мати незначний температурний коефіцієнт опору.

Основні вимоги, що ставляться до ТП:

– якомога більше значення коефіцієнта тензочутливості;

– високий питомий електричний опір;

– температурний коефіцієнт лінійного розширення чутливого елемента перетворювача має бути по можливості таким, що дорівнює температурному коефіцієнту лінійного розширення об'єкта, що досліджується.

У напівпровідниках *n*-типу коефіцієнт тензочутливості від'ємний, а в напівпровідниках *р*-типу додатний (табл. 4.2).

Для рідких тензорезистивних матеріалів (ртуті, електролітів), які практично не змінюють свого об'єму в процесі деформації, коефіцієнт тензочутливості *S*=2.

Справді, у разі сталого об'єму *V* опір *R* провідника зі сталим поперечним перерізом по всій довжині пропорційний до квадрата довжини:



а при *V*=const і *ρ*=const його зміна



Звідси



Таблиця 4.2

Основні характеристики тензочутливих матеріалів

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Коефіцієнт тензо­чутливості *S* | Модуль  пружності Е, ГПа | ТКС,  10–6  1/К | ТК  лінійного розширення, 10-6 1/К | Питомий опір, мк ×  × Ом⋅м | Термо-  ЕРС з  міддю,  мк⋅В/К | ТК тензочутливості,  10-6 1/К |
| Константан | 1.9...  2,1 | 150 | ±50 | 14...15 | 0,46...  0,50 | –40 | – |
| Ніхром | 2,1...  2,3 | 180 | 22 | 14 | 0,9...  1,7 | +22 | – |
| Платинородій | 5,1...  5,5 | – | 1700 | – | 0,2 | – | – |
| Елінвар | 0,7...  3,8 | 176 | 300 | 0,9 | 0,84 | 0,3 | – |
| Германій (дендрит): |  |  |  |  |  |  |  |
| *n*-типу [111] | –150 | 155 | 1500 | 0,1...6 | 0,25× ×104 | – | 3000 |
| *р*-типу [111] | +100 | 155 | 3000...  8000 | 0,1…6 | 1,1× ×104 | – | 400... 5000 |
| Кремній:  *n*-типу [100]  *р*-типу [111] | –130  +175 | 130  190 | 6000  1300 | 0...4  0...4 | 0,35× ×104  7,8⋅104 | –  – | 3000  2000 |

Визначимо вираз повного опору ТП. Відомо, що



або в разі заміни Δ→*d*



Проінтегрувавши здобутий вираз з урахуванням початкових умов, отримуємо:



Проте



Тоді



Враховуючи опір коротких сторін петель ТП, маємо:



Отриманий вираз визначає повний опір ТІЇ.

Умова оптимальності роботи рівноплечового мосту з ТП *R=R*н*.* Повзучість проявляється у вигляді зміни вихідного сигналу при заданому і незмінному значенні деформації і звичайно визначається як



де Δ*εl –* зведена до входу зміна вихідного сигналу; *εl –* задана відносна деформація.

Причиною повзучості є пружна недосконалість основи та клею. В межах пружного діапазону деформацій повзучість більшості ТП не перевищує 0,5–1% за першу годину після приклеювання і відповідно 1–1,5% за 6 годин.

Механічний гістерезис, як і повзучість, зумовлений пружною недосконалістю основи та клею і чисельно визначається як зведена до входу різниця значень вихідного опору для одного і того ж самого значення деформації за умови, що дане значення деформації досягається в разі плавного її зростання і плавного зменшення. Для різних типів ТП механічний гістерезис лежить у межах 0,5–5%.

Температурна нестабільність, або вплив температури навколишнього середовища на основні параметри ТП, полягає, з одного боку, у зміні опору ТП за рахунок його температурного коефіцієнта опору, а з іншого – в появі додаткових механічних напружень через різниці в температурних коефіцієнтах лінійного розширення матеріалу тензорезистора та деталі, що досліджується.

Якщо *β*д і *β*п – температурні коефіцієнти лінійного розширення деталі, що досліджується, і підкладки ТП, то відносна деформація ТП, зумовлена зміною навколишньої температури на Δ*Θ*, дорівнює:



а зміна його опору при цьому



Оскільки зміна опору ТП зумовлена наявністю температурного коефіцієнта опору матеріалу чутливого елемента Δ*Rα*=*Rα*Θ, то загальна зміна опору ТП, спричинена зміною температури навколишнього середовища на ΔΘ, дорівнює:



Компенсаційні опори можуть бути обчислені за методикою [51].

Для виготовлення ТП широко використовують термокомпенсовані тензометричні дроти, температурний коефіцієнт опору яких можна отримати спеціальним відпалюванням заданої величини, яка відповідає температурному коефіцієнту матеріалу об'єкта, що досліджується.

Якщо умова термокомпенсації дроту не виконується, то значення компенсаційного опору нуля ТП можна обчислити за наступною методикою.

Зміна опору ТП на 1°С зміни температури дорівнює:



де *R –* опір ТП; αΘ – температурний коефіцієнт опору дроту; *S* – коефіцієнт тензочутливості; *β*д, *β*п – температурний коефіцієнт лінійного розширення відповідно матеріалу об'єкта та дроту.

Зміна опору ТП і зміна компенсаційного опору (увімкненого послідовно з ТП)



(де *α*к *–* температурний коефіцієнт компенсаційного опору) мають бути однаковими, тому компенсаційний опір



Основна динамічна характеристика ТП – їх власна частота, значення якої для наклеюваних ТП становить 100...30 кГц.

Власна частота ТП визначає граничну частоту процесу, що досліджується, при якій частотними похибками можна знехтувати.

Для досліджень змінних деформацій зазвичай вибирають тензорезистивний перетворювач, власна частота якого хоча б у   
5–10 разів перевищує частоту деформації.

Важливим параметром ТП є допустима потужність *Р,* яка може розсіюватися в ТП за умови, що його перегрів не перевищить допустимого значення.

Допустима потужність ТП перебуває в певній залежності від його геометричних розмірів, що можна використовувати під час визначення *Р* для відомих тензорезисторів, а також геометричних розмірів проектованих перетворювачів згідно із заданою допустимою потужністю.

Відведення теплоти від ТП до деталі, що досліджується, через шар клею та підкладку значно перевищує тепловіддачу в навколишнє повітря. Тому можна вважати, що практично вся теплота відводиться в деталь, що досліджується; за площу *S* для плівкових і фольгових ТП беруть поверхню ТП, звернуту до деталі, що досліджується, а для дротяних – половину циліндричної поверхні дроту чутливого елемента.

Питома потужність дротяних, фольгових і напівпровідникових ТП незалежно від розсіюваної в них потужності і повної поверхні, що її займає чутливий елемент, звичайно коливається в незначних межах: *P*пит=26...28 кВт/м2 (або мВт/мм2).

## 4.8. Розрахунок ТП

Основні етапи розрахунку ТП: вибір конструкції, матеріалу; розрахунок геометричних розмірів; розрахунок чутливості та похибки.

Вихідними даними для розрахунку є вимоги технічного завдання (ТЗ) на розробку ТП.

Згідно з вимогами ТЗ конструкцію і матеріал ТП вибирають, зважаючи на межі вимірювання, умови встановлення ТП на об'єкті вимірювання (матеріал об'єкта вимірювання, розміри, кривизна та стан місця під встановлення ТП, можливість виконання термообробки); температурний діапазон роботи і точність. Частіше застосовують дротяні ТП, оскільки вони забезпечують вимірювання деформації в широких амплітудному і температурному діапазонах з достатньою точністю. Якщо вимірювання виконують при від'ємних температурах, перевагу надають плівковим (лаковим) ТП, при високих температурах – цементним.

Малі деформації у вузькому температурному діапазоні вимірюють за допомогою напівпровідникових ТП завдяки їх високій чутливості.

Для розрахунку геометричних розмірів ТП визначальними є вимоги щодо живлення вимірювального кола.

Допустимий струм живлення наклеюваного дротяного ТП може бути розрахований за формулою [51]:



де *d –*діаметр дроту, м (вибирають мінімально можливим).

Для плівкових і фольгових ТП допустимий струм *I*доп значно більший, оскільки в цих ТП умови охолодження кращі, ніж в дротяних. Величина *I*доп цих ТП залежить від співвідношення ширини *т* до товщини *z* смужки ТП. Так, при співвідношенні *т/z*=10, *I*доп=1,4 *I*доп дротяного ТП того ж самого перерізу. При *т/z=*40 *I*доп=1,95 *I*доп.

Допустимий струм напівпровідникових ТП можна брати таким, що дорівнює допустимому струму фольгових ТП, а вільних ТП – d 1,5 рази нижчий, ніж наклеюваних.

За даною напругою живлення і залежно від вибраного вимірювального кола обчислюють опір ТП.

Базу і ширину дротяного ТП визначають з таких передумов.

Для зменшення габаритних розмірів датчика потрібно зменшувати базу тензорезистора. Проте при заданому опорі в матеріалі ТП це спричинює збільшення ширини і все більша частина дроту виявляється неробочою, через що знижується коефіцієнт чутливості. Тому відношення розміру бази *l*б*,* ТП до його ширини *b* має бути в межах 2...5, тобто



Зменшити ширину ТП можна за рахунок скорочення відстані між окремими дротиками. Проте надмірне зменшення цієї відстані спричиняє температурний вплив одного боку петлі ТП на другий, що потребує зниження допустимого струму, і, крім того, обмежене технологічними можливостями намотки ТП. Крок намотки *t*>>2*l.* Практично відстань між витками вибирають у 10...20 раз більшою за діаметр дроту.

Враховуючи, що відношення розміру бази ТП до його ширини   
*n*=*l*б /*b*, знаходимо число витків ТП



де *l=πRd*2/4*ρ –* довжина тензодроту; *R –* опір ТП; *d –* діаметр дроту; *ρ* – питомий опір ТП.

Ширина ТП може бути виражена через число витків та крок намотки: *b*=(2*W* –1)*t*.

Динамічні властивості ТП визначаються динамічними властивостями об'єкта вимірювання, верхня гранична частота вимірювання деформації ТП становить 100 кГц; амплітудний діапазон ТП визначається межею міцності тензочутливого матеріалу і для найпоширеніших дротяних ТП на паперовій основі, плівкових та фольгових ТП становить 0,005–2%.

Потужність, яка розвивається в ТП, дорівнює



Питома площа поверхні охолодження не повинна бути нижчою за норму *δ*≥*δ*доп, яка для ТП, наклеєних на метал, приблизно дорівнює 2 см/Вт, а для ТП, наклеєних на пластмасу, – 5 см/Вт.

Оскільки площа поверхні охолодження *S*=(2*bl*б)4, для чотирьох тензодатчиків мостової схеми, мають виконуватися умови



Похибка ТП характеризується такими складовими: повзучістю, гістерезисом, нелінійністю, температурною похибкою нуля та чутливості, похибкою від розкиду тензочутливості тощо.

Основна похибка вимірювального кола *δ* може бути значно меншою і зумовлена в основному стабільністю й точністю напруги живлення *δ*тта елементів вимірювального кола *δ*к. Формулу для розрахунку основної похибки ТП можна подати у вигляді



Найважливіші характеристики ТП – чутливість, основна похибка, напруга живлення, опір.