

Лекція 3. Первинні перетворювачі неелектричних величин. Тензорезистивні перетворювачі.

Тензорезистивні перетворювачі набули широкого застосування при вимірюванні пружних деформацій і напруг, що виникають у деталях і вузлах машин, у складних будівельних конструкціях при статичних і динамічних навантаженнях, а також як чутливі елементи в датчиках тиску, витратомірах тощо.

Принцип дії тензорезисторів заснований на явищі тензоефекту – зміні величини активного опору провідникових і напівпровідникових матеріалів під впливом прикладених до них механічних напруг і деформацій.

Активний опір провідника при незмінній його температурі визначається з виразу

$$R = \rho \frac{l}{q} = \rho \frac{l^2}{V}, \quad (2.5)$$

де ρ – питомий опір провідника; l – довжина провідника; q – площа поперечного перерізу провідника; V – об'єм провідника.

Якщо провідник піддати пружній деформації, то змінюються його геометричні розміри й структура матеріалу, а це, у свою чергу, викличе зміну його опору. Експериментально встановлено, що відносна зміна опору провідника пропорційна його відносній поздовжній деформації, тобто

$$\frac{\Delta R}{R} = S_T \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.6)$$

де $S_T = \frac{\xi_R}{\xi_l}$ – коефіцієнт тензочутливості матеріалу провідника,

$\xi_R = \frac{\Delta R}{R}$ – відносна зміна опору,

$\xi_l = \frac{\Delta l}{l}$ – відносна деформація,

ΔR – збільшення опору при зміні довжини l на величину Δl .

Коефіцієнт тензочутливості показує, у скільки разів відносна зміна опору ξ_R більша за його відносну деформацію ξ_l .

Для визначення відносної зміни опору візьмемо повний диференціал виразу (2.5):

$$dR = \frac{l}{q} d\rho + \frac{\rho}{q} dl - \frac{\rho l}{q^2} dq \quad (2.7)$$

Розділивши праву й ліву частини виразу (2.7) на (2.5) і замінивши диференціали кінцевими приростами, одержимо вираз для відносного опору:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} - \frac{\Delta q}{q} \quad (2.8)$$

Із (2.6) і (2.8) з урахуванням, що

$$-\frac{\xi_q}{\xi_l} = 2\mu \quad (2.9)$$

одержимо рівняння для коефіцієнта тензочутливості:

$$S_T = 1 + 2\mu + \frac{\xi_\rho}{\xi_l}, \quad (2.10)$$

де $\mu = -\frac{\xi_q}{\xi_l}$ – коефіцієнт Пуассона, що характеризує величину зміни об'єму провідника в межах пружних деформацій;

$\xi_q = \frac{\Delta q}{q}$; $\xi_l = \frac{\Delta l}{l}$ – відносні величини відповідно поперечної й поздовжньої деформації провідника;

$\xi_\rho = \frac{\Delta \rho}{\rho}$ – відносна величина питомого опору.

Відносна зміна питомого опору матеріалу пропорційна відносній поздовжній деформації, тоді:

$$S = 1 + 2\mu + \gamma, \quad (2.11)$$

де $\gamma = \frac{\xi_\rho}{\xi_l}$.

З отриманого виразу видно, що коефіцієнт тензочутливості (поздовжньої) залежить від коефіцієнтів μ й γ , і для даного матеріалу є величиною постійною.

Для металів $\mu = 0,24 \dots 0,4$, а $\gamma = 0,5 \dots 1,5$, відповідно $S_T = 2 \dots 3$.

Матеріал, що застосовується для тензорезисторів, повинен мати більше значення коефіцієнта тензочутливості, малий температурний коефіцієнт опору і гарну відтворюваність його характеристик при виготовленні перетворювачів.

Коефіцієнт тензочутливості для металів, що найбільш часто застосовуються у тензорезисторах, близький до двох. Так, наприклад, для константану $S_T \approx 2$, для ніхрому $S_T \approx 2,2$, для хромелю $S_T = 2,5$.

Більш високою тензочутливістю, ніж метали, володіють напівпровідникові матеріали (германій, кремній). Так, наприклад, для германію $S_T \approx 100$. Однак напівпровідникові матеріали характеризуються малою механічною міцністю і більш низькою стабільністю в порівнянні з металами.

Тензорезистори, виконані з металів, поділяють на дротяні й фольгові. Дротяний тензорезистор (рис. 2.5) виконується із дроту діаметром 0,02...0,05 мм (константан, ніхром, елінвар та ін.), що укладається у вигляді частих петель решітки на ізоляційній плівці і приклеюється до неї.

Кінці дроту мають виводи, за допомогою яких тензорезистор підключається до вимірювальної схеми.

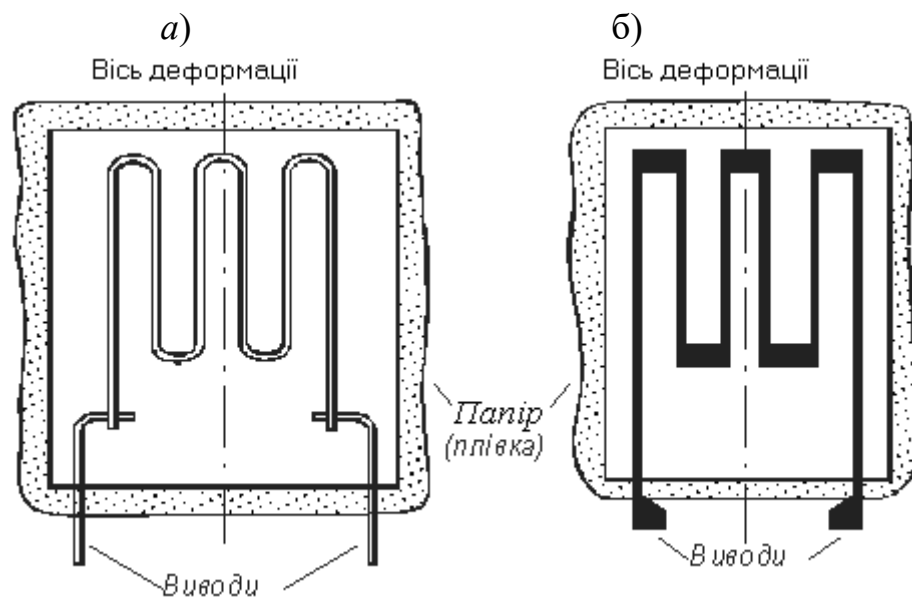


Рис. 2.5

Потім перетворювач покривається зверху папіром або лаком.

Пластина з тензорезистором наклеюється на поверхню випробуваної деталі таким чином, щоб його поздовжня вісь була розташована в напрямку вимірюваної деформації деталі, тобто щоб можливі деформації деталі

здійснювалися вздовж петель тензорезистора. Це дозволяє точніше виміряти лінійні деформації.

Крім поздовжньої тензочутливості, тензорезистори характеризуються: базою й шириною решітки, номінальним опором, поперечною тензочутливістю, повзучістю, опором ізоляції, вологостійкістю, температурним коефіцієнтом опору. База визначає довжину решітки перетворювача, що коливається в межах 1,5...100 мм.

Номінальний опір тензорезистора лежить у межах 10...1000 Ом.

Поперечна тензочутливість характеризує чутливість перетворювача в перпендикулярному напрямку до робочого, величина якої коливається від 0 для фольгових тензорезисторів, до 0,25...1% від поздовжньої тензочутливості для дротяних.

Під повзучістю розуміють поступове зменшення деформації, що сприймається тензорезистором при постійній деформації випробуваної деталі. Явище повзучості обумовлене релаксацією напруги в клейовому шарі, що передає деформацію від випробуваної деталі до решітки.

Похибки дротяних тензорезисторів залежать від зміни температури, опору ізоляції, вологостійкості, якості наклеювання і наявності поперечної деформації. Зміни температури можуть внести особливо великі похибки. Це пов'язано як зі зміною питомого опору тензорезистора, так і з появою додаткових механічних напруг через різницю температурних розширень матеріалів тензорезисторів і деталі, деформація якої вимірюється. Тому часто застосовують тензорезистори з дротом із константану, що має малий температурний коефіцієнт опору.

Для температурної компенсації використовуються мостові вимірювальні схеми з двома суміжними плечима, в які включаються тензорезистори з однаковими температурними коефіцієнтами опору, з яких один є робочим, а

інший – компенсуючим, що перебуває в однакових температурних умовах з робочим.

До переваг дротяних тензорезисторів варто віднести незначну вагу й розміри, малу інерцію, відсутність гістерезису, а до недоліків - відносно невисоку чутливість і можливість використання для випробування тільки однієї деталі.

Фольгові тензорезистори, з більш високою технологією виготовлення, виконуються з фольги товщиною 4...12 мкм фотохімічним способом, яким можна виготовити будь-який малюнок решітки.

Тензорезистори з прямокутною решіткою застосовуються для вимірювання лінійних напружених станів (рис. 2.5,б).

Для вимірювання тисків виготовляються тензорезистори з круглою решіткою, що наклеюється на мембрану.

В якості матеріалів для фольгових тензорезисторів, крім металів, застосовуються напівпровідники.

До переваг фольгових тензорезисторів варто віднести відсутність поперечної тензочутливості. Крім того, фольгові тензорезистори забезпечують кращу якість приклеювання до випробуваної деталі, ніж дровотів.

Точність виміру механічних напруг і деформацій за допомогою наклеюваних тензорезисторів досягає 0,3...1%.

Тензорезистори що не наклеюються, виконуються із дроту, намотуваного на ізоляторах, укріплених на деталях, що взаємно переміщуються.

В серійних напівпровідникових тензорезисторах застосовують кремній *p*-типу з питомим електричним опором $\rho_0 = 0,02...0,04$ Ом·см, та кремній *n*-типу з питомим опором $\rho = 0,02...0,03$ Ом·см.

Сучасна напівпровідникова тензометрія має декілька напрямків. Перший з них пов'язаний з розвитком одиничних приклеюваних тензорезисторів, які є функціональним аналогом дротяних (наприклад, тензорезистори типу Ю-8 та Ю-12).

Для таких елементів коефіцієнт тензочутливості при температурі $25 \pm 10^\circ\text{C}$ та відносній деформації до 0,1% знаходиться в межах 90...130, база дорівнює 5...7 мм, номінальний електричний опір становить 100...200 Ом.

До переваг таких тензоперетворювачів належить висока чутливість, мініатюрність, а до недоліків – сильний вплив температури, складність монтажу, великий розкид характеристик. Похибки одиничних напівпровідникових тензорезисторів становлять 0,5...1%.

Другий напрямок передбачає створення інтегральних тензомодулів. У таких тензоперетворювачах, які застосовуються в датчиках тиску, пружний елемент (мембрана) виготовляється з пластини напівпровідника кремнію, на поверхні якого методом дифузії формують інтегральну тензочутливу схему. Тут тензорезистор є єдиною ланкою пружного елемента. Отже, на відміну від наклеюваних дротяних тензорезисторів, тут відсутня проміжна ланка між пружним елементом та тензорезистором – клей, який є причиною додаткових похибок у наклеюваних тензоперетворювачах через його пружну недосконалість.

Останнім часом з'явився ще один напрямок у напівпровідниковій тензометрії, пов'язаний із застосуванням мостових тензорезистивних структур, які являють собою з'єднані монолітно в схему одинарного моста напівпровідникові тензорезистори. Мостова тензорезистивна структура у вигляді квадрата є універсальною для пружних елементів, що працюють на розтяг, стиск, згин.

Габаритні розміри таких перетворювачів становлять 2...6 мм, при товщині самого тензорезистора 20...25 мкм.

Датчики, виконані на основі мостових тензоструктур, є точнішими від датчиків з одиничними напівпровідниковими тензорезисторами (їх похибка дорівнює 0,1...0,2%), а порівняно з тензомодулями – технологічнішими та універсальнішими.