

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**М. А. Долгов**  
**С. О. Пискунов**

# **МІЦНІСТЬ ТА РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ**

**ЧАСТИНА 1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МІЦНОСТІ  
ТА ВИКОРИСТАННЯ ТЕНЗОМЕТРІЇ  
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ  
ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ: ПРАКТИКУМ**

**Навчальний посібник**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістр  
за освітньою програмою «Динаміка і міцність машин»  
спеціальності 131 Прикладна механіка

Електронне мережне навчальне видання

Київ  
КПІ імені Ігоря Сікорського  
2022

УДК 539.4 : 531.7

Долгов М.А., Пискунов С.О. Міцність та руйнування елементів конструкцій. Частина 1. Фізичні основи міцності та використання тензометрії для визначення напруженого стану елементів конструкцій: Практикум. Навч. посіб. для здобувачів ступеня магістр за освітньою програмою «Динаміка і міцність машин» спеціальності 131 Прикладна механіка. – Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2022. – 44 с.

Рецензент *Петраков Ю.В., д.т.н., професор,  
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Відповідальний редактор *Пискунов С.О., д.т.н., професор*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 1 від 02.09.2022 р.)  
за поданням Вченої ради Навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту  
(протокол № 1 від 01.09.2022 р.)*

В навчальному посібнику розглянуто питання будови твердих тіл, дефектів кристалічної структури від яких залежить міцність матеріалів. Окрема увага приділена використанню методів тензометрії для дослідження напруженого стану та процесів руйнування елементів конструкцій. Розглядаються різні типи тензорезисторів та основні їх характеристики. Показано використання тензодавачів для дослідження консольного згину елементів конструкцій.

Надаються приклади розв'язання задач різного прикладного значення.

Призначено для здобувачів освітнього ступеня магістр за спеціальністю 131 Прикладна механіка, може бути також корисним студентам інших спеціальностей та викладачам під час підготовки до практичних занять.

Реєстр. № НП 22/23-004. Обсяг 1,5 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© М.А.Долгов, С.О.Пискунов  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

## ЗМІСТ

<b>Вступ.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Фізичні основи міцності .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Використання методів тензометрії для дослідження напруженого стану та процесів руйнування елементів конструкцій .....</b>	<b>14</b>
2.1 Аналіз тензочутливості сплавів .....	14
2.1.1 Малі деформації.....	14
2.1.2 Великі деформації.....	16
2.2 Типи тензорезисторів.....	18
2.2.1 Дротяні тензорезистори.....	18
2.2.2 Фольгові тензорезистори.....	19
2.2.3 Напівпровідникові тензорезистори.....	20
2.3 Матеріали, що використовуються для виготовлення та наклеювання тензорезисторів.....	21
2.3.1 Матеріали для виготовлення ґратниць .....	21
2.3.2 Клеї для встановлення тензорезисторів.....	23
2.3.3 Герметики.....	24
2.4 Основні характеристики тензорезисторів.....	24
2.5 Схеми включення тензорезисторів у вимірювальний міст.....	25
<b>3 Дослідження консольного згину елементів конструкцій .....</b>	<b>31</b>
<b>4 Визначення впливу температури на похибку вимірювання деформації при випробуваннях на згин .....</b>	<b>40</b>
<b>Література .....</b>	<b>44</b>

## Вступ

Ідеального твердого тіла не існує. В твердих тілах існує велика кількість дефектів або недосконалостей. Механічні властивості матеріалів чутливі до відхилень кристалічної ґратки від досконалості. Цей вплив не завжди є несприятливим: часто особливі характеристики матеріалів створюють шляхом введення контрольованої кількості дефектів. Дефекти кристалічної будови підрозділяють по геометричних ознаках на точкові, лінійні, поверхневі та об'ємні. Розуміння процесів руйнування елементів конструкцій не можливо без ознайомлення фізичними основами міцності.

Для дослідження напруженого стану та процесів руйнування елементів конструкцій використовують різні методи, зокрема тензометрії. За допомогою тензодавачів вимірюють деформації механічно пов'язаних з ними елементів. Тензорезистор є основною складовою частиною тензодавачів, що застосовуються для непрямого вимірювання сили, тиску, ваги, механічних напружень тощо. Розрахунок деформацій елементів конструкцій є важливою складовою при визначенні характеристик міцності матеріалів та розуміння процесів руйнування конструкцій в різних галузях сучасної техніки.

Докладне викладення теоретичних положень фізичних основ міцності у показано у багатьох роботах [1 – 4]. Експериментальні методи тензометрії відображено як в навчальних, так і наукових працях [5, 6]. У даному навчальному посібнику наведені короткі теоретичні відомості, які є основою для проведення пропонованих практичних розрахункових і експериментальних досліджень, зокрема наведені вихідні положення фізичних основ міцності та розглянуті питання використання методів тензометрії для дослідження напруженого стану та процесів руйнування елементів конструкцій.

Призначений для здобувачів вищої освіти, що навчаються за освітньою програмою ОКР магістр за спеціальністю 131 Прикладна механіка, може бути також корисним студентам, інших спеціальностей професійна діяльність яких пов'язана зі вивченням закономірностей міцності та руйнування елементів конструкцій, викладачам для підготовки практичних занять.

# 1 Фізичні основи міцності

Мета роботи: Ознайомитися з методами визначення концентрації та рухливості рівноважних точкових дефектів для заданої температури, енергії їх утворення та міграції

## Теоретичні відомості

Конструкційні матеріали мають кристалічну структуру. Під час кристалізації, яка відбувається при охолодженні розплаву металу та затвердінні, атоми розташовуються у певній послідовності і на певній відстані, утворюючи кристалічну ґратку. Під час деформування матеріалу відстані між атомами змінюються і структура кристалічної ґратки спотворюється. При цьому опір матеріалу деформуванню залежить від правильності вихідної структури кристалічної ґратки, яка може порушуватись вихідними точковими дефектами.

До точкових дефектів кристалічної ґратки, що мають мікроскопічні розміри в усіх трьох вимірах, відносять вакансії, міжвузлові атоми, домішкові атоми, що розчиняються в кристалах за типом заміщення та проникнення, а також деякі комплекси точкових дефектів.

Концентрація точкових дефектів  $C$  – це відношення кількості дефектів в одиниці об'єму  $n$  до кількості атомів (або вузлів) у цьому об'ємі  $N$ . Кожній температурі відповідає своя рівноважна концентрація точкових дефектів, яка забезпечує мінімум вільної енергії або ентальпії:

$$C = \frac{n}{N} = \exp\left(\frac{S_0}{k}\right) \exp\left(-\frac{E_0}{kT}\right), \quad (1.1)$$

де  $S_0$  – ентропія утворення точкових дефектів, еВ/К або Дж/К;

$E_0$  – енергія утворення точкових дефектів, еВ або Дж;

$k$  – стала Больцмана ( $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$  еВ/К =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$T$  – температура, К.

Якщо концентрацію точкових дефектів визначають з точністю до порядку величини, ентропійним показником нехтують (тобто вважають ентропійний множник  $\exp(S_0/k)$  близьким до одиниці). Тоді

$$C = \frac{n}{N} = \exp\left(-\frac{E_0}{kT}\right) \quad (1.2)$$

Атоми в кристалах коливаються довкола положення рівноваги, безперервно обмінюючись енергією між собою. При цьому атом може отримати енергію міграції  $E_M$ , якої достатнє для переходу з свого вузла до

сусіднього вакантного. Таким чином точкові дефекти переміщуються (або мігрують). Кількість переходів до нового положення, яке здійснює дефект за одну секунду ( $\Gamma$ ), визначається за формулою:

$$\Gamma = v_0 \exp\left(\frac{S_M}{k}\right) \exp\left(-\frac{E_M}{kT}\right) \quad (1.3)$$

де  $v_0$  – частота теплових коливань у напрямку вакансії,  $10^{13} \text{ c}^{-1}$ ;  
 $S_M$  – ентропія міграції точкових дефектів, еВ/К або Дж/К;  
 $E_M$  – енергія міграції точкових дефектів, еВ або Дж.

Якщо частоту стрибків визначають з точністю до порядку величини, ентропійним показником часто нехтують, тобто вважають  $\exp(S_M/k) \rightarrow 1$ , тоді:

$$\Gamma = v_0 \exp\left(-\frac{E_M}{kT}\right) \quad (1.4)$$

Швидкість самодифузії атомів визначається концентрацією та рухливістю вакансій, а енергія активації самодифузії  $E_{CD}$  складається з двох доданків:

$$E_{CD} = E_0 + E_M. \quad (1.5)$$

Енергії утворення  $E_0$  та міграції  $E_M$  вакансій визначають експериментально, а для міжвузлових атомів ці характеристики обчислюють за допомогою фізичних моделей.

Точкові дефекти впливають на фізичні властивості металів, тому визначаючи змінювання об'єму, електричного опору, внутрішньої енергії, можна оцінити  $E_0$  та  $E_M$ .

Як відомо, з підвищенням температури об'єм металу збільшується. Відносне збільшення лінійних розмірів зразка ( $\Delta L/L$ ) відбувається як за рахунок відносного збільшення міжатомної відстані ( $\Delta a/a$ ), так і з причини виходу атомів на поверхню металу та утворення на ній нових атомних шарів. При цьому всередині кристала виникають вакансії, концентрація яких у цьому випадку визначається як

$$C = 3 \cdot \left( \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta a}{a} \right) \quad (1.6)$$

Число 3 як множник додано для переходу від збільшення лінійних розмірів твердого тіла до змінення його об'єму. Значення  $\Delta L/L$  визначають за методом дилатометрії (від лат. dilato – розширення),  $\Delta a/a$  – за методами рентгеноструктурного аналізу.

Термічна обробка металевих виробів будь-якого вигляду та призначення полягає у їх нагріванні до певної температури, витримці за цієї температури та подальшому охолодженні з різними швидкостями.

Під час нагрівання металу концентрація точкових дефектів у ньому збільшується. Якщо після витримки метал охолоджувати з великими швидкостями (провести гартування), точкові дефекти, що виникли у ньому під час нагрівання, не встигають прийти до рівноваги з граткою. В результаті утворюється надлишкова концентрація вакансій. З урахуванням особливості процесу їх утворення (великі швидкості охолодження) такі вакансії часто називають «замороженими».

Підвищена концентрація «заморожених» під час гартування вакансій обумовлює приріст електроопору  $\Delta\rho$ , пропорційний до цієї концентрації та такий, що змінюється за експонентою:

$$\Delta\rho = A \exp\left(-\frac{E_0}{kT}\right) \text{ або } \ln(\Delta\rho) = \ln A - \frac{E_0}{k} \cdot \frac{1}{T} \quad (1.7)$$

де  $A$  – стала величина для даного твердого тіла.

Якщо визначити приріст електроопору зразків, загартованих від двох температур нагріву ( $T_1$  та  $T_2$ ), то енергію утворення вакансій можна визначити за формулою:

$$E_0 = k \frac{(\ln \Delta\rho_1 - \ln \Delta\rho_2)}{(1/T_2) - (1/T_1)} \quad (1.8)$$

Якщо гартування проведено за трьох та більшої кількості значень температур, то можна скористатися графічним методом визначення  $E_0$  – за тангенсом кута нахилу прямої, побудованої в координатах « $\ln(\Delta\rho) - 1/T$ »:

$$E_0 = k \frac{\Delta(\ln \Delta\rho)}{\Delta(1/T)} \quad (1.9)$$

Після обчислення  $E_0$  можна визначити  $C$  за будь-якої температури твердого стану речовини. Для експериментального визначення енергії міграції  $E_M$  використовують низку методів. Якщо кінетика процесу відпалу точкових дефектів характеризується сталим значенням енергії активації, то швидкість змінення концентрації «заморожених» дефектів  $dn/d\tau$  можна навести у вигляді:

$$\frac{dn}{d\tau} = -F(n) \cdot k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_M}{kT}\right) \quad (1.10)$$

де  $F(n)$  – неперервна функція концентрації дефектів;  
 $k_0$  – коефіцієнт перед експонентою.

Для визначення  $E_M$  необхідно одержати ізотерми будь якої властивості, змінення якої пропорційне зміненню концентрації вакансій, наприклад, електроопору (рис. 1.1).

Потім на графіках слід провести горизонтальну лінію (метод перетину). Це означає, що після відпалу у зразках металу залишилася однакова кількість «заморожених» вакансій. Як випливає з графіків (див. рис. 1.1), для досягнення заданого рівня властивостей (концентрації вакансій) за різних температур відпалу необхідно витратити різний час. З урахуванням цього можна записати:

$$\tau_1 \exp\left(-\frac{E_M}{kT_1}\right) = \tau_2 \exp\left(-\frac{E_M}{kT_2}\right) = const \quad (1.11)$$

або

$$\ln\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) = \frac{E_M}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right),$$

звідки

$$E_M = k \frac{\ln(\tau_1/\tau_2)}{(1/T_2) - (1/T_1)} \quad (1.12)$$

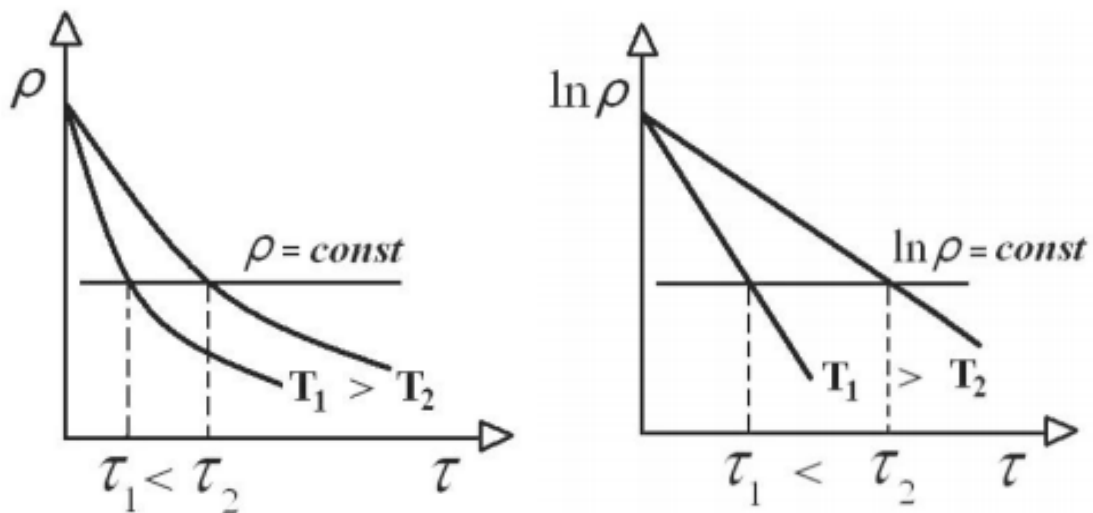


Рис. 1.1. Залежність електроопору  $\rho$  загартованого металу від тривалості ізотермічного відпалу при різних температурах

Задача № 1.

Як змінюється концентрація вакансій та міжвузлових атомів при підвищенні температури алюмінію від кімнатної до температури, що наближається до температури плавлення ( $660^\circ\text{C}$ ). Енергія утворення вакансій в алюмінії дорівнює  $0,75\text{ eV}$ , а міжвузлових атомів –  $3,0\text{ eV}$ . Ентропійний



множник можна вважати близьким до одиниці. Розрахунок вести з точністю до порядку величини.

Розв'язання.

При формулюванні «кімнатна температура» у розрахунках зазвичай приймають значення  $T = 20$  °С. Тоді, визначаючи концентрацію вакансій  $C_{вак.}$  та міжвузлових атомів  $C_{м.ат.}$  за формулою (2), одержуємо:

$$C_{вак.} = \exp\left(-\frac{0,75}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot 293}\right) = e^{-29,7} = 10^{-12,9} \approx 10^{-13}$$

$$C_{м.ат.} = \exp\left(-\frac{3,0}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot 293}\right) = e^{-118,8} = 10^{-51,6} \approx 10^{-52}$$

Для визначення концентрації точкових дефектів поблизу температури плавлення можна врахувати, що її значення (933 К) майже в три рази перевищує кімнатну температуру ( $933/293 = 3,18$ ). З цієї причини значення показника ступеня при розрахунку  $C_{вак.}$  та  $C_{м.ат.}$  зменшаться відповідно майже в 3 рази:

$$C_{вак.} \approx 10^{-4}$$

$$C_{м.ат.} \approx 10^{-17}$$

Висновки

1. Оскільки енергія утворення вакансій у декілька разів менша за енергію утворення міжвузлових атомів, то концентрація рівноважних вакансій за будь-яких температур твердого стану на багато порядків перевищує концентрацію міжвузлових атомів. З підвищенням температури ця різниця зменшується, але залишається достатньо істотною.

2. Рівноважна концентрація вакансій навіть за температур, близьких до температури плавлення, не перевищує  $10^{-4}$  (або 0,01 %), що відповідає одній вакансії на 10000 атомів.

Задача № 2.

Використовуючи умови задачі № 1, визначте кількість точкових дефектів в одному молі алюмінію.

Розв'язання.

Кількість точкових дефектів в одному молі визначаємо за формулою:

$$n = C \cdot N_A,$$

де  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  1/моль – кількість частинок (атомів) в одному молі речовини (число Авогадро).

Значення концентрації точкових дефектів візьмемо з задачі № 1:

– за кімнатної температури  $C_{\text{вак.}} \approx 10^{-13}$ ,  $C_{\text{м.ат.}} \approx 10^{-52}$ ;

– за температури 660 °С  $C_{\text{вак.}} \approx 10^{-4}$ ,  $C_{\text{м.ат.}} \approx 10^{-17}$ .

Тоді кількість точкових дефектів в одному молі алюмінію складатиме:

– за кімнатної температури  $n_{\text{вак.}} \approx 6 \cdot 10^{10}$ ,  $n_{\text{м.ат.}} \approx 6 \cdot 10^{-29}$ ;

– за температури 660 °С  $n_{\text{вак.}} \approx 6 \cdot 10^{19}$ ,  $n_{\text{м.ат.}} \approx 6 \cdot 10^6$ .

**Висновки**

Імовірність утворення власних рівноважних міжвузлових атомів при всіх температурах твердого стану близька до нуля.

**Задача № 3.**

Визначте підвищення внутрішньої енергії  $\Delta U$  одного молу алюмінію, що обумовлено рівноважними вакансіями за  $T = 660$  °С.

**Розв'язання.**

Підвищення енергії, що обумовлено рівноважними вакансіями, знаходимо як добуток енергії утворення однієї вакансії (див. задачу № 1) на кількість вакансій в одному молі (див. задачу № 2.):

$$\Delta U = E_0 \cdot n = 0,75 \text{ eV} \cdot 6 \cdot 10^{19} = 4,5 \cdot 10^{19} \text{ eV} = 7,2 \text{ Дж}$$

### **Завдання для самостійної роботи**

Виконайте розв'язок задачі відповідно до свого варіанту.

**Варіант № 1**

Порівняйте рівноважну концентрацію точкових дефектів у  $\alpha\text{-Fe}$  (ОЦК) за кімнатної температури та поблизу температури плавлення ( $0,95 \cdot T_{\text{пл}}$ ). Енергія утворення вакансій – 1,4 еВ; міжвузлових атомів – 5,0 еВ. Температура плавлення заліза – 1539 °С.

**Варіант № 2**

Визначте (з точністю до порядку величини) частоту переміщень вакансій у сріблі за температури, що дорівнює  $0,9 \cdot T_{\text{пл}}$ . Енергія активації самодифузії  $E_{\text{сд}} = 1,9$  еВ; енергія утворення вакансій  $E_0 = 1,15$  еВ. Температура плавлення срібла 960 °С.

**Варіант № 3**

Порівняйте рухливість вакансій та міжвузлових атомів в алюмінії за температури 660 °С. Енергія міграції вакансій – 0,65 еВ; міжвузлових атомів –

0,12 eВ. Розрахунок провести з точністю до першої значущої цифри. Ентропійний множник вважати близьким до одиниці.

#### Варіант № 4

Енергія активації самодифузії міді дорівнює 2,08 eВ, а енергія міграції – 1,08 eВ. Як зміниться концентрація вакансій за підвищення температури від 500 до 1000 °С?

#### Варіант № 5

Визначте (з точністю до порядку величини) частоту переміщень вакансій у сріблі за температури, що дорівнює  $0,95 \cdot T_{пл}$ . Енергія активації самодифузії  $E_{сд} = 1,93$  eВ; енергія утворення вакансій  $E_0 = 1,10$  eВ. Температура плавлення срібла 960 °С.

#### Варіант № 6

Визначте концентрацію вакансій в алюмінії, якщо поблизу температури плавлення різниця між відносним збільшенням лінійних розмірів зразка ( $\Delta L/L$ ) та відносною зміною параметра кристалічної ґратки ( $\Delta a/a$ ) склала  $9,4 \cdot 10^{-4}$ . Опишіть суть цього методу визначення концентрації вакансій, його переваги та недоліки.

#### Варіант № 7

Визначте енергію утворення вакансій в золоті, якщо приріст електроопору  $\Delta\rho$ , обумовлений гартуванням від температури  $T_{гарт}$ , склав:

$T_{гарт}, ^\circ\text{C}$	550	650	750	850
$\Delta\rho, \text{Ом}\cdot\text{см}$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$6,5 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$

Для розв'язання задачі побудуйте графік залежності  $\ln(\Delta\rho)$  від  $T^{-1}$ .

#### Варіант № 8

Визначте, як змінюється концентрація вакансій в  $\alpha\text{-Fe}$  за підвищення температури від 500 до 900 °С. Енергія утворення вакансій в  $\alpha\text{-Fe}$  – 1,6 eВ.

#### Варіант № 9

Визначте (з точністю до порядку величини) частоту стрибків (переміщень) вакансій в залізі при нагріванні до температури  $0,95 \cdot T_{пл}$ , якщо

енергія активації самодифузії  $E_{CD} = 2,8$  еВ, а енергія утворення вакансій  $E_0 = 1,5$  еВ. Температура плавлення заліза –  $1539$  °С.

#### Варіант № 10

Визначте кількість рівноважних вакансій в одному молі срібла за температури  $930$  °С. Енергія утворення вакансій у сріблі складає  $1,10$  еВ.

#### Варіант № 11

Визначте кількість рівноважних вакансій в одному молі заліза за температури  $900$  °С. Енергія утворення вакансій  $E_0 = 1,5$  еВ.

#### Варіант № 12

Визначте енергію міграції вакансій у попередньо загартованому дуже тонкому золотому дроті, якщо надлишковий електроопір має однакоке значення після ізотермічних відпалів протягом  $130$  хвилин за температури  $118$  °С та  $34$  хвилин – за температури  $140$  °С.

#### Варіант № 13

Визначте приріст внутрішньої енергії, обумовленої утворенням вакансій в одному молі золота за  $900$  °С, якщо енергія утворення вакансій  $E_0 = 0,95$  еВ.

#### Варіант № 14

Порівняйте рухливість вакансій в  $\alpha$ - та  $\beta$ -цирконії за температури поліморфного перетворення із  $\alpha$ -фази у  $\beta$ -фазу:  $862$  °С. Енергія міграції  $E_m^{\alpha-Zr} = 0,6$  еВ та  $E_m^{\beta-Zr} = 1,6$  еВ. Задачу розв'яжуйте з точністю до першої значущої цифри.

#### Варіант № 15

Визначте (з точністю до порядку величини) концентрацію вакансій в молібдені під час нагрівання до температури  $0,95 \cdot T_{пл}$ , якщо енергія активації самодифузії  $E_{CD} = 4,53$  еВ, а енергія міграції  $E_m = 1,53$  еВ. Температура плавлення молібдену  $2620$  °С.

#### Варіант № 16

Визначте енергію міграції вакансій в попередньо загартованому дуже тонкому золотому дроті, якщо надлишковий електроопір має однакоке

значення після ізотермічних відпалів протягом 100 хвилин за температури 118 °С та 28 хвилин – за 140 °С.

#### Варіант № 17

Визначте частку внутрішньої енергії, обумовленої вакансіями в одному молі срібла за температури 950 °С, якщо енергія їх утворення  $E_0 = 1,10$  еВ.

#### Варіант № 18

Порівняйте рівноважну концентрацію вакансій та міжвузлових атомів у платині (ГЦК) за кімнатної температури та поблизу температури плавлення ( $0,95 \cdot T_{пл}$ ). Енергія утворення вакансій – 1,5 еВ; міжвузлових атомів – 3,5 еВ. Температура плавлення платини – 1773 °С. Розрахунок виконуйте з точністю до порядку величини. Ентропійний множник вважайте близьким до одиниці.

#### Варіант № 19

Під час відпалу міді за температури 910 °С концентрація вакансій склала  $10^{-5}$ , а для 1060 °С –  $4 \cdot 10^{-5}$ . Визначте енергію утворення вакансій в міді.

#### Варіант № 20

Визначте середню тривалість перебування вакансій в одному вузлі кристалічної ґратки нікелю за температури, що дорівнює  $0,9 \cdot T_{пл}$ . Енергія активації самодифузії – 2,80 еВ, енергія утворення вакансій – 1,60 еВ. Температура плавлення нікелю – 1455 °С.

## 2. Використання методів тензометрії для дослідження напруженого стану та процесів руйнування елементів конструкцій

Мета роботи: Ознайомитись з методами тензометрії та принципом роботи моста Уінстона

Тензодавач – резистор, електричний опір якого змінюється залежно від його деформації. В основі принципу роботи тензодавачів лежить явище п'єзорезистивного ефекту. За допомогою тензодавачів можна вимірювати деформації механічно пов'язаних з ними елементів. Тензорезистор є основною складовою частиною тензодавачів, що застосовуються для непрямого вимірювання сили, тиску, ваги, механічних напружень тощо.

### 2.1 Аналіз тензочутливості сплавів

Змінювання електричного опору провідника під час його розтягування або стискання, назване тензоефектом, було відкрито в 1856 англійським вченим фізиком У. Томсоном лордом Кельвіном (William Thomson, 1st Baron Kelvin, 1824 – 1907).

Проведемо аналіз тензоефекту для малих та великих деформацій.

#### 2.1.1 Малі деформації

Відомо, що величина електричного опору провідника  $R$  визнається співвідношенням:

$$R = \rho \frac{l}{F}, \quad (2.1)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу провідника,  
 $l$  – його довжина,  
 $F$  – площа поперечного перерізу.

Опір  $R$  можна розглядати як функцію трьох змінних. Знайдемо його диференціал:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial F} dF = \frac{l}{F} d\rho + \frac{\rho}{F} dl + \frac{l}{F^2} dF \quad (2.2)$$

Розділивши вираз (2.2) на (2.1), перейдемо до відносного змінювання опору:

$$\frac{dR}{R} = \frac{\partial \rho}{\rho} + \frac{\partial l}{l} - \frac{\partial F}{F} \quad (2.3)$$

Отримане співвідношення показує, що відносна зміна опору провідника залежить від суми відносних змін: питомого опору матеріалу, довжини та площі провідника.

Перший член правої частини (2.3) запишемо у вигляді відповідно:

$$\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dl}{l} \quad (2.4)$$

де  $m$  – коефіцієнт пропорційності.

Фізика пояснює зміну питомого опору матеріалу змінюванням числа електронів, що припадають на одиницю об'єму провідника під час його пружного деформування.

Другий член у виразі (2.3) – це відносне подовження провідника:

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon \quad (2.5)$$

Для дроту круглого поперечного перерізу

$$\frac{dF}{F} = \frac{2\pi r}{\pi r^2} dr = 2 \frac{dr}{r} \quad (2.6)$$

За визначенням коефіцієнт Пуассона  $\mu$  є відношення поперечної деформації до поздовжньої:

$$\mu = -\frac{dr}{r} \cdot \frac{1}{\varepsilon}$$

Тоді вираз (1.6) перепишемо у такому вигляді:

$$\frac{dF}{F} = -2\mu\varepsilon \quad (2.7)$$

Підставивши (2.4), (2.5) та (2.7) у (2.3), отримаємо

$$\frac{dR}{R} = (m + 1 + 2\mu) \cdot \varepsilon \quad (2.8)$$

Величину  $S$  називають коефіцієнтом тензочутливості металу до деформації:

$$S = \frac{dR/R}{dl/l} = m + 1 + 2\mu$$

Коефіцієнт тензочутливості  $S$  характеризує інтенсивність зміни відносного опору провідника  $dR/R$  в залежності від відносної деформації  $dl/l$ .

Перший член у коефіцієнті  $S$  визначається зміною питомого опору металу провідника під час його деформування, а два інших – зміною його

геометрії ( $dl$  та  $dF$ ). За малих пружних деформацій коефіцієнт Пуассона:  $\mu = 0,3$ . Отже, внесок у коефіцієнт тензочутливості змінювання геометрії провідника під час деформування різних металів однаковий і дорівнює приблизно  $1 + 2\mu = 1,6$ .

Після переходу до кінцевих величин, отримаємо основне рівняння тензоефекту:

$$\frac{\Delta R}{R} = S\varepsilon \quad (2.9)$$

У табл. 2.1 представлений перелік сплавів, які широко застосовуються у виробництві тензорезисторів. Для цих сплавів в області пружного деформування коефіцієнт тензочутливості  $S$  більше ніж 1,6 внаслідок вкладу в тензоефект члена, який пов'язаний зі зміною питомого опору металу  $(d\rho/\rho)/(dl/l)$ .

Табл. 2.1. Хімічний склад та коефіцієнт тензочутливості сплавів, які використовують для виготовлення тензодавачів

Найменування металу	Хімічний склад, %	$S$
Константан	50 – 60% Cu, 40 – 50%Ni	2,0 – 2,15
Карма	74% Ni, 20% Cr, 3% Fe, 3% Al	2,3
Ізоеластик	52% Fe, 36% Ni, 8% Cr, 3,5% Mn, 0,5% Mo	3,6
Ніхром	80% Ni, 20% Cr	2,1–2,5
Платиновольфрам	92% Pt, 8% W	4,0

### 2.1.2 Великі деформації

Для великої деформації методика аналізу тензочутливості має бути змінена, оскільки у провіднику переважають пластичні деформації.

Введемо до рівняння (2.1) об'єм провідника  $V = F \cdot l$ . Тоді отримаємо наступний вираз:

$$R = \rho \frac{l^2}{V} \quad (2.10)$$

Його диференціювання та поділ на опір  $R$  дозволяють отримати:

$$\frac{dR}{R} = \frac{\partial \rho}{\rho} + 2 \frac{\partial l}{l} - \frac{\partial V}{V} \quad (2.11)$$

Оскільки під час пластичного деформування об'єм провідника практично не змінюється, то  $dV \rightarrow 0$  та  $d\rho \rightarrow 0$ , а рівняння (2.11) зводиться до вигляду

$$\frac{dR}{R} = 2 \frac{\partial l}{l} \quad (2.12)$$



Якщо пластичні деформації досить малі за величиною, то тензочутливість сплаву (з врахуванням того, що  $\mu = 0,5$ ) становить  $S = 2$ .

У випадку досить великих пластичних деформацій зміна опору визначається шляхом інтегрування рівняння (1.12). Замість диференціалу  $dR$  треба використовувати приріст опору  $\Delta R$ :

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = 2 \ln\left(\frac{l}{l_0}\right),$$

де  $R_0$  – початкове значення опору,  
 $l_0$  – початкове значення довжини.

Після перетворення отримуємо вираз

$$\ln\left(1 + \frac{\Delta R}{R_0}\right) = 2 \ln\left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)$$

Отже,

$$\frac{\Delta R}{R_0} = 2\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right) + \left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)^2 \quad (2.13)$$

З врахуванням того, що  $S = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$  аналогічно формулі (2.9), отримуємо виразу для визначення  $S$ :

$$S = 2 + \frac{\Delta l}{l}$$

Таким чином, за досить великих пластичних деформацій тензочутливість сплаву  $S$  лінійно залежить від деформації.

## 2.2 Типи тензорезисторів

### 2.2.1 Дротяні тензорезистори

У 1938 р., розв'язуючі проблему визначення деформування споруд під дією сейсмічних хвиль, американський інженер-механік Артур Клод Руж (Arthur Claude Ruge, 1905–2000) запропонував і створив перший тензорезистор (від латинських слів *tensus* – напружений та *resisto* – чинити опір) – прилад для вимірювання деформацій в елементах конструкцій.

Перші конструкції дротяних тензометрів опору являли собою дротяну нитку, натягнуту на несівній рамці, яка кріпилася об'єкті, який досліджується, за допомогою ножових фіксаторів та кріпильних пристроїв. Ці датчики витримували багаторазове використання, однак були великими та

громіздкими, мали обмежені динамічні характеристики та викликали труднощі під час монтажу.

Тензорезистори, що приклеюються, – одноразові давачі. Їх не можна зняти з деталі або елемента конструкції, виконати тарування та знову встановити. Їхні метрологічні характеристики визначають непрямим шляхом. З великої партії однакових давачів, які виготовлені строго за однією і тією ж технологією, здійснюють статистичну вибірку, визначають метрологічні характеристики датчиків з вибірки та поширюють ці характеристики на всю партію.

Дротяний тензорезистор масового застосування (рис. 2.1) є плоскою петлеподібною дротяною обмоткою 2 прямокутної форми, до кінців 4 якої припаяні або приварені відносно товсті виводи з мідного дроту 5. Дротяна ґратниця за допомогою спеціального клею 3 закріплюється на тонкій прямокутній смужці 1 з паперу, клейового або лакової плівки, що служить для ґратниці підкладкою.

Чутливість дротяної ґратниці практично однакова як під час розтягування, так і під час стискання. Пояснюється це тим, що тонкі дроти по всій своїй довжині знаходяться в міцному шарі клею і під час дії стикової деформації, не втрачають стійкість, оскільки становлять єдине ціле разом з клейовим шаром та поверхнею деталі. До кінців дротяної ґратниці припаюють або приварюють мідні виводи. Вони повинні мати достатню механічну міцність, добре контактувати з кінцями дротяної ґратниці і бути зручними для підключення до них дротів виміральної схеми.

Тензочутливу ґратницю дротяного тензорезистора утримує на собі та електрично ізолює її від матеріалу деталі підкладка. Вона повинна бути еластичною, механічно міцною, добре приклеюватися до різних матеріалів, мати хорошу вологостійкість та високі ізолювальні якості, не змінювати своїх властивостей у заданому інтервалі температур, не мати гістерезису та повзучості.

### **2.2.2 Фольгові тензорезистори**

Подальшим розвитком дротяних тензорезисторів стали фольгові тензорезистори (рис. 2.2). Вони виготовляються прогресивним методом фотолітографії з дуже тонкої (близько 0,0036 мм) фольги. Оскільки тонка фольга легко ушкоджується, до початку фотографічного процесу та травлення на неї наносять тонку плівку, яка є несівною основою як у процесі виробництва, так і після наклеювання тензорезистора на деталь.

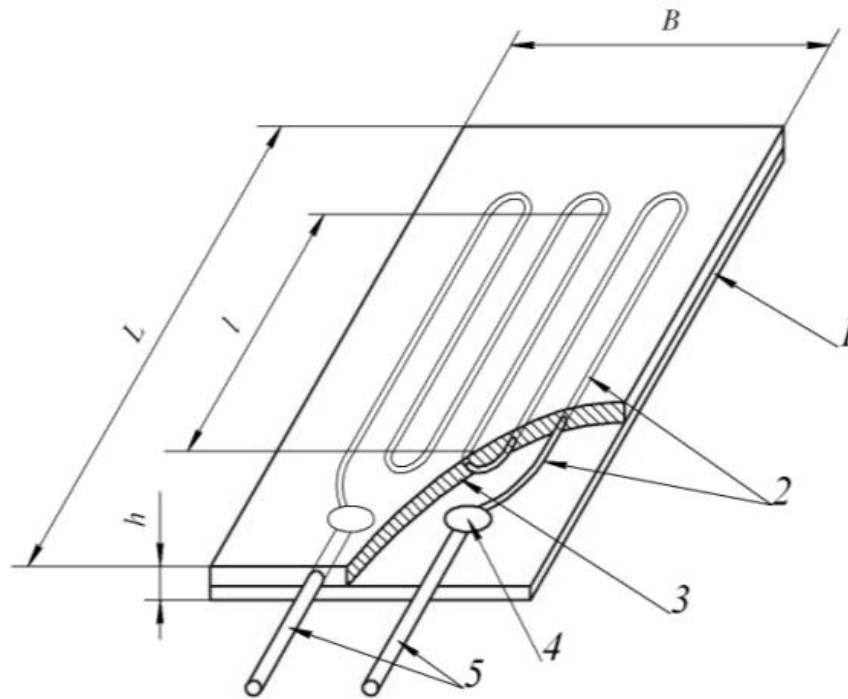


Рис. 2.1. Конструкція дротяного тензорезистора

Фольгові тензорезистори мають безперечні переваги в порівнянні з дротяними й фактично витіснили останні з обігу. Вони мають прямокутну форму поперечного перерізу ниток чутливої ґратниці  $l$  малої товщини. З одного боку, при цьому збільшується площа зчеплення ґратниці з поверхнею досліджуваної деталі 2, що робить міцнішим з'єднання тензорезистора з деталлю, покращує передачу деформації до чутливої ґратниці, підвищує стабільність та надійність вимірювань. З іншого боку, збільшується тепловіддача з ґратниці на деталь. В процесі вимірювань для збільшення рівня сигналу, що знімається, через тензорезистор пропускається струм високої щільності й ґратниця розігріваються.

Крім того, метод фотолітографії дозволяє автоматизувати процес виробництва та отримувати тензорезистори найрізноманітніших конфігурацій з широкими поперечними перемичками 3. Наявність широких перемичок робить фольгові тензорезистори практично нечутливими до поперечної деформації деталі, що є їх безперечною перевагою порівнянні з дротяними датчиками.

Фольгові тензорезистори мають широкі контактні площинки 4 для надійного припаювання вивідних дротів 5. Наявність витравлених позначок 6 на підкладці 7 дозволяє надійніше контролювати положення тензорезистора на деталі у процесі його встановлення. Між деталлю та підкладкою розташований тонкий клейовий шар 8. Зверху датчик має шар покриття 9.

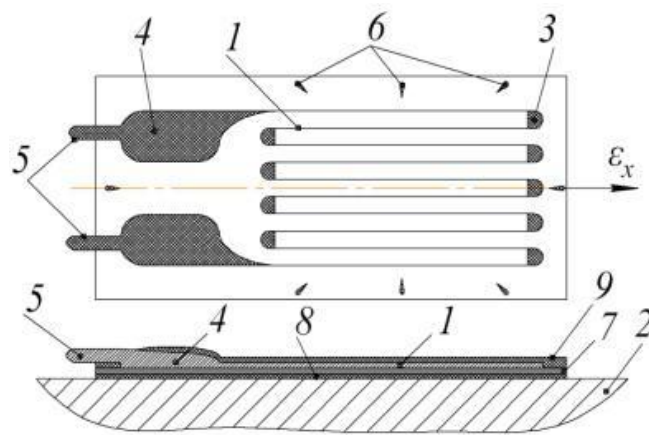


Рис. 2.2. Фольговий тензорезистор

Залежно від кількості чутливих ґратниць, розміщених на одній підкладці, фольгові тензорезистори діляться на одноелементні та багатоелементні. Багатоелементні тензорезистори можуть мати дві, три або чотири ґратниці.

### 2.2.3 Напівпровідникові тензорезистори

Напівпровідникові тензорезистори використовують п'єзорезистивні властивості напівпровідникових матеріалів. Основним елементом напівпровідникового тензорезистора є тонка прямокутна плівка монокристала кремнію, яка для зручності в користуванні закріплена на тонкій основі. Оскільки, опір кремнію приблизно в 1000 раз більший за опір константану, що використовується в фольгових тензодавачах, в напівпровідникових тензорезисторах не використовується конфігурація ґратниці для створення початкового опору в діапазоні 100 – 1000 Ом. Напівпровідникові тензодатчики (у порівнянні з дротяними та фольговими) мають чимало істотних переваг. Чутливість їх у 50 – 60 разів перевищує чутливість дротяних, розміри набагато менші, а високий рівень вихідного сигналу вимірюваних схем не потребує застосування складних та дорогих підсилювачів. Окрім того, за одних і тих же розмірів, опір тензорезистора, внаслідок введення відповідних присадок і зміни технології виготовлення, може змінюватись у широкому діапазоні (від 100 Ом до 50 кОм) за коефіцієнта тензочутливості від 50 до 200. Головною відмінністю напівпровідникових тензорезисторів від дротяних є більша (до 50 %) зміна опору тензоперетворювача внаслідок деформування.

Найсильніше тензоефект виражений у германію, кремнію та інших напівпровідникових матеріалах. Але для масового виготовлення застосовують лише кремній та германій. Вони мають високу тензочутливість, хімічно

інертні, витримують нагрівання до  $500^{\circ} - 540^{\circ}\text{C}$  і дають змогу виготовляти тензорезистори різної форми.

Властивості та характеристики напівпровідникових тензорезисторів визначаються застосованим матеріалом, питомим опором і типом провідності. Знак тензоефекту (за розтягання) у напівпровідниках *n*-типу від'ємний, а *p*-типу – додатний.

## **2.3 Матеріали, що використовуються для виготовлення та наклеювання тензорезисторів**

### **2.3.1 Матеріали для виготовлення ґратниць**

Матеріали для границь повинні відповідати наступним вимогам:

- мати високий питомий опір, що дозволяє виготовляти тензорезистори з малою базою та чималим опором;
- мати високу та стабільну чутливість до деформації; зміни опору, спричинені деформацією, повинні підкорятися лінійному закону у досить широкому діапазоні;
- бути нечутливим впливу температури, тобто. температурний коефіцієнт опору має бути близьким до нуля;
- термоЕРС у парі з міддю має бути якнайменша, що дуже важливо для живлення тензорезисторів постійним струмом;
- температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу дроту матеріалу та деталі, на яку наклеюється тензорезистор, повинні бути рівними або незначно відрізнятись, інакше зміни температури викликатимуть деформацію і, отже, створюватимуть похибки при вимірюваннях;
- не мати гістерезу;
- мати технологічність, яка дозволяє виготовляти фольгу мікронних розмірів;
- мати високе відношення границі пропорційності до модуля пружності;
- сплави, що застосовуються для виготовлення високотемпературних тензорезисторів, повинні добре протистояти окисному впливу зовнішнього середовища.

Розглянемо основні переваги та недоліки сплавів, що використовуються для виготовлення границь.

Зараз більшість тензорезисторів виготовляються з константану в силу наступних його переваг:

- сталість коефіцієнта тензочутливості у широкому діапазоні деформацій (до 8%);
- у відпаленому стані константан може бути використаний для вимірювання деформацій до 20%; однак у цьому випадку у константану виявляється зміна початкового опору, що свідчить про систематичне змінювання опору кожного циклу навантаження;
- відсутність істотних змін під час переходу від пружного деформування до пластичного;
- високий питомий опір ( $\rho = 0,49$  мкОм/м);
- високу температурну стабільність;
- можливість створення температурно компенсованих тензодавачів шляхом узгодження коефіцієнта температурного розширення давача з аналогічним параметром матеріалу.

Зазвичай тензорезистори виготовляються з м'якого відпаленого константану. Основними його недоліками є:

- низький коефіцієнт тензочутливості (близько 2,1);
- велика термоЕРС у парі з міддю (порядку 47 мкВ/°С). Щоправда, цей недолік позначається лише під час живлення тензомоста постійним струмом за наявності різниці температур між выводами.

Сплав карма також широко застосовується, причому у порівнянні з константаном він має наступні переваги:

- він може бути температурно компенсований у більш широкому діапазоні температур;
- нікельхромова основа сплаву карми забезпечує тензодавачам вищі втомні характеристики;
- сплав виявляє високу тимчасову стабільність і тому переважний для вимірювання статичних деформацій протягом тривалих проміжків часу (від кількох місяців до кількох років).

Головний недолік сплаву карми – труднощі лютування вивідних провідників до контактних площинок давача.

Сплав ізоеластик має високу тензочутливість ( $S = 3,6$ ) і найбільш високі втомні характеристики серед сплавів, що застосовуються для виготовлення тензодавачів.

Оскільки сплав є виключно чутливим до температури, він не може бути температурно компенсований, і, таким чином, сфера його застосування обмежена динамічними або статичними вимірюваннями, для яких температурна нестабільність не має суттєвого значення.

Сплави ніхром та платиновольфрам застосовують у високотемпературних вимірюваннях, для яких набуває істотного значення стійкість до окислення.

### **2.3.2 Клеї для встановлення тензорезисторів**

Клеї на основі ціаноакрилату не вимагають ні нагрівання, ні тверднику для ініціювання полімеризації. Затвердіння (полімеризація) ціаноакрилатних клейних речовин починається від дії адсорбованої в повітрі води з відносною вологістю в межах 40 та 70 %. За відносної вологості повітря нижче 30 % реакція відчутно сповільнюється. Вологість вище 80 % викликає миттєве затвердіння. Полімеризація протікає до кінця лише в тонких плівках. Товсті шари речовини тверднуть не повністю або взагалі не тверднуть. З цієї причини непридатні для склеювання сильно шорсткі поверхні. Для початку полімеризації необхідний незначний тиск на давач. Оскільки міцність клею знижується з часом у результаті поглинання вологи, необхідно захищати давач від вологи для його тривалої експлуатації.

Епоксидний клей складається зі смоли та тверднику, який вступає реакцію зі смолою для її полімеризації. Для тензорезисторів використовують епоксидні клеї з дуже низькою в'язкістю, що дозволяє наносити їх дуже тонким шаром. З цієї причини епоксидні клеї економічні у використанні. Переважні епоксидно-фенольні смоли, оскільки вони утворюють дуже тонкі високоміцні, однорідні плівки зі слабо вираженими повзучістю та гістерезисом. Для гарантування повної полімеризації, епоксидні клеї зазвичай полімеризуються за підвищених температур протягом декількох годин. Робочий діапазон температур епоксидних клеїв визначається їх складом.

### **2.3.3 Герметики**

Якщо випробування елементів конструкцій проводять за підвищеної вологості та протягом тривалого часу, то тензорезистори, як правило, слід захищати від впливу вологи. Волога проникає в матеріали підкладки та клею і вони набухають. Погіршуються їх механічні характеристики: знижується міцність, зменшується модуль пружності, внаслідок розм'якшення зв'язувальних речовин збільшується повзучість давачів. Крім того, змінюються параметри електричної ізоляції тензорезисторів від об'єкта вимірювання.

Залежно від температури та часу дії вологого середовища для герметизації тензорезисторів використовують різні вологозахисні покриття.

В умовах підвищеної вологості за нормальної температури захист тензорезисторів можна забезпечити нанесенням декількох шарів вологостійких клеїв. За дуже високої вологості застосовують покриття на основі бітуму, каніфолі, воску та епоксидних смол.

## 2.4 Основні характеристики тензорезисторів

База  $l$  – довжина чутливого елемента ґратниці тензорезистора в *мм*. Випускаються давачі з базою від 0,2 до 150 *мм*.

Номінальний опір  $R$  – значення активного опору чутливого елемента тензорезистора в *Ом*.

Робочий струм живлення  $I_p$  – допустимий струм у *мА*, за якого не відбувається помітного нагріву тензорезистора, що може вплинути на властивості тензочутливого елемента, підкладки та клейового з'єднання. Чим більший струм, що проходить через ґратницю тензорезистора, тим вище рівень електричних сигналів, в які перетворюється вимірювана деформація. Тому з точки зору збільшення чутливості вимірювальної схеми бажано пропускати через тензорезистор якомога більший струм.

Границя вимірюваної деформації  $\epsilon_{\max}$  – найбільше значення відносної деформації, щодо якої завод-виробник гарантує надійну роботу тензорезисторів та лінійність їхньої характеристики перетворення. Правильно наклеєний тензорезистор має практично лінійну характеристику і забезпечує досить високу точність вимірювань, якщо деформація не перевищує рівня  $\pm 0,3\%$ . Проте мають місце невеликі відхилення від лінійності під час циклічного деформування, причому крива розвантаження розташовується нижче за криву навантаження.

Коефіцієнт тензочутливості визначається як відношення відносного прирощення опору наклеєного тензорезистора до відносної деформації зразка, виміряної в напрямку осі тензорезистора:

$$k = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$$

Цей найважливіший параметр давача відображає поведінку системи «ґратниця–підкладка–клей» і дещо відрізняється від аналогічного параметра для матеріалу ґратниці, який був введений раніше та позначався буквою  $S$ . Вплив конфігурації вимірювальної ґратниці та умов передачі деформації до границі викликає різницю між  $S$  та  $k$ , проте цим звичайно нехтують. Внаслідок цієї причини коефіцієнт  $k$  визначається виробником після випробувань для кожної групи тензорезисторів. Під час виробництва не



можливо управляти коефіцієнтом тензочутливості для того, щоб отримати його певне значення.

Нелінійність – максимальне відхилення реальної передавальної функції від апроксимувальної прямої лінії.

Зміщення нуля – негативний вихідний сигнал давача після зняття навантаження.

Гістерез – різниця значень вихідного сигналу тензорезистора для одних і тих же рівнях вхідного сигналу, отриманих під час навантаження та розвантаженні об'єкта.

Робочий діапазон температур – діапазон температур, за якого гарантується роботоздатність давача.

Температурна характеристика теплового розширення  $\alpha$ , або термочутливість наклеєного тензорезистора – коефіцієнт, який рівний відносної зміни опору наклеєного тензорезистора за зміни температури на 1 °С.

Напрацювання до утомного руйнування – число циклів навантаження наклеєного тензорезистора знаковмінною деформацією певного рівня, за якому спостерігається розвиток втомних руйнувань датчика.

## 2.5 Схеми включення тензорезисторів у вимірювальний міст

Вимірювання деформації за допомогою тензорезистивних перетворювачів – один із найскладніших у техніці електричних вимірювань. Складність визначається малим діапазоном зміни опору тензорезистора під впливом деформації. Зміни опору тензорезистора надзвичайно малі та становлять для давача опором 100 Ом близько 0,0002 Ом на деформацію 0,0001 %. Таким чином, деформація 0,1 % змінює опір 100 Ом давача на 0,2 Ом. Для перетворення таких малих змін опору у вихідні сигнали, які можуть реєструватися, у вимірювальних приладах широко використовується мостова схема.

Вимірювальний міст заведено зображувати у вигляді ромба, сторони якого називають плечима, а точки з'єднання плечей – вершинами або вузлами мосту. Міст Уїтстона з живленням від джерела постійної напруги складається з трьох функціональних частин (рис. 2.3). Це джерело напруги  $U$ , чотири резистори ( $R_1, R_2, R_3, R_4$ ), що утворюють міст, та реєструвальна схема, що включає резистор навантаження  $R_M$ . У наведених нижче рівняннях припускається  $R_M = \infty$ .

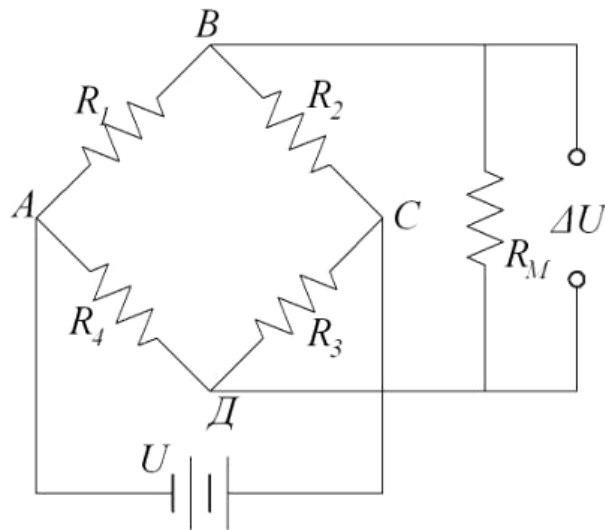


Рис. 2.3. Міст Уїтстона

Вихідна напруга моста Уїтстона (різниця напруги точок  $B$  та  $D$ ) визначається співвідношенням

$$\Delta U = \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (2.13)$$

З рівняння (2.13) випливає, що  $\Delta U = 0$ , якщо виконується умова

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ або } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (2.14)$$

За дотримання рівності (2.14) міст називається збалансованим. Це означає, що мала напруга розбалансу, спричинена зміною опору, вимірюється щодо нульового або майже нульового рівня. Цей малий сигнал легко може бути посилено до високого рівня для подальшої реєстрації.

Вихідна напруга  $\Delta U$  виникає за змінювання опору резисторів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  на величини  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta R_3$ ,  $\Delta R_4$ . Такі змінювання опору виникають, наприклад, унаслідок деформації або зміни температури тензорезисторів.

Відповідно до рівняння (2.13) зміна вихідної напруги  $U$ , яке викликане зазначеними малими змінюваннями опорів, становить

$$\Delta U = \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1 - \eta) U,$$

де  $\eta$  – коефіцієнт, який характеризує похибку (нелінійність моста) та визначається за виразом:

$$\eta = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4}}{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} + 2} \quad (2.15)$$

Залежно від кількості тензорезисторів, що включаються до вимірювального мосту, можливі три модифікації мостової схеми: чверть мостова, півмостова та повний міст (рис. 2.4).

Тензорезистори зазвичай виносяться за межі вимірювального пристрою і розташовуються на досліджуваному об'єкті, тоді як резистори, що доповнюють міст, як правило, розташовані у вимірювальному пристрої. У плечі мосту тензорезистори можна включати послідовно, паралельно та змішано.

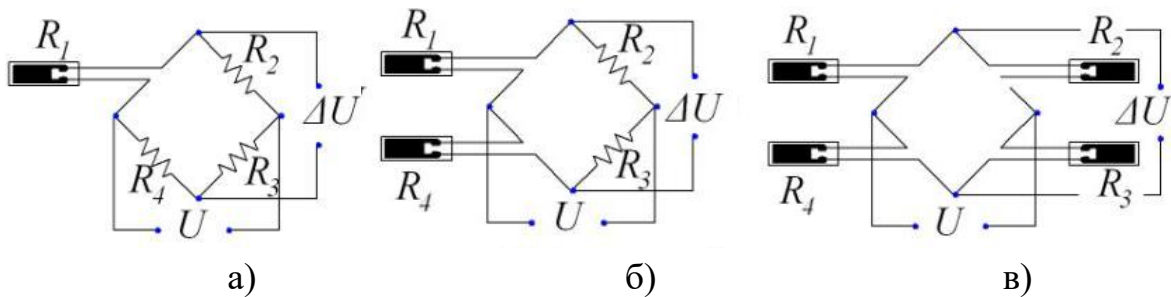


Рис. 2.4. Модифікації вимірювального моста: а) чверть моста, б) півмоста, в) повний міст

Задача № 1.

Розрахувати коефіцієнт тензочутливості  $k$ . Опір тензодавача  $R = 152$  Ом. Опір змінився на 5 Ом під час деформування зразка на 0,5%.

Розв'язання.

Деформація дорівнює  $\frac{\Delta l}{l} = 0,5\% = 0,005$ .

$\Delta R = 5$  Ом

$$k = \frac{(\Delta R/R)}{(\Delta l/l)} = \frac{5}{152 \cdot 0,005} = 6,58$$

Відповідь:  $k = 6,58$

Задача № 2.

Визначити як зміниться опір тензодавача внаслідок деформації 0,0001%. Опір тензодавача 120 Ом. Коефіцієнт тензочутливості 2.

Розв'язання.

$R = 120$  Ом

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = 0,0001\% = 0,000001$$

$$k = 2$$

$$\Delta R = R \cdot \varepsilon \cdot k$$

$$\Delta R = 120 \cdot 0,000001 \cdot 2 = 0,00024 \text{ Ом} = 240 \text{ мкОм}$$

Відповідь:  $\Delta R = 240 \text{ мкОм}$

Задача № 3.

Розрахувати вихідну напругу моста. Вхідна напруга 5 В. Опір тензодавачів 120 Ом. Чверть мостова схема (рис. 2.5). Приріст опору 0,136 Ом.

Розв'язання.

$$R = 120 \text{ Ом}$$

$$\Delta R = 0,136 \text{ Ом}$$

$$U = 5 \text{ В}$$

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

Відповідь:  $\Delta U = 0,0014 \text{ В}$

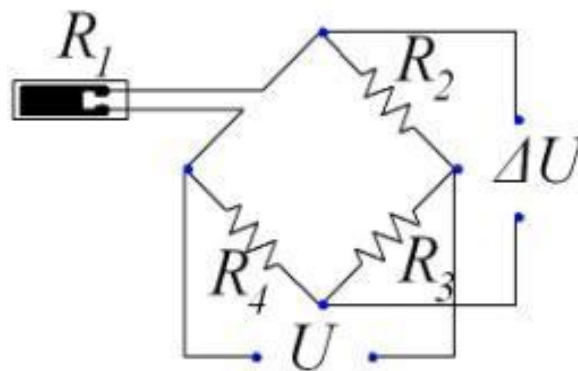


Рис. 2.5. Чверть мостова схема

### Завдання для самостійної роботи

1. Ознайомитись з конструкцією та принципом роботи тензодавачів.
2. Ознайомитись з принципом роботи моста Уінстона.
3. Розв'язати задачі 1, 2 та 3 для свого варіанту.
4. Зробити висновки

Варіанти до задачі № 1

Варіант	$R, \text{ Ом}$	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$	$\Delta R, \text{ Ом}$
1.	100	0,01	2
2.	200	0,015	2
3.	300	0,02	5
4.	400	0,009	3
5.	180	0,008	5
6.	210	0,012	2
7.	150	0,013	6
8.	250	0,014	7
9.	190	0,015	9
10.	120	0,016	1
11.	120	0,02	3
12.	190	0,02	2
13.	100	0,02	3
14.	180	0,009	1
15.	180	0,02	4
16.	120	0,01	3
17.	190	0,02	5
18.	200	0,01	6
19.	200	0,02	7
20.	120	0,02	5

Варіанти до задачі № 2

Варіант	$R, \text{ Ом}$	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$	$k$
1.	100	0,000001	2
2.	200	0,000015	2,1
3.	300	0,000002	2,5
4.	400	0,000009	1,3
5.	180	0,000008	1,5
6.	210	0,0000012	1,2
7.	150	0,0000013	1,6
8.	250	0,0000014	1,7
9.	190	0,0000015	1,9
10.	120	0,0000016	1,1
11.	120	0,000001	3
12.	150	0,000018	3,1
13.	200	0,0000022	2,5
14.	300	0,000007	1,9
15.	120	0,000006	1,8
16.	200	0,0000018	1,5
17.	190	0,000001	1,9
18.	200	0,0000018	1,2
19.	120	0,0000011	2,9
20.	150	0,0000012	1,8

Варіанти до задачі № 3

Варіант	$R, \text{ Ом}$	$\Delta R, \text{ Ом}$	$U, \text{ В}$	Вид моста
1.	100	0,1	5	Чверть моста
2.	200	0,15	10	Півмоста
3.	300	0,2	5	Повний міст
4.	400	0,09	10	Чверть моста
5.	180	0,08	5	Півмоста
6.	210	0,12	10	Повний міст
7.	150	0,13	5	Чверть моста
8.	250	0,14	10	Півмоста
9.	190	0,15	5	Повний міст
10.	120	0,16	10	Чверть моста
11.	220	0,13	10	Чверть моста
12.	100	0,15	5	Півмоста
13.	200	0,2	10	Повний міст
14.	300	0,09	5	Чверть моста
15.	280	0,08	10	Півмоста
16.	100	0,12	5	Повний міст
17.	350	0,13	10	Чверть моста
18.	150	0,14	5	Півмоста
19.	390	0,15	10	Повний міст
20.	220	0,16	5	Чверть моста

### 3 Дослідження консольного згину елементів конструкцій

Мета роботи: Дослідження характеру деформування зразків (на прикладі випробувань балки на консольний згин)

Основними схемами підключення тензодавачів до схеми мосту Уїтстона є чверть моста, півмоста та повний міст. Чверть мостова схема підключення є найбільш надійною та економічною внаслідок малої кількості проводів, але може бути використана тільки у випадку, коли температура навколишнього середовища в процесі випробувань практично не змінюється, інакше температурна зміна опору проводів сприймається вимірювальним пристроєм як деформація.

Півмостова схема дозволяє виключити температурні похибки від нагрівання конструкції та сполучних проводів, також дозволяє отримати подвоєну чутливість. Схема повний міст несприйнятлива до температурних змін тензодавачів, які наклеєні на зразок, і до температурної зміни опору з'єднувальних проводів. Також ця схема дозволяє отримувати підвищення чутливості в порівнянні зі чверть мостовою схемою. Це залежить від рівня вимірюваних деформацій кожним тензодавачем, від знака деформацій, а також від того, в які плечі моста включені тензодавачі.

#### Порядок виконання роботи

Схема прикладання навантаження під час консольного згину показана на рис. 3.1.

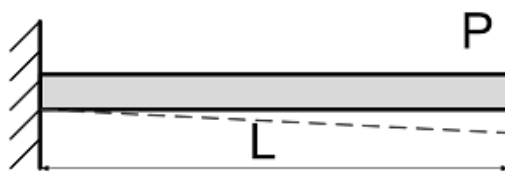


Рис. 3.1. Консольний згин зразка:  $L$  – довжина зразка,  $P$  – навантаження на зразок

У браузері відкрийте сайт за наступним посиланням (рис. 3.2):

<https://sl-coep.vlabs.ac.in/exp/strain-gauge-sensor/simulation.html>

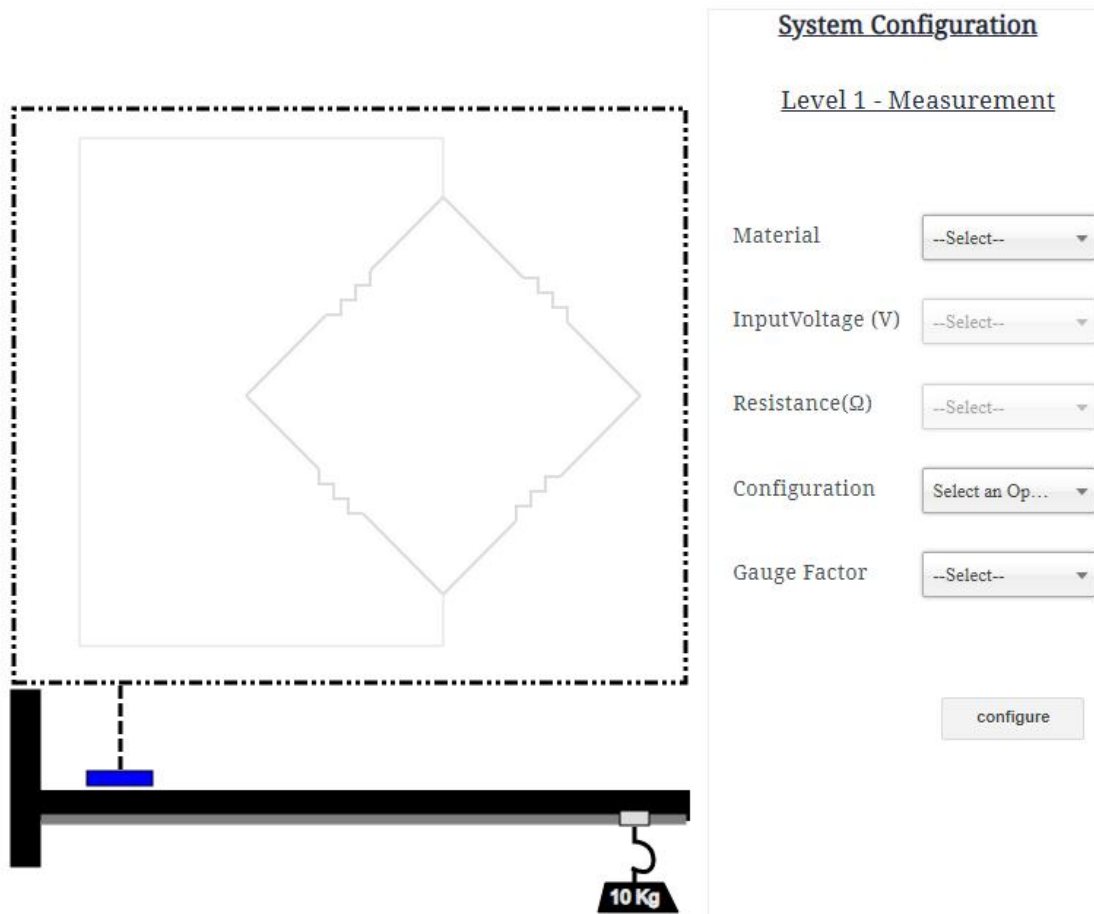


Рис.3.2. Початкове вікно сайту

1. Виберіть матеріал тензодавача із доступного меню, що розкривається. Для вибору натисніть на трикутник біля надпису – Select (Вибрати)– у діалоговому вікні *Material (Матеріал)* (рис. 3.3).

2. Виберіть значення вхідної напруги у вольтах моста Уїтстона, до якого підключений тензодавач. Для вибору натисніть на трикутник біля надпису –Select (Вибрати)– у діалоговому вікні *InputVoltage (V) (Вхідне напруження (V))*.

3. Виберіть опір тензодавача  $R$  в Ом. Для вибору натисніть на трикутник біля надписи – Select (Вибрати)– у діалоговому вікні *Resistance (Ω) (Опір (Ω))*.

4. Виберіть тип моста: чверть моста (рис. 3.4), півмоста (рис. 3.5, рис. 3.6), повний міст (рис. 3.7). Для вибору натисніть на трикутник біля надпису –*Select (Вибрати)*– у діалоговому вікні *Configuration (Конфігурація)*.

5. Виберіть значення коефіцієнта тензочутливості із доступного меню, що розкривається. Для вибору натисніть на трикутник біля надпису – *Select (Вибрати)*– у діалоговому вікні *Gauge Factor (Коефіцієнт тензочутливості)*.

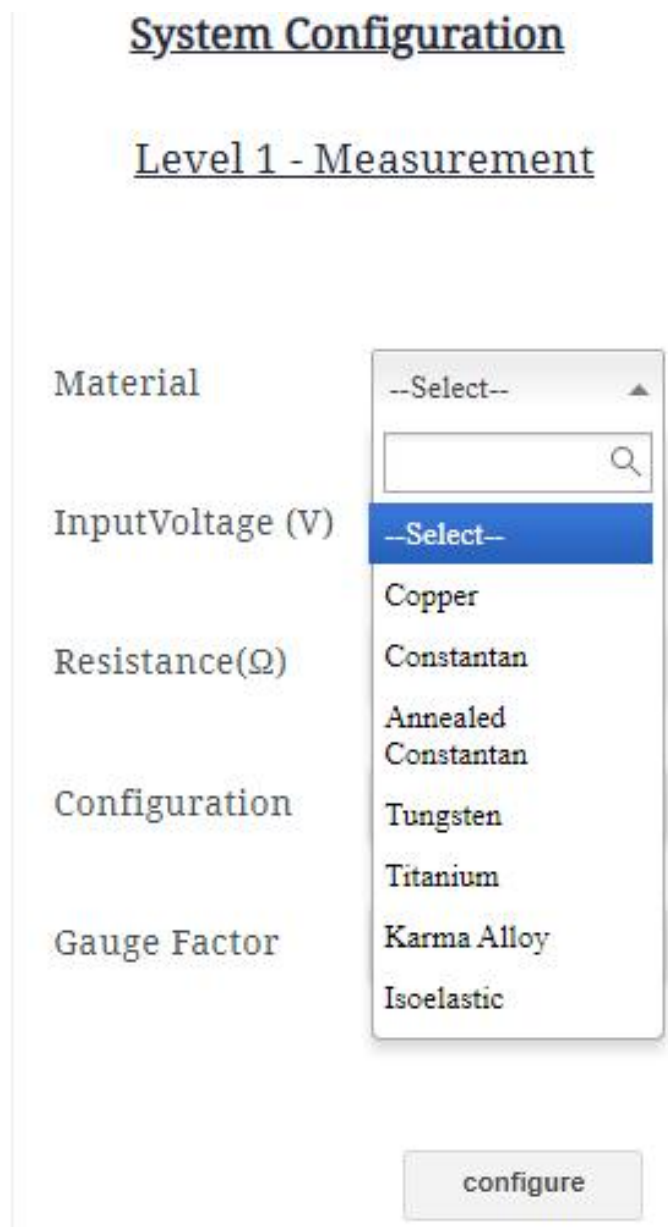


Рис.3.3. Вибір матеріалу тензодавача

6. Натисніть на кнопку *configure* (конфігурація). Для підтвердження конфігурації системи натисніть кнопку *Yes* (Так) (рис. 3.8). Для продовження конфігурування системи натисніть кнопку *No* (Ні) та продовжуйте процес вибору конфігурації системи.

7. Рівень 1 (*Level 1 – Measurement*) для проведення вимірювання буде активовано. Виберіть вагу (в кгс), якою буде навантажуватися консольна балка. Для вибору натисніть на трикутник біля надписи – *Select* (Вибрати)– у діалоговому вікні *Weight(Kg)* (вага (кгс)).

8. Значення опору тензодавача  $R_g$  в омах буде показано у вікні *Value of  $R_g$  (Ω)* (Значення  $R_g$  (Ω)).



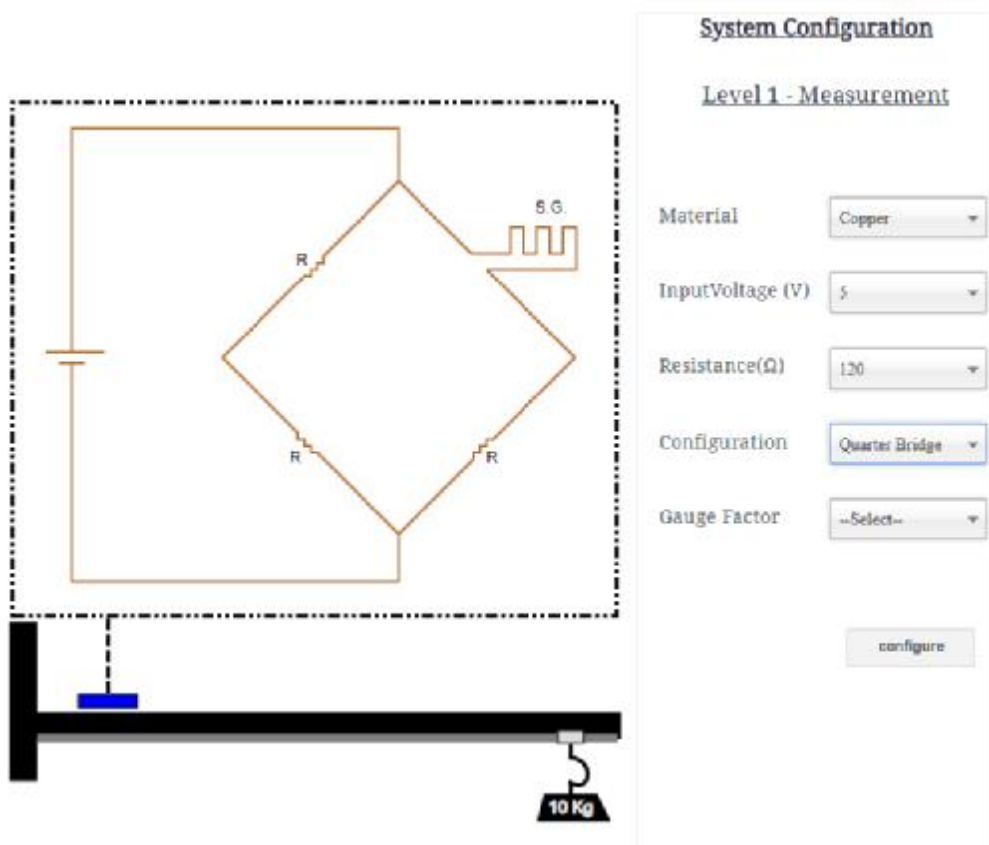


Рис. 3.4. Чверть мостова схема моста Уїтстона

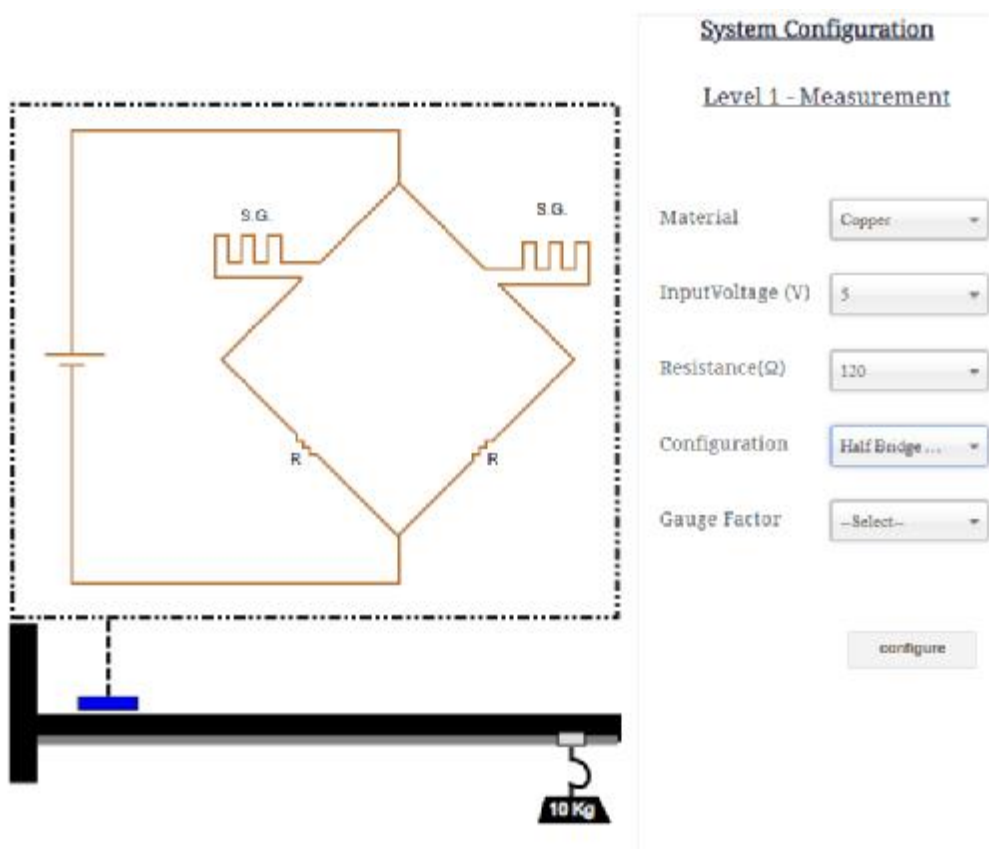


Рис. 3.5. Півмостова схема моста Уїтстона

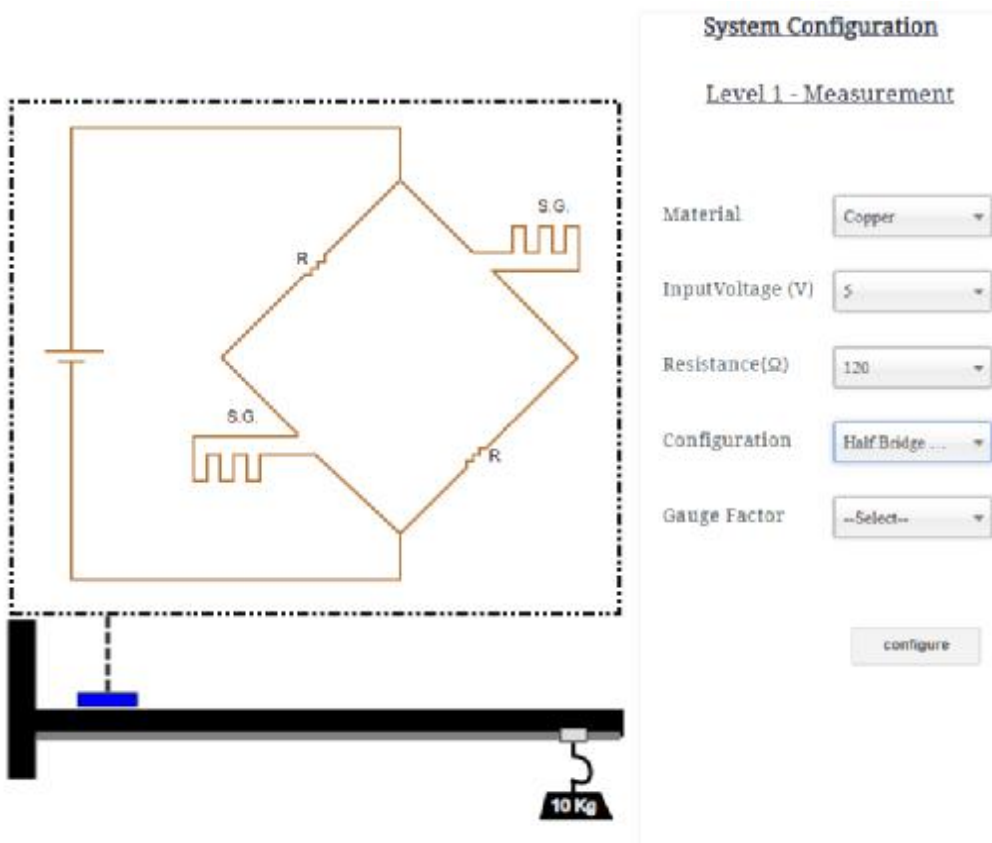


Рис.3.6. Півмостова схема моста Уїтстона

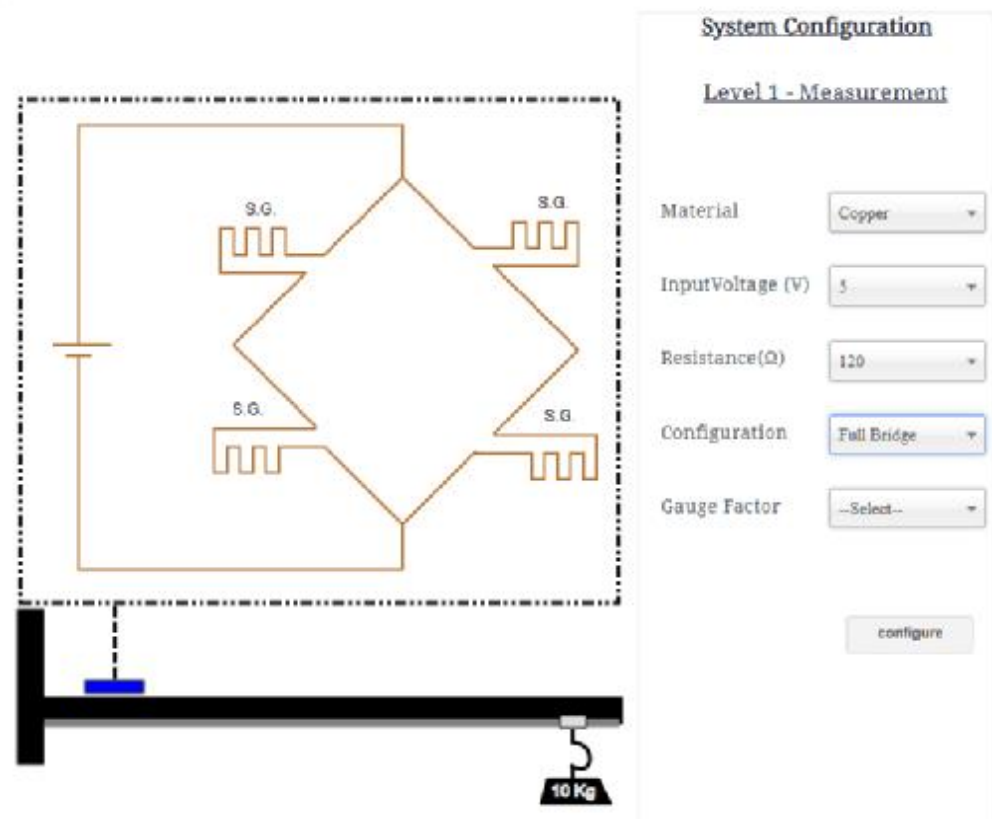


Рис. 3.7. Повний міст Уїтстона

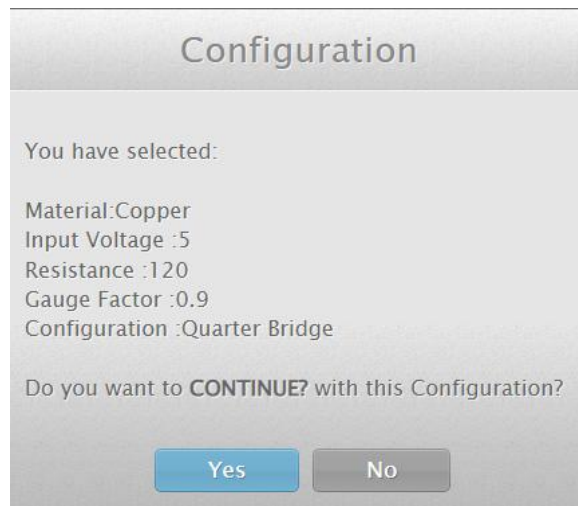


Рис. 3.8. Діалогове вікно *Configuration* (Конфігурація) для наступного варіанта:  
 матеріал – мідь, вхідна напруга  $U = 5$  В, опір тензодавача  $R = 120$  Ом,  
 коефіцієнт тензочутливості  $k = 0,9$

9. Обчислить вихідну напругу  $\Delta U$  та введіть її у мілівольтах у поле діалогового вікна *Enter Output Voltage (in mV)* (Введіть вихідне напруження (в мВ)). Для розрахунку цієї напруги використовуйте наступні формули:

а) для чверті моста:

$$\Delta U = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} U = \frac{1}{4} \frac{(Rg - R)}{R} U, \quad (3.1)$$

б) для півмоста

$$\Delta U = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} U = \frac{1}{2} \frac{(Rg - R)}{R} U, \quad (3.2)$$

в) для повного моста

$$\Delta U = \frac{\Delta R}{R} U = \frac{(Rg - R)}{R} U. \quad (3.3)$$

де  $U$  – вхідна напруга,

$\Delta R$  – зміна опору тензодавача після початку випробувань  
 ( $\Delta R = Rg - R$ ),

$Rg$  – опір тензодавача після навантаження на балку,

$R$  – опір тензодавача.

10. Розраховане значення вихідної напруги  $\Delta U$  введіть у відповідне поле (у форматі 0.00). Натисніть кнопку *Submit* (Відправити).

11. Якщо розрахунок вихідної напруги  $\Delta U$  правильний, буде показано відповідне повідомлення. У іншому випадку кнопка *Submit* (Відправити) змінить на декілька секунд колір на червоний та з'явиться

надпис *Re-calculate* (Перерахувати). Розрахунок  $\Delta U$  потрібно повторити та вставити правильне значення у відповідне поле.

12. Змініть значення ваги у діалоговому вікні *Weight* (Вага) та повторіть кроки з п. 7 по п. 11.

13. Для побудови графіка розрахунок вихідної напруги  $\Delta U$  виконайте п'ять разів. Задавайте наступні значення ваги: 0,5; 1; 2; 4 та 10 кгс.

14. Натисніть на кнопку *Plot* (Графік), щоб побачити графік (рис. 3.9). Проаналізуйте залежність вихідної напруги  $\Delta U$  від навантаження на консольну балку. Переконайтесь у лінійності цього графіка. Виконайте розрахування рівняння регресії методом найменших квадратів.

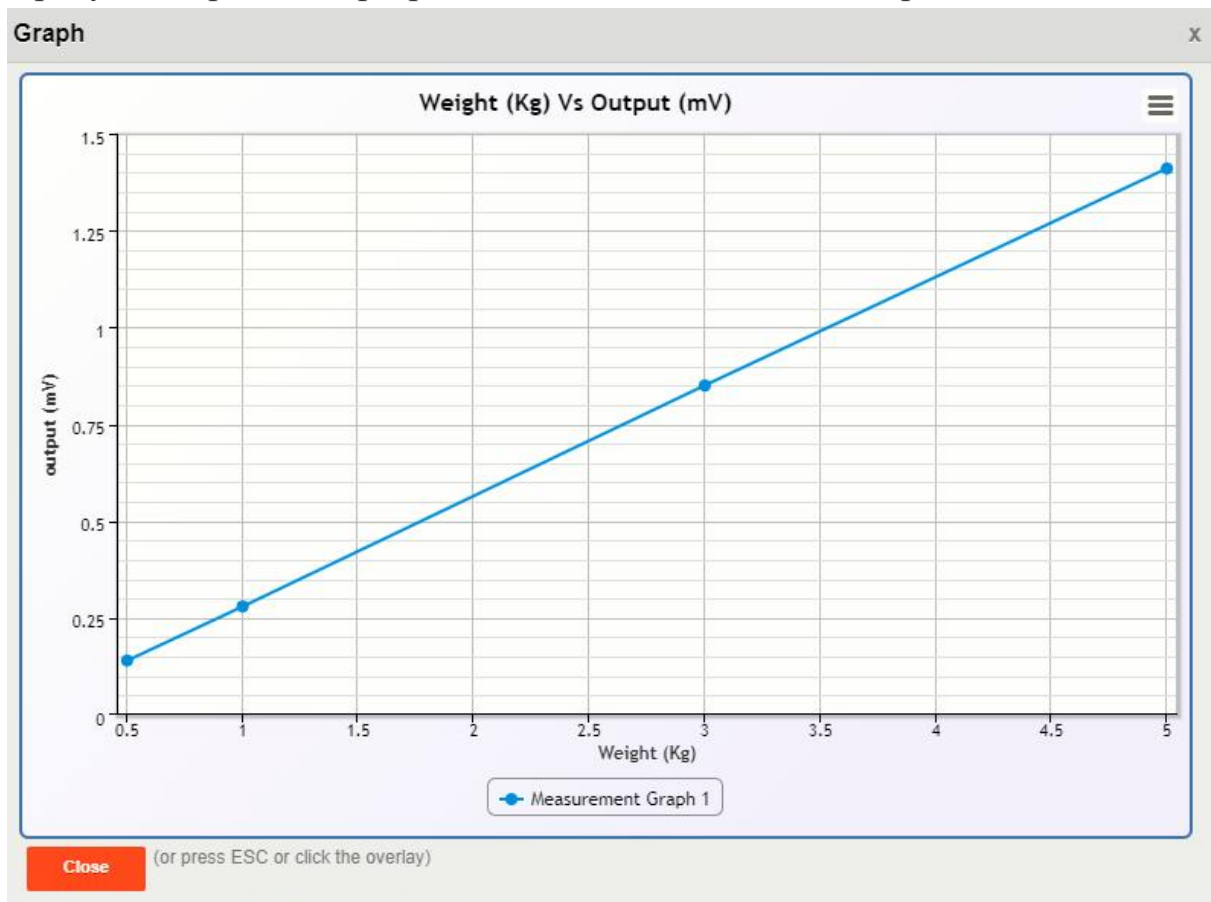


Рис. 3.9. Вікно графіку залежності вихідної напруги  $\Delta U$  (мВ) від ваги (кгс)

15. Закрийте вікно відображення графіка (натисніть кнопку *Close* (Закрити)). Повторіть експеримент. Для цього виконайте змінювання значення вхідної напруги або типів мостів Уїтстона. Проаналізуйте отримані графіки. Для цього використовуйте кнопку *Next set of values* (Наступний набір значень), яка стала активною.

### Завдання для самостійної роботи

Варіанти завдання наведено у таблиці 3.1.

Табл. 3.1. Варіанти завдання

Варіант	Матеріал	Вхідна напруга $U$ , В	Опір тензодавача $R$ , Ом	Тип моста Уїтстона	Коефіцієнт тензочутливості $k$
1	Константан (Constantan)	5	120	Чверть мостовий (рис. 3.4)	0,9
2	Вольфрам (Tungsten)	10	350	Півмостовий (рис. 3.5)	2
3	Титан (Titanium)	5	600	Півмостовий (рис. 3.6)	3,5
4	Сплав Карма (Karma Alloy)	10	700	Повний міст (рис. 3.7)	4,5
5	Сплав Ізоеластик (Isoelastic)	5	1000	Чверть мостовий (рис. 3.4)	5,5
6	Вольфрам (Tungsten)	5	120	Чверть мостовий (рис. 3.4)	0,9
7	Титан (Titanium)	10	350	Півмостовий (рис. 3.5)	2
8	Сплав Карма (Karma Alloy)	5	600	Півмостовий (рис. 3.6)	3,5
9	Сплав Ізоеластик (Isoelastic)	10	700	Повний міст (рис. 3.7)	4,5
10	Константан (Constantan)	5	1000	Чверть мостовий (рис. 3.4)	5,5
11	Константан (Constantan)	5	350	Чверть мостовий (рис. 3.4)	0,9
12	Вольфрам (Tungsten)	10	600	Півмостовий (рис. 3.5)	2
13	Титан (Titanium)	5	700	Півмостовий (рис. 3.6)	3,5
14	Сплав Карма (Karma Alloy)	10	1000	Повний міст (рис. 3.7)	4,5
15	Сплав Ізоеластик (Isoelastic)	5	120	Чверть мостовий (рис. 3.4)	5,5
16	Константан (Constantan)	5	350	Чверть мостовий (рис. 3.4)	2
17	Вольфрам (Tungsten)	10	600	Півмостовий (рис. 3.5)	3,5
18	Титан (Titanium)	5	700	Чверть мостовий (рис. 3.4)	4,5
19	Сплав Карма (Karma Alloy)	10	1000	Повний міст (рис. 3.7)	5,5
20	Сплав Ізоеластик (Isoelastic)	5	120	Чверть мостовий (рис. 3.4)	0,9

Результати спостережень привести у вигляді таблиці 3.2.

Табл. 3.2. Результати вимірювання вихідної напруги тензодавача  $\Delta U$  та деформації консольної балки

Вага, кгс	Вихідна напруга $\Delta U$ , мВ	Деформація $\epsilon$ консольної балки за показниками тензодавача
0,5		
1		
2		
4		
10		

Побудувати графіки залежностей:

- 1) вихідної напруги  $\Delta U$  (мВ) від ваги (кгс);
- 2) навантаження (Н) від деформації консольної балки  $\epsilon$ .

Виконайте розрахунок рівнянь регресії методом найменших квадратів для створених графіків.

Контрольні питання

1. Поясніть вплив температури на тензодавач та засоби його зниження.
2. Як модуль пружності матеріалу впливає на кут нахилу кривої залежності навантаження (Н) від деформації консольної балки  $\epsilon$ ?
3. Надайте хімічний склад матеріалу тензодавача для свого варіанту.
4. Проаналізуйте переваги та недоліки матеріалу тензодавача для свого варіанту.
5. Проаналізуйте типи мостів Уїтстона за чутливістю під час механічних випробувань.
6. Що таке коефіцієнт тензочутливості?
7. Для яких цілей можна використовувати тензодавачі?

## 4 Визначення впливу температури на похибку вимірювання деформації при випробуваннях на згин

Мета роботи: Дослідження впливу температури на тензометричні характеристики тензодавачів (на прикладі випробувань балки на консольний згин)

### Порядок виконання роботи

Схема прикладання навантаження під час консольного згину показана на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Консольний згин зразка:  $L$  – довжина зразка,  $P$  – навантаження на зразок

У браузері відкрийте сайт за наступним посиланням:

<https://sl-coep.vlabs.ac.in/exp/strain-gauge-sensor/simulation.html>

1. Виконайте завдання для свого варіанта у відповідності до практичної роботи № 3 (Дослідження консольного згину елементів конструкцій).

2. Після переходу з рівня 1 (*Level 1 – Measurement*) на рівень 2 (*Level 2–Effect of position*), конфігурація системи та вибрана вага залишаються незмінними.

3. Необхідно вибрати положення ваги, яка прикріплена до консольної балки (рис. 4.1). На початку експерименту відстань між тензодавачем та вагою становила 16 см. Якщо вибрати положення 14 см у діалоговому вікні *Position (in cm) (Відстань (в см))*, то відстань зменшиться на 2 см. Тобто відстань між тензодавачем та вагою буде становити вже 14 см. Спостерігати цю зміну можна на схемі в нижній частині вікна *Level 2–Effect of position (Рівень 2 – Вплив відстані)*.

4. У діалоговому вікні *Output Voltage (in mV) (Вихідне напруження (в мВ))* показано значення вихідної напруги  $\Delta U$ . Порівняйте це значення з значенням, яке отримане на попередньому етапі вимірювання.

Для розрахунку цієї напруги використовуйте наступні формули:

а) для чверті моста:

$$\Delta U = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} U = \frac{1}{4} \frac{(Rg - R)}{R} U, \quad (4.1)$$

б) для півмоста

$$\Delta U = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} U = \frac{1}{2} \frac{(Rg - R)}{R} U, \quad (4.2)$$

в) для повного моста

$$\Delta U = \frac{\Delta R}{R} U = \frac{(Rg - R)}{R} U. \quad (4.3)$$

де  $U$  – вхідна напруга,

$\Delta R$  – зміна опору тензодавача після початку випробувань ( $\Delta R = Rg - R$ ),

$Rg$  – опір тензодавача після навантаження на балку,

$R$  – опір тензодавача.

5. Для побудови залежності вихідної напруги  $\Delta U$  від положення ваги розрахунок виконайте п'ять разів. Задавайте наступні значення: 16; 14; 10; 6 та 2 см.

6. Натисніть на кнопку *Графік (Plot)* для створення графіка. Проаналізуйте залежність вихідної напруги  $\Delta U$  від зміни положення ваги. Переконайтесь у лінійності цієї залежності. Виконайте розрахування рівняння регресії методом найменших квадратів.

7. Закрийте вікно відображення графіка (натисніть кнопку *Close (Закрити)*) та перейдіть на наступний рівень, натиснувши кнопку *Level 3 (Рівень 3)*. Після переходу з рівня 2 (*Level 2 – Effect of position*) на рівень 3, всі параметри, зокрема положення ваги для рівня 1 та рівня 2, залишаються незмінними. Тепер необхідно вибрати температуру, за якої експлуатується тензодавач.

8. Виберіть значення температури в °C із меню, що розкривається. Для вибору натисніть на трикутник біля надписи – *Select (Вибрати)* – у діалоговому вікні *Temperature (°C) (Температура ((°C))*. Температура, яку використовували під час попередніх розрахунків (на рівнях 1 та 2), становила 20 °C.



9. Значення опору тензодавача  $R_g$  відображається в омах у вікні *New Value of  $R_g$  ( $\Omega$ ) (Нове значення  $R_g$  ( $\Omega$ ))*. Порівняйте це значення з попереднім значенням.

10. Для створення графіка необхідно провести розрахунок опору тензодавача  $R_g$  п'ять разів (для температур 10, 15, 25, 30 та 40 °C). Результати спостережень занести в таблицю 4.1.

Табл. 4.1. Зміна опору тензодавача  $R_g$  внаслідок дії температури

Номер досліду	Температура тензодавача, °C	$\Delta T$ , °C	Опір тензодавача $R_g$ , Ом	$\frac{\Delta R}{R}$	$\frac{\Delta R_T}{R}$
1					
2					
3					
4					
5					

11. Натисніть на кнопку *Plot (Графік)* для створення графіка. Проаналізуйте залежність опору тензодавача  $R_g$  від температури. Переконайтесь у лінійності цієї залежності. Виконайте розрахування рівняння регресії методом найменших квадратів.

12. На похибку вимірювання деформації тензодавачами великий вплив має дія температури. За змінюванням температури змінюється початковий опір тензодавача (температурна похибка нуля) та коефіцієнт тензочутливості (температурна похибка чутливості). Змінювання початкового опору тензодавача визначають двома факторами: змінюванням питомого опору  $\rho$  матеріалу як безпосередньо під дією  $\Delta T$ , так і під дією додаткового механічного навантаження, яке виникає в тензодавачі, якщо температурні коефіцієнти лінійного розширення (ТКЛР) деталі (зразка) та тензодавача не рівні. Загальне відносне змінювання опору тензодавача визначається за наступною формулою:

$$\frac{\Delta R_T}{R} = \alpha \Delta T + (\beta_{OK} - \beta_T) \cdot k \Delta T$$

де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору (ТКО);

$\beta_{OK}$ ,  $\beta_T$  – температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу деталі (зразка) та матеріалу тензодавача відповідно;

$k$  – коефіцієнт тензочутливості,

$\Delta T$  – змінювання температури.

Розрахувати значення  $\frac{\Delta R_T}{R}$  для свого варіанта. Результати занести в таблицю 4.1. Данні для розрахунку приведено в таблиці 4.2. Матеріал консольної балки – сталь 08X18H10.

Табл. 4.2. Значення температурного коефіцієнту лінійного розширення та температурного коефіцієнту опору для різних матеріалів

№ п/п	Матеріал	Температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалу, 1/°C	Температурний коефіцієнт опору, 1/°C
1	Константан (Constantan)	$14,97 \cdot 10^{-6}$	-0,000074
2	Вольфрам (Tungsten)	$4,5 \cdot 10^{-6}$	0,0045
3	Титан (Titanium)	$8,5 \cdot 10^{-6}$	0,0013
4	Сплав Карма (Karma Alloy)	$14,97 \cdot 10^{-6}$	-0,000074
5	Сплав Ізоеластик (Isoelastic)	$450 \cdot 10^{-6}$	0,000145
6	Сталь 08X18H10	$11,7 \cdot 10^{-6}$	–

### Завдання для самостійної роботи

Виконати роботу для рівней 1, 2 та 3. Варіанти завдання наведено у таблиці 4.3.

Результати спостережень привести у вигляді таблиці 4.1. Виконайте розрахування відповідних рівнянь регресії методом найменших квадратів.

Табл. 4.3. Варіанти завдання

Варіант	Матеріал	Вхідна напруга, В	Опір тензодавача, Ом	Тип моста Уїтстона	Коефіцієнт тензочутливості $k$
1	Константан (Constantan)	5	120	Чверть мостовий (рис. 3.4)	0,9
2	Вольфрам (Tungsten)	10	350	Півмостовий (рис. 3.5)	2
3	Титан (Titanium)	5	600	Півмостовий (рис. 3.6)	3,5
4	Сплав Карма (Karma Alloy)	10	700	Повний міст (рис. 3.7)	4,5
5	Сплав Ізоеластик (Isoelastic)	5	1000	Чверть мостовий (рис. 3.4)	5,5
6	Вольфрам (Tungsten)	5	120	Чверть мостовий (рис. 3.4)	0,9

Продовження табл. 4.3.

Варіант	Матеріал	Вхідна напруга, В	Опір тензодавача, Ом	Тип моста Уїгстона	Коефіцієнт тензочутливості $k$
7	Титан (Titanium)	10	350	Півмостовий (рис. 3.5)	2
8	Сплав Карма (Karma Alloy)	5	600	Півмостовий (рис. 3.6)	3,5
9	Сплав Ізоеластик (Isoelastic)	10	700	Повний міст (рис. 3.7)	4,5
10	Константан (Constantan)	5	1000	Чверть мостовий (рис. 3.4)	5,5
11	Константан (Constantan)	5	350	Чверть мостовий (рис. 3.4)	0,9
12	Вольфрам (Tungsten)	10	600	Півмостовий (рис. 3.5)	2
13	Титан (Titanium)	5	700	Півмостовий (рис. 3.6)	3,5
14	Сплав Карма (Karma Alloy)	10	1000	Повний міст (рис. 3.7)	4,5
15	Сплав Ізоеластик (Isoelastic)	5	120	Чверть мостовий (рис. 3.4)	5,5
16	Константан (Constantan)	5	350	Чверть мостовий (рис. 3.4)	2
17	Вольфрам (Tungsten)	10	600	Півмостовий (рис. 3.5)	3,5
18	Титан (Titanium)	5	700	Чверть мостовий (рис. 3.4)	4,5
19	Сплав Карма (Karma Alloy)	10	1000	Повний міст (рис. 3.7)	5,5
20	Сплав Ізоеластик (Isoelastic)	5	120	Чверть мостовий (рис. 3.4)	0,9

#### Контрольні питання

1. Поясніть вплив температури на тензодатчик та засоби його зниження.
2. Надайте хімічний склад матеріалу тензодавача для свого варіанту.
3. Проаналізуйте переваги та недоліки матеріалу тензодавача для свого варіанту.
4. Проаналізуйте типи мостів Уїгстона за температурною чутливістю під час випробувань зразків та елементів конструкцій.

## Література

1. Кривуша Л. С., Зайцева Т. О. Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання з дисципліни “Дефекти кристалічної будови” для студентів спеціальності 7.090412 – термічна обробка металів. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. 30 с.
2. Ларіков Л. Н. Структура і властивості металів [Електронний ресурс] : конспект лекцій для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» (освітня програма "Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання") / Ларіков Леонід Нікандрович; КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Сидоренко С. І., Волошко С. М. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,98 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 329 с. – (Серія "Педагогічне надбання: Л.Н. Ларіков.").
3. Холявко В.В. Фізичні основи міцності та руйнування. К. : Вид-во НТУУ КПІ. 2015. 100 с.
4. Максименко О. П., Ізмайлова М. К. Конспект лекцій з дисципліни «Теоретичні основи процесів (за фахом)» Частина І, для здобувачів вищої першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 136 – Металургія за освітньо-професійною програмою «Металургія». Кам'янське : ДДТУ, 2016. 63 с.
5. Інформаційні вимірювальні системи для контролю параметрів та властивостей твердих тіл і матеріалів з покриттям. *Інформаційні та вимірювальні системи: теорія і практика*. Посібник / Г.І. Хімічева та ін. // К. : Основа, 2006. С. 295 – 327.
6. Кузьмич Л. В., Квасніков В. П. Методи та засоби автоматичного контролю та вимірювання параметрів напружено-деформованого стану складних конструкцій : монографія . Київ : Інтерсервіс, 2019. 147 с.