

**АСУ ТП У ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ:  
методичні вказівки до виконання практично-  
лабораторних робіт**

УДК 681.5:669(072)  
А90

Рекомендовано Науково-методичною  
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 3 від «22» листопада 2024 р.)

**Укладачі:**

М. М. Штода, канд. техн. наук., доцент  
О. І. Сімкін, д-р техн. наук, професор

А90 АСУ ТП у прокатному виробництві : методичні вказівки до виконання практично-лабораторних робіт (для студентів спеціальності 136 *Металургія освітня кваліфікація бакалавр з металургії усіх форм навчання*) / уклад.: М. М. Штода, О. І. Сімкін. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 63 с.

Методичні вказівки включають тематику індивідуальних завдань, методичні пояснення щодо порядку їх виконання, критерії оцінювання виконаного індивідуального завдання, вимоги до його оформлення, включаючи зразок титульної сторінки.

Рекомендовано для студентів спеціальності 136 *Металургія освітня кваліфікація ,бакалавр з металургії*, а також студентів, що вивчають «АСУ ТП у прокатному виробництві» як дисципліну вільного вибору.

УДК 681.5:669(072)

**Зміст**

<b>Вступ</b> .....	4
<b>Лабораторна робота № 1</b> Розрахунок приладів виміру температури.....	5
<b>Практична робота № 1</b> Методи вимірювання частоти обертання.....	14
<b>Індивідуальне завдання №1</b> Розрахунок приладів для виміру тиску металу на валки прокатних станів.....	19
<b>Модульна контрольна робота №1</b> Розрахунок приладів для виміру крутильного моменту прокатки.....	32
<b>Практична робота № 2</b> Розрахунок параметрів тензодатчиків опору.....	41
<b>Індивідуальне завдання № 2</b> Розрахунок параметрів вимірювальних ланцюгів приладів з тензодатчиками опору.....	47
<b>Модульна контрольна робота №2</b> Оптимальний розкрій металу на холодильник дрібносортного стану.....	55
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	62
<b>Додаток А</b> .....	63

## Вступ

Автоматизовані системи управління технологічними процесами у прокатному виробництві (АСУ ТП) у прокатному виробництві – це навчальна дисципліна, спеціалізація якої полягає в забезпеченні формування у фахівців як практичних навичок експлуатації автоматизованих систем управління технологічними процесами прокатного виробництва, так і знань про технічне, організаційне, математичне та програмне забезпечення цих систем відповідно до сучасних тенденцій розвитку.

Особливістю дисципліни є докладний аналіз прокатного виробництва з точки зору його автоматизації, враховуючи необхідність застосування конкретної вимірювальної та регулюючої апаратури, технічних засобів автоматизації, мікроконтролерів, відповідного програмного забезпечення, а також SCADA (систем диспетчерського управління та збору даних) й спеціалізованого програмного забезпечення. Набуті в результаті вивчення дисципліни знання можуть бути застосовані при розробці сучасних технічних рішень для керування відповідними технологічними процесами та агрегатами [7].

При проведенні лабораторних та практичних робіт з дисципліни «АСУ ТП у прокатному виробництві» студент повинен закріпити отриманні знання при вивченні лекційного курсу, а також приділити особливу увагу розгляданню наступних питань:

- вибір пристрою для вимірювання температури в умовах процесів обробки металів тиском;
- розрахунок пристроїв для вимірювання тиску металу на валки прокатних станів;
- розрахунок приладів для виміру крутильного моменту прокатки;
- розрахунок параметрів тензодатчиків опору.

У даних методичних вказівках розглянуті питання проектування вимірювальних пристроїв для отримання інформації, необхідної для автоматизації процесів обробки металів тиском. У вказівках наведені приклади розрахунків вимірювальних пристроїв та варіанти індивідуальних завдань.

**Лабораторна робота №1**  
**РОЗРАХУНОК ПРИЛАДІВ ВИМІРУ ТЕМПЕРАТУРИ**  
*(За матеріалами [2, 5, 7]).*

**Загальні теоретичні відомості**

Температура — найважливіший технологічний параметр процесів гарячої обробки металів тиском і, зокрема, прокатки.

У таблиці 1.1 приведені найбільш розповсюджені в даний час термометричні властивості і відповідні їм промислові методи виміру температур.

Таблиця 1.1 – Промислові методи виміру температур

№	Метод виміру	Вимір температури, °С	Термометричні властивості
1	Рідинного скляного термометра	До 700	Об'ємне розширення тіл
2	Манометричних та газових термометрів	До 550	Зміна тиску робочої рідини
3	Дилатометричний	До 1200	Лінійне розширення тіл
4	Термометр опору	До 2500	Електричний опір провідників
5	Термоелектричний	До 2500	Термоелектричні явища
6	Реперних крапок	До 2800	Зміна агрегатного стану тіл
7	Оптичної та радіаційної пірометрії	Від 100 та вище	Інтенсивність теплового випромінювання тіл
8	Кольорової пірометрії	Від 400 та вище	Розподілення енергії у спектрі теплового випромінювання тіл
9	Вимір температур полум'я та плазми	Від 400 та вище	Закономірності спектрального випромінювання газоподібних тіл

Застосування методів 1—6 вимагає безпосереднього контакту термоприймача з досліджуваним тілом чи уведення термоприймача в досліджуване середовище. Інші не вимагають безпосереднього контакту приймача з досліджуванним середовищем і дозволяють здійснювати дистанційний вимір температур з деякої відстані від об'єкта.

Найбільше поширення в прокатному виробництві одержали контактні методи 4 і 5 та безконтактні 7 і 8, у яких зміна температури перетворюється в зміну електричної величини.

Вимір температури металу в прокатному виробництві відрізняється деякими особливостями, основними з яких є наступні.

По-перше, діапазон вимірюваних температур метала надзвичайно широкий: від 100—250 °С при “теплій” прокатці до 1200 °С та вище при

гарячій прокатці легуваних сталей, титана й інших матеріалів. По-друге, середовище, у якій функціонують прилади, характеризується підвищеною вологістю (випар великої кількості води при гидрозбиві окалини й охолодженні прокатних валків), а також непрозорістю (запиленість через наявність часток окалини, масляний туман і т.п.). По-третє, об'єкт (зливок, заготовка, прокат), температура якого вимірюється, найчастіше переміщується з досить високою швидкістю. По-четверте, на металі при гарячій прокатці, як правило (виключенням є прокатка у вакуумі й у середовищі з захисною атмосферою), мається окалина або первинна після нагрівання в печах, або вторинна, що утворюється на поверхні металу в процесі прокатки.

Тому, при гарячій прокатці для виміру температури металу звичайно застосовують швидкодіючі прилади, засновані на безконтактних методах (оптичні і фотоелектричні пірометри). Для виміру температури печей широко використовують термоелектричні і радіаційні пірометри.

Крім того, у деяких випадках необхідно в прокатному виробництві контролювати такі параметри, як температура травильних ванн, температура валків (при підтримці їх профілювання), температура охолоджувальної води і технологічного змащення. Для зазначених цілей широко застосовують контактні методи, у тому числі і термометри опору і термоелектричні пірометри.

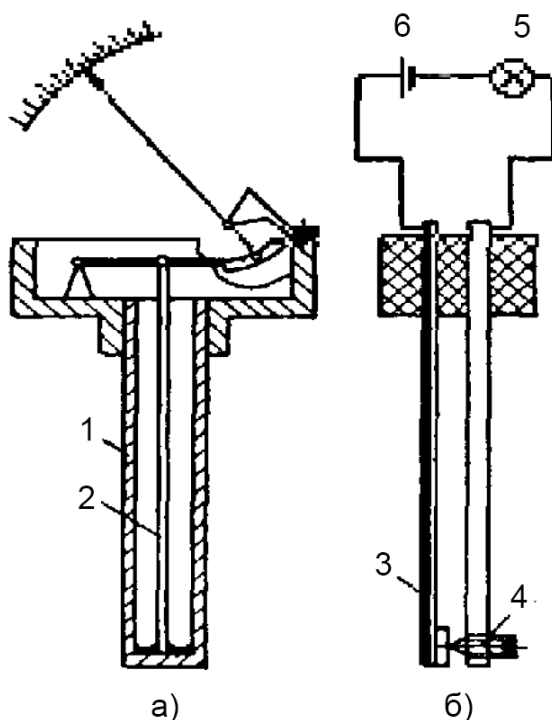
### **Дилатометричні і біметалічні термометри**

Принцип дії дилатометричних і біметалічних термометрів заснований на зміні лінійних розмірів твердих тіл у залежності від зміни їхньої температури.

Так, якщо при  $0^{\circ}\text{C}$  довжина тіла  $L$ , то з підвищенням температури до  $t^{\circ}\text{C}$  довжина тіла зміниться.

Схема пристрою дилатометричного термометра показана на рисунку 1.1, а. Основні частини термометра: сталева чи мідна трубка, що знаходиться в середовищі, температура якого вимірюється, і стрижень, один кінець якого приварений до дна трубки, а інший шарнірно з'єднаний зі стрілкою термометра. Трубку дилатометричного термометра звичайно виготовляють з матеріалу, коефіцієнт лінійного розширення якого значно перевищує коефіцієнт лінійного розширення матеріалу стрижня (алюміній, латунь, червона мідь, інвар).

Принцип дії контактного біметалічного термометра ясний зі схеми, приведеної на рисунку 1, б. Зі збільшенням температури біметалічна пластина термометра, що може бути виготовлена з міді і інвару чи зі сталі й інвару, згинається. При визначеній температурі відбувається розмикання контакту. Сигнальна лампа гасне, сигналізуючи про досягнення заданої температури.



1—трубка; 2—стрижень; 3—біметалічна пластина; 4—контакт;  
5 – сигнальна лампа; 6 – джерело енергії

Рисунок 1.1 – Схема пристрою дилатометричного (а) та біметалічного термометра (б)

Дилатометричні і біметалічні термометри звичайно використовують у виді температурних реле, їх застосовують для сигналізації граничних температур, а також у схемах автоматичних регуляторів температури (наприклад, розчинів у травильних ваннах і технологічному мастилі).

### Термометри опору

Принцип дії термометрів опору заснований на властивості металів змінювати свій електроопір при зміні температури.

Знаючи залежність опору провідника від температури і вимірюючи цей опір яким-небудь приладом, можна вимірювати температуру середовища, у якому знаходиться цей провідник. Термометри опору використовують для виміру температури води, пару і газу в нагрівальних і термічних печах прокатних цехів, а також температури олії в циркуляційних системах прокатних станів. Звичайно чуттєвий елемент намотано на каркас, що поміщений у захисну трубку зі сталі 20 чи 1Х18Н10Т. У більшості випадків каркас зроблений зі слюди, кварцу чи порцеляни.

Межі виміру температур термометрами опору залежать від матеріалу чуттєвого елемента і його конструкції:

Матеріал чуттєвого елемента	Pt	Cu	Ni	Fe
Нижня межа, °C	-200	-50	-50	-50
Верхня межа, °C	500	100	200 – 250	100 – 150

В даний час для виміру температур у різних областях промисловості все більше розповсюдження одержують напівпровідникові термометри опору (термістори). Перевага термісторів перед термометрами опору, виготовленими з металевих дротів, полягає в дуже високій їхній чутливості до температурних змін. Матеріали, використовувані для виготовлення термісторів, дуже різноманітні: суміші окислів сульфідів різних металів чи рідкоземельних елементів.

Однак термістори мають порівняно невисоку стабільність їх градуированих характеристик, що часто обмежує точність виміру температури.

### Термоелектричні пірометри

Термоелектричним пірометром називають термопару з підключеним до неї вимірювальним приладом. За допомогою термоелектричних пірометрів вимірюють температури від 100 до 1300°C. Великими достоїнствами термоелектричних пірометрів є: високий ступінь точності, можливість централізації контролю температур з автоматичним записом, а також можливість градування шкали вимірювального приладу на будь-який температурний інтервал у межах припустимих температур.

Термоелектричні пірометри знаходять широке застосування при вимірі температури різних зон нагрівальних і термічних печей прокатних цехів, а також при визначенні температури металу і технологічного інструмента як у промислових умовах, так і при лабораторних дослідженнях.

Під термопарою прийнято розуміти два різнорідних провідники (термоелектроди), що контактують між собою, принаймні, у двох точках з температурами  $t_1$  і  $t_2$ , причому  $t_1$  не дорівнює  $t_2$ . При рівності температур  $t_1$  і  $t_2$  термопара підкоряється закономірностям ряду Вольта, для якого в ізотермічному замкнутому ланцюзі сумарна електрорушійна сила дорівнює нулю.

При нерівності температур  $t_1$  і  $t_2$  термічна електрорушійна сила термопари, складеної з термоелектродів **a** та **б**, визначається різницею між значеннями температур  $t_1$  і  $t_2$ .

Таким чином, термопара є нескладним перетворювачем температури в електричну величину – різницю потенціалів.

Місце контактування термоелектродів, що поміщається в середовище з вимірюваною температурою  $t_2$ , одержало назву робочого кінця «гарячого спаю» термопари. Інший спай термопари, температура

якого підтримується постійною  $t_1$ , називають її вільним кінцем чи «холодним спаєм» термопар.

Для виміру термічної електрорушійної сили, що розвивається термопарою, у її ланцюг включають вимірювальний прилад між вільними кінцями термопар (рис. 1.2).

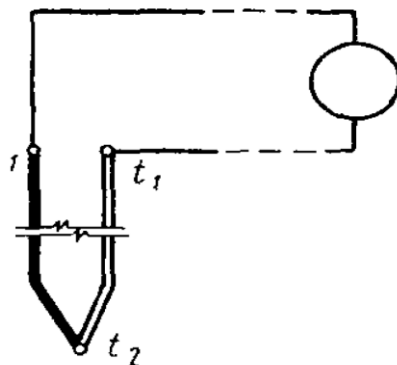


Рисунок 1.2 – Схема підключення вимірювального приладу

У таблиці 1.2 приведено склад ряду провідників термоелектродів, і граничні температури їх застосування.

Таблиця 1.2 – Властивості термоелектродів

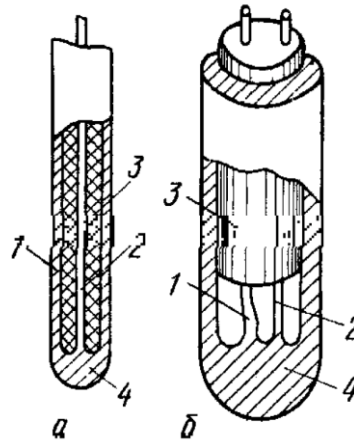
Найменування матеріалу	Позначення (склад), %	Гранична температура використання, °С	
		довготривала	короткотривала
Копель	56Cu + 44Ni	600	800
Алюмель	95Ni + 5(Al, Si, Mg)	1000	1250
Золото	Au	700	900
Платина	Pt	1300	1600
Платинородій	90Pt + 10Rh	1300	1600
Хромель	90Ni + 10Cr	1000	1250

Термопары виготовляють з: 1) благородних металів; 2) неблагородних металів; 3) металевих термоелектродів у парі з неметалами і хімічними сполуками.

Термопары з благородних металів (платинородій-платинова, золото-платинова й ін.) застосовуються в основному як еталонні і зразкові. Термоелектроди з неблагородних металів найчастіше застосовують у сполученнях: мідь-копелева (довготривале використання - 350 °С; короткотривале використання – 500 °С); хромель-копелева (довготривале використання – 600 °С; короткотривале використання – 800 °С); хромель-алюмелева (довготривале використання – 900 °С; короткотривале використання – 1250 °С). Термопары третьої групи (вольфрам-графітові, молібден-графітові) використовують для виміру температур до 2000 °С.

Робочий спай термопар виготовляють або електрозварюванням за допомогою електричної дуги, або спайкою в струмені ацетилену чи

гримучого газу. Термопара може бути трубчастої конструкції (рис. 1.3, а), коли один з термоелектродів виконаний у вигляді трубки, а інший – у вигляді дроту. На всьому протязі аж до робочого спаю зовнішній термоелектрод відділений від внутрішнього ізоляційною прокладкою. На рис. 1.3, б показана термопара з робочим спаєм, привареним до дна захисної трубки, зробленої з міді, бронзи, сталі чи інших матеріалів. Ізоляційний матеріал обирають у залежності від верхніх граничних температур, при яких працює термопара; ними можуть бути гума (до 80 °С), шовк (до 120 °С), емаль (до 150 °С), скляні кульки (до 500 °С), кварцові трубки (до 1500° С).



1, 2–термоелектроди; 3–ізоляційний матеріал; 4–робочий спай

Рисунок 1.3 – Конструкція термопари

### Методика проведення заняття

На початку заняття викладається теоретичний матеріал стосовно теми роботи та проводиться опитування про зміст основних термінів, характеристик та сфер застосування приладів для вимірювання температури, що використовують на виробництві та побуті.

Далі, кожен здобувач освіти отримує завдання відповідно до свого номеру варіанту та виконує розрахунки відповідно до прикладу.

### Приклад розрахунку

Розрахуйте товщини складових елементів біметалічного термометра, прогин пластини та чутливість елемента, якщо температура вимірюваного середовища складає  $t = 300\text{ °C}$ ; довжина пластини  $l = 60\text{ мм}$ ; загальна товщина біметалевої пластини  $h = 1\text{ мм}$ ; модуль пружності першого матеріалу пластини  $E_1 = 16,3 \cdot 10^{10}\text{ Па}$ ; модуль пружності другого металу пластини  $E_2 = 19,6 \cdot 10^{10}\text{ Па}$ ; різниця між коефіцієнтами лінійного розширення матеріалів біметалевої пластини

$$\alpha_1^t - \alpha_2^t = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{°C}}.$$

**Розв'язання:**

З підвищенням температури середовища біметал згинається у бік шару з меншим коефіцієнтом. При цьому прогин кінця біметалевої пластини визначається залежністю

$$\lambda = \frac{3}{2} (\alpha_1^t - \alpha_2^t) \frac{t \cdot l^2}{2h},$$

де  $\alpha_1^t$  і  $\alpha_2^t$  – коефіцієнти лінійного розширення першого та другого металів біметалевої пластини відповідно,  $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ ;  $t$  – температура,  $^\circ\text{C}$ ;  $l$  – довжина біметалевої пластини, мм;  $h$  – загальна товщина біметалевої пластини, мм.

Допустима точність розрахунку витримується при ширині біметалевої пластини менше однієї третини її довжини. Найбільшу чутливість  $\delta = \frac{\lambda}{t}$  має нормальний біметал, коли

$$\frac{h_1}{h_2} = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}},$$

де  $h_1$  та  $h_2$  – товщини кожного з металів у біметалевій пластині відповідно, мм;  $E_1$  та  $E_2$  – модулі пружності кожного матеріалу пластини відповідно, Па.

Тоді спочатку визначаємо співвідношення товщини компонентів пластини біметалу, що забезпечить максимальну чутливість елемента

$$\frac{h_1}{h_2} = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} = \sqrt{\frac{19,6 \cdot 10^{10}}{16,3 \cdot 10^{10}}} = 1,1.$$

Тоді можемо записати для загальної товщини пластини

$$h = h_1 + h_2 = 1,1h_2 + h_2 = 2,1h_2.$$

Звідки

$$h_2 = h / 2,1 = 1 / 2,1 = 0,48 \text{ мм};$$

$$h_1 = 1 \cdot 0,48 = 0,52 \text{ мм}.$$

Прогин кінця пластини біметалу при  $t = 300 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\lambda = \frac{3}{2} (12 \cdot 10^{-6}) \frac{300 \cdot 60^2}{2 \cdot 1} = 9,7 \text{ мм.}$$

Чутливість елемента

$$\delta = \frac{9,7}{300} = 0,032 \frac{\text{мм}}{^{\circ}\text{C}}.$$

### Завдання для самостійної роботи

Розрахувати товщини складових елементів біметалічного термометра, прогин пластини та чутливість елемента для умов відповідно до номера варіанту, наведених у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Вихідні дані для розрахунку біметалічного термометра

№	t, °C	l, мм	h, мм	E <sub>1</sub> , ·10 <sup>10</sup> Па	E <sub>2</sub> , ·10 <sup>10</sup> Па	(α <sub>1</sub> <sup>t</sup> - α <sub>2</sub> <sup>t</sup> ), ·10 <sup>-6</sup> $\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$
1	150	40	0,5	16,6	19,3	8,0
2	160	41	0,6	16,7	19,2	8,5
3	170	42	0,7	16,8	19,1	9,0
4	180	43	0,8	16,9	19,0	9,5
5	190	44	0,9	17,0	18,9	10,0
6	200	45	1,0	17,1	18,8	10,5
7	210	46	1,1	17,2	19,7	11,0
8	220	47	1,2	17,3	19,6	11,5
9	230	48	1,3	17,4	19,5	12,0
10	240	49	1,4	17,5	19,4	12,5
11	250	50	1,5	17,6	19,3	8,0
12	260	51	0,5	17,7	19,2	8,5
13	270	52	0,6	17,8	19,1	9,0
14	280	53	0,7	17,9	16,0	9,5
15	290	54	0,8	18,0	16,9	10,0
16	300	55	0,9	18,1	16,7	10,5
17	310	56	1,0	18,2	16,6	11,0
18	320	57	1,1	18,3	16,5	11,5
19	330	58	1,2	18,4	16,4	12,0
20	150	59	1,3	18,5	16,3	12,5
21	160	60	1,4	18,6	16,2	8,0
22	170	61	1,5	18,7	16,1	8,5
23	180	62	0,5	18,8	17,1	9,0
24	190	63	0,6	18,9	16,0	9,5
25	200	64	0,7	19,0	16,2	10,0
26	210	65	0,8	19,1	16,3	10,5
27	220	66	0,9	19,2	16,4	11,0
28	230	67	1,0	19,3	17,0	12,5

**Питання для контролю знань**

1. Назвіть методи виміру температури, які використовуються у сучасній промисловості.
2. Наведіть переваги та недоліки методів виміру температури.
3. Які властивості повинні мати пристрої виміру температури, котрі призначені для використання у прокатному виробництві?
4. Опишіть принцип дії дилатометричного та біметалічного вимірювача температури.
5. Опишіть принцип дій термометрів опору.
6. Опишіть принцип дії термоелектричних вимірювачів температури робочого середовища.

**Практична робота №1**  
**МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ**  
*(За матеріалами [1, 2, 5, 7]).*

**Загальні теоретичні відомості**

При дослідженні промислових станів застосовують ручний тахометр, стаціонарний тахогенератор чи датчик імпульсів. Ручний тахометр зручно застосовувати лише в тих випадках, коли швидкість обертання електродвигуна постійна. При мінливій швидкості обертання електродвигуна використовують стандартний тахогенератор. Тахогенератор являє собою звичайний колекторний генератор постійного струму з незалежним збудженням. Електрорушійну силу на виході з якоря тахогенератора можна визначити по формулі:

$$E_{\text{я}} = C \cdot \Phi \cdot n,$$

де  $C$  – постійна, залежна від конструкції тахогенератора;  $\Phi$  – потік збудження;  $n$  – частота обертання якоря генератора.

Якщо  $\Phi = \text{const}$ , то  $E_{\text{я}} = f(n)$ , тобто електрорушійна сила тахогенератора є мірою швидкості обертання якоря.

Точність виміру швидкості обертання електродвигуна за допомогою тахогенератора звичайно складає 3 – 4 %.

Для збільшення точності виміру швидкості обертання електродвигуна застосовують датчик імпульсів. Найпростіший датчик імпульсів складається з металевого диска з ізолюючою вставкою, укріпленого на кінці валу двигуна (або прокатного валка, або ролика рольганга тощо) і нерухомого контакту. При влученні контакту на ізолюючу вставку розривається ланцюг гальванометра і на фотоплівці (або на екрані комп'ютера, або у файлі) записується імпульс у виді виступу. Частота обертання рухливої деталі (при одній ізолюючій вставці) визначають по формулі, об./хв.:

$$n = \frac{60}{\tau},$$

де  $\tau$  – відстань між сусідніми виступами, час від початку одного імпульсу до початку наступного, с.

Якщо до диску встановлено  $z$  ізолюючих вставок, то частота визначається по формулі, об./хв.:

$$n = \frac{60}{z \cdot \tau}.$$

Цим методом особливо зручно користатися в тих випадках, коли швидкість електродвигуна залишається практично постійної в процесі прокатки. Погрішність виміру складає 1 – 1,5 %.

При налагодженні безперервних станів необхідно знати швидкість обертання прокатних валків. У цьому випадку для збільшення точності виміру швидкості обертання застосовують цифрові тахометри. Вимір швидкості цифровим тахометром засновано на рахунку імпульсів датчика, встановленого на приводному валу. Найбільше часто використовуються фотоімпульсні датчики, що складаються з обертового диска з радіальними прорізами, з одного боку якого розташований випромінювач лазерного світла, а з іншого – фотодатчик.

Для прикладу розглянемо розрахунок кутової швидкості відцентрового тахометра.

Статична характеристика чутливого елемента відцентрового тахометра розраховується на основі результатів виміру відцентрових сил інерції, що виникають при обертанні твердого тіла. При цьому стала кутова швидкість обертання вхідного валу (рис. 2.1) відповідає відцентровим силам, що утворюються рухомими вантажами, та врівноважується силою пружної протидії пружини:

$$\omega^2 = \frac{4gc_{ж}z}{m_2 n(z_0 - z) \left[ 1 + \frac{2r_m}{\sqrt{4l_m^2 - (z_0 - z)^2}} \right]},$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання валу тахометра, рад/с;  
 $g$  – прискорення вільного падіння, см/с<sup>2</sup>;  $c_{ж}$  – жорсткість пружини, г/см;  
 $z$  – пересування рухливої муфти, см;  $m_2$  – маса вантажу, г;  $n$  – кількість вантажів (парне число);  $z_0$  – довжина пружини у вільному стані, см;  
 $r_m$  – постійна відстань від осі обертання до шарніра тяги, см;  $l_m$  – довжина тяг, см.

Коефіцієнт жорсткості пружини обчислюється за формулою:

$$c_{ж} = \frac{4 \frac{D_{cp}}{d_{op}} + 2}{4 \frac{D_{cp}}{d_{op}} - 3} \cdot 10^3,$$

де  $D_{cp}$  – середній діаметр пружини, см;

$d_{op}$  – діаметр дроту пружини, см.

Число обертів деталі обчислюється за формулою, об./хв.:

$$N_o = 30 \frac{\omega}{\pi}$$

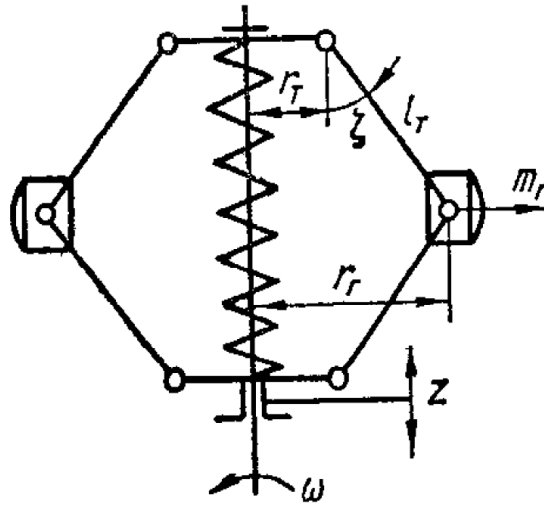


Рисунок 2.1 – Відцентровий чутливий елемент

### Методика проведення заняття

На початку заняття проводиться опитування про основні розуміння стосовно визначення швидкості пересування в прокатному виробництві. Визначаються місця де важливо визначити швидкість прокатки та обертання деталей прокатного стану. Визначаються деталі прокатного стану що обертаються та частота обертів підлягає обов'язковому вимірюванню.

Далі розглядається приклад розрахунку. Після чого, кожен здобувач освіти отримує завдання відповідно до свого номеру варіанту та виконує розрахунки відповідно до прикладу.

### Приклад розрахунку

Збудувати статичну характеристику відцентрового тахометра для наступних даних:  $r_m = 0,8$  см;  $l_m = 4$  см;  $m_z = 10$  г;  $d_{op} = 0,1$  см;  $D_{cp} = 1$  см;  $z_0 = 6$  см. При цьому прийняти прискорення вільного падіння рівним  $981$  см/с<sup>2</sup>, число вантажів дорівнює 2.

### Розв'язання:

Коефіцієнт жорсткості пружини

$$c_{жс} = \frac{4 \frac{1}{0,1} + 2}{4 \frac{1}{0,1} - 3} \cdot 10^3 = 1,14 \cdot 10^2 \frac{г}{см}$$

## Кутова швидкість валу

$$\omega^2 = \frac{4 \cdot 981 \cdot 1,14 \cdot 10^2 z}{10 \cdot 2 \cdot (6-z) \left[ 1 + \frac{2 \cdot 0,8}{\sqrt{4 \cdot 4^2 - (6-z)^2}} \right]} = \frac{2,16 \cdot 10^5 z}{(6-z) \left[ 1 + \frac{1,6}{\sqrt{64 - (6-z)^2}} \right]}$$

Задаючись переміщенням рухливої муфти, обчислюємо відповідні значення окружної швидкості та частоти обертання, що одержує деталь при даному значенні переміщення:

$z$ , см	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50
$\omega$ , рад/с	89	124	184	264	297	356
$N_o$ , об./хв.	852	1190	1757	2522	2838	3400

За цими даними будуємо статичну характеристику (рис. 2.2).

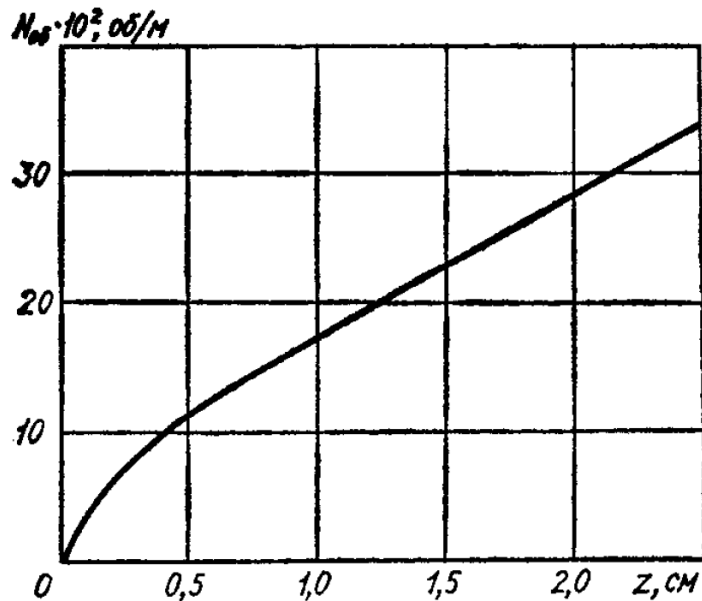


Рисунок 2.2 – Статична характеристика відцентрового чутливого елемента

Робочою ділянкою шкали є діапазон 1000-3500 об./хв., що відповідає практично лінійній ділянці статичної характеристики. При цьому початкова точка шкали забезпечується попереднім стиском пружини на 0,38 см.

### Завдання для самостійної роботи

Збудувати статичну характеристику відцентрового тахометра для даних з табл. 2.1 відповідно до номера варіанту. При цьому прийняти прискорення вільного падіння рівним  $981 \text{ см/с}^2$ , число вантажів дорівнює 2.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку статичної характеристики відцентрового чутливого елемента

№	$r_m$ , см	$l_m$ , см	$m_z$ , г	$d_{оп}$ , см	$D_{cp}$ , см	$z_0$ , см
1	0,50	2,0	10	0,11	0,5	3,0
2	0,55	2,5	11	0,12	0,6	3,5
3	0,60	3,0	12	0,13	0,7	4,0
4	0,65	3,5	13	0,14	0,8	4,5
5	0,70	4,0	14	0,15	0,9	5,0
6	0,75	4,5	15	0,16	1,0	5,5
7	0,80	5,0	16	0,17	1,1	6,0
8	0,85	5,5	17	0,18	1,2	6,5
9	0,90	6,0	18	0,19	1,3	7,0
10	0,95	6,5	19	0,20	1,4	7,5
11	1,00	7,0	20	0,21	1,5	8,0
12	1,05	7,5	21	0,11	1,6	8,0
13	1,10	8,0	22	0,12	1,5	8,5
14	1,15	8,5	23	0,13	1,4	9,0
15	1,20	8,0	24	0,14	1,3	9,5
16	0,50	7,5	25	0,15	1,2	3,0
17	0,55	7,0	26	0,16	1,1	3,5
18	0,60	6,5	27	0,17	1,0	4,0
19	0,65	6,0	28	0,18	2,9	4,5
20	0,70	5,5	29	0,19	2,8	5,0
21	0,75	5,0	30	0,20	2,7	5,5
22	0,80	4,5	29	0,21	2,6	6,0
23	0,85	4,0	28	0,16	2,5	6,5
24	0,90	3,5	27	0,17	2,4	7,0
25	0,95	3,0	25	0,18	2,3	7,5
26	1,00	2,5	20	0,19	2,2	8,0
27	1,05	2,0	15	0,20	2,1	8,0
28	1,10	7,0	10	0,21	2,0	8,5

### Питання для контролю знань

1. Перерахуйте методи виміру частоти обертання деталей приладів прокатного стану.

2. Наведіть переваги та недоліки методів виміру швидкості обертання.

3. Яким чином здійснюється вибір пристрою виміру швидкості обертання для конкретних виробничих або лабораторних умов?

4. Опишіть принцип дії відцентрового тахометра.

5. Опишіть принцип дій імпульсного тахометра.

**Індивідуальне завдання №1**  
**РОЗРАХУНОК ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРУ ТИСКУ МЕТАЛУ НА**  
**ВАЛКИ ПРОКАТНИХ СТАНІВ**  
(За матеріалами [1, 2, 5, 7]).

**Загальні теоретичні відомості**

**Методи виміру**

При прокатуванні без натягу або підпору розкату між клітьями стану або без дії інших зовнішніх сил рівнодіюча тиску металу на валки (сила прокатки) спрямована вертикально. Ця сила через шийки валків передаються до подушок і далі через натискні гвинти і натискні гайки на станини робочої кліті.

Під дією тиску перераховані деталі деформуються, причому величини їх деформацій пропорційні величині тиску.

Тиск металу на валки можна визначити, міряючи деформацію різноманітних елементів кліті або сприймані ними сили.

Найбільше зручно визначати тиск металу по деформаціях стійок станин або по навантаженнях на натискні гвинти.

Для виміру деформації стійок станини застосовують індуктивні і тензометричні датчики переміщення, а також дротові тензодатчики. Датчики переміщення за допомогою кронштейнів закріплюють на стійках станин; тензодатчики наклеюють на ділянки станин, вільні від концентрації напружень. Цей метод не часто застосовують у дослідницькій практиці. Йому властиві такі недоліки: 1) низька чутливість, тому що деформація стійок станини навіть при великих навантаженнях дуже мала; 2) низька точність; 3) необхідність градування датчика кожний раз після кріплення його до станини. Для проведення градування датчика зазвичай утворюють силу що розриває валки один від одного, найчастіше за допомогою гідравлічного або іншого домкрату. Таким чином, процедура градування датчику потребує тривалого припинення роботи стана.

Найбільш часто силу прокатки визначають по навантаженнях, що діє на натискні гвинти. Для цього між натискними гвинтами і подушками замість захисних стаканів установлюють силувимірювачи – месдозы. Переваги цього методу: 1) висока чутливість; 2) велика точність; 3) месдозы можна попередньо проградувати на гідравлічному пресі або іншому обладнанні, яке встановлено окремо від прокатного стану, тому не існує необхідності у зупинці стану; 4) установка месдоз на стані на стані виконується під час перевалки клітей, тому також не потребує додаткових зупинок виробництва. Повну силу металу визначають підсумовуванням отриманих при вимірюванні навантажень на кожний натискний гвинт

$$P = P_1 + P_2,$$

де  $P_1$  і  $P_2$  – сила, що діє на натискний гвинт 1 та 2.

При наявності зовнішніх сил, що діють на осередок деформації, натяг (підпор) металу між клітьми стану, вектор рівнодіючої сили прокатки, що діє на валки з боку металу, відхиляються від вертикалі. У цьому випадку месдозами вимірюють вертикальну складову рівнодіючої сили прокатки.

У випадку виміру сили прокатки в клітьх із попередньо напруженими валками необхідно враховувати силу попереднього навантаження валків. Яку легко виміряти месдозами при налагодженні кліті.

Месдоза складається з пружного елемента – первинного перетворювача, що перетворює навантаження в деформацію, і датчиків, що перетворюють деформацію в електричний сигнал. Вихідні сигнали месдоз після перетворення вимірювальними схемами в тік записуються на фотострічку осцилографом чи (при використанні комп'ютерної техніки) на електронний накопичувач інформації.

У залежності від типу застосовуваного датчика деформації месдоза бувають вугільні, ємкісні, індуктивні, магнітопружні та з тензодатчиками опору.

Найбільше широко застосовуються в дослідницькій практиці та при автоматизації прокатного виробництва месдоза з дротовими і фольговими тензодатчиками опору. Вони порівняно прості по конструкції і мають високі вимірювальні характеристики. У процесі експлуатації спостерігається деяка зміна чутливості цих датчиків, пов'язана зі зміною механічних властивостей клею, що скріплює тензодатчик із пружним елементом. Незважаючи на цей недолік, месдоза з такими датчиками застосовуються також і для стаціонарного контролю тиску металу на валки на виробничих станах.

### **Умови роботи месдоз на стані і вимоги до їхньої конструкції**

Месдоза, установлені під натискні гвинти кліті, працюють в умовах: ударного навантаження (при захваті металу валками); нерівномірного і нестабільного розподілу навантаження по контактних площадках; теплового впливу з боку металу (при гарячому прокатуванні); високої вологості навколишнього середовища.

Ударне навантаження викликає зсув елементів месдоза і зміну мікрогеометрії контактних площадок, що спричиняє за собою перерозподіл навантаження по контактних площадках.

Крім того, ударне навантаження призводить до порушення міцності з'єднань деталей месдоза, а отже, і до розгерметизації захисного корпусу, унаслідок цього в середину корпусу потрапляють вода, пар і мастило (емульсія чи олія), що несприятливо позначається на роботі тензодатчиків.

Одностороннє нагрівання месдоза викликає градієнт температур по перерізу пружного елемента. Якщо при конструюванні месдоза не

враховувати вплив цього чинника, то може спостерігатися значна нестабільність нуля гальванометра.

На підставі викладеного до конструкції месдозы варто пред'явити такі вимоги:

1) месдоза повинна бути достатньо міцною і мати якнайменше деталей і з'єднань;

2) електрична частина месдозы: тензодатчики, провідники що їх з'єднують і вивідні проводи повинні бути надійно захищені від впливу на них вологи, мастила та інших агресивних складових зовнішнього середовища;

3) месдоза повинна бути вкрай чутлива до зміни навантаження і (найголовніше) залежність між навантаженням та величиною деформації пружного елемента месдозы повинна мати лінійний характер;

4) показання месдозы не повинні залежати від незначних перекосів, ексцентричності прикладення навантаження, щільності прилягання та площі контакту між гвинтом та месдозою, тобто точності встановлення месдозы під гвинт;

5) месдоза повинна бути нечутливою до градієнту температур по об'єму пружного елемента.

### **Циліндричний пружний елемент**

На рис. 3.1, а приведений циліндричний пружний елемент із чотирма тензодатчиками, що наклеєні до його бічної поверхні: подовжніми R1, R4 і поперечними R2, R3. При навантаженні елемента силою P тензодатчики R1, R4 сприймають деформації стиску, а тензодатчики R2, R3 – деформації розтягу, що обумовлені коефіцієнтом Пуассона матеріалу елемента.

Тензодатчики з'єднуються один з одним згідно електричної схеми напівміст (рис. 3.1, б) або міст (рис. 3.1, в). Перший варіант з'єднання зазвичай використовують при роботі з тензопідсилювачем, другий – при роботі без нього або при роботі з підсилювачем, якщо він підтримує таку опцію.

Напруги в місцях наліпки тензодатчиків у силу принципу незалежності дії сил, справедливого для пружних тіл, можна розглядати як ті, які складаються з нормальної і дотичної складових.

Пружні елементи месдоз виготовляють із сталей з високою межею пружності (40X, 45X, 35XГСА) із наступним термічним опрацюванням до твердості 40-50 HRC.

Припустимі напруги (напруги при максимальному навантаженні, що вимірюється) вибирають у залежності від характеру навантаження: при ударному навантаженні 100-150 Н/мм<sup>2</sup>; при неударному навантаженні 200-300 Н/мм<sup>2</sup>; а іноді і більш, але не вище 400 Н/мм<sup>2</sup>.

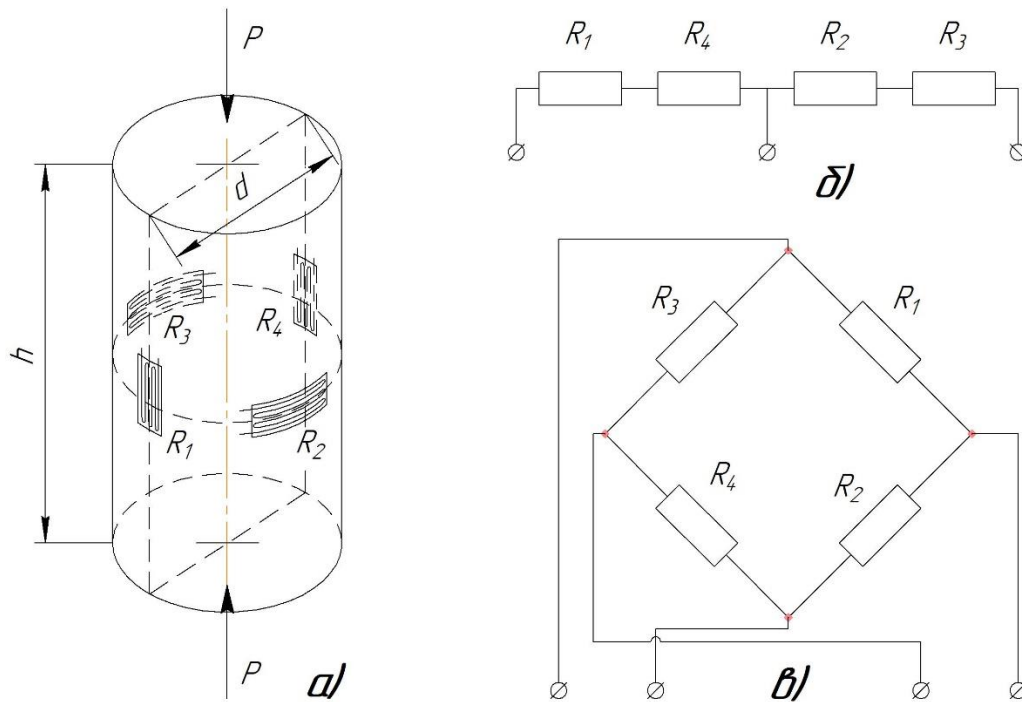


Рисунок 3.1 – Циліндрична месдоза (а) та схеми з'єднання тензодатчиків у електричну схему напівміст (б) та міст (в)

Діаметр циліндричного пружного елемента визначають по формулі

$$d = \sqrt{\frac{4P_{\max}}{\pi\sigma_{\max}}},$$

а сторону пружного елемента у вигляді паралелепіпеда – по формулі:

$$b = \sqrt{\frac{P_{\max}}{\sigma_{\max}}},$$

де  $\sigma_{\max}$  – припустима напруга стискання в пружному елементі, Н/мм<sup>2</sup>.

Висоту циліндричного пружного елемента визначають по формулі  
- для циліндра

$$h = 2,26 \cdot \sqrt{\frac{P_{\max}}{\sigma_{\max}}} + l_{\delta},$$

де  $l_{\delta}$  – базова довжина датчика (робоча довжина тензодатчика).

- для паралелепіпеду

-

$$h = 2,87 \cdot \sqrt{\frac{P_{\max}}{\sigma_{\max}}} + l_{\sigma}.$$

Отже, для того самого відношення  $\frac{P_{\max}}{\sigma_{\max}}$  пружний елемент у вигляді паралелепіпеду є більш високим.

### Кільцевий пружний елемент

Кільцевий пружний елемент приведено на рис. 3.2. Тензодатчики на такому елементі можна наклеїти в подовжньому та поперечному напрямках на зовнішній або на внутрішній поверхнях.

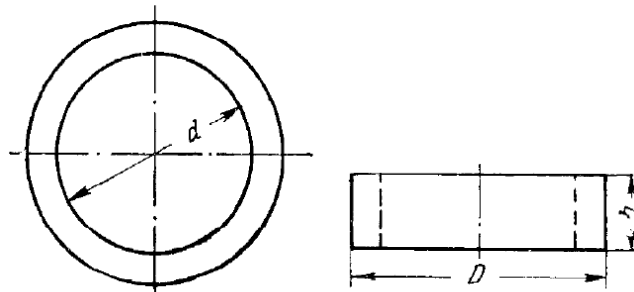


Рисунок 3.2 – Кільцевий пружний елемент

У месдозах для вимірювання сили застосовують звичайно низькі кільцеві елементи з відношенням  $h/D < 1$ . Для великих навантажень порядку 10 МН приймають  $h/D = 0,25$ .

Навіть при самому ретельному опрацюванні контактних поверхонь пружного елемента та проміжних деталей забезпечити стабільність деформацій у місцях наклеювання тензодатчиків (посередині висоти елемента) дуже важко, особливо на початковій ділянці навантаження.

При наклеюванні на пружний елемент невеличкої кількості поздовжніх тензодатчиків можливий такий випадок, коли частина з них не буде сприймати деформацію.

При розташуванні тензодатчиків тільки на зовнішній або внутрішній сторонах кільця показання месدوزи залежать від розподілу навантаження на контактні у напрямку радіусу кільця. Для виключення таких похибок показань необхідно наклеювати поздовжні тензодатчики на зовнішню і на внутрішню сторони кільця.

Число поздовжніх тензодатчиків, при якому пружний елемент мало чутливий до виду навантаження, повинно складати

$$Z_{\text{пр}} = Z_{\text{пр.зовн}} + Z_{\text{пр.внут}},$$

де  $Z_{\text{пр.зовн}}$ ,  $Z_{\text{пр.внут}}$  – числа подовжніх тензодатчиків відповідно на зовнішній і внутрішній сторонах кільця.

При роботі без тензопідсилювача на пружний елемент необхідно наклеїти таке ж число поперечних тензодатчиків, щоб можна було скласти мостову схему. Поперечні тензодатчики наклеюють на зовнішню та внутрішню сторони кільця в проміжках між подовжніми тензодатчиками.

При вмиканні в міст числа подовжніх і поперечних тензодатчиків повинні бути кратні двом, що накладає визначені обмеження на розміри кільця. Крім того, розміри кільця повинні також задовольняти умові

$$h \geq D - d + l_{\sigma},$$

де  $l_{\sigma}$  – довжина бази, що є характеристикою тензодатчиків які наклеюють на пружний елемент месдозы.

Зовнішній діаметр кільця приймають з урахуванням діаметра п'яти натискного гвинта, а його висоту – виходячи з висотного габариту месдозы, що обмежується відстанню між п'ятою натискного гвинта і площадкою на подушці верхнього валка (звичайно  $h < 100-120$  мм).

Внутрішній діаметр кільця  $d$  розраховують по формулі

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{4P_{\text{max}}}{\pi \sigma_{\text{max}}}},$$

де  $P_{\text{max}}$  – максимальна сила, яку може вимірювати месдоза, зазвичай приймають виходячи із практичних даних;  $\sigma_{\text{max}}$  – межа текучості при стисканні для матеріалу пружного елемента месдозы.

Остаточно розміри кільця  $D$ ,  $d$  і  $h$  підбирають так, щоб  $Z_{\text{пр.зовн}}$  та  $Z_{\text{пр.внут}}$  були цілі числа.

### **Круглий мембранний пружний елемент**

Конструкція круглого мембранного пружного елемента приведена на рис. 3.3. Навантаження прикладається до елемента по круглій площадці на зовнішній стороні мембрани. Тензодатчики наклеюють на внутрішню сторону мембрани. Внутрішня порожнина елемента закривається кришкою.

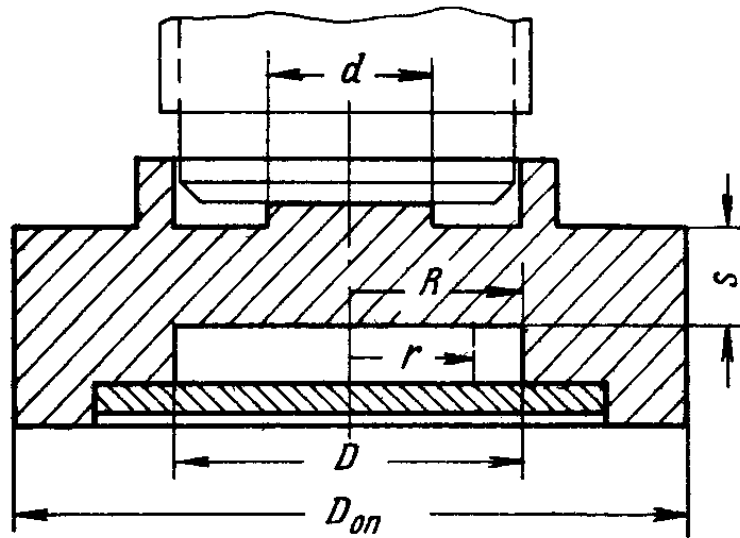


Рисунок 3.3 – Круглий мембранний елемент

Переваги месدوزи з таким пружним елементом такі: проста конструкція, мінімальна кількість деталей; порівняно невеликі габарити по висоті та надійний захист тензодатчиків від шкідливих впливів, що спостерігаються при виробництві прокатної продукції.

Мембранні пружні елементи можуть застосовуватися для навантажень до 1500 кН (150 Т). Для більш великих навантажень вимушено збільшують розміри пружного елемента (перш за все товщину), що є найбільшим недоліком мембранних месдоз.

На підставі досліджень рекомендовано два варіанти розташування тензодатчиків на внутрішній стороні мембрани (рис. 3.4).

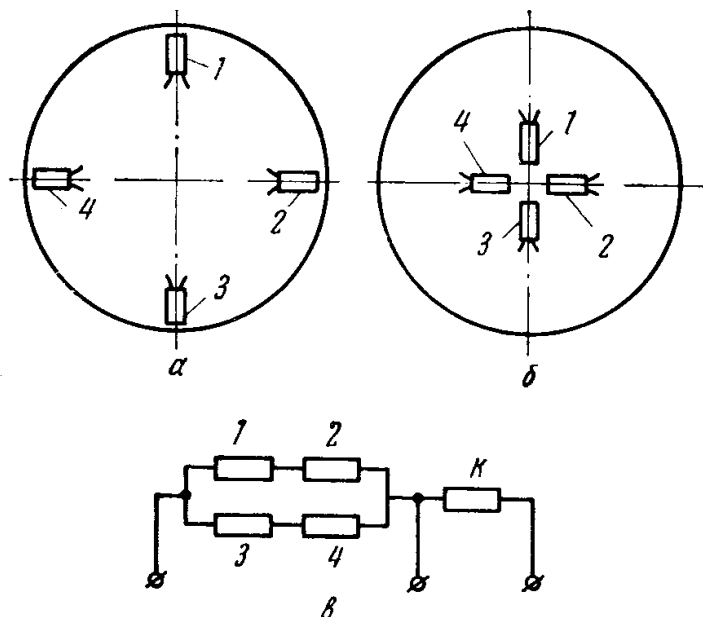


Рисунок 3.4 – Варіанти розташування тензодатчиків на внутрішній стороні мембрани (а, б) та схеми з'єднання їх у напівміст (в)

Варіант **а** застосовують при відношенні товщини мембранного елемента до його діаметру менше ніж 1 до 3 ( $\frac{s}{D} < \frac{1}{3}$ ), тобто коли діаметр площадки навантаження менше товщини мембрани ( $d < s$ ) та на величину деформацій у центральній частині мембрани впливають тангенціальні сили на контактній поверхні, викликані тертям, що призводять до нестабільності показань месдозы.

Варіант **б** застосовують при відношенні товщини мембранного елемента до його діаметру більше ніж 1 до 3 ( $\frac{s}{D} > \frac{1}{3}$ ), коли вплив дотичних сил можна не враховувати.

Обидва варіанти розташування тензодатчиків виключають вплив зсуву центру прикладення навантаження від осьової лінії.

На рис. 3.5 приведено графік залежності максимальної напруги  $\sigma_{\max}$  у мембрані (у центрі) від відношення  $\frac{s}{D}$  для  $\frac{d}{D} = 0,5$ .

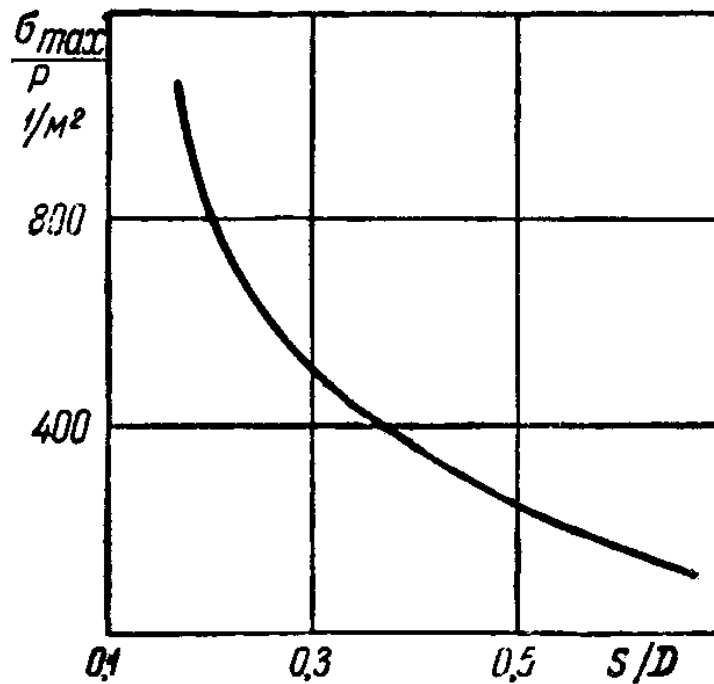


Рисунок 3.5 – Залежність максимальної напруги на внутрішній стороні мембрани від відношення  $\frac{s}{D}$

Цим графіком можна скористатися при виборі товщини мембрани  $s$  для заданих навантажень  $P_{\max}$  і припустимої напруги для матеріалу мембрани  $\sigma_{\max}$ .

Нехай, наприклад,

$$P_{\max} = 0,5 \text{ МН (50 т)} \text{ та } \sigma_{\max} = 200 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2} \left( 20 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \right).$$

$$\text{Тоді для } \frac{\sigma_{\max}}{P_{\max}} = \frac{200}{0,5} = 400 \frac{1}{\text{м}^2}.$$

З графіку (рис. 3.5) знаходимо  $\frac{s}{D} \approx 0,36$ .

Звідки товщина мембрани при її діаметрі 120 мм

$$s = 0,36 \cdot D = 0,36 \cdot 120 \approx 43 \text{ мм}.$$

### Прямокутний мембранний пружний елемент

Для лабораторних досліджень сили прокатки можливе використання месдоз більш простої конструкції. Це месдоза з прямокутним пружним елементом (рис. 3.6).

Недоліком такої месدوزи є погана захищеність тензодатчиків від шкідливого впливу навколишнього середовища. До переваг можна віднести дуже просту конструкцію месдоз, що полегшує їхнє виготовлення та проектну роботу, а також зручність в експлуатації.

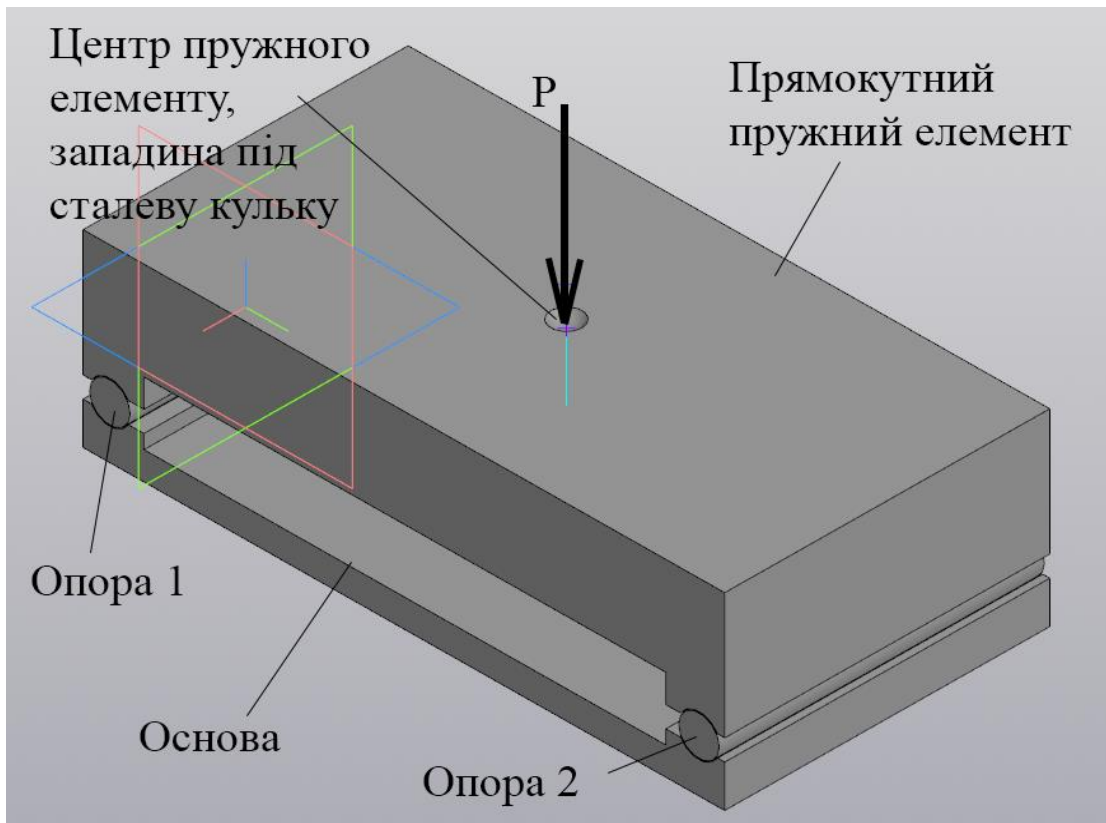


Рисунок 3.6 – Прямокутний пружний елемент

Хід розрахунку мембранних месдоз із прямокутним пружним елементом:

1. Визначають припустиму деформацію (стріла прогину) пружного елемента по формулі:

$$\lambda_{\text{прун.}} = \frac{g}{\omega_0^2} = \frac{g}{100\omega^2},$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\frac{\text{мм}}{\text{с}^2}$ ;

$\omega_0$  – власна кругова частота датчика,  $\frac{\text{об.}}{\text{с}}$ ;

$\omega$  – кругова частота процесу, що підлягає виміру,  $\frac{\text{об.}}{\text{с}}$ ;

$\lambda_{\text{прун.}}$  – припустима стріла прогину мембранного датчику, мм.

2. Кругова частота досліджуваного процесу визначається по формулі:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f,$$

де  $f$  – максимальна частота процесу, що підлягає виміру, Гц.

Значення частоти обирають з таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Частотні характеристики прокатних станів

Тип стану	За розрахунковими значеннями		Максимальні частоти процесу $f$ , Гц
	максимальний момент $M_{\text{макс}}$ , $\text{т}\cdot\text{м}$	максимальна сила $P_{\text{макс}}$ , $\text{т}$	
Блюмінг 1100	150	-	0 - 10,55
Слябінг 1120	136 - 241	-	0 - 14,10
Безперервно-заготівельний стан 720	79,7 - 79,9	-	0 - 9,40
Рейко-балковий стан	26,17 - 46,75	-	0 - 10,0
Середньосортний п'ятикльтьовий стан тріо 400	8,413	86,5 - 100,3	0 - 44,0
Обтискна кліть середньосортного стану тріо 620	19,44	173	0 - 24,8

<b>Листові стани:</b> трьохкльтьовий листовий стан 730	44,85	-	0 - 13,0
двохкльтьовий стан дуо 630 x 1300	13,38	12,4	0 - 19,8
однокльтьовий стан дуо 630 x 1300	12,89	256	0 - 27
<b>Стани холодної прокатки:</b> двохкльтьовий стан дуо 630 x 1300	7,12	189	0 - 3,6
реверсивний стан 400 x 800	4,775	181,5	0 - 3,6
стан 300 x 450	0,4578	90,75	0 - 4,1
шестивалковий стан 460	0,4224	90,75	0 - 3,6

3. З конструктивних розумінь приймають довжину і ширину пружного елемента та, знаючи величину максимальної сили, що буде досліджуватися, розраховують товщину пружного елемента:

$$h = \sqrt{\frac{3 \cdot P \cdot l}{b \cdot \sigma_m}},$$

де  $h$  – товщина пружного елемента, мм;

$P$  – максимальна сила прокатки, що можна досліджувати за допомогою месдози, Н;

$l$  – довжина пружного елемента, мм;

$b$  – ширина пружного елемента, мм;

$\sigma_m$  – межа текучості для матеріалу пружного елемента месдози, МПа.

4. Розраховується стріла прогину при розрахованій товщині:

$$\lambda = \frac{Pl^3}{48EI},$$

де  $E$  – модуль Юнга для матеріалу, з якого виготовляється пружний елемент, МПа;

$I$  – момент інерції для перерізу пружного елемента, мм<sup>4</sup>.

$$I = \frac{bh^3}{12}.$$

Якщо  $\lambda \leq \lambda_{прун}$ , то розрахунок вважають задовільним і залишають отримані значення. У протилежному випадку або зменшують довжину пружного елемента, або збільшують його товщину (чи ширину), і, після відповідного коректування, знову повторюють розрахунок, починаючи з пункту 3.

### Приклад розрахунку

Розрахувати прямокутний пружний елемент на максимальне вимірвальна сила 20 т (200 кН) для середньосортного стану.

### Розв'язання:

З таблиці 3.1 обираємо частоту для стану  $f = 10$  Гц.

Тоді кругова частота досліджуваного процесу буде дорівнювати

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 = 62,8 \frac{\text{об.}}{\text{с}}.$$

Розраховуємо припустиму стрілу прогину

$$\lambda_{прун.} = \frac{9869}{100 \cdot 62,8^2} = 0,025 \text{ мм}.$$

Приймаємо робочу довжину пружного елемента 100 мм, а ширину – 60 мм. Приймаємо, що пружний елемент виготовляється зі сталі 45, для якої  $\sigma_T = 360$  МПа ;  $E = 2,04 \times 10^5$  МПа.

Тоді висота пружного елемента

$$h = \sqrt{\frac{3 \cdot 200 \cdot 100}{60 \cdot 360}} = 52,7 \approx 55 \text{ мм}.$$

Обчислюємо момент інерції перерізу пружного елемента

$$I = \frac{60 \cdot 55^3}{12} = 831875 \text{ мм}^4.$$

У даному випадку стріла прогину буде складати

$$\lambda = \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 100^3}{48 \cdot 2,04 \cdot 10^5 \cdot 831875} = 0,0245 \text{ мм}.$$

Так як умова  $\lambda \leq \lambda_{прун}$  виконується, то коректування розмірів пружного елемента не потрібна. Остаточні приймаємо розміри елемента:  $h = 55$  мм;  $b = 60$  мм ;  $L = 100$  мм.

Інші розміри месдозы приймаються конструктивно.

### **Завдання для самостійної роботи**

Розрахувати параметри циліндричної, кільцевої та мембранних месдоз для максимальної сили прокатки  $P_{max} = 10 \cdot 0,8N$  (т), де  $N$  – номер варіанту. Матеріал пружного елемента – сталь 45. Тип стану обрати відповідно до сили прокатки (див. табл. 3.1).

### **Питання для контролю знань**

1. Для чого використовуються месдозы?
2. Яким чином здійснюється вимірювання сила, що діє з боку металу на валки прокатних станів?
3. Яким вимогам повинні відповідати пристрої вимірювання, які використовуються у прокатному виробництві?
4. Які основні типи вимірювачів сили ви знаєте та яка між ними різниця?
5. Опишіть правила встановлювання вимірювачів тиску.

## Модульна контрольна робота №1 РОЗРАХУНОК ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРУ КРУТИЛЬНОГО МОМЕНТУ ПРОКАТКИ

(За матеріалами [1, 2, 5, 7]).

### Загальні теоретичні відомості

Повний момент прокатки, який дорівнює сумі моментів валків можна визначити наступними методами.

1. По записаним кривим (осцилограмам) електричної потужності  $N$  і оборотам  $n$  приводного електродвигуна

$$M_{np} = \left[ \frac{9,55(N - N_{x.x.})\eta_{\partial}}{n} - M_{\partialин} \right] i_{n.m.} \cdot \eta_{n.m.} - M_{т.n.}$$

де  $N$ ,  $N_{x.x.}$  – потужність прокатки та холостого ходу, відповідно;

$\eta_{\partial}$  – к.к.д. електродвигуна головного приводу кліті;

$n$  – частота обертання електродвигуна;

$M_{\partialин}$  – динамічний крутильний момент, приведений до вала електродвигуна;

$i_{n.m.}$  – передатне число механізмів головної лінії кліті;

$\eta_{n.m.}$  – к.к.д. механізмів головної лінії кліті;

$M_{т.n.}$  – момент тертя приводних механізмів головної лінії кліті.

2. По записаній кривій (осцилограмі) сили прокатки  $P$ , якщо відоме плече  $a$  моменту:

$$M_{np} = 2 \cdot a \cdot P.$$

3. По обмірюваним за допомогою спеціальних приладів крутильним моментам на шпинделях валків чи на корінному валу.

Перший метод незручний, якщо прокатка ведеться з перемінною швидкістю, як наприклад на блюмінгу, і необхідно обчислювати динамічний крутильний момент  $M_{\partialин}$ . Другий метод характеризується невисокою точністю, тому що звичайно невідомо з достатньою точністю плече моменту. Третій метод самий точний, але на промислових станах доволі важкий у обслуговуванні та слабо захищений від випадкових руйнувань деталей вимірювачів при перевалках та в процесі експлуатації станів. В той самий час в лабораторних умовах цей недолік не настільки важливий. Тому при лабораторних дослідженнях

найчастіше використовують прямий метод вимірювання моменту прокатки, а на виробництвах – перший з перелічених методів.

При зміні крутильних моментів на шпинделях валків повний момент прокатки визначають по формулі

$$M_{np} = M_{\epsilon} + M_{\eta} - M_{m.n.} - 2M_{x.x.ш},$$

де  $M_{\epsilon}$  та  $M_{\eta}$  – обмірювані крутильні моменти, на верхньому і нижньому шпинделях;

$M_{x.x.ш}$  – обмірюваний крутильний момент, на шпинделях при холостому ході стану.

При вимірі крутильного моменту на корінному валу момент прокатки знаходять по рівнянню

$$M_{np} = M_{\kappa} \cdot i_{n.m.} \cdot \eta_{n.m.} - M_{m.n.} - 2M_{x.x.к},$$

де  $M_{x.x.к}$  – обмірюваний момент, на корінному валу при холостому ході стану.

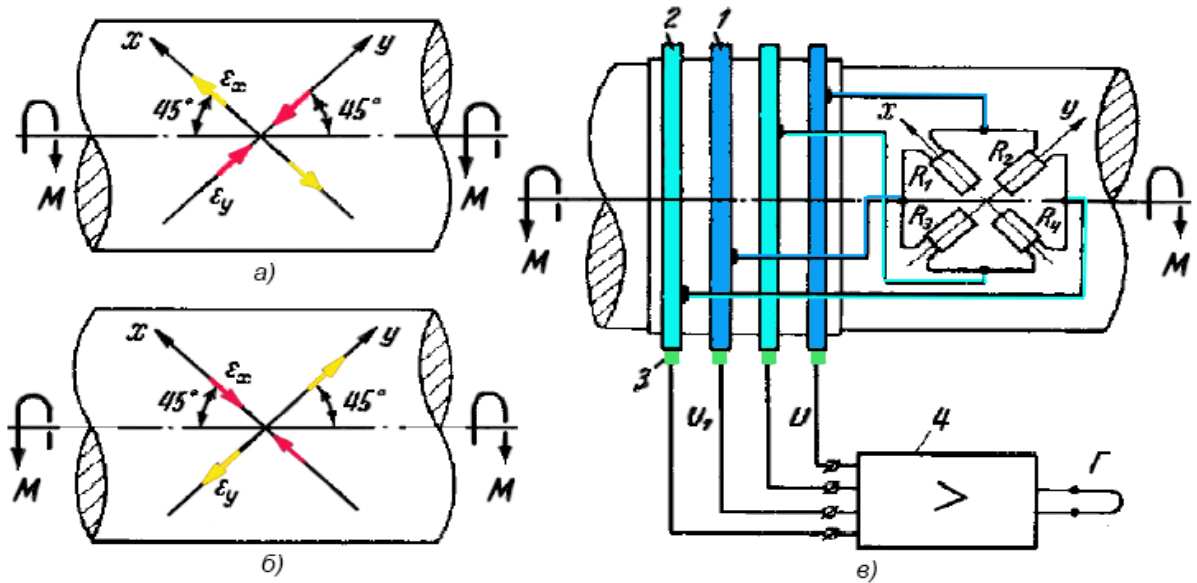
Точність визначення моменту прокатки, залежить від точності визначення втрат на тертя.

### **Вимір крутильного моменту за допомогою тензодатчиків опору**

При скручуванні валу моментом, який він передає, найбільші поверхневі деформації спрямовані по двох взаємно перпендикулярних осях  $x$  та  $y$ , нахилених під кутом  $45^{\circ}$  до осі валу. Причому ці деформації рівні по величині і протилежні за знаком (рис. 4.1, а, б).

При напрямку скручування валу, показаному на рис. 4.1, а по осі  $x$  діють деформації розтягання, а по осі  $y$  – деформації стиску.

Якщо наклеїти на вал чотири тензодатчика так, щоб подовжні осі двох з них збігалися з віссю  $x$ , а подовжні осі інших двох – з віссю  $y$ , і потім включити кожну пару в протилежні плечі моста (рис. 4.1, в), то при скручуванні валу моментом на виході моста виникає сигнал, пропорційний величині деформації валу, а отже, і переданому їм моменту.



1 – токоз'ємні кілця; 2– ізолююча втулка; 3 – щітки; 4 – тензопідсилювач

Рисунок 4.1 – Напрямки максимальних поверхневих деформацій валу у залежності від напрямку крутіння валу (а, б) та розташування тензодатчиків на валу при вимірюванні моменту (в)

### Вибір тензодатчиків

Міст, розташований на валу, з'єднують із входом тензопідсилювача звичайно за допомогою токоз'ємного пристрою з ковзними контактами. Погрішності запису, викликані нестабільністю перехідних опорів ковзних контактів, зменшуються зі збільшенням опорів пліч моста.

Тому бажано використовувати для виміру деформацій валу тензодатчики з великим опором, наприклад 400 Ом. Збільшити опір пліч моста можна також наклейкою на вал не чотирьох, а восьми тензодатчиків і включенням їх послідовно по два тензодатчика в плече.

Для підвищення чутливості моста бажано використовувати тензодатчики з великими базами (25 – 30 мм). Ці тензодатчики мають велику подовжню чутливість і меншу поперечну чутливість, чим тензодатчики з малою базою (10 – 15 мм).

### Кріплення тензодатчиків на вал

Для точної наклейки тензодатчиків на вал по осях найбільших деформацій застосовують трафарет, що виготовляють із прямокутної смужки папера (рис. 4.2). На смужці олівцем наносять вісь трафарету і під кутом 45° до неї осі тензодатчиків. Потім на папері уздовж осей тензодатчиків виконують прямокутні прорізи. Розмір прорізу в осьовому напрямку вибирають небагато більш бази застосовуваних

тензодатчиків, а в поперечному – ширині його паперової підкладки. Далі до трафарету сторонами з виводами приклеюють тензодатчики, причому так, щоб їхні бази були розташовані в прямокутних прорізах. При кріпленні тензодатчиків до трафарету бажано у місцях їхніх виводів провідників наносити побільше клею для того, щоб провідники міцно були з'єднані з трафаретом.

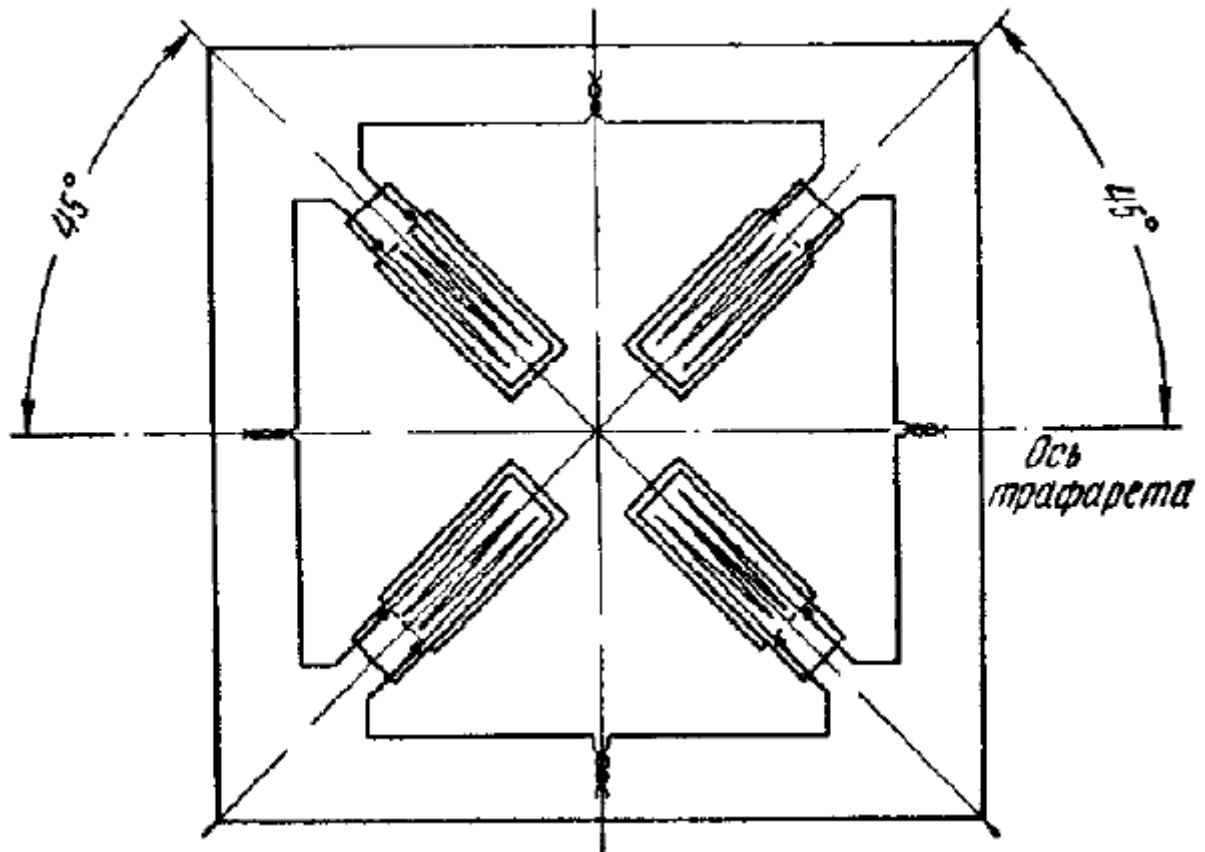


Рисунок 4.2 – Трафарет для точного монтажу тензодатчиків

Тензодатчики, прикріплені до трафарету, з'єднують у мостову схему.

Трафарет з тензодатчиками монтують на вал у такий спосіб. Після очищення і відповідної підготовки місця на валу спочатку приклеюють трафарет. При наклеїці необхідно простежити, щоб його вісь збігалася з віссю валу. Потім на вал наклеюють тензодатчики. Після сушіння протягом декількох годин трафарет разом з тензодатчиками покривають влагозахисною мастикою, залишаючи виводи проводів мостової схеми вільними.

### **Токз'ємний пристрій**

Найчастіше момент прокатки визначають виміром моментів на шпинделях кліті, рідше на кореновому валу приводного електродвигуна.

У першому випадку, крім моменту прокатки, вдається також одержати дані про розподіл моменту між шпинделями.

Шпиндель працює в умовах сильних ударів, вібрацій і великих динамічних навантажень (биття). Крім того, шпиндель верхнього валка може переміщатися у вертикальному напрямку при регулюванні зазору між валками. Для знімання сигналу моста в таких умовах найбільш застосовний струнний токоз'ємний пристрій.

Цей пристрій (рис. 4.3) складається з токоз'ємного кільця 1 з канавкою, що виготовляють з латуні чи міді, і щітки 2 – сталеві струни діаметром 0,7 – 0,8 мм, що охоплює кільце. Струна 2 натягається пружиною 3. Тому що струна охоплює значну частину кільця забезпечується гарний контакт. Для стабілізації перехідного опору контакту кільце змазують технічним вазеліном. Контакт не порушується навіть при великих (20 – 30 мм) биттях шпинделя. Такий токоз'ємний пристрій надійно працює в складі вхідного ланцюга тензопідсилювача (при розташуванні моста на шпинделі) до окружної швидкості кільця 1 – 3 м/с. При великих швидкостях кільце сильно нагрівається і, крім того, спостерігаються сильні вібрації струн. Контакт стає нестабільним, що приводить до значних похибок запису.

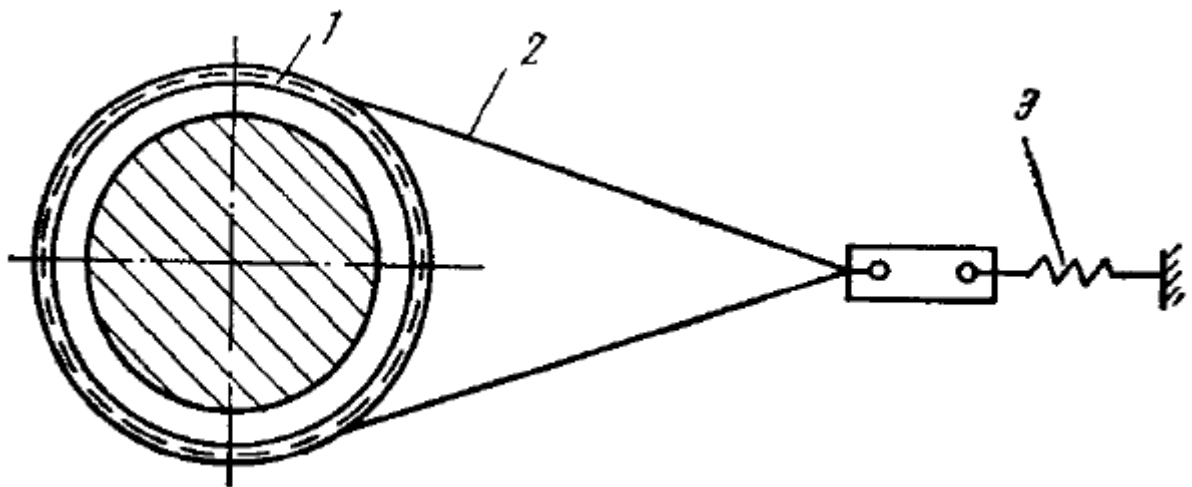


Рисунок 4.3 – Струнний токоз'ємний пристрій

### Визначення масштабу запису

Масштаб запису крутильного моменту валу, можна визначити двома способами: градуванням вимірювального комплексу чи розрахунковим шляхом.

У першому випадку нерухомому валу за допомогою спеціальних приладів, які навантажують вали відомими крутильними моментами і записують на фотострічку відповідні їм відхилення. На підставі цих даних будують градувальний графік  $M=f(y)$ , який використовують при розшифровці запису.

При справній апаратурі градувальний графік має вид прямої лінії, тому для розшифровки запису можна застосовувати масштаб

$$M_m = \frac{M_1}{y_1},$$

де  $y_1$  – відхилення, що відповідає моменту  $M_1$  (по градувальному графіку).

Проведення градування у виробничих умовах зв'язано з великими труднощами, особливо коли вал розрахований на передачу великих крутильних моментів. Тому більш часто масштаб запису моменту визначають розрахунковим шляхом.

Зв'язок між відхиленням на фотострічці  $y$  і моментом на валу  $M$  виражається рівнянням:

$$y = K' \frac{2K_0(1-\gamma)}{GW_p} M,$$

де  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  – модуль зсуву матеріалу вала, МН/м<sup>2</sup>;

$W_p = \frac{\pi d^3}{16}$  – полярний момент інерції перетину вала, м<sup>3</sup>;

$d$  – діаметр вала, м;

$E$  – модуль пружності, МН/м<sup>2</sup>;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$\gamma = \frac{K_n}{K_0}$  – відношення поперечної чутливості тензодатчика до

повздожньої чутливості.

Коефіцієнт  $K'$ , що представляє собою добуток чутливості тензопідсилювача і гальванометра, визначають у такий спосіб. До одного з пліч моста підключають відомий опір  $R_0$ . При цьому в міст вноситься розбаланс

$$\varepsilon_{R_0} = \frac{R}{R_0 + R},$$

де  $R$  – опір тензодатчика.

Цей розбаланс викликає відхилення на фотострічці

$$y_0 = K' \varepsilon_{R_0} = K' \frac{R}{R_0 + R}.$$

Звідси

$$K' = y_0 \left( 1 + \frac{R_0}{R} \right)$$

Тоді момент на валу визначається формулою

$$M = M_m y,$$

$$\text{де } M_m = \frac{GW_p}{2y_0 \left( 1 + \frac{R_0}{R} \right) K_o (1 - \gamma)} - \text{масштаб запису.}$$

У якості  $R_0$  зручно використовувати опор з допуском по опорі  $\pm 0.5$  чи  $\pm 1\%$ .

Точність визначення масштабу розрахунковим шляхом залежить від того, наскільки близькі до дійсних значень:

- 1) прийнятий модуль  $G$  зсуву матеріалу валу;
- 2) прийняті подовжня чутливість  $K_o$  і відношення  $\gamma$ ;
- 3) сприймані тензодатчиками деформації до деформацій, викликаних чистим скручуванням валу.

Подовжня чутливість  $K_o$  тензодатчиків у залежності від якості наклейки і часу сушіння може відрізнятись від тої, що указується заводом виготовлювачем не більше ніж на  $\pm (2-4) \%$ .

Вали прокатних станів (шпинделі, корінні вали електродвигунів і ін.) роблять в умовах, при котрих відсутні згинальні моменти, тому деформації на їх поверхні обумовлені тільки крутінням.

При якісній наклейці і гарному просушуванні тензодатчиків точність визначення масштабу розрахунковим шляхом може бути доведена до 2–3 %.

### **Приклад розрахунку**

Розрахувати масштаб запису та визначити момент прокатки при наступних умовах: матеріал валу – сталь 45 ( $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МН} / \text{м}^2$ );  $\nu = 0,3$ ;  $d = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}$ ;  $\gamma = 0.01$ ;  $R = 50 \text{ Ом}$ ;  $R_0 = 10 \text{ Ом}$ ;  $y_0 = 10 \text{ мм} = 0,01 \text{ м}$ .

**Розв'язання:**

Модуль зсуву матеріалу вала:

$$G = \frac{2 \cdot 10^5}{2(1+0,3)} = 97,1 \text{ МН} / \text{м}^2.$$

Полярний момент інерції перетину вала:

$$W_p = \frac{3,14 \cdot 0,1^3}{16} = 1,96 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Масштаб запису:

$$M_m = \frac{97,1 \cdot 1,96 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,01 \cdot \left(1 + \frac{10}{50}\right) \cdot 2 \cdot (1 - 0,01)} = 0,4 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Момент прокатки при відхиленні кривої на фотопапері осцилографа  $y = 125 \text{ мм} = 0,125 \text{ м}$ :

$$M = 0,4 \times 0,125 = 0,05 \text{ МН} \cdot \text{м} = 50 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

**Завдання для самостійної роботи**

Розрахувати масштаб запису та визначити момент прокатки для умов, наведених у таблиці 4.1. Матеріал валу – сталь 45.

**Контрольні запитання**

1. Для чого потрібне вимірювання моменту прокатки?
2. Які ви знаєте способи вимірювання моменту прокатки?
3. У чому є різниця між різними способами виміру моментів?  
Назвіть переваги та недоліки кожного з них.
4. Яким умовам повинен відповідати тензодатчик, застосований для виміру моментів прокатування?
5. Опишіть правила монтажу вимірювального моста на досліджуваній вал.
6. У чому смисл розрахунку масштабу запису при визначенні моменту прокатування?

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку запису моменту прокатки

№ вар.	d, мм	$\gamma$	R, Ом	R <sub>0</sub> , Ом	y <sub>0</sub> , мм	y, мм
1	105	0,010	50	5	1	5
2	110	0,011	60	6	2	10
3	115	0,012	100	7	3	15
4	120	0,013	150	8	4	20
5	125	0,014	140	9	5	25
6	130	0,015	200	10	6	30
7	135	0,014	250	11	7	35
8	140	0,013	300	12	8	40
9	145	0,012	350	13	9	45
10	150	0,011	400	14	10	50
11	155	0,010	340	5	11	55
12	160	0,011	310	6	12	60
13	165	0,012	270	7	13	65
14	170	0,013	220	8	14	70
15	175	0,014	160	9	15	75
16	180	0,015	130	10	16	80
17	185	0,014	110	11	17	85
18	190	0,013	90	12	18	90
19	195	0,012	70	13	19	95
20	200	0,011	45	14	20	100

## Практична робота № 2

### РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТЕНЗОДАТЧИКІВ ОПОРУ

(За матеріалами [1, 2, 5, 7]).

#### Загальні теоретичні відомості

##### Електротензометричний метод виміру сил

В даний час не розроблений метод безпосереднього перетворення сили в електричну величину. У більшості випадків використовується попереднє перетворення сили в механічну деформацію за допомогою пружних елементів. Наприклад, найпростішим пружним елементом може служити циліндричний сталевий стрижень.

Сполучаючи елемент із датчиком переміщення (деформації), одержимо устрій для перетворення сили в електричну величину. Датчики деформації називають частіше усього електротензодатчиками, а самий метод, заснований на застосуванні таких датчиків – електротензометричним методом виміру сили.

Електротензометричний метод дослідження силового режиму машин є найпоширенішим завдяки властивій йому гнучкості, високої чутливості і точності. Особливістю методу є можливість дистанційного виміру сили.

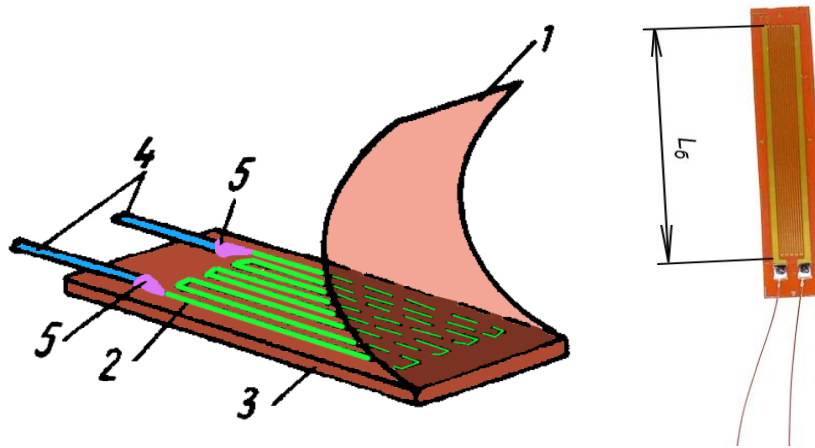
Серед різноманітних типів електротензометрів (індуктивних, емнісних, магнітопружних і ін.) найбільше високим вимогам до точності вимірів при роботі в особливо важких умовах відповідають електротензометри опору або, як їх частіше називають, тензодатчики опору. Вони мають малі габарити, мають високу конструктивну пристосовуваність з малою інертністю.

У приладах, призначених для виміру силових параметрів процесу прокатування, звичайно застосовуються дротові і фольгові тензодатчики.

##### Дротовий тензодатчик

Конструктивно дротовий тензодатчик (рис. 5.1) виконується у виді плоскої спіралі з тонкого (діаметром 0,012 – 0,05 мм), частіше усього константанового, дроту, що вклеюється між смужками тонкого паперу. До кінців спіралі приварюються тонкі (діаметром 0,25 мм) мідні провідники. Такий тензодатчик підключають до вимірювального ланцюга. Довжина спіралі, що зветься базою тензодатчика  $l_0$ , може дорівнювати 2–40 мм і більш.

Якщо наклеїти тензодатчик, наприклад, на циліндричний пружний елемент у напрямку утворюючої і потім навантажити елемент осьовою силою, то поверхневі деформації елемента через прошарок клею і паперу передадуться дротовій спіралі.



1 – тонкий папер; 2 – спіраль; 3 – клійова підкладка; 4 – контакти; 5 – припой

Рисунок 5.1 – Дротовий тензодатчик

Під дією деформації геометричні розміри спіралі (довжина дроту і її поперечний переріз) змінюються. При цьому також змінюється і питомий опір матеріалу дроту (тензорезистивний ефект).

У результаті опір спіралі одержує збільшення  $\Delta R$ . Причому при розтягненні опір дроту збільшується, а при стисканні – зменшується.

Основні параметри тензодатчиків такі: максимальна деформація  $\epsilon_{0max}$ , що вимірюється; чутливість до подовжньої деформації  $K_0$ , чутливість до поперечної деформації  $K_\perp$ , температурний коефіцієнт  $\alpha_a$ , припустима сила струму  $I_a$ , опір спіралі  $R$ , повзучість  $P_a$ , а також припустимі робочий діапазон температур і опір ізоляції.

### **Чутливість до деформації**

Під подовжньою чутливістю тензодатчика до деформації розуміють відношення відносної зміни опору спіралі до подовжньої деформації при одноосьовому напруженому стані.

Поперечна чутливість тензодатчика значно менше подовжньої.

Подовжня чутливість тензодатчиків у залежності від довжини бази коливається в межах 1.5 – 2.1.

Подовжня чутливість із зменшенням довжини бази зменшується та збільшується при зменшенні товщини прошарку клею і діаметра дроту, а також із зростанням міцностних характеристик клею.

При тривалій роботі тензодатчика міцнісні властивості клею поступово змінюються, що спричиняє за собою зміну чутливості тензодатчика. Тому стабільність роботи тензодатчика багато в чому залежить від властивостей застосовуваного клею і якості наліпки.

### **Температурний коефіцієнт**

Температура деталі, на якій наклеєний тензодатчик, впливає на омичний опір дроту, довжину дроту і розміри ділянки деталі під

тензодатчиком. Якщо вважати, що тензодатчик не наклеєний на деталі, але знаходиться в однакових із нею температурних умовах, тоді температурний коефіцієнт тензодатчика обчислюється за формулою

$$\alpha_{\partial} = \alpha + K_0(\beta_2 - \beta_1),$$

де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору металу проволочки;

$\beta_1$  – температурний коефіцієнт розширення металу проволочки;

$\beta_2$  – температурний коефіцієнт розширення металу деталі (пружного елемента).

Так, коли тензодатчик виконано з константової проволочки та наліплено на сталеву деталь, то можливо прийняти:  $\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $K_0 = 2,0$ ;  $\beta_1 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $\beta_2 = 11 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , тоді  $\alpha_{\partial} = 20 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot (11 \cdot 10^{-6} - 15 \cdot 10^{-6}) = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

### Припустима сила струму

Для підвищення чутливості вимірювального ланцюга важливо, щоб через тензодатчик можна було пропускати як можна більший струм.

Величина току що пропускається через тензодатчик обмежується припустимою температурою нагрівання, яку приймають у залежності від якості застосовуваного клею. При підвищенні температури понад припустиму клей розм'якшується, і внаслідок цього деформація деталі не цілком передається дротові.

Для якісної оцінки впливу конструктивних параметрів дротового тензодатчика на припустимий струм використовують формулу, яка отримана з рівняння балансу тепла:

$$I_{\partial} = \sqrt{\frac{40,6 \cdot 10^4 \cdot (\theta_1 - \theta_2) \cdot p \cdot q}{\rho}},$$

де  $\theta_1, \theta_2$  – температури тензодатчика і деталі,  $^\circ\text{C}$ ;

$p, q$  – периметр (мм) і площа поперечного перерізу дроту ( $\text{мм}^2$ );

$\rho$  – питомий опір дроту датчика,  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ .

### Повзучість

Якщо швидко навантажити деталь, на якій наклеєний тензодатчик, постійної силою, то збільшення опору тензодатчика, що установилося відразу після навантажування, буде поступово з часом зменшуватися. Звичайно це зменшення припиняється після 20–40 хв. Це явище прийняте називати повзучістю тензодатчика.

Повзучість тензодатчика залежить від пружно-пластичних властивостей клею і дорівнює від долі відсотка до 2–3%.

### Опір ізоляції

Опір ізоляції між дротовою спіраллю і деталлю є дуже важливою характеристикою наклеєного на деталь тензодатчика. У правильно наклеєного і висушеного тензодатчика цей опір доходить до 500-1000 МОм, а іноді і вище.

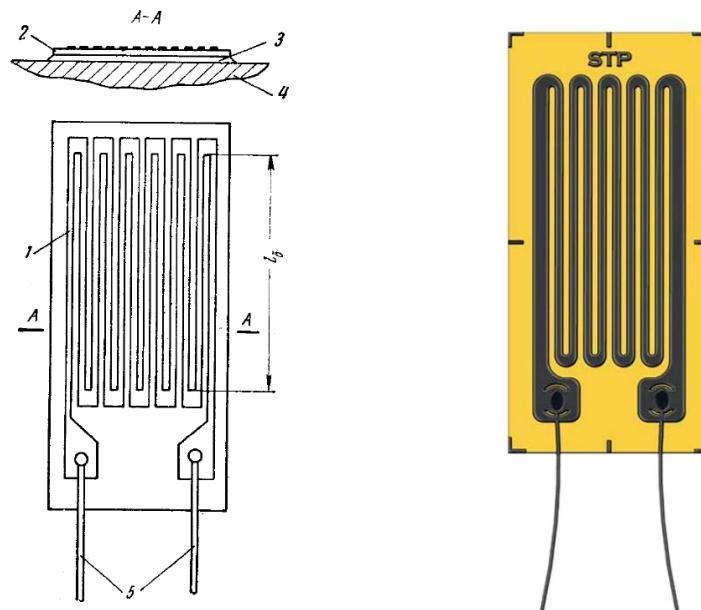
Тензодатчик рахується висушеним і придатним до роботи, коли опір ізоляції залишається постійним. При роботі тензодатчика опір ізоляції може змінитися в результаті впливу вологи, якщо не прийнято ніяких спеціальних захисних мір.

Необхідно періодично контролювати опір ізоляції тензодатчика. Якщо опір ізоляції знизився до декількох десятків тисяч Ом, то це свідчить про значне зволоження тензодатчика, тому вимірювання потрібно перервати.

### Фольговий тензодатчик

Фольговий тензодатчик на відміну від дротового має спіраль, виготовлену з константанової фольги товщиною 5 – 15 мкм методом фототравлення. У якості ізолюючої підложки використовується лакова плівка.

Загальний вид тензодатчика приведений на рис. 5.2.



1 – фольгова спіраль; 2 – лакова плівка; 3– лак; 4– деталь;  
5 – контакти

Рисунок 5.2 – Фольговий тензодатчик

Завдяки прямокутному перетину спіралі зростає площа контакту її з деталлю, у зв'язку з чим поліпшуються умови передачі деформації до неї і відвід від неї тепла, що виділяється при проходженні току. Гарний

відвід тепла від спіралі дозволяє пропускати токи через фольговий тензодатчик у десятки раз більші, ніж через дрововий, що є одною з основних його переваг.

## ЗАСТОСУВАННЯ ТЕНЗОДАТЧИКІВ

### Вимір напруги в деталях

У випадку одноосьового напруженого стану для визначення напруги достатньо виміряти за допомогою тензодатчика деформацію уздовж осі напруги. Відповідно до закону Гука напруга буде дорівнювати

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 = E \frac{\frac{\Delta R}{R}}{K_0}$$

Таким чином, вимірявши відносну зміну опору тензодатчика, викликану деформацією, по цьому вираженню можна підрахувати напругу.

У процесі виміру температура деталі може змінитися, тому повна відносна зміна опору складає

$$K_0 \cdot \varepsilon_0 + \alpha_\theta \Delta \theta = K_0 \frac{\sigma}{E} + \alpha_\theta \Delta \theta.$$

Похибка унаслідок впливу зміни температури дорівнює

$$\delta_0 = \frac{\alpha_\theta \Delta \theta}{K_0 \frac{\sigma}{E}}.$$

Наприклад, якщо  $\sigma = 10 \text{ МН} / \text{м}^2$ ;  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МН} / \text{м}^2$ ;  $K_0 = 2,0$ ;  
 $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } 1 / ^\circ\text{C}$  та  $\Delta \theta = 1^\circ\text{C}$ ; тоді  $\delta_0 = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{2 \cdot \frac{10}{2 \cdot 10^5}} = 0,12$  (або 12%)

Таким чином, при вимірі невеличких напруг зміна температури навіть на  $1^\circ\text{C}$  може призвести до значної похибки.

Для виключення впливу температури поруч із робочим тензодатчиком, що вимірює деформацію деталі, розташовують платівку з того ж матеріалу, що і деталь, із наклеєним на ній так названим компенсаційним тензодатчиком. Обидва тензодатчика включають у сусідні плечі мостової схеми.

Для компенсації впливу температури на результат виміру необхідно, щоб, по-перше, тензодатчики мали однакові температурні

коефіцієнти ( $\alpha_{\theta_1} = \alpha_{\theta_2}$ ) і, по-друге, збільшення температури деталі і платівки повинні бути рівні. Ці умови забезпечуються при ідентичності наліпки обох тензодатчиків і розташуванні платівки з компенсаційним тензодатчиком якнайближче до робочого тензодатчику.

### Завдання для самостійної роботи

Розрахувати температурний коефіцієнт тензодатчику, припустимий струм датчика, напругу у деталі та похибку вимірювань при неврахуванні температурного ефекту для умов, наведених у табл. 5.1.

При цьому прийняти  $\alpha = 20 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ;  $K_0 = 2,0$ ;  $\beta_1 = 15 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ;  $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ ;  $d_{\text{пров.дат}} = 0,05 \text{ мм}$ ;  $\rho = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ . Матеріал деталі – сталь 45.

### Контрольні запитання

1. Які ви знаєте методи електро-тензометричного виміру сил?
2. Що представляє собою проволочений тензодатчик та як він діє?
3. Які параметри характеризують тензодатчик та на що впливає кожен з цих параметрів?
4. Що називається температурним коефіцієнтом тензодатчика?
5. Які фактори впливають на роботу тензодатчика опору?
6. Чим відрізняється дрововий тензодатчик від фольгового, та як ця різниця може впливати на результати вимірювань?
7. Як здійснюється вимір напруг у деталях обладнання за допомогою тензодатчиків?

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку дровового тензодатчику

№ вар.	$\beta_2 \cdot 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}$	$\theta_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta R \cdot 10^{-3}, \text{ Ом}$	$R, \text{ Ом}$
1	5,0	21,1	1,0	400
2	5,1	22,3	2,0	100
3	5,2	24,2	3,1	200
4	5,3	25,3	4,7	300
5	5,4	26,8	5,8	150
6	7,0	27,4	6,4	250
7	7,1	28,4	7,8	350
6	7,2	29,8	8,9	380
9	7,3	30,4	10,7	130
10	7,4	22,5	11,6	270
11	7,5	42,6	5,9	400
12	7,6	53,3	1,7	100
13	7,7	43,3	2,3	200
14	7,8	45,5	3,7	300
15	7,9	45,6	4,2	150
16	5,5	47,8	9,8	250
17	5,6	49,1	8,9	350
18	5,7	38,7	8,5	380
19	5,8	34,2	4,6	130
20	5,9	33,3	1,3	270

## Індивідуальне завдання № 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЛАНЦЮГІВ ПРИЛАДІВ З ТЕНЗОДАТЧИКАМИ ОПОРУ

### Загальні теоретичні відомості

#### Мостова схема

Для перетворення зміни опору тензодатчиків у тік звичайно застосовують схему одинарного моста Уїтстона (рис. 6.1). Цю схему складають частково або цілком із тензодатчиків і використовують переважно в невірноваженому режимі, тобто в режимі, при якому через прилад, що підключається до її виходу, протікає тік. Нижче розглянута робота цієї схеми якщо джерелом напруги виступає прилад постійного струму.

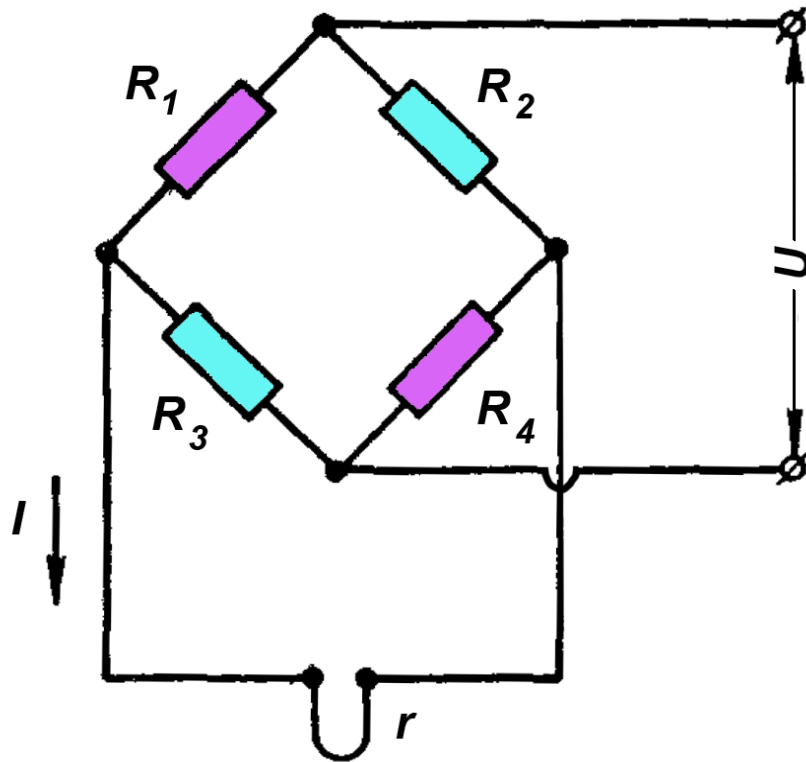


Рисунок 6.1 – Схема одинарного мосту

З електротехніки відома умова

$$R_1 R_4 - R_2 R_3 = 0 ,$$

де  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – опори пліч моста.

Ця умова називається умовою рівноваги (балансу) моста. При її виконанні струм через прилад не протікає.

Вмикання тензодатчиків у мостову схему дозволяє:

- 1) одержати на виході струм, прямо пропорційний змінам опорів тензодатчиків, а отже, і сприйнятими ними деформаціями;
- 2) скомпенсувати (при рівності температурних коефіцієнтів тензодатчиків) температурні складові змін опору.

Звичайно тензодатчики, що включаються в плечі схеми, підбирають за значенням опору з точністю не нижче 0,5%. Абсолютні збільшення опорів тензодатчиків навіть при найбільших деформаціях дуже малі.

Наприклад, у тензодатчика з параметрами  $R = 200 \text{ Ом}$ ,  $K_0 = 2.0$  під дією деформації 0,2% опір змінюється усього лише на 0,8 Ом, тобто на 0.4%.

Тензодатчики наклеюють на пружний елемент і потім включають у мостову схему. При пружній деформації деталі кожен з тензодатчиків деформується, що призводить до порушення умови рівноваги моста. Тоді через прибор починає протікати тік, пропорційний деформації, величина якого може бути обчислена за формулою

$$I = \frac{U}{4(R+r)} \left( \frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right),$$

де  $U$  – напруга, яка підводиться до мостової схеми;

$R$  – опір одного з плечей мостової схеми;

$r$  – опір вимірювального пристрою;

$\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$  – абсолютний приріст опору пліч, який визваний деформацією, що виникає під дією сили.

Цю формулу можна записати у спрощеному вигляді

$$I = A_I \cdot \varepsilon_R,$$

де 
$$A_I = \frac{U}{4(R+r)};$$

$$\varepsilon_R = \left( \frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right).$$

Коефіцієнт  $A_I$  показує, який струм виникає на виході моста, коли сума відносних змін опорів його плечей  $\varepsilon_R$  дорівнює одиниці, і являє собою чутливість моста по силі струму.

Сума відносних змін опорів плечей  $\varepsilon_R$  називається сумарним розбалансом моста.

### Вибір параметрів мостової схеми

При виборі параметрів мостової схеми завжди бажано одержати як можна більше значення чутливості схеми по току.

На підставі проведення досліджень встановлено, що при заданому току  $I_{нл.дон}$  (допустима сила струму для датчика з умов розігріву) і  $r$ :

$$R = 4 \cdot r; \quad A_I = \frac{2}{5} I_{нл.дон}; \quad U = 8 \cdot r \cdot I_{нл.дон}.$$

Наприклад, оптимальні параметри моста у випадку роботи з гальванометром з  $r = 55 \text{ Ом}$  і дрововими тензодатчиками  $I_{нл.дон} = 30 \text{ мА}$ :

$$R = 4 \cdot 55 = 220 \text{ Ом};$$

$$A_I = \frac{2}{5} \cdot 30 = 12 \text{ мА};$$

$$U = 8 \cdot 55 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 13,2 \text{ В}.$$

Приймаючи значення опору плеча мостового з'єднання  $R = 200 \text{ Ом}$ , розрахуємо  $A_I$  та  $U$ :

$$A_I = \frac{30}{2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{55}{200}} = 11,76 \text{ мА};$$

$$U = 2 \cdot 200 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 12 \text{ В}.$$

У даному випадку в якості джерела напруги моста можна застосовувати акумуляторну батарею або інше джерело постійного струму на 12 В.

У таблиці 6.1 приведені розрахункові значення сили струму, що проходить через гальванометр, у залежності від напруги в тілі пружного циліндричного елемента, на який наклеєні чотири тензодатчики. При розрахунку прийняли: чутливість тензодатчиків до деформації  $K_0 = 2.0$ ; коефіцієнт Пуассона матеріалу  $\nu = 0.3$ ; модуль пружності матеріалу  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МН/м}^2$ . Сумарний розбаланс моста розраховували по формулі

$$\varepsilon_R = 2K_0(1+\nu)\varepsilon = 2K_0(1+\nu)\frac{\sigma}{E}.$$

де  $\varepsilon$  – відносна пружна деформація пружного елемента мостозни.

Таблиця 6.1 - Розрахункові значення вихідного струму моста

Напруга у пружному елементі $\sigma, Н / мм^2$	Відносна деформація $\varepsilon, \%$	Сумарний розбаланс моста $\varepsilon_R, \%$	Сила струму $A_I, А$	Відхилення на екрані осцилографу, мм
50	0,025	0,13	0,015	6
100	0,050	0,26	0,030	12
150	0,075	0,39	0,045	18
200	0,100	0,52	0,060	24
250	0,125	0,65	0,075	30
300	0,150	0,78	0,090	36

Якщо замість дровових застосувати фольгові тензодатчики з припустимою силою струму 0,5 А, то для підводу напруги моста необхідне джерело з напругою  $2 \cdot 0,5 \cdot 200 = 200$  В і потужністю  $2 \cdot 200 \cdot 0,5 = 200$  Вт. Таке джерело являє собою досить громіздкий устрій. Тому параметри моста при застосуванні фольгових тензодатчиків краще вибирати виходячи з умов напруги. Найбільше зручно використовувати в якості джерела акумулятор на 24 В. Тоді гранично припустимий тік буде протікати через тензодатчик, якщо його опір буде складати

$$R = \frac{24}{2 \cdot 0,5} = 24 \text{ Ом}.$$

Таким чином, при заданій напрузі для одержання можливо більшої чутливості бажано застосовувати тензодатчики опором 30 і 50 Ом.

Наприклад, якщо використовувати тензодатчики опором  $R = 50$  Ом, то при  $r = 55$  Ом та  $U = 24$  В маємо

$$A_I = \frac{24}{4} \cdot \frac{1}{50 + 55} = 0,057 \text{ А} = 57 \text{ мА}$$

Тоді при  $\sigma = 150 \text{ МН} / \text{м}^2$  струм, що протікає через гальванометр складе

$$I = 57 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3} = 0,22 \text{ мА}$$

і відхилення на екрані буде дорівнювати

$$\frac{0,22}{0,25} \cdot 100 = 88 \text{ мм}.$$

Приведені розрахунки показують, що успішне застосування вимірювального ланцюга без підсилювача можливо, якщо:

- 1) в пружному елементі виникають великі напруження [200–300 МН / м<sup>2</sup>];
- 2) усі тензодатчики, що входять у міст, активні;
- 3) максимальні частоти процесів не занадто великі і можна використовувати чутливі гальванометри.

### Міст із складовими плечами

У силовимірювачах, розрахованих на навантаження порядку декількох мега ньютонів, використовують масивні пружні елементи з великою площею поперечного перерізу. Для того щоб показання таких силовимірювачів були стабільними, на пружний елемент наклеюють до 32 і більш тензодатчиків і з'єднують їх у мостову схему.

При цьому кожне плече складається з декількох тензодатчиків.

У загальному випадку на пружний елемент можна наклеїти  $4k$  тензодатчиків, де  $k$  – число тензодатчиків у плечі. У кожному плечі тензодатчики можна з'єднати послідовно, паралельно і комбінованим способом у  $m$  рівнобіжних гілок по  $n$  тензодатчиків у кожній гілці.

Очевидно, що з'єднання останнім способом можливо тільки, якщо  $k$  відповідає ряду значень: 4, 6, 8, 9...

Легко показати, що в даному випадку оптимальні параметри моста такі:

$$R = 4 \cdot \frac{m}{n} \cdot r = 4 \cdot \frac{m^2}{k} \cdot r;$$

$$A_I = \frac{2}{5} \cdot m \cdot I_{\partial.\partial on};$$

$$U = 8 \cdot n \cdot r \cdot I_{\partial.\partial on} = 8 \cdot \frac{k}{m} \cdot r \cdot I_{\partial.\partial on}.$$

Отже, при заданих  $k$  і  $r$  чутливість  $A_I$  зростає при збільшенні числа рівнобіжних гілок  $m$ . Одночасно знижується необхідна напруга моста.

**Приклад.** Дротові тензодатчики:  $k = 4$ ;  $r = 55$  Ом та  $I_{\partial.\partial on} = 30$  мА.

Можливі три варіанти з'єднання тензодатчиків у плечі:

- 1)  $m = 4$ ;  $n = 1$ ; 2)  $m = 2$ ;  $n = 2$ ; 3)  $m = 1$ ;  $n = 4$ .

Для кожного варіанта параметри моста такі:

$$1) R = 4 \cdot \frac{4}{1} \cdot 55 = 880 \text{ Ом}; A_I = \frac{2}{5} \cdot 4 \cdot 30 = 48 \text{ мА};$$

$$U = 8 \cdot 1 \cdot 55 \cdot 0,03 = 13,2 \text{ В}.$$

$$2) R = 4 \cdot \frac{2}{2} \cdot 55 = 220 \text{ Ом}; A_I = \frac{2}{5} \cdot 2 \cdot 30 = 24 \text{ мА};$$

$$U = 8 \cdot 2 \cdot 55 \cdot 0,03 = 26,4 \text{ В}.$$

$$3) R = 4 \cdot \frac{1}{4} \cdot 55 = 55 \text{ Ом}; A_I = \frac{2}{5} \cdot 1 \cdot 30 = 12 \text{ мА};$$

$$U = 8 \cdot 4 \cdot 55 \cdot 0,03 = 52,8 \text{ В}.$$

При першому варіанті з'єднання отримуємо найбільшу чутливість мостового з'єднання і невелике значення напруги в ланцюгу, проте такий варіант важко реалізувати, оскільки тензодатчиків з опором  $R = 800 \text{ Ом}$  не виготовляють, доведеться в одному плечі послідовно з'єднувати до 4 тензодатчиків. Тоді спільна кількість датчиків сягне 16 шт., що потребує суттєвої площі для розміщення.

Третій варіант з'єднання не прийнятний, по причині низької чутливості та необхідності джерела постійного струму з високою напругою (більше 24 В).

Таким чином, найбільш раціональним виявляється другий варіант з'єднання тензодатчиків. Приймаючи значення опору плеча мостового з'єднання тензодатчиків  $R = 200 \text{ Ом}$  і напругу  $U = 24 \text{ В}$ , одержуємо:

$$A_I = \frac{30}{2} \cdot \frac{2}{1 + \frac{2 \cdot 55}{2 \cdot 200}} = 23,53 \text{ мА}.$$

### Приклад розрахунку

1. Припустимий струм на фольговому тензодатчику  $I_{\text{доп}} = 250 \text{ мА}$ ; повний опір зовнішнього ланцюга  $R_{\text{пр}} = 80 \text{ Ом}$ ; опір тензодатчика  $R = 50 \text{ Ом}$ ; середня тензочутливість фольгових датчиків  $S = 2.2$ ; напруга стискання чутливого елемента  $\sigma = 2000 \text{ кг/см}^2$ . Визначити силу струму, яка виникає на вході прибору при розміщенні тензодатчиків у одинарний міст, якщо матеріал пружного елемента – сталь 45 ( $E = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ ).

### Розв'язок:

Для даних умов відносна деформація пружного елемента визначається так:

$$\varepsilon = \frac{P}{\pi r^2 E} = \frac{\sigma}{E}.$$

$$\varepsilon = \frac{2000}{2 \cdot 10^6} = 0,001.$$

Тоді зміна опору датчика відповідно до формули

$$\Delta R = R \cdot S \cdot \varepsilon.$$

$$\Delta R = 50 \cdot 2,2 \cdot 0,001 = 0,11 \text{ Ом}.$$

Припустимо напруга, яка подається на міст з урахуванням допустимого струму

$$U = 2 \cdot I_{\text{дон}} \cdot R.$$

$$U = 2 \cdot 0,25 \cdot 50 = 25 \text{ В}.$$

Тоді сила струму на пристрою, що приймає сигнал з мосту, буде такою

$$I_{\text{пр}} = \frac{U \cdot S \cdot \sigma \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot E \cdot (2R + R_{\text{вн}})}.$$

$$I_{\text{пр}} = \frac{25 \cdot 2,2 \cdot 2000 \cdot (1 + 0,3)}{2 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot (2 \cdot 50 + 80)} \approx 0,0002 \text{ А} = 0,2 \text{ мА}.$$

де  $\nu = 0,3$  – коефіцієнт Пуассона.

2. При таких же вихідних даних визначити напругу у чутливому елементі при вихідному сигналі  $I_{\text{пр}} = 0,15 \text{ мА}$ .

**Розв'язок:**

Напруга у пружному елементі складе

$$\sigma = \frac{2 \cdot I_{\text{пр}} \cdot E \cdot (2R + R_{\text{вн}})}{U \cdot S \cdot (1 + \nu)}.$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot (2 \cdot 50 + 80)}{25 \cdot 2,2 \cdot (1 + 0,3)} \cdot 10^{-3} = 1500 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = 150 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}.$$

3. При заданих вихідних даних для другого випадку та напрузі у чутливому елементі  $\sigma = 3000 \text{ кг/см}^2$  визначити величину напруги, яка повинна бути підведена до мостового з'єднання.

**Розв'язок:**

Ця величина буде дорівнювати

$$U = \frac{2 \cdot I_{\text{пр}} \cdot E \cdot (2R + R_{\text{вн}})}{\sigma \cdot S \cdot (1 + \nu)}.$$

$$U = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot (2 \cdot 50 + 80)}{3000 \cdot 2,2 \cdot (1 + 0,3)} = 12,6 \text{ В}.$$

### Завдання для самостійної роботи

1. Повний опір зовнішнього ланцюга  $R_{пр} = 80$  Ом; середня тензочутливість фольгових датчиків  $S = 2.2$ . Визначити силу струму, яка виникає на вході прибору при розміщенні тензодатчиків у одинарний міст для умов, наведених у табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Вихідні дані для розрахунку мостового з'єднання

№ вар.	$I_{доп}, \text{мА}$	$R, \text{Ом}$	$\sigma, \text{кг/см}^2$	$I_{пр}, \text{мА}$
1	15	125	1200	0,13
2	20	120	1250	0,12
3	30	115	1300	0,11
4	40	110	1350	0,25
5	50	105	1400	0,24
6	60	100	1450	0,23
7	70	95	3500	0,22
8	80	90	3000	0,21
9	90	85	2500	0,19
10	200	80	2000	0,17
11	190	30	1650	0,23
12	180	35	1600	0,22
13	170	40	1550	0,21
14	160	45	1500	0,19
15	150	50	1450	0,17
16	140	55	1400	0,13
17	130	60	1350	0,12
18	120	65	1300	0,11
19	110	70	1250	0,25
20	100	75	1200	0,24

2. При вихідних даних задачі 1 визначити напругу у чутливому елементі. Значення вихідного сигналу взяти з табл. 6.2.

3. Для вихідних даних задачі 2 та напрузі у чутливому елементі, взятій з табл. 6.2 визначити величину напруги, яка повинна бути підведена до моста.

### Контрольні запитання

1. Для чого потрібна мостова схема з'єднання датчиків опору?
2. За якими принципами здійснюється вимір напруги у деталях за допомогою тензодатчиків опору?
3. Що називається чутливістю моста по току та від яких параметрів вона залежить?
4. В яких умовах можливо використання вимірювального ланцюга без підсилювача?
5. Коли виникає потреба у використанні моста з складовими плечами?

## Модульна контрольна робота №2 ОПТИМАЛЬНИЙ РОЗКРІЙ МЕТАЛУ НА ХОЛОДИЛЬНИК ДРІБНОСОРТНОГО СТАНУ

### Загальні теоретичні відомості

Вже можна прийняти зазвичай таке твердження: сучасний дрібносортний стан повинен мати безперервне розташування клітей. Переваги безперервної прокатки загальновідомі, і головне з них – це висока продуктивність. Тому саме цей спосіб прокатки використовують при виробництві холоднокатаних та гарячекатаних штаб, катанки, профілів дрібних та середніх розмірів, існують рішення і для великих профілів.

Дрібносортні безперервні стани можуть бути одно- і багатонитковими, коли в кожній клітці чорнової групи одночасно прокатується кілька заготовок (2 або 4), а потім ці заготовки прокатуються в одну нитку в двох або чотирьох паралельно розташованих чистових групах клітей. На рис. 7.1 наведено схеми розташування обладнання типових двониткового та однопниткового дрібносортних станів.

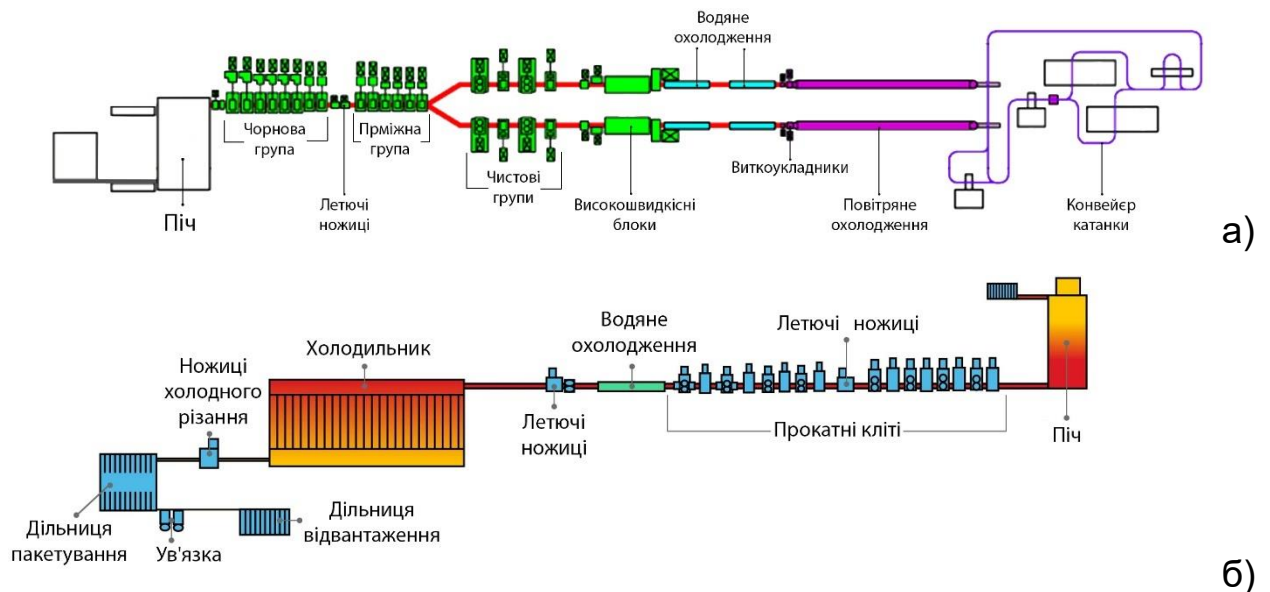


Рисунок 7.1 – Схеми розташування обладнання типових двониткового (а) та однопниткового (б) безперервних сортових станів

Незважаючи на різноманіття конструкцій прокатних станів, пов'язаних насамперед із сортаментом продукції, послідовність основних технологічних операцій повторюється і носить деякий варіативний характер.

Можна уявити сукупність можливих технологічних операцій під час виробництва сортового прокату як варіативну схему, яка наведена на рис. 7.2.



Рисунок 7.2 – Багатоваріантна потокова схема основних технологічних операцій під час виробництва сортового прокату

Основними ж технологічними операціями під час виробництва всіх видів сортового прокату є:

- підготовка заготовки під прокатку;
- власне, прокатка заготовки до кінцевих розмірів та форми;
- охолодження (термообробка) готового прокату;
- обробка товарної продукції.

Підготовка заготовки під прокатку включає, як правило, зачищення поверхні заготовки від окалини та дефектів (для холодної заготовки) та нагрівання перед прокаткою.

Найчастіше при виробництві проволочи, дрібних і середніх профілів використовується холодний посад заготовки в піч і нагрівання її до температури прокатки.

Прокатка заготовки здійснюється у прокатних клітках. Найчастіше використовують двовалкові клітки з чергуванням розташування валків «горизонтальні – вертикальні». Клітки на безперервних станах об'єднуються в безперервні групи, не більше 10 клітей в одній групі. Між кожною групою клітей встановлюють летючі ножиці. Летючі ножиці забезпечують безаварійну прокатку, обрізаючи дефектний передній і, у деяких випадках, задній кінець розкату. Крім того, летючі ножиці використовують як аварійні для розрізання задньої частини прокату при зупинках хвостової частини стану.

На деяких ділянках сортових станів для транспортування прокату до клітей і між клітками можуть бути використані рольганги, шлепери або трайб-апарати.

Таким чином, технологічна операція прокатки заготовки до кінцевих розмірів може бути представлена набором «елементарних» операцій деформації металу в клітках, різання та транспортування прокату.

Прискорене охолодження (термообробка) готового прокату з прокатного нагрівання проводиться як з метою отримання необхідних механічних властивостей арматурних профілів та катанки, так і з метою зменшення окалини на готовому профілі. Термообробка арматурних профілів здійснюється в лініях водяного охолодження водо-повітряною сумішшю, що встановлюються за останньою (чистою) кліттю прокатного стану. Охолодження можуть проводити в режимі «підстуджування» до температури, що перевищує температуру ферито-перлітних перетворень у сталі, або в режимі термічного зміцнення – до температури, яка забезпечує здійснення необхідних фазових перетворень. Останній режим застосовують під час виробництва термічно зміцненого арматурного прокату.

Остаточне охолодження пруткового прокату лінії стану виконують на холодильниках, де температура профілів в результаті вільного теплообміну з повітряним середовищем цеху поступово знижується до можливості проведення оброблювальних операцій.

Остаточна обробка готового пруткового прокату здійснюється у хвості прокатного стану на ділянці обробки. Оброблювальні операції включають порізку на мірні довжини профілів, формування пакета товарної продукції, упаковка (обв'язування), зважування, маркування та передача складу готової продукції, відвантаження.

При виробництві прокату в прутках набір технологічних операцій на вихідній стороні дрібносортового стану визначається необхідністю забезпечити охолодження та обробку прокату, що виходить із прокатних клітей, у прямолінійному стані.

Для охолодження дрібносортового прокату використовують рейкові холодильники (див. рис. 7.3). Довжину рейкових холодильників прагнуть зробити оптимальної довжини. Холодильники сучасних дрібносортових станів мають довжину 110...125 м і забезпечують прийом та охолодження прокату відповідної довжини. Наприклад, при виробництві круглого профілю діаметром 14 мм з 12-ти метрової заготовки перерізом 80x80 мм, довжина розкату на виході з чистої кліті становить близько 500 м. Тому розкат, отриманий з однієї заготовки, на виході зі стану необхідно розділити на частини, які можна вільно розмістити на холодильнику і без аварійно транспортувати по ньому. Тобто довжина штанг не повинна перевищувати довжини холодильника і не повинна бути коротшою за деяке мінімальне значення.

Крім того, довжина штанги повинна вміщувати цілу кількість довжин готових профілів відповідно до технічного завдання замовлення. Також при розрахунку довжини необхідно враховувати додаткові втрати на торцювання видалення передньої та задньої частин пачки. Довжина цих віддалених частин повинна мати деяке мінімальне значення, яке обумовлюється можливістю обладнання стану.

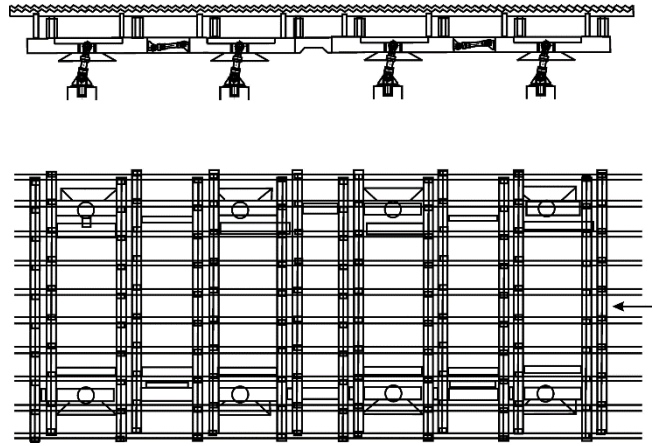


Рисунок 7.3 – Холодильник сортопрокатного стану

### Приклад розрахунку

1. Розрахувати оптимальну довжину заготовки та розкрою розкату круглого профілю діаметром 20 мм на довжину холодильника сортопрокатного стану 95 м. З урахуванням мірної довжини розкату у відповідності із замовленням – 12 м. Виробництво здійснюється із литої сталевий заготовки перерізом 160x160 мм. Припустима довжина заготовки з умов нагріву 10...12 м. Витратний коефіцієнт на стані при виробництві круглого профілю діаметром 20 мм складає 1,015.

### Розв'язок:

1. Розраховуємо кількість кратних довжин прокату, що максимально можуть розміститися на заданій довжині холодильника:

$$n_{кр} = L_x / l_{кр} ,$$

де  $L_x$  – довжина холодильника прокатного стану;

$l_{кр}$  – кратна довжина, відповідно до замовлення.

$$n_{кр} = 95/12 \approx 7,9 \text{ шт.}$$

Округлюємо отримане значення до меншого цілого, тобто максимальна кількість кратних довжин прокату, що може розміститися на холодильнику складає 7 шт.

Тоді максимальна довжина однією відрізаної штанги без урахування витратного коефіцієнту буде складати:

$$L_{ум.} = n_{кр} \cdot l_{кр} ,$$

$$L_{ум.} = 7 \cdot 12 = 84 \text{ м.}$$

2. Розраховуємо масу одного метру готової продукції при щільності  $7,85 \text{ т/м}^3$ . Для цього спочатку визначаємо обсяг, що займає 1 м готового профілю при номінальних розмірах.

$$V_{z.n.} = S_{z.n.} \cdot l = \frac{\pi \cdot d_{z.n.}^2}{4} \cdot l,$$

де  $S_{z.n.}$  – площа поперечного перерізу готової продукції;

$l$  – погонна довжина – 1 м;

$d_{z.n.}$  – діаметр готового круглого профілю.

$$V_{z.n.} = \frac{\pi \cdot 0,02^2}{4} \cdot 1 = 0,000314 \text{ м}^3.$$

Тоді маса одного погонного метру готового прокату (круглого профілю діаметром 20 мм) складе:

$$q_{z.n.} = \rho \cdot V_{z.n.},$$

де  $\rho$  – щільність сталі в готовій продукції.

$$q_{z.n.} = 7,85 \cdot 0,000314 = 0,00247 \text{ т / п. м.}$$

3. Розраховуємо масу однієї штанги, що складається з 7 кратних довжин готового профілю

$$Q_{шт.} = 7 \cdot 0,00247 = 0,2072 \text{ т.}$$

4. Розраховуємо масу одного метру заготовки при щільності  $7,85 \text{ т/м}^3$ .

Об'єм, що займає 1 м заготовки при номінальних розмірах поперечного перерізу.

$$V_3 = S_3 \cdot l = 0,98 \cdot a_3^2 \cdot l,$$

де  $S_3$  – площа поперечного перерізу заготовки;

$a_3$  – сторона профілю заготовки.

$$V_3 = 0,98 \cdot 0,16^2 \cdot 1 = 0,025 \text{ м}^3.$$

Тоді маса одного погонного метру заготовки складе:

$$q_3 = 7,85 \cdot 0,025 = 0,196 \text{ т / п. м.}$$

5. Визначаємо кількість штанг, що можна отримати з максимальної та мінімальної довжини заготовки:

$$n_{\max}^{um.} = \frac{l_3^{\max} \cdot q_3}{Q_{um.}},$$

де  $l_3^{\max}$  – максимальна припустима довжина заготовки з умов нагріву.

$$n_{\max}^{um.} = \frac{12 \cdot 0,196}{0,2072} = 11,3 \text{ шт.}$$

Аналогічно,

$$n_{\min}^{um.} = \frac{10 \cdot 0,196}{0,2072} = 9,4 \text{ шт.}$$

Таким чином, виходячи з умов можливостей обладнання стану з однієї заготовки можемо отримати максимум 11 штанг та мінімум 10 штанг по 84 м кожна на холодильнику. Для подальшого висновку приймаємо максимальне число штанг –  $n_{um.} = 11$  шт.

6. Далі розраховуємо масу та довжину заготовки з урахуванням витратного коефіцієнту.

Маса заготовки:

$$M_3 = Q_{um.} \cdot n_{um.} \cdot k_6,$$

де  $k_6$  – витратний коефіцієнт при виробництві профілю, що розраховується.

$$M_3 = 0,2072 \cdot 11 \cdot 1,015 = 2,3134 \text{ т.}$$

Довжина заготовки

$$L_3 = \frac{M_3}{q_3};$$

$$L_3 = \frac{2,3134}{0,196} \approx 11,8 \text{ м.}$$

**Відповідь:** оптимальна довжина заготовки  $L_3 = 11,8$  м, довжина штанги 84 м плюс довжина обрізків на ножицях холодного різання. Приймаємо довжину обрізків по 150 мм, тоді довжина штанг складе 84,3 м.

### Завдання для самостійної роботи

1. Розрахувати оптимальну довжину заготовки та розкрою розкату круглого профілю діаметром  $d$  мм на довжину холодильника сортопрокатного стану  $l_x$  м. З урахуванням мірної довжини розкату у відповідності із замовленням – 12 м. Виробництво здійснюється із литої

квадратної сталеві заготовки зі стороною перерізу  $a$  мм. Припустима довжина заготовки з умов нагріву 10...12 м. Витратний коефіцієнт на стані при виробництві заданого профілю складає  $k_e$ . Значення параметрів розрахунку наведені у табл. 7.1.

### Контрольні запитання

1. На які групи розділяють операції з виробництва сортових профілів?
2. Чим обмежена мінімальна довжина штанги на холодильнику сортового стану?
3. Чим обмежена максимальна довжина штанги на холодильнику сортового стану?
4. В чому полягає сутність оптимального розкрою сортового прокату на довжину холодильника?

Таблиця 7.1 – Вихідні дані для розрахунку оптимального розкрою металу

№ вар.	Діаметр профілю $d$ , мм	Довжина холодильника $l_x$ , м	Сторона заготовки $a$ , мм	Витратний коефіцієнт $k_e$
1	14	110	125	1,012
2	12	100	125	1,012
3	16	130	130	1,016
4	18	110	130	1,017
5	22	125	150	1,021
6	24	115	150	1,021
7	26	105	170	1,018
8	28	120	170	1,018
9	30	140	200	1,019
10	32	135	200	1,019
11	14	100	130	1,011
12	12	110	130	1,014
13	16	115	150	1,014
14	18	130	150	1,014
15	22	105	125	1,018
16	24	120	125	1,016
17	26	140	180	1,017
18	28	135	180	1,019
19	30	105	180	1,021
20	32	125	180	1,021

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Кравченко В. П., Койфман О. О., Сімкін О. І. Автоматизація технологічних процесів і виробництв у чорній металургії : навчальний посібник. Одеса : Олді+, 2023. 276 с.
2. Білінський Й. Й., Книш Б. П. Електронно-обчислювальні пристрої : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2021. 66 с.
3. Шевченко В. В., Тимчик Г. С. Основи автоматизації технологічних процесів : конспект лекцій. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 111 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/97358d2f-ecf9-44a1-a78f-6510ffef424c/content>
4. Клименко О. П., Каюн І. Г., Шейкус А. Р. Контроль і управління технологічними процесами : навчальний посібник. Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2019. 179 с.
5. Бешта О. С., Балахонцев О. В., Бородай В. А. Автоматизований електропривод у прокатному виробництві. Дніпропетровськ, 2010. 224 с. URL: [https://elprivod.nmu.org.ua/ua/student/disciplines/epmm/Automatic\\_ED\\_roll\\_ing\\_mills.pdf](https://elprivod.nmu.org.ua/ua/student/disciplines/epmm/Automatic_ED_roll_ing_mills.pdf).
6. Ponomareva O., Porshnev S., Borodin A., Mirvoda S. Date preparation module of automated metallurgical products production system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1047. № 012003. DOI: <https://10.1088/1757-899X/1047/1/012003>.
7. АСУ ТП у прокатному виробництві : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 136 Металургія освітня кваліфікація магістр з металургії за спеціалізацією «Прокатне виробництво» усіх форм навчання / уклад. М. М. Штода. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА». 2023. 49 с. URL: <https://dspace.mipolytech.education/items/b1549c93-f28d-436c-a2af-80d595c0dd81>

АСУ ТП У ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ:  
ЗВІТ  
З ВИКОНАННЯ

ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ №\_\_

*Виконав:*

*студент гр. \_\_\_\_\_*

\_\_\_\_\_  
*(ПІБ студента)*

*Перевірів:*

\_\_\_\_\_  
*(посада викладача)*

\_\_\_\_\_  
*(ПІБ викладача)*

Запоріжжя 20\_\_

*Навчально-методичне видання*

**Штода Максим Миколайович  
Сімкін Олександр Ісакович**

**АСУ ТП У ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ:  
методичні вказівки до виконання практично-  
лабораторних робіт**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції