

Кухар Володимир Валентинович

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри обробки металів тиском,
ДВНЗ «ПДТУ» (м. Маріуполь)

Аніщенко Олександр Сергійович

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
доцент кафедри обробки металів тиском,
ДВНЗ «ПДТУ» (м. Маріуполь)

Присяжний Андрій Григорович

кандидат технічних наук,
доцент кафедри обробки металів тиском,
ДВНЗ «ПДТУ» (м. Маріуполь)

В. В. Кухар

О. С. Аніщенко

А. Г. Присяжний

ОСНОВИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

**НАВЧАЛЬНИЙ
ПОСІБНИК**

У навчальному посібнику наведені загальні методи досліджень процесів та устаткування обробки металів тиском (ОМТ). Описані фізичні та методологічні принципи визначення енергосилових та технологічних параметрів процесів ОМТ. Розкрита сутність геометричних методів, електротензометрії, застосування механічних, оптичних, струнних, пневматичних тензометрів. Викладені основи поляризаційно-оптичних методів і структурно-спадкових методів. Описані найпоширеніші методи обробки експериментальної інформації.

Маріуполь 2019

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет»

В. В. Кухар, О. С. Аніщенко, А. Г. Присяжний

**ОСНОВИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ**

Навчальний посібник

Рекомендовано вченою радою
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних
закладів

Маріуполь
2019

УДК 621.7:620.1

К 95

Рекомендовано вченою радою
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних
закладів
(протокол № 15 від 23.05.2019 р.)

Рецензенти:

Максименко О. П. – завідувач кафедри «Обробка металів тиском» Дніпровського державного технічного університету (м. Кам'янське), д-р техн. наук, професор;

Явтушенко О. В. – завідувач кафедри «Обробка металів тиском» Інженерного інституту Запорізького національного університету, д-р техн. наук, доцент;

Макуров С. Л. – завідувач кафедри «Теорія металургійних процесів та ливарне виробництво» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», д-р техн. наук, професор.

К 95 Кухар В. В.

Основи експериментальних методів дослідження процесів обробки металів тиском : навчальний посібник / В. В. Кухар, О. С. Аніщенко, А. Г. Присяжний. – Маріуполь : ПДТУ, 2019. – 234 с.

ISBN 978-966-604-247-0

У навчальному посібнику наведені загальні методи досліджень процесів та устаткування обробки металів тиском (ОМТ). Описані фізичні та методологічні принципи визначення енергосилових та технологічних параметрів процесів ОМТ. Розкрита сутність геометричних методів, електротензометрії, застосування механічних, оптичних, струнних, пневматичних тензометрів. Викладені основи поляризаційно-оптичних методів і структурно-спадкових методів. Описані найпоширеніші методи обробки експериментальної інформації.

УДК 621.7:620.1

© В.В. Кухар, О.С. Аніщенко, А.Г. Присяжний, 2019
ISBN 978-966-604-247-0 © ДВНЗ «ПДТУ», 2019

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У ПРОЦЕСАХ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ..	9
1.1 Важливість вимірювань для розвитку природознавства, науки і техніки.....	9
1.2 Види вимірювань і методи механіки твердого деформівного тіла.....	9
1.3 Прилади і точність вимірювань.....	13
1.4 Структурна схема електричного приладу для вимірювання неелектричної величини.....	14
1.5 Статичні характеристики приладів.....	15
1.6 Динамічні характеристики приладів.....	16
1.7 Методи аналогій і моделювання.....	17
Питання для самоконтролю.....	18
Додаток А.....	19
2 ГЕОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ.....	23
2.1 Основи геометричних методів.....	23
2.2 Метод муар.....	25
2.3 Аналіз муарових смуг і картин частинних похідних.....	29
2.4 Метод координатної сітки.....	33
2.5 Метод побудови фіктивної сітки без поділу зразка.....	37
2.6 Метод шаруватих моделей.....	40
Питання для самоконтролю.....	42
Додаток Б.....	43
3 ЕЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРІЯ.....	45
3.1 Дротяні датчики опору та їх конструкція.....	45

3.2	Кріплення тензодатчиків і особливості технології експерименту.....	48
3.3	Фізичні основи електротензометрії.....	49
3.4	Тарирування датчика.....	52
3.5	Електричні кола (ланцюги).....	53
3.5.1	Потенціометрична схема.....	54
3.5.2	Мостова схема.....	56
3.5.3	Чутливість електричних кіл (ланцюгів).....	59
3.6	Температурна компенсація.....	62
3.7	Вивчення плаского напружено-деформованого стану.....	65
3.8	Вимірювання силових і кінематичних параметрів у обробці металів тиском.....	70
	Питання для самоконтролю.....	92
	Додаток В.....	94
4	МЕХАНІЧНІ, ОПТИЧНІ, ПНЕВМАТИЧНІ ТА СТРУННІ ТЕНЗОМЕТРИ.....	97
4.1	Механічні тензометри.....	97
4.2	Оптичні тензометри.....	105
4.3	Вимірювання деформацій пневматичними тензоμεтрами.....	109
4.4	Струнні тензометри та їх застосування.....	115
	Питання для самоконтролю.....	123
	Додаток Г.....	125
5	ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ОПТИЧНІ МЕТОДИ.....	130
5.1	Фізичні основи поляризаційно-оптичних методів.....	130
5.2	Навантажена модель у полі полярископу.....	136
5.3	Апаратура.....	139
5.4	Матеріали для двовимірної фото пружності...	142
5.5	Аналіз полів ізохром та ізоклін.....	146
5.6	Способи розділення напружень.....	153
5.7	Порядок проведення експерименту.....	155

5.8	Аналіз напруженого стану прокатних валків..	160
	Питання для самоконтролю.....	161
	Додаток Д.....	163
6	СТРУКТУРНО-СПАДКОВІ МЕТОДИ.....	164
6.1	Метод ліній ковзання.....	164
6.2	Метод крихких покриттів.....	167
6.3	Вимірювання твердості.....	177
6.4	Мікроструктурний метод.....	182
6.5	Оптично-чутливі покриття.....	187
	Питання для самоконтролю.....	192
	Додаток Е.....	193
7	ОСНОВИ ОБРОБКИ	
	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	198
7.1	Способи обробки дослідних даних.....	198
7.1.1	Графічні способи обробки.....	203
7.1.2	Аналітичні способи.....	206
7.1.3	Чисельне диференціювання.....	210
7.1.4	Метод найменших квадратів.....	212
7.2	Статистична обробка результатів вимірювань..	214
7.3	Організація експерименту.....	217
7.3.1	Постановка дослідження в зв'язку з особливостями процесів обробки металів тиском.....	218
7.3.2	Планування експерименту.....	221
	Питання для самоконтролю.....	226
	СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ....	227

ВСТУП

З розвитком процесів обробки металів тиском (ОМТ) та проблем проектування і створення оптимальних конструкцій устаткування виникають складні завдання, пов'язані з визначенням силових режимів, витрат енергії, вибором оптимальних технологічних параметрів деформування, визначенням температурних умов і конструкції елементів технологічного обладнання та інструменту. Відповіді на них можна дати лише на науковій основі, використовуючи різні методи дослідження процесів ОМТ.

У сукупності, методи дослідження процесів ОМТ можна розділити на чотири класи: теоретичні, експериментальні, експериментально-розрахункові, експериментально-розрахунково-аналітичні.

Значний внесок у розвиток теоретичних та експериментальних методів аналізу процесів ОМТ зробили видатні науковці С. І. Губкін, О. А. Іль'юшин, Л. М. Качанов, В. В. Соколовський, Ю. М. Работнов, О. Ю. Ішлінський, О. П. Чекмарьов та ін., роботи яких створили передумови для розробки розрахункових методів. Методи механіки твердого деформівного тіла дозволяють задовільно описати основні закономірності кінематики процесів ОМТ і визначити потрібні силові режими та роботу деформування, оцінити міцність елементів конструкції та вибрати оптимальну її форму.

Теоретичні (суто аналітичні) методи засновані на заміні дослідження реального фізичного об'єкта математичною моделлю, поведінка якої з достатньою точністю відображає поведінку фізичного об'єкту. Для аналітичного дослідження необхідно реальний матеріал і реальний процес замінити їх моделями. Другий етап аналітичного процесу – це детальний аналіз математичної

моделі процесу, тобто отримання залежності сили, роботи деформації та інших величин від параметрів процесу пластичної деформації і реалізації технології. При цьому, пластична деформація супроводжується складними фізичними явищами. Це призводить до того, що залежність між напруженнями і деформаціями в реальному тілі, що пластично змінює форму, виявляється набагато складніше, ніж у моделі.

Деякі вихідні величини (опір деформації, контактне тертя) визначаються на підставі експериментальних досліджень з обмеженою точністю. Тому і результати теоретичного аналізу необхідно оцінювати критично. Потрібно звертати увагу на вихідні дані, які використовуються для теоретичного аналізу, і співставляти точність методу з точністю вихідних даних. Термін "точні методи" означає отримання теоретичного рішення, наприклад, шляхом інтегрування диференціальних рівнянь рівноваги спільно з умовою пластичності. З точки зору механіки суцільних середовищ це рішення точне, але лише до тих пір, поки вважаємо точними значення опору деформації, контактного тертя і інших вихідних величин при умовах, що допущені. Друге джерело похибок – це заміна реального процесу моделлю. Щоб оцінити отримане аналітичне рішення, необхідно проводити експериментальну перевірку.

Інші методи дослідження процесів ОМТ містяться на результатах експерименту, які приймаються у «чистому» вигляді або піддаються обробці. Всі експериментальні методи засновані на дослідженні реальних матеріалів у реальних процесах, тому вони є більш точними. Іноді, з метою зменшення витрат на матеріали та деформуючій інструмент, дослідження проводять на геометрично подібних заготовках (зразках) зменшених розмірів, тобто застосовують принципи фізичного моделювання.

Для обробки експериментальної інформації та пов'язанням її з фізичними процесами пластичної деформації застосовують суміщені методи (експериментально-розрахункові, експериментально-розрахунково-аналітичні), яким приділено увагу в цьому навчальному посібнику. Об'єднання експерименту і теоретичного аналізу дозволяє створити потужні перспективні методи дослідження навіть найскладніших процесів ОМТ.

Навчальний посібник буде корисним студентам вищих навчальних закладів, що навчаються за програмами бакалаврату та магістратури на технічних спеціальностях, пов'язаних з вивченням теорії та технології обробки матеріалів (металургійні, механічні, технологічні спеціальності) та за освітньою програмою «Обробка металів тиском». Надані матеріали можуть викликати практичний інтерес у аспірантів, наукових працівників та робітників промисловості.

1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У ПРОЦЕСАХ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

1.1 Важливість вимірювань для розвитку природознавства, науки і техніки

Важливість вимірювань для розвитку науки і техніки важко переоцінити. Накопичення емпіричних відомостей завжди було фундаментом для розвитку теоретичних основ природознавства. При сучасному рівні розвитку теорії – проведення експерименту пов'язане, частіше, з підтвердженням справедливості нових теоретичних рішень або із їх спростуванням.

Зазвичай, у виробничих умовах (або на виробництвах з наявністю лабораторних умов), простіше провести експеримент, ніж утримувати штат «теоретиків» або «змусити» технологів правильно порахувати технологічні або енергосилові параметри. Експеримент також тут може виступати більш точним і оперативним методом, таким, що найбільше відповідає заданим виробничим умовам.

Оснащення металургійних цехів, прокатних станів, як і ліній кривошипних пресів, вимірювальними приладами (наприклад, для визначення тиску металу на валки, штампи) – є необхідною умовою для забезпечення працездатності схем автоматизації.

1.2 Види вимірювань і методи механіки твердого деформованого тіла

Види вимірювань розділяють на прямі та непрямі.

Прямі вимірювання – пов'язані з безпосереднім контактом вимірюваної величини з вимірювальним

приладом («діаметр заготовки – штангенциркуль»). *Непрямі* вимірювання – це ті, що вимагають перетворення вимірюваного параметра в шукану величину (температура (°C) $\Rightarrow$ термопара вимірює термо-ЕРС (Вольт)).

Методи механіки твердого деформівного тіла базуються на теорії напружено-деформованого стану, і рівняннях, що описують реологічну поведінку суцільного середовища. Існують два основні способи розв'язання задач – теоретичний та експериментальний.

Проте, не можна відокремити один від одного теоретичні й експериментальні методи – вони знаходяться в діалектичній єдності, оскільки будь-яка теорія базується на дослідних даних, а постановка будь-якого експерименту заснована на певних теоретичних передумовах. У деяких випадках ці методи настільки тісно переплетені, що правильніше казати про експериментально-теоретичний підхід до розв'язання технологічних завдань.

У експериментальних методах шукані величини визначаються безпосередньо шляхом вимірювань або спостереження. Коли для отримання необхідних параметрів первинні дослідні дані піддаються математичним операціям (диференціювання, інтегрування тощо) – маємо експериментально-розрахункові методи. Якщо при цьому використовують рівняння механічного стану, що встановлюють зв'язок між силовими і кінематичними параметрами суцільного середовища, то такі способи називають експериментально-розрахунково-аналітичними.

У табл. 1.1 представлено способи отримання основних параметрів напружено-деформованого стану за даними деяких експериментальних методів.

Способи експериментального дослідження напружено-деформованого стану металу й обладнання досить різні й характеризуються величиною, діапазоном і точністю вимірюваних величин, спеціальним

устаткуванням і умовами постановки дослідження, способами математичної обробки первинної інформації та інтерпретацій кінцевих результатів. Основні експериментальні методи механіки твердого деформівного тіла, що використовують, наприклад, в обробці металів тиском, наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.1 – Величини, що визначаються в різних експериментальних методах

Метод	Спосіб отримання величин		
	Експериментальний (Э)	Експериментально-розрахунковий (ЕР)	Експериментально-розрахунково-аналітичний (ЕРА)
1	2	3	4
Тензометрія	Деформація, переміщення	Швидкості деформації, швидкості переміщень	Напруження
Ділильні сітки	Переміщення	Деформації	Те ж
Муар	Швидкості течії	Швидкості деформацій	-
Фото-пружність	Різниця головних напружень, напрям головного напруження	Напруження, деформації, переміщення	-
Оптично чутливі покриття	Різниця головних деформацій, напрям головної деформації	Деформації, переміщення	Напруження

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
Кристалічна фото-пластичність	Різниця головних напружень, напрям головного напруження	Напруження	Деформації, переміщення
Інтерферометрія	Переміщення	Деформації, швидкості деформації	Напруження
Вимірювання твердості	Інтенсивність напружень	Напруження	Деформації, переміщення
Лінії ковзання	Траскторії максимальних дотичних напружень	»	Те ж
Крихкі покриття	Траскторії головних деформацій	Деформації	Напруження

Таблиця 1.2 – Основні методи механіки твердого деформованого тіла

Метод	Основні різновиди	Метод	Основні різновиди
Поляризаційно-оптичний	Фотопружність Полімерна фотореологія Кристалічна фотореологія Оптично чутливі покриття	Структурно-спадковий	Крихкі (лакові) покриття Вимірювання твердості Природні позначки Рентгенографічний
Геометричний	Ділильні сітки Багатопарові моделі Метод муарових смуг	Інші	Моделювання Ультразвукові методи Оптична інтерферометрія Голографія Комбіновані

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4
Геометричний	Ділильні сітки Багат шарові моделі Метод муарових смуг	Інші	Моделювання Ультразвукові методи Оптична інтерферометрія Голографія Комбіновані
Тензометрія	Електротензометрія Механічні й оптичні прилади		

При аналізі пластичної формозміни широко використовуються ділильні сітки, муар, вимірювання твердості й оптично чутливі покриття. Щоб отримати достовірну інформацію та зменшити об'єм математичної обробки, доцільно обирати такий експериментальний метод, що дозволяє безпосередньо визначати шукані величини, при цьому можна використовувати дані з табл. 1.1.

Найбільш поширеними для аналізу працездатності інструменту й обладнання є методи електротензометрії та поляризаційно-оптичний.

1.3 Прилади і точність вимірювання

Результатом будь-якого експериментального дослідження мають бути дані що мають практичну значущість. У зв'язку з тим, що процеси обробки металів слід віднести до таких, які перебігають швидко, то прилади повинні мати відповідні характеристики.

Прилади розділяють на такі:

- 1) що показують;
- 2) що реєструють:
 - а) самописні,
 - б) інтегрувальні (цифрові).

Відліковий пристрій – це шкала і показчик.

Шкала – це сукупність позначок уздовж просування показчика в значеннях будь-якої (вимірюваної) величини.

Вимоги до показчика:

- а) мала маса;
- б) співмірність зі шкалою;
- в) легкі умови відліку.

Точність вимірювання. Усі вимірювальні прилади мають похибки. Це паспортна величина приладу. Про точність вимірювання говорити не можна, якщо похибка вимірюваної величини ($\delta_{\text{вимір.вел.}}$) сумірна з похибками приладу ($\delta_{\text{приладу}}$).

Необхідно щоб $\delta_{\text{приладу}} \ll \delta_{\text{вимір.вел.}}$.

1.4 Структурна схема електричного приладу для вимірювання неелектричної величини

Використання приладів електровимірювань для вимірювання неелектричної величини ґрунтується на застосуванні додаткового пристрою, що перетворює неелектричну величину в ЕРС або зміну електричного параметра. Такі пристрої називають датчиками або перетворювачами.

Розділяють датчики (2):

Генераторні – перетворюють вимірювану неелектричну величину в ЕРС ($T^{\circ}\text{C} \Rightarrow \text{ТЕРМО-ЕРС}$).

Параметричні – перетворюють неелектричну величину в зміну електричного параметру (металевий термоопір з мідною обмоткою – при зміні $T^{\circ}\text{C}$ змінюється омичний опір Ω , Ом).

Структурну схему приладу електровимірювання для вимірювання неелектричної величини наведено на рис. 1.1.

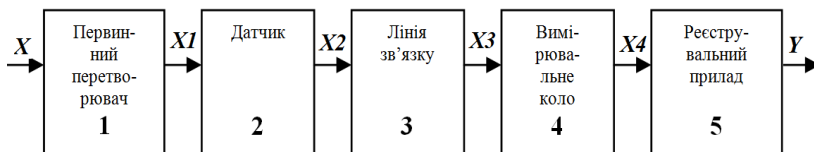


Рисунок 1.1 – Структурна схема електровимірювального приладу для вимірювання неелектричної величини

На рис. 1.1 позначено:

1 – пристрій, що здійснює перетворення вимірюваної неелектричної величини знову в неелектричну, проте зручну для подальшого перетворення в електричний сигнал (наприклад, мездоза тиску містить пружний сталевий елемент, що перетворює силу в деформацію);

2 – датчик – вторинний перетворювач;

3 – зв'язок між датчиком і вимірювальним колом, який може здійснитися через підсилювач, магнітне поле, електричне поле або за допомогою радіоліній;

4 – усі елементи, що беруть участь у перетворенні сигналу датчика в електричний струм;

5 – реєструвальний прилад, що наочно показує вимірювану величину у вигляді відхилення покажчика приладу.

1.5 Статичні характеристики приладів

Відхилення покажчика, або відображення величини на екрані (Y) – це функція вимірюваної величини, побічних параметрів, напруги живлення приладів та ін.

Статистичні характеристики відбивають зв'язок між Y та X при процесах, що протікають повільно, і при таких значеннях побічних вимірюваних величин $[T^{\circ}C, U...]$, які не перевищують критичних значень:

$$Y = f (X; T^{\circ}\text{C}; U; \dots)$$

Вимірювана величина	Побічні параметри	Напруга живлення приладів
------------------------	----------------------	---------------------------------

Статистичні характеристики відбивають зв'язок між Y та X при процесах, що протікають повільно, і при таких значеннях побічних вимірюваних величин $[T^{\circ}\text{C}, U\dots]$, які не перевищують критичних значень.

Статистична чутливість – це коефіцієнт перетворення:

$$K = \Delta Y / \Delta X,$$

де ΔY – зміна відхилення показчика;
 ΔX – реальна зміна вимірюваної величини.

Чутливість елементів (кожного з елементів схеми рис. 1.1) визначається як:

$$K_1 = \Delta X_1 / \Delta X; \quad K_2 = \Delta X_2 / \Delta X_1; \quad K_3 = \Delta X_3 / \Delta X_2;$$

$$K_4 = \Delta X_4 / \Delta X_3; \quad K_5 = \Delta Y / \Delta X_4.$$

Тоді коефіцієнт перетворення можна записати як

$$K = \Delta Y / \Delta X = K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * K_5.$$

Відносна похибка приладу :

$$\delta_Y = (\Delta Y - K \Delta X) / K \Delta X.$$

1.6 Динамічні характеристики приладів

Динамічні характеристики приладів необхідно враховувати при швидкоплинних процесах. Вони проявляються у вигляді спотворень форми графіку, що записується, та викликані інерцією приладу, тобто

перехідними процесами (рис. 1.2).

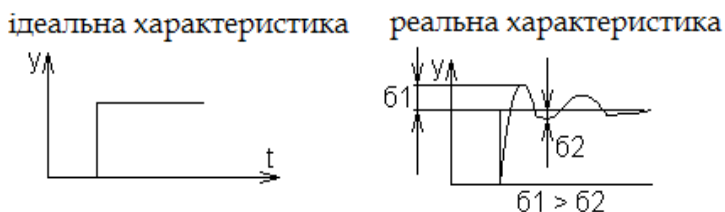


Рисунок 1.2 – Динамічні характеристики приладів (перехідні процеси)

Нормованим показником приладу є динамічний коефіцієнт:

$$k_1 = 61 / 62,$$

що показує міру інерційності приладу (61 та 62 – амплітуди коливань сигналу, див. рис. 1.2).

При конструюванні приладів величину k_1 намагаються зменшувати.

1.7 Методи аналогій і моделювання

Моделювання, зазвичай, виправдане економічними міркуваннями. Розроблено фундаментальну теорію подібності та моделювання (у т.ч. для процесів обробки металів – І. Барб, Ф. Кік, В.Л. Кирпичов, М.В. Кирпичов, Ю.М. Чижигов, Г.Г. Шломчак, Є.П. Унков, С.І. Губкін та ін., див., наприклад, [<http://metall-work.ru/kontrol/39.html>]).

Моделювання можна розділити на фізичне (подібність) і математичне (аналогове). Здійснення останнього вимагає, зазвичай, рівня знань в області математики.

Метод аналогій не вимагає геометричної або фізичної

подібності моделі та натури (їх реологічних характеристик), оскільки заснований на подвійному застосуванні однакових математичних функцій як до натури, так і до моделі.

Фізичне моделювання повинно враховувати подібність для моделі та натури характеристик пружності, пластичності, в'язкості, геометрії, температури та інших чинників.

Питання для самоконтролю

1. Поясніть особливості методів вимірювання енергосилових і технологічних параметрів у процесах обробки металів тиском (ОМТ).

2. В чому полягає важливість вимірювання для розвитку науки і техніки?

3. Назвіть основні способи експериментального вивчення напружено-деформованого стану металу й устаткування.

4. Назвіть основні види вимірювання і основні методи механіки твердого деформівного тіла.

5. В чому полягає поняття точності вимірювання приладами?

6. Відтворіть структурну схему електричного приладу для вимірювання неелектричної величини. Дайте пояснення.

7. Що таке статичні характеристики приладів?

8. Назвіть динамічні характеристики приладів.

9. Поясніть особливості методи аналогій і моделювання у процесах ОМТ.

Додаток А

А.1 Перелік найчастіше вживаних скорочень (абревіатур)

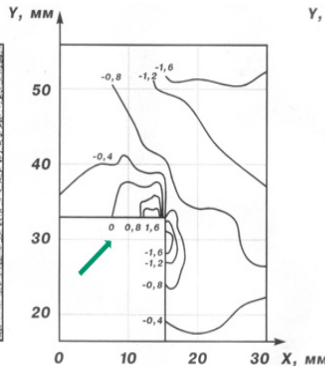
ММТДТ – методи механіки
твердого деформованого тіла
НДС – напружено-деформований
стан
ОМТ – обробка металів тиском
ТП – технологічний процес
Методи НК, МНК – методи
неруйнівного контролю
NDT – nondestructive testing
УЗ – ультразвук
УЗК – ультразвукові коливання
УЗД – ультразвукова
дефектоскопія

ЕММТДТ – експериментальні
ММТДТ
АЕ – акустична емісія
ГІ – голографічна
інтерферометрія
ПОМ – поляризаційно-оптичні
методи
ФТ – фотопружність
ФП – фотопластичність
ОЧП – оптично-чутливі покриття
(метод ОЧП)
МКС – метод координатних сіток

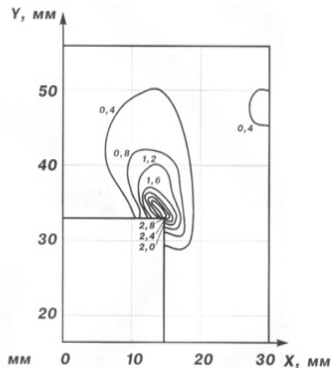
А.2 Оптимізація технології пресування порошкових виробів складної форми на основі голографічних досліджень (ГІ)



Інтерферограма
процесу пресування
мідного порошку



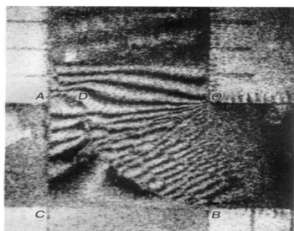
Розподіл висотних
деформацій ϵ_y
(область з
деформаціями
розтягування
вказана стрілкою)



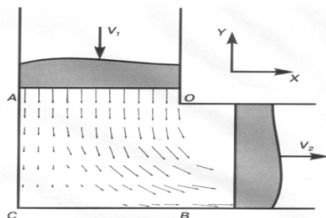
Розподіл зсувних
деформацій γ_{xy}

(Глухов Л.М. [<http://www.myshared.ru/slide/340781>])

А.3 Дослідження і оптимізація процесу кутового рівноканального пресування металевих порошків методом ГІ

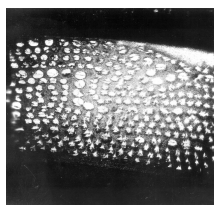


Інтерферограма процесу кутового рівноканального пресування порошку

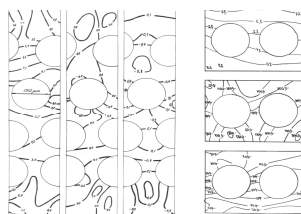


Розподіл векторів швидкостей течії часток порошку

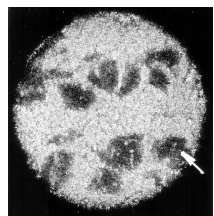
А.4 Дослідження і оптимізація процесу пресування труб з композиційного матеріалу типу Бор–Алюміній (В–АІ)



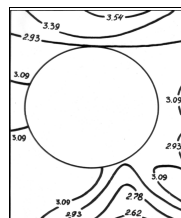
Збільшене (10х) зображення ділянки трубної заготовки з матеріалу В-АІ



Розподілу компонент тензора малих деформацій по товщині трубної заготовки



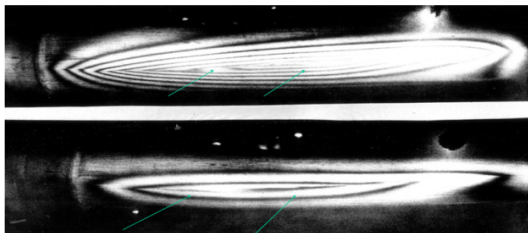
Збільшене (30х) зображення ділянки трубної заготовки з матеріалу В-АІ



Розподіл компонентів ϵ_r тензора малих деформацій біля одного волокна В

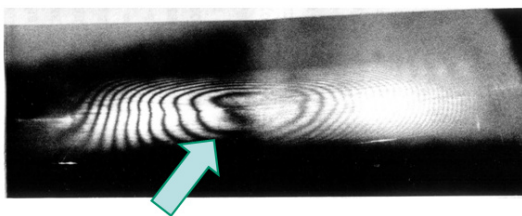
(Глухов Л.М. [<http://www.myshared.ru/slide/340781>])

A.5 Контроль якості труб з композиційного матеріалу типу *B-Al* методами голографічної інтерферометрії



Інтерферограми дефектних зразків з дефектами у вигляді тріщин (вказані стрілками), виявлених шляхом нагріву зразків

A.6 Контроль якості труб з композиційного матеріалу типу *B-Al* методами голографічної інтерферометрії



Інтерферограма дефектного зразка з дефектом у вигляді потоншення стінки (вказаний стрілкою), виявленого шляхом нагріву зразка

(Глухов Л.М. [<http://www.myshared.ru/slide/340781>])

A.7 Класифікація методів неруйнівного контролю (НК, NDT)

1 Методи контролю проникаючими речовинами

- 1.1 Капілярний метод
- 1.2 Пошук витіку

2 Акустичні методи контролю

- 2.1 Ультразвукова дефектоскопія
- 2.2 Метод акустичної емісії

3 Електромагнітні методи контролю

3.1 Електричний контроль:

- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| - електроємнісний | - електроіскровий |
| - електропотенціальний | - трибоелектричний |
| - електричного опору | - електростатичний порошковий |
| - термоелектричний | |

3.2 Магнітний контроль:

- | | |
|---------------------|----------------------|
| - магнітопорошковий | - індукційний |
| - магнітографічний | - пондеромоторний |
| - феррозондовий | - магніторезисторний |
| - гальваноманітний | - магнітооптичний |

4 Методи контролю випромінюваннями

4.1 Радіохвильовий контроль (НВЧ-випромінювання)

4.2 Оптичний і тепловий контроль

4.3 Радіаційний контроль (рентгенівське, гамма-випромінювання, нейтронне)

4.3.1 Радіографія (електро радіографія, нейтронна радіографія)

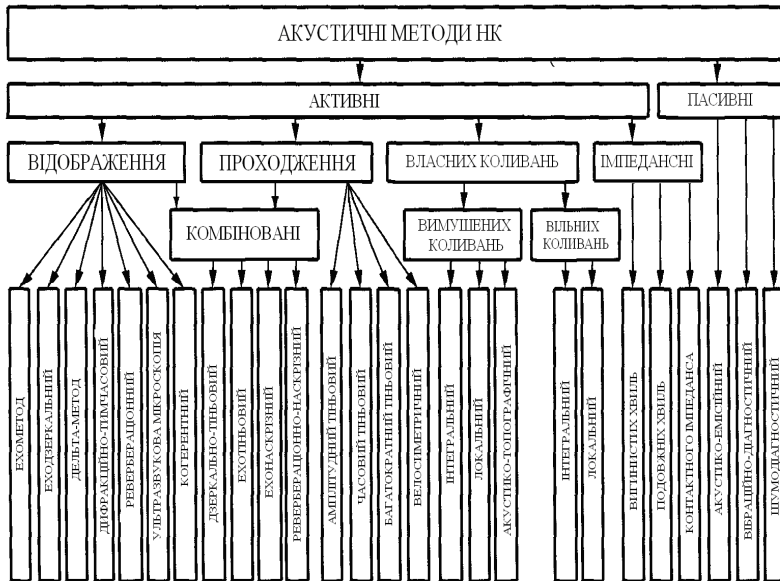
4.3.2 Радіоскопія (радіаційна інтроскопія)

4.3.3 Радіометрія

5 Інтроскопія

Методи і засоби візуального представлення внутрішньої структури різних об'єктів, непрозорих для видимого світла (акустична і рентгенівська томографія, комп'ютерна томографія).

А.8 Акустичні методи НК



(Глухов Л.М. [<http://www.myshared.ru/slide/340781>])

2 ГЕОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ

2.1 Основи геометричних методів

Найбільш відомим з геометричних методів експериментального аналізу деформацій є *метод ділильних або координатних сіток*.

Сутність методу полягає в тому, що на досліджувану поверхню наносять систему точок, ліній або будь-яких інших позначок, зміна взаємного розташування і конфігурації яких дозволяє визначити переміщення, деформації, швидкості деформацій і т.і. Найбільше поширення набули сітки, що складаються із взаємно перпендикулярних систем паралельних ліній з рівним кроком, що пов'язано з достатньою простотою їх отримання і обробки первинних експериментальних даних.

Метод ділильних сіток дає дискретну інформацію, база його задається відстанню між сусідніми лініями – кроком сітки. В результаті вимірювань можна визначити середнє значення переміщень і деформацій, тому для збільшення чутливості методу бажано зменшувати крок сітки. Це призводить до збільшення числа вимірювань, а також вимагає застосування високоточних вимірювальних приладів і більш якісного нанесення початкової сітки.

Для дослідження процесів обробки матеріалів тиском широко використовують метод муарових смуг, який відрізняється наочністю, порівняльною простотою і точністю. Суть методу полягає в тому, що при накладенні двох систем досить щільних ліній утворюються картини квазіінтерференційних смуг, які характеризують розбіжність в кроці і (або) напрямку цих ліній. На відміну від методу координатних сіток тут відбувається якісна зміна форми первинної інформації: замість дискретних значень вимірюваних величин є їх безперервні поля.

Всі перераховані методи, незважаючи на відмінності, мають внутрішню єдність, через те, що вони, фактично, дають одну і ту ж інформацію, засновану на реєстрації зміни геометричних розмірів. Жоден з цих методів не є абсолютним, кожен з них має свої переваги і недоліки і свою область застосування, крім того, в ряді випадків доцільно використовувати їх комбінації.

Інтерпретація дослідних даних. Розглянемо чистий вигин балки, на бічну поверхню якої нанесена система горизонтальних ліній з рівним кроком p (рис. 2.1). Вертикальні переміщення v в будь-якій точці балки можна визначити шляхом вирахування координат точки до і після прикладення навантаження. Величини v можна отримати і не вдаючись до вимірювань. Для цього на деформовану систему ліній необхідно накласти систему прямих ліній з кроком p , які будемо називати контрольними, або еталонними ґратками (решітками).

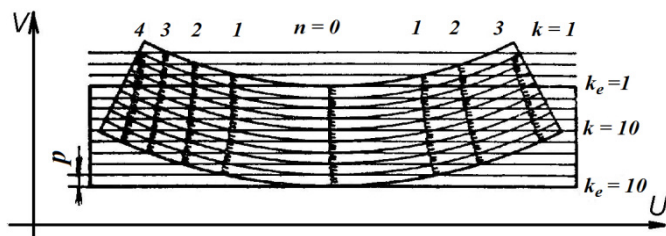


Рисунок 2.1 – Схема утворення муарової картини при чистому вигині балки, смуги якої 1, 2, 3 тощо – є лініями рівних вертикальних переміщень

Позначимо номери ліній деформованої ґратки (решітки) через k , а еталонної – k_e , тоді для будь-якої точки перетину цих ґраток отримаємо:

$$v = (k - k_e) p = np, \quad (2.1)$$

де $n = (k - k_e)$ – номер, або порядок точки перетину.

Поєднуючи точки з однаковим порядком плавною кривою, одержимо лінію з однаковим значенням вертикальних переміщень. При зменшенні кроку ґратки кількість точок перетинів збільшується і вони зливаються в безперервну лінію, яка називається муаровою смугою.

Таким чином, муарова смуга є геометричним місцем точок, що мають однакові вертикальні переміщення, перпендикулярні лініям еталонної ґратки.

Щоб отримати другу компоненту переміщень на зразок наносять вертикальну систему ліній. Величина горизонтального переміщення визначиться за формулою:

$$u = (l - l_e) p = np, \quad (2.2)$$

де $n = (l - l_e)$ – порядок муарової смуги;
 l_e і l – індекси ліній контрольної (еталонної) і деформованої ґраток.

На практиці порядок смуг більш зручно знаходити з фізичних міркувань. Так відомо, що точки бруса, який лежить на опорах, не мають вертикальних переміщень, і тому логічно вважати, що через них буде проходити смуга нульового порядку. Перша смуга відповідає переміщенням точок бруса у вертикальному напрямку на величину кроку p , друга смуга – на $2p$ і так далі. Для поля горизонтальних переміщень початком відліку зручно вибрати центр балки, тоді порядки смуг ліворуч і праворуч будуть рівні за величиною і зворотні за знаком.

2.2 Метод муар

У зв'язку з тим, що людське око, так само як і будь-яка оптична система, має обмежену роздільну здатність, то воно не може розрізняти деталей об'єктів, кут зору яких

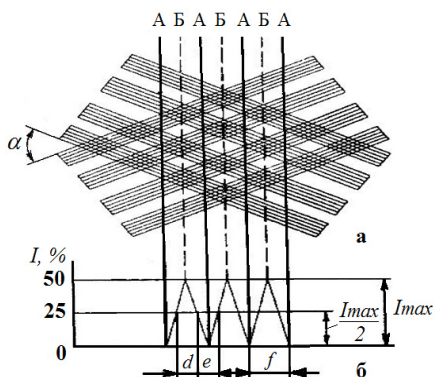
менше однієї хвилини. Тому, якщо два (або більше) досить щільних масиви будь-яких геометричних елементів накладаються один на інший і розглядаються в прохідному або відбитому світлі, то спостерігається *муаровий ефект*. Смуги, пов'язані з цією псевдоінтерференційною картиною, прийнято називати *муаровими смугами*.

Картина муарових смуг не є інтерференційною в точному значенні цього слова, так як утворення муарових смуг пояснюється зміною в розподілі інтенсивності світла при його проходженні через непрозорі смуги ґраток. Оптична інтерференція і дифракційні явища, зазвичай, не мають істотного впливу на створення такої картини. Це пояснення засноване на гіпотезі про прямолінійне поширення світла, яка є наближеною, але достатньою для тлумачення основних закономірностей муарового ефекту.

Розподіл інтенсивності світла. Нехай дві однакові ґратки, прозорість яких дорівнює 50 %, накладені одна на одну під кутом α (рис. 2.3). Якщо ґратки досить щільні, то при спостереженні неозброєним оком муарові смуги будуть безперервними (лінії первинних ґраток не буде видно). Теоретичний розподіл інтенсивності світла I , що пройшло через таку систему, відповідає закону трикутника. Тоді ширина темної смуги (повне гасіння світла) дорівнює нулю, однак, видима смуга буде значно більше. Тому за ефективну ширину темної муарової смуги приймають відстань між точками, в яких інтенсивність досягає половини максимального значення. Ефективні ширини, як темної, так і світлої смуги будуть однакові і рівні половині кроку між смугами, причому, через темну смугу пройде 12,5 %, а через світлу 37,5 % світла. Світлі муарові смуги проходять через малі діагоналі ромбів, що утворені лініями початкових ґраток, а великі діагоналі є осями другого муару. Видимим є той муар, для якого відстань між смугами найбільша.

Таким чином, муарові смуги є перпендикулярними до бісектриси кута між лініями пересічних початкових ґраток, а їх крок дорівнює:

$$f = p / (2 \sin \frac{\alpha}{2}). \quad (2.3)$$



a – схема і *б* – розподіл інтенсивності світла;
 А та Б – центри;
f, *d* і *e* – крок, ефективні ширини темних і світлих муарових смуг відповідно

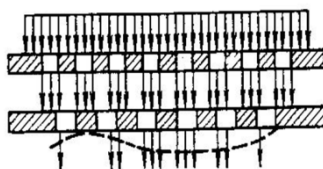


Рисунок 2.4 – Схема проходження світла (стрілки) через дві паралельно накладені одна на іншу ґратки з різним кроком;
 штрихова лінія – (середня) інтенсивність світла, що реєструється

Рисунок 2.3 – Проходження світла через дві ідентичні лінійні ґратки, накладені під кутом α

При збільшенні кута α крок смуг зменшується, і навпаки. Муарові смуги зникають, якщо кут α дорівнює 0° або 60° , проте, практичний діапазон є меншим і досить хорошу картину можна отримати при кутах менше 40° .

При накладенні двох прямолінійних ґраток з різним кроком ($p_1 > p_2$) без кутового зміщення – утворюються муарові полоси, паралельні лініям ґраток з кроком f .

$$f = \frac{p_1 p_2}{p_1 - p_2}. \quad (2.4)$$

Розподіл інтенсивності світла, що проходить, в цьому випадку можна представити у вигляді прямокутників різної ширини (рис. 2.4).

Через те, що інтенсивність світла є усередненою, освітленість поля буде більш-менш плавною функцією. Піки цієї функції виникають там, де середня інтенсивність досягає максимуму і око реєструє світлі смуги. Западини відповідають мінімуму середньої інтенсивності світла, яке пройшло, і реєструються у вигляді темних муарових смуг. Аналіз формул (2.3) і (2.4) показує, що малим відносним кутовим зміщенням і різницям у кроці ґраток відповідає порівняно великий крок муарових смуг. Цей ефект використовується для вимірювання малих величин переміщень.

У загальному випадку накладення двох прямолінійних ґраток з різним кроком і взаємним поворотом на кут α – муарові смуги є системою прямих, нахилених під кутом φ і кроком f , де:

$$f = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos \alpha}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{p_1 \sin \alpha}{p_1 \cos \alpha - p_2}. \quad (2.5)$$

Часто, замість кута нахилу муарових смуг φ і їх кроку f , використовуються відстані між муаровими смугами в напрямку осей f_x і f_y , для яких справедливі такі рівності:

$$f = \frac{f_x f_y}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \pm \frac{f_y}{f_x}, \quad (2.6)$$

де знак плюс справедливий для I – III квадрантів.

2.3 Аналіз муарових смуг і картин частинних похідних

Муарові смуги є параметричними кривими, тобто є сімейством кривих. В першу чергу визначають вид рівняння, що описує дане сімейство кривих, після чого знаходять параметри даного рівняння, тобто аналітичний опис кривих. Щоб отримати компоненти деформованого стану, необхідно знати значення частинних похідних переміщень по координатам. Тут можливе застосування методів графічного або аналітичного диференціювання. Одним з методів є метод «прогонки смуги» (рис. 2.5), який полягає в тому, що при постійному значенні параметра смуги величина похідної буде прямо-пропорційна відношенню $p/\Delta x$, яку називають ціною поділки смуги. Ця величина повністю визначається зсувом Δx .

Косі ґратки і зсуви. Для деяких завдань наявність геометричної і силової симетрії дозволяє визначити дві компоненти вектора повного переміщення u і v тільки за одною муаровою картиною.

Так, якщо початковий напрямок ліній ґратки становить кут α з віссю симетрії зразка, то після деформування і накладення еталонної ґратки отримуємо поле переміщень $u_\alpha = const$. Картина муарових смуг u_α є дзеркальним відображенням картини $u_{-\alpha}$. Отже, за одною муаровою картиною отримуємо дві компоненти переміщення u_α та $u_{-\alpha}$, які пов'язані з горизонтальним u і вертикальним v переміщеннями співвідношеннями:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= u \cdot \cos \alpha + v \cdot \sin \alpha; & u_{-\alpha} &= u \cdot \cos \alpha - v \cdot \sin \alpha; \\ \text{або} & & & \\ 2u \cdot \cos \alpha &= u_\alpha + u_{-\alpha}; & 2v \cdot \sin \alpha &= u_\alpha - u_{-\alpha}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

У загальному випадку плоскої задачі, необхідно мати дві муарові картини, наприклад, u_α й v_α , пов'язані з u та v співвідношеннями (див. рис. 2.6):

$$\begin{aligned} u_\alpha &= u \cdot \cos \alpha + v \cdot \sin \alpha; & v_\alpha &= v \cdot \cos \alpha - u \cdot \sin \alpha; \\ \text{або} & & & \\ u &= u_\alpha \cos \alpha - v_\alpha \sin \alpha; & v &= u_\alpha \sin \alpha + v_\alpha \cos \alpha. \end{aligned} \quad (2.8)$$

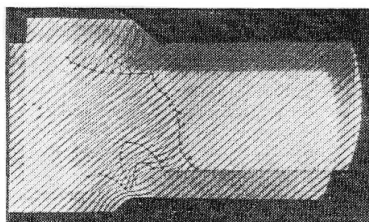


Рисунок 2.5 – Отримання картини частинної похідної способом «прогонки смуги» в методі координатної сітки

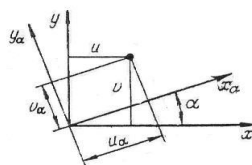


Рисунок 2.6 – Співвідношення між координатами і переміщеннями при повороті осей

При деформуванні ґраток, нанесених під кутами α і $(\alpha + 90^\circ)$, шляхом зсуву в напрямку осей x і y , будемо мати значення частинних похідних $\partial u_\alpha / \partial x$; $\partial u_\alpha / \partial y$; $\partial v_\alpha / \partial x$ та $\partial v_\alpha / \partial y$. З огляду на співвідношення (2.8), отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial y} &= \frac{\partial u_\alpha}{\partial y} \sin \alpha - \frac{\partial v_\alpha}{\partial y} \cos \alpha; & \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{\partial u_\alpha}{\partial x} \cos \alpha - \frac{\partial v_\alpha}{\partial x} \sin \alpha; \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{\partial u_\alpha}{\partial y} \cos \alpha + \frac{\partial v_\alpha}{\partial y} \sin \alpha; & \frac{\partial v}{\partial x} &= \frac{\partial u_\alpha}{\partial x} \sin \alpha - \frac{\partial v_\alpha}{\partial x} \cos \alpha. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Як приклад, на рис. 2.7, а і б показані частинні похідні $\partial u_{45} / \partial y$ та $\partial u_{45} / \partial x$, а знайдені за цими формулами значення похідної $\partial v / \partial y$ показані на рис. 2.7, в хрестиками.

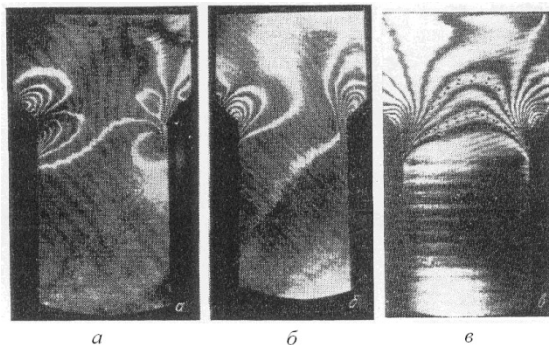


Рисунок 2.7 – Поля частинних похідних du_{45}/dy (а), du_{45}/dx (б), dv/dy (в)

Так як в даному випадку $\alpha = 45^\circ$, то ці формули спрощуються і зводяться до виду:

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial u_{45}}{\partial y} + \frac{\partial v_{45}}{\partial y}; & \sqrt{2} \frac{\partial v}{\partial x} &= -\frac{\partial u_{45}}{\partial x} + \frac{\partial v_{45}}{\partial x}; \\ \sqrt{2} \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{\partial u_{45}}{\partial x} + \frac{\partial v_{45}}{\partial x}; & \sqrt{2} \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{\partial u_{45}}{\partial y} + \frac{\partial v_{45}}{\partial y}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

При наявності геометричної і силової симетрії, поле v_{45} є дзеркальним відображенням поля $\partial v/\partial y$, $\partial v/\partial x$, $\partial u/\partial y$ і $\partial u/\partial x$. Фотографії деяких полів частинних похідних наведені на рис. 2.8.

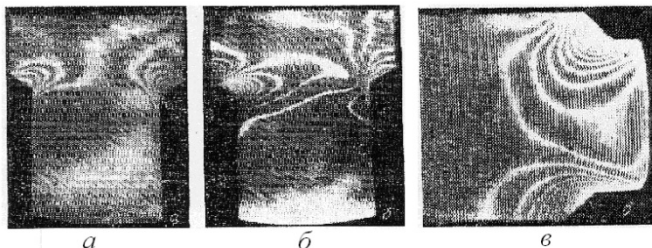
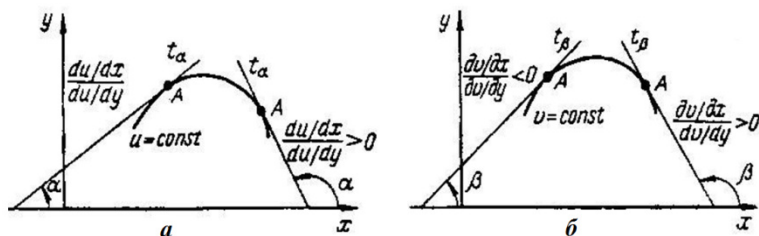


Рисунок 2.8 – Поля частинних похідних du_{45}/dx_{45} (а), du_{45}/dy_{45} (б) і dv/dx_{45} (в)

Наведені міркування можуть бути застосовані до методу координатних сіток. Для цього необхідно дві копії деформованої сітки зсунути одна від іншої і з'єднати відповідні точки перетину плавною кривою. Точність компонент тензора деформацій, в цьому випадку, буде трохи нижче внаслідок меншої кількості точок перетину, через які проходять лінії з рівними значеннями частинних похідних. Проте, застосування цього наближеного способу визначення переміщень і деформацій, що виключає операцію вимірювання координат деформованої сітки, є в багатьох випадках доцільним.

З умови безперервності переміщень витікає, що лінії рівних переміщень у внутрішніх областях досліджуваної поверхні замкнені криві, а незамкнені лінії починаються і закінчуються на контурі.

Муарові смуги, які відповідають різним значенням переміщень, не перетинаються. При аналізі муарової картини (приклад див. на рис. 2.9) потрібно враховувати зростає або спадає функція u (або v). Для цього досліджувану поверхню розбивають на області з постійними знаками частинних похідних переміщень; вони поділяються лініями, в яких відповідні частинні похідні перетворюються в нуль.



$$a - u = \text{const}, \quad b - v = \text{const}$$

Рисунок 2.9 – Зв'язок між кутом нахилу дотичної до муарової смуги і знаками частинних похідних

Нехай α і β – кути, утворені дотичними t_α і t_β муарових смуг $u = \text{const}$ і $v = \text{const}$ з позитивним напрямком осі x (див. рис. 2.9). Тоді лінія $\partial u / \partial x = 0$ проходить через точки, для яких $\alpha = 0^\circ$, тобто, дотична t_α паралельна осі x ; лінія $\partial u / \partial y = 0$ проходить через точки, в яких $\alpha = 90^\circ$, тобто паралельна осі y .

Таким чином, лінії нульових перших похідних можна легко побудувати по муаровим картинам переміщень.

2.4 Метод координатної сітки

Термін *координатна* або *ділильна* сітка використовується в широкому сенсі, тобто він позначає не тільки систему рисок або інших міток, нанесених на площині, а й просторові системи гвинтів, штифтів, рейок, ґраток (комірок) і т.с. Незважаючи на різноманіття варіантів виконання сіток, за способом інтерпретації експериментальної інформації їх можна розділити на дві основні групи: до першої групи належать методи, які використовують співвідношення *деформаційної теорії пластичності*; методи другої групи ґрунтуються на *теорії пластичної течії* (пластичного плину). У всіх випадках вводиться гіпотеза про ізотропність матеріалу і однорідність деформації в межах кожної комірки сітки, а отримані компоненти деформованого стану є середніми і, умовно, можуть бути віднесені до центру комірки.

На початковому етапі розвитку метод координатних сіток використовували тільки для якісного аналізу напружено-деформованого стану. Удосконалення методики проведення експерименту і способів обробки дослідних даних, а також розвиток обчислювальної техніки, дали можливість здійснювати кількісний аналіз. Однак, обробка експериментальної інформації за методом координатної сітки і в даний час залишається досить

трудомістким процесом, що зумовлено великою кількістю вимірювальних операцій і підготовкою даних до введення в ЕОМ. Тому, перспективи подальшого розвитку методу пов'язані з вирішенням проблеми автоматизації експериментальних досліджень.

Кінцеві деформації. Розглянемо випадок нанесення координатної сітки на площину дії головних деформацій. Найбільш просто можна визначити компоненти головних деформацій в тому випадку, коли їх напрями відомі і не змінюються в процесі деформування. У цьому випадку коло (окружність), вписане у квадратну комірку сітки, перетворюється в еліпс, а сама комірка – у прямокутник.

Головні деформації еліпсу визначаються за формулами:

$$\overline{\varepsilon_1} = \ln \frac{r_1}{r_0} ; \quad \overline{\varepsilon_2} = \ln \frac{r_2}{r_0} , \quad (2.11)$$

де r_0 , r_1 і r_2 – радіус початкового кола і головні напіввісі еліпсу відповідно.

Якщо деформація комірки супроводжується зсувом, то початковий квадрат перетворюється у паралелограм (рис. 2.10, а) і головні напіввісі еліпсу визначають так:

$$r_{1,2} = \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_1^2 + b_1^2}{2}\right)^2 - a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta_1}} , \quad (2.12)$$

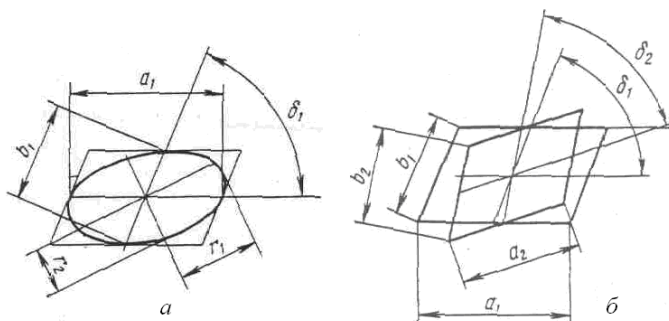
де a_1 і b_1 – розміри комірки після деформації.

Напрямок найбільших (головних) деформацій обчислюється за формулою:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{r_1^2 - r_2^2}{2r_1^2} \operatorname{tg} \delta_1 - \sqrt{\left(\frac{r_1^2 - r_2^2}{2r_1^2} \operatorname{tg} \delta_1\right)^2 - \frac{r_2^2}{r_1^2}} . \quad (2.13)$$

Головні компоненти деформацій визначаються за рівняннями (2.11), а інтенсивність логарифмічних деформацій, з урахуванням умови нестисливості, буде:

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}. \quad (2.14)$$



a – прямокутник – паралелограм;

б – паралелограм – паралелограм

Рисунок 2.10 – Схема перетворення комірки ділильної сітки

Таким чином, тільки для однієї комірки необхідно провести три вимірювання: два лінійних і одне кутове. У загальному випадку, коли вихідна комірка має форму паралелограма (рис. 2.10, б), головні деформації визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_1 &= \frac{1}{2} \ln \frac{b_2^2 + n_1^2 a_2^2 + 2n_1 a_2 b_2 \cos \delta_2}{b_1^2 + n_1^2 a_1^2 + 2n_1 a_1 b_1 \cos \delta_1}; \\ \bar{\varepsilon}_2 &= \frac{1}{2} \ln \frac{b_2^2 + n_2^2 a_2^2 + 2n_2 a_2 b_2 \cos \delta_2}{b_1^2 + n_2^2 a_1^2 + 2n_2 a_1 b_1 \cos \delta_1}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

де a_2 і b_2 – розміри паралелограма після деформації, а

$$n_{1,2} = \left[(a_1^2 b_2^2 - a_2^2 b_1^2) \pm \sqrt{(a_1^2 b_2^2 - a_2^2 b_1^2 + \dots + 4(a_1 b_1 a_2^2 \cos \delta_1 - a_2 b_2 a_1^2 \cos \delta_2) \times \dots \times (a_1 b_1 b_2^2 \cos \delta_1 - a_2 b_2 b_1^2 \cos \delta_2))} \right] / 2(a_1 \times \dots \times b_1 a_2^2 \cos \delta_1 - a_2 b_2 a_1^2 \cos \delta_2) \quad (2.16)$$

Напрямок головних осей у вихідному і деформованому стані буде:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_1 &= \frac{b_1 \sin \beta_1 + n_{1,2} a_1 \cos \alpha_1}{b_1 \cos \beta_1 + n_{1,2} a_1 \sin \alpha_1}; \\ \operatorname{tg} \varphi_2 &= \frac{b_2 \sin \beta_2 + n_{1,2} a_2 \cos \alpha_2}{b_2 \cos \beta_2 + n_{1,2} a_2 \sin \alpha_2}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Ці формули виявляються доцільними при поетапному дослідженні процесів обробки матеріалів, коли комірки для наступних етапів не є прямокутними.

При дослідженні напружено-деформованого стану для осесиметричних задач пластичної формозміни зручно використовувати ділильну сітку, що складається з системи кіл (окружностей) з радіусом r_0 . Головні деформації тоді обчислюють за простими співвідношеннями:

$$\overline{\varepsilon}_\theta = \ln \frac{R}{R_0}; \quad \overline{\varepsilon}_1 = \ln \frac{r_1}{r_0}; \quad \overline{\varepsilon}_2 = \ln \frac{r_2}{r_0}, \quad (2.18)$$

де $\overline{\varepsilon}_\theta$, $\overline{\varepsilon}_1$ і $\overline{\varepsilon}_2$ – окружна і головні деформації в меридіональному перерізі;

R_0 і R – відстані від осі симетрії до певної точки до і після деформування;

r_1 і r_2 – напіввісі еліпсу, в який перетворилася первісна окружність.

Напрямок головної деформації визначається експериментально, як кут φ між напрямком більшої

напіввісі еліпсу r_1 і віссю зразка. Осьову і радіальну логарифмічну деформації можна знайти за формулами:

$$\bar{\varepsilon}_z = \frac{1}{2} \left(\bar{\varepsilon}_\theta + \ln \frac{r_1}{r_2} \cos 2\varphi \right); \quad \bar{\varepsilon}_r = \frac{1}{2} \left(\bar{\varepsilon}_\theta - \ln \frac{r_1}{r_2} \cos 2\varphi \right). \quad (2.19)$$

Компоненти девіатора напружень можна визначити, використовуючи рівняння теорії опору матеріалів пластичній деформації. Величини нормальних напружень знаходять при інтегруванні відповідних диференціальних рівнянь рівноваги. Загальним недоліком цих методів, обробки первинних експериментальних даних є порівняно невисока точність вимірювання кутових величин. Відзначимо, що досить точні результати можна отримати, вимірюючи тільки лінійні координати вузлів сітки.

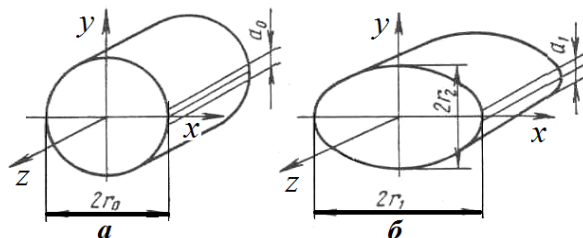
2.5 Метод побудови фіктивної сітки без поділу зразка

Цей метод був розроблений для дослідження нерівномірності деформації при куванні круглої заготовки. Він дозволяє розрахувати орієнтовні параметри координатної сітки, розташованої у вертикальній і горизонтальній площинах симетрії суцільної заготовки.

Для цього на бічній поверхні зразка наносять дві лінії, паралельні його твірній (рис. 2.11); вимірюючи в фіксованих точках відстань між цими рисками (лініями) до a_0 та після a_1 деформації, можна визначити висотну деформацію:

$$\bar{\varepsilon}_y \bigg|_{\substack{x=r_0 \\ y=0}} = \ln \frac{a_1}{a_0}, \quad (2.20)$$

де r_0 – радіус заготовки.



a – зразок до деформування;
 b – зразок після деформування

Рисунок 2.11 – Схема розрахунку фіктивної ділильної сітки

Припустимо, що виконується гіпотеза плоских перерізів, тоді середня деформація вздовж осі z буде постійною і дорівнює:

$$\varepsilon_z = \ln \frac{F_0}{F_1}; \quad \varepsilon_x = -\varepsilon_y - \varepsilon_z, \quad (2.20)$$

де F_0 та F_1 – початкова і кінцева площі поперечного перерізу.

У багатьох випадках, без великої похибки, можна вважати, що при деформації початковий круглий поперечний переріз перетворюється в еліпс, площу якого можна обчислити за формулою:

$$F_1 \approx \ln \frac{\pi}{4} r_1 r_2. \quad (2.21)$$

Так як дослідження проводиться в головних площинах, то деформації ε є головними і визначаються за формулами:

$$\bar{\varepsilon}_x = \ln(1 + \varepsilon_x) = \ln\left(1 + \frac{\partial u}{\partial X}\right) = \ln\left(\frac{\partial x}{\partial X}\right); \quad (2.22)$$

$$\bar{\varepsilon}_y = \ln(1 + \varepsilon_y) = \ln\left(1 + \frac{\partial u}{\partial Y}\right) = \ln\left(\frac{\partial x}{\partial Y}\right),$$

де X і Y – координати матеріальної точки в недеформованому стані;

x і y – координати цієї самої точки після деформації.

Так як в силу симетрії функції переміщень u та v непарні, то можна записати:

$$\frac{\partial x}{\partial X}\Big|_{y=0} = C_0 - C_1\left(\frac{X}{r_0}\right)^2; \quad \frac{\partial x}{\partial Y}\Big|_{X=0} = C_2 - C_3\left(\frac{Y}{r_0}\right)^2. \quad (2.23)$$

Сталі C_0 , C_1 , C_2 і C_3 можна виразити безпосередньо через результати вимірювань відстаней між рисками і площі поперечного перерізу:

$$C_0 = \frac{3}{2}\left(\frac{r_1}{r_0} - \frac{F_1 a_0}{F_0 a_1}\right); \quad C_1 = C_0 - \frac{F_1 a_0}{F_0 a_1}; \quad (2.24)$$

$$C_2 = \frac{r_1 r_2}{r_0^2 C_0}; \quad C_3 = 3\left(C_2 - \frac{r_2}{r_0}\right).$$

Значення координат для побудови ліній сітки, яку ми мали б на площині фізичного різку, обчислюють за формулами:

$$x\Big|_{y=0} = \int_0^x \frac{\partial x}{\partial X} dX = C_0 X - \frac{C_1}{3}\left(\frac{X}{r_0}\right)^2 X; \quad (2.25)$$

$$y\Big|_{x=0} = \int_0^y \frac{\partial y}{\partial Y} dY = C_2 Y - \frac{C_3}{3}\left(\frac{Y}{r_0}\right)^2 Y.$$

Експериментальна перевірка показала, що похибка обчислення площі поперечного перерізу за формулою еліпса

не перевищує 5 %; умова сталості поздовжньої деформації виконується з точністю 5...10 %, а відхилення фактичної координатної сітки від розрахункової становить 10...15 %.

Ці дані дозволяють зробити висновок про те, що спосіб фіктивної (розрахункової) ділильної сітки можна успішно використовувати для якісного експрес-аналізу деформованого стану низки процесів пластичної формозміни металів у холодному і гарячому станах.

2.6 Метод шаруватих моделей

Обмеженням методу ділильних сіток є те, що поверхні дослідження заздалегідь фіксуються. Цей недолік може бути в якійсь мірі компенсований застосуванням шаруватих моделей, причому в якості модельного матеріалу можуть використовуватися кольорові глини, пластилін і метали різного кольору.

Досліджуваний об'єкт, в даному випадку, виготовляють з набору різнокольорових пластин, циліндрів або елементів інших конфігурацій, з'єднаних між собою тим чи іншим способом. Після деформування зразок розрізають по будь-якій заданій площині або поверхні, на якій видно межі викривлених деформацією шарів (рис. 2.12). Ця інформація є вихідною для подальшого аналізу напружено-деформованого стану.

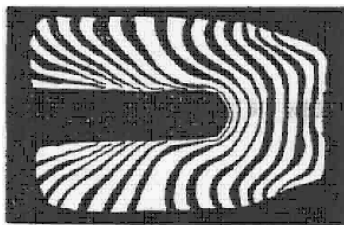


Рисунок 2.12 – Фотографія деформованої шаруватої моделі

Найбільш просто виготовити таку модель з кольорового пластиліну. Однакові по товщині пластини спресовують у моноліт, а для отримання більш чітких меж розділу шарів на їх поверхню наносять тонкий шар пудри. Шари такого матеріалу мають однакові механічні характеристики і реологічні властивості. Деформування, зазвичай, виконують дерев'яним інструментом.

Основним недоліком таких моделей є те, що реологічна поведінка пластиліну і металу має істотну різницю, тому метод може бути використаний тільки для якісної оцінки процесів формозміни. Крім цього, точність одержуваних результатів невисока, через труднощі виготовлення рівнотовщинних і досить тонких пластин, а також через великі похибки у вимірюваннях внаслідок розмитості меж між шарами.

Більш перспективними є шаруваті металеві моделі, на яких можна проводити дослідження при кімнатних і підвищених температурах; вони можуть складатися з шарів товщиною до десятих часток міліметра і дозволяють робити кількісний аналіз. Для виготовлення такого матеріалу підбирають метали з близькими механічними характеристиками і різним кольором (хороші результати були отримані на парі «мідь – томпак»).

З'єднання шарів здійснюється у результаті утворення твердих розчинів заміщення на їхніх кордонах у процесі взаємної дифузії металів при гарячому пресуванні або прокатці пакету. До недоліків можна віднести анізотропію такого матеріалу і технічні труднощі в отриманні однакових за товщиною шарів (різнотовщинність може досягати 50 %). Остання обставина обмежує можливість отримання кількісних даних.

Питання для самоконтролю

1. Сформулюйте основи геометричних методів.
2. Що представляє собою метод Муар? В чом його фізична сутність?
3. Зобразіть схему проходження світла через дві ідентичні лінійні ґратки.
4. Зобразіть схему проходження світла (стрілки) через дві паралельно накладені один на одного ґратки з різним кроком.
5. Як проводять (за якою методикою) аналіз муарових смуг і картин частинних похідних?
6. Поясніть сутність методу координатної сітки.
7. Поясніть сутність методу побудови фіктивної сітки без поділу зразка.
8. Поясніть сутність методу шаруватих моделей. Які матеріали використовують при дослідженнях методом шаруватих моделей?

Додаток Б

Б.1 Метод муар

Метод муару (муарових смуг) [moire method] – це:

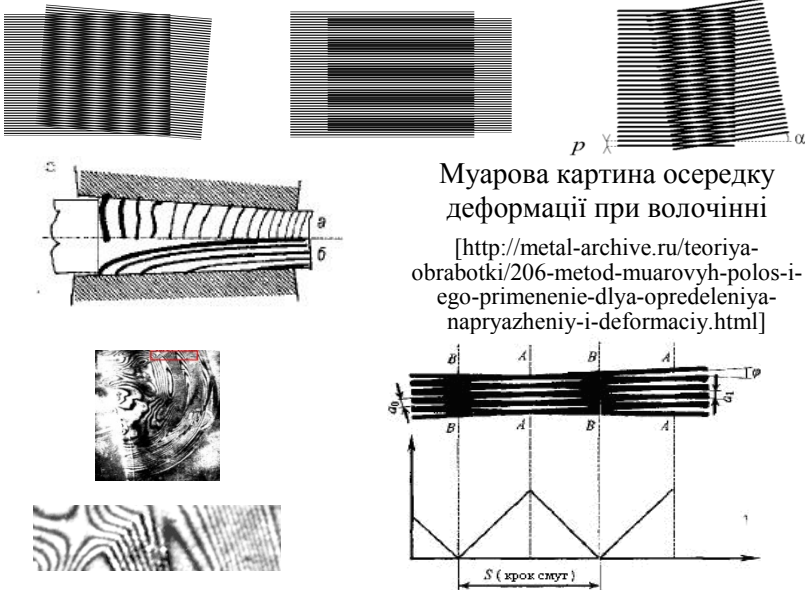
- Експериментально-теоретичний метод визначення деформацій і переміщень по світлих і темних смугах, що чергуються, утворюються внаслідок механічної інтерференції, що виникають при накладенні двох або більше за системи ліній, сіток, растрів або точок.

- Метод передбачає виготовлення контрольного растру, нанесення растру на тіло до його деформації і накладення його після деформації на контрольний.

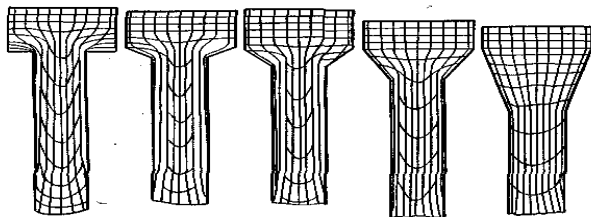
- Спостережувані при накладенні муарові смуги є геометричним місцем точок, що одержують однакове переміщення в напрямі, перпендикулярному до ліній контрольного растру.

- При плоскій стаціонарній пластичній течії муарові смуги дають (у ейлеревих координатах) картину поля переміщень в даному перерізі тіла.

- Для аналізу картин муару і визначення деформацій будують графіки зміни переміщень і швидкостей уздовж прямих, паралельних осям координат.



Б.2 Метод координатної сітки – деформація сітки в процесі пресування прутка

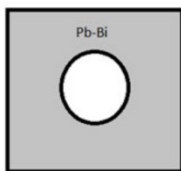


Б.3 Метод шаруватих моделей

*Фізичне моделювання
процесу деформації
слябів та блюмів на
машинах безперервного
лиття заготовок
(автор: Смирнов Є.М.)*



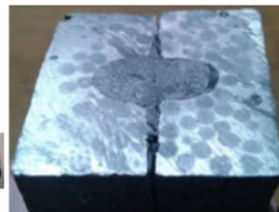
Модельні зразки (сляб)



Модельний зразок
блюму зі сплаву
свинець-вісмут



Автор: Смирнов Є.М.



3 ЕЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРИЯ

3.1 Дротяні датчики опору та їх конструкція

Тензометри призначені для експериментального визначення відносних подовжень (або вкорочень) на поверхнях твердого тіла. З усього різноманіття тензометрів (механічних, пневматичних, гідравлічних і т.і.) найбільшого поширення набули електротензометри. Електричні методи вимірювання деформацій засновані на реєстрації зміни будь-якого електричного параметру (ємності, індуктивності, електричного опору і т.і.), яке відбувається в датчику, установленому на досліджуваному об'єкті.

Залежно від того, який параметр змінюється при навантаженні, датчики називають індукційними, емісійними, магнітострикційними і датчиками опору. Щоб зафіксувати електричний сигнал, який виник у результаті деформації, необхідно мати датчик, пристрій для посилення одержуваного від датчика сигналу і будь-який пристрій, що реєструє.

В обробці металів тиском найчастіше використовують *дротяні датчики опору* (ДДО), які називають ще *тензорезисторами*, тому тут обмежимося розглядом цього класу датчиків.

Тензодатчики складаються з основи (бази або підкладки), на якій розміщується дріт, намотаний в певному порядку у вигляді котушки. Тензодатчики призначені тільки для вимірювання пружних деформацій і не розраховані на пластичні деформації.

Розміщення ДДО на об'єктах, що пластично деформуються, може призвести до розриву дроту. Характеристики, які стосуються пластичної формозміни, отримують побічно, з пружних деформацій елементів

обладнання, на які кріплять тензодатчики. Причому, пружному деформуванню елемента обладнання на певну величину буде відповідати сила, рівна або пропорційна силі, яка витрачена на пластичне деформування тіла.

У відповідності з різними способами розміщення дроту на пласкій основі тензометра розрізняють наступні типи тензометрів.

1. Тензометр з паралельними ґратами.
2. Тензометр з пласкою котушкою.
3. Тензометр з одиночним дротом.
4. Тензометр напружень.
5. Тензометр з поперечними перемичками.

У найбільш поширеному тензодатчику з *паралельними ґратами* (рис. 3.1, *а*) дріт утворює ґратку з паралельних ліній, пов'язаних з кінцями півколами. Дроту тензодатчика в місцях півкіл часто повідомляється подовження досліджуваної деталі в напрямку, перпендикулярному до подовжньої осі тензодатчика, що може призводити до спотворення результатів вимірювання. При цьому похибка, що виникає, наприклад, для тензодатчика типу PR 9210 фірми Philips, становить близько 5 %, коли відносне подовження в поперечному напрямку в 2 рази більше відносного подовження в подовжньому напрямку. При відомому розташуванні і певних розмірах ґратки тензодатчика вплив поперечного подовження легко може бути розрахований і врахований при обробці результатів вимірювань при двовірному напруженому стані шляхом введення відповідних виправлень.

Тензодатчик з *пласкою котушкою* виготовляється шляхом намотування дроту у вигляді циліндричної котушки, яку потім сплющують і в такому вигляді наклеюють на пласку основу (рис. 3.1, *з*). Тензодатчики цього типу можуть бути виготовлені з меншою довжиною

бази, але мають той недолік, що дроти, які утворюють верхні половини сплюснутих витків ґратки, знаходяться на порівняно великій відстані від основи тензодатчика.

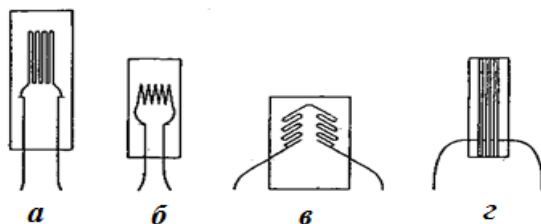


Рисунок 3.1 – Різні типи дротяних тензодатчиків опору, що наклеюються

Поперечна чутливість тензодатчиків з пласкою катушкою в більшості випадків незначна й іноді, навіть, буває негативною в зв'язку з тим, що ділянки дроту в місці сполучення верхньої і нижньої половин витків розташовані перпендикулярно поверхні досліджуваної деталі. Тензодатчики з паралельними ґратами і з пласкою катушкою в більшості випадків виготовляються вручну на спеціальних пристроях.

Тензодатчик з *одиначним дротом* складається з одного єдиного дроту, розміщеного уздовж поздовжньої осі датчика. Такі датчики не чутливі до подовження в поперечному напрямку, але мають малий опір або виконуються з великою довжиною бази.

У датчику напружень (рис. 3.1, *в*) дріт розташований у вигляді подвійної ґратки, параметри якої підібрані таким чином, що відношення поперечної чутливості до поздовжньої дорівнювало коефіцієнту Пуассона для матеріалу досліджуваної деталі.

3.2 Кріплення тензодатчиків і особливості технології експерименту

В якості основи тензорезисторів може служити папір або пластмасова панель. Пластмаси, що застосовуються в якості основ тензодатчика, зазвичай, більш теплопровідні, ніж папір, однак, товщина основи з пластмаси часто буває більше товщини паперової основи. Наклейка тензометрів з основою з пластмаси за допомогою клеїв з розчинником, що випарюється, вимагає більше часу, так як для повного висихання клею під основою тензометра, що майже не пропускає пари розчинника, часто потрібно кілька діб. У той же час, тензометр з паперовою основою буває готовий для вимірювань не пізніше 24 годин після наклеювання.

Для збереження дроту тензодатчика від механічних пошкоджень дріт закривають смужкою фетру або повністю втоплюють дріт в основу датчика. Ці заходи одночасно забезпечують захист дроту від швидких змін температури в результаті охолодження місцевим потоком повітря або нагрівання при короткочасній дії теплового випромінювання.

Дріт наклеєного на деталь стандартного тензодатчика опору зазвичай має електричну ємність по відношенню до металевій деталі близько 50 пф (пікофарад). Якщо деталь знаходиться під напругою змінного струму, то, завдяки наявності цієї ємності, на дроті тензометра можуть з'являтися досить значні напруги-перешкоди, які часто не вдається повністю усунути, незважаючи на наявність в вимірювальній схемі фільтрів і випрямлювачів. У цих випадках виявляється корисним повне екранування дроту датчика. Для такого екранування тензометр обклеюють обмоткою з тонкої мідної стрічки (наприклад, перетином $2 \text{ мм} \times 0,01 \text{ мм}$), спресовують, ізолюють і в такому вигляді

наклеюють на досліджувану деталь. Витки екрануючої обмотки пропадають уздовж осьової лінії тензодатчика і після наклеювання тензодатчика екрануючу обмотку з'єднують з опліткою кабелю, що екранує та з'єднує тензометр з вимірником.

Для позначення положення дроту тензометра на його поверхні наносять дві взаємно осьові лінії.

Найвигідніші значення омичного опору тензодатчика лежать в області від 100 Ом до 1000 Ом.

3.3 Фізичні основи електротензометрії

Явище, покладене в основу електротензометрії, засноване на зміні електричного опору при деформації металевий провідника. Відомо, що омичний опір R провідника довжиною l площею поперечного перерізу F і питомим опором ρ змінюється за наступним законом:

$$R = \rho \frac{l}{F}. \quad (3.1)$$

Продиференціюємо рівність (3.1) і розділяємо її на загальний опір, отримаємо:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dF}{F}. \quad (3.2)$$

Величина dF визначає зміну поперечного перерізу провідника в результаті деформації і дорівнює:

$$\frac{dF}{F} = -2\mu \frac{dl}{l} + \mu^2 \left(\frac{dl}{l} \right)^2 \approx -2\mu \frac{dl}{l}, \quad (3.3)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона.

Підставляючи (3.3) в (3.2), матимемо:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l}(1+2\mu) = \left[(1+2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \right] \varepsilon = k\varepsilon, \quad (3.4)$$

де k – коефіцієнт тензочутливості матеріалу провідника;
 dR/R – відносна зміна опору дроту;
 dl/l – відносна деформація;
 $d\rho/\rho$ – відносна зміна питомого опору.

З експериментальних даних, наведених у табл. 3.1, видно, що ця величина для більшості використовуваних матеріалів змінюється в межах від -12 до +5.

Аналіз рівняння (3.4) показує, що коефіцієнт k залежить від двох чинників: *зміни розмірів провідника*, пов'язаного з коефіцієнтом Пуассона, і *зміни питомого опору*. Величина $(1 + 2\mu)$ для різних металів і сплавів може бути прийнята рівною 1,6...1,8. Другий доданок в цьому рівнянні може змінюватися в досить широких межах і від нього, в основному, залежить чутливість датчика.

З рівняння (3.4) видно, що для підвищення чутливості ДДО доцільно використовувати матеріали з великим коефіцієнтом тензочутливості (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Характеристика матеріалів тензодатчиків

Матеріал	Склад, %	Коефіцієнт тензо- чутливості	Питомий опір, Ом·см,	Гранична робоча температура, °C
1	2	3	4	5
Констант- ан	60Cu + 40Ni	2,0	0,48	400
Ніхром	80Ni + 20Cr	2,2	1,30	1000
Манганин	84Cu + 12Mn + + 4Ni	0,5	0,42	—

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5
Платино-іридієвий сплав	80Pt + 20Ir	5,1	0,36	1300
Платино-вольфрамовий сплав	92Pt + 8W	4,0	—	—
Нікель-молібденевий сплав	28Mo + 72Ni	2,5	1,40	650
Нікель-хромовий сплав	20Cr + 2Cu + + 2,6Al + + 75,4Ni	2,0	1,16	1000
Залізо-хром-алюмінієвий сплав	22,3Cr + + 4,8Al + + 0,35C + + Інше	+2,8	1,50	1250
Нікель	Ni	-12,1	—	—
Срібло	Ag	2,9	—	—
Мідь	Cu	2,6	—	—
Платина	Pt	6,0	0,10	1300

Для забезпечення нормальної роботи матеріал тензорезистору повинен відповідати таким вимогам:

1) мати лінійний зв'язок між деформацією і зміною опору в достатньому діапазоні деформацій, так як це дозволяє спростити тарування і використовувати датчик в пружній, а іноді і в пластичній областях;

2) мати високий питомий опір, що дозволяє зменшити розміри ДДО при порівняно високому опорі;

3) володіти високими характеристиками міцності;

4) повинен бути відсутнім гістерезис, так як наявність його позначається на відтворюваності результатів;

5) мати хорошу термостабільність.

У низці випадків до дротяних датчиків можуть пред'являтися додаткові вимоги, що ставляться до їх герметичності, інерційності, економічності та ін. Найбільш повно цим вимогам відповідає мідно-нікелевий сплав – *константан*.

Наступним важливим параметром датчика є його *база*. Зазвичай вона є в межах від 1 мм до 20 мм. В даний час розроблено серію датчиків з меншою базою.

Вибір бази визначається низкою чинників. З одного боку, її збільшення призводить до великих похибок вимірювання в разі неоднорідного поля деформацій, так як датчик дає осереднену величину деформації на його базі. З іншого боку, зменшення бази дозволяє наблизитися до вимірювання в точці, але при цьому падає омічний опір тензорезистору і, отже, точність вимірювання. Крім того, на вибір бази впливає конфігурація поверхні досліджуваної деталі і зручність монтажу ДДО.

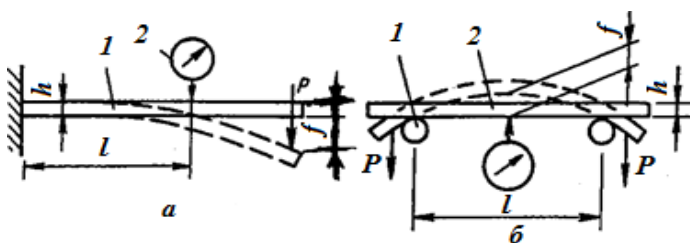
В останні роки з'явилися відомості про практичне використання *напівпровідникових датчиків*, які мають надзвичайно високу чутливість ($k > 100$). Принципова відмінність роботи цих датчиків, у порівнянні з датчиками опору, полягає в тому, що коефіцієнт тензочутливості матеріалу залежить, головним чином, від зміни питомого опору, а не від зміни лінійних розмірів.

Недоліками цих датчиків є порушення лінійного зв'язку при вимірюванні великих деформацій і висока чутливість до зміни температури.

3.4 Тарирування датчика

Для визначення коефіцієнту тензочутливості ДДО необхідно провести їх тарирування. Датчик наклеюють на консольну балку рівного опору (рис. 3.2, *а*) або на балку

постійного поперечного перерізу, що працює на чистий вигин (рис. 3.2, б).



1 – балка; 2 – індикатор

Рисунок 3.2 – Схема тарування тензорезисторів за допомогою консольної балки рівного опору (а) і за допомогою балки постійного поперечного перерізу, що працює на чистий вигин (б)

З курсу опору матеріалів відомо, що в разі вигину консольної балки трикутної форми поздовжні деформації на її поверхні постійні і визначаються формулою:

$$\varepsilon = \frac{h}{l^2} f, \quad (3.5)$$

де h – товщина балки;

l – відстань від закладення до точки вимірювання прогину f (див. рис. 3.2).

Таким чином, визначення ε практично зводиться до вимірювання прогину, що здійснюється, найчастіше, індикатором годинникового типу або будь-яким іншим вимірювальним пристроєм.

3.5 Електричні кола (ланцюги)

Датчики змінюють свій опір під впливом зовнішнього навантаження за формулою:

$$\Delta R / R = k\varepsilon. \quad (3.6)$$

Величина $\Delta R / R$ може бути виміряна двома найбільш поширеними способами: *мостовим* і *потенціометричним*.

3.5.1 Потенціометрична схема

На рис. 3.3 представлена потенціометрична схема включення тензодатчика в електричне коло, яке часто використовується при вивченні динамічних явищ і перетворює зміну опору $\Delta R / R$ в зміну напруги ΔE .

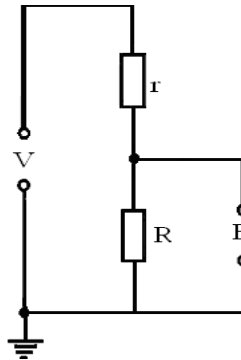


Рисунок 3.3 – Потенціометрична схема включення тензорезистора

Тут джерело струму з напругою V підключається до датчика R через додатковий баластний опір r ; зміна напруги на датчику фіксується за допомогою вимірювального приладу. Тоді коли опір приладу приблизно в 100 разів перевищує опір тензорезистора, напруга на датчику E виражається наступною залежністю:

$$E = \frac{R}{R+r} V. \quad (3.7)$$

Якщо опір датчика внаслідок деформації змінюється на ΔR , то напруга на виході дорівнюватиме:

$$E + \Delta E = \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + r} V. \quad (3.8)$$

Віднімаючи ці рівності, отримаємо:

$$\Delta E = \frac{r}{r + R + \Delta R} \cdot \frac{\Delta R}{R} E. \quad (3.9)$$

Ця залежність нелінійна, але при вимірюванні деформацій менш 0,01 величиною ΔR в знаменнику можна знехтувати в порівнянні з $(R + r)$ і тоді ΔE буде прямо пропорційна зміні опору. При цьому похибка вимірювання деформацій не перевищує 2 %.

З формули (3.9) також видно, що збільшення баластного опору призводить до поліпшення лінійного зв'язку. Потенціометричний спосіб вимірювання забезпечує досить надійне визначення деформацій в межах до 2...10 %. Чутливість потенціометричної схеми визначається за формулою:

$$K_{\Pi} = \frac{\Delta E}{\varepsilon}. \quad (3.10)$$

Величина K_{Π} може бути інтерпретована, як показник якості або ефективності схеми; наприклад, при вивченні динамічних процесів, коли вимірювані деформації, як правило, малі, чутливість схеми повинна досягати максимальних значень з тим, щоб зменшити ступінь посилення вихідного сигналу.

На підставі виразів (3.7) – (3.10) і закону Ома можна записати:

$$K_{II} = \frac{r}{R+r} kIR, \quad (3.11)$$

де k – коефіцієнт тензочутливості датчика;
 I – сила струму в ланцюзі (колі).

Це рівняння показує, що чутливість електричного ланцюга (кола) визначається двома незалежними параметрами $r/(R+r)$ та kIR . Перший з них визначається вибором баластного опору r і в межі наближається до одиниці, що відповідає максимальній ефективності. Однак при дуже великих r потрібно дуже висока напруга і тому на практиці цю величину приймають рівною $9R$, при цьому відношення $r/(R+r)=0,9$. Другий параметр істотно впливає на чутливість схеми і, в залежності від типу датчика і струму ланцюга, може змінюватися в межах від 3 до 700. Зміна вихідної напруги датчиків, зазвичай, незначна, тому K_{II} має порядок 5...10 В.

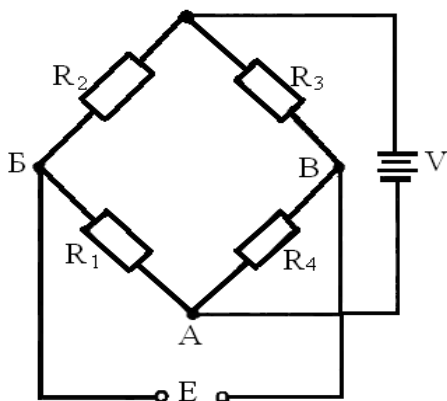
Великою перевагою потенціометричних схем є їх простота, але, в той же час, вони мають ряд суттєвих недоліків. Зміна вихідної напруги ΔE вельми мала в порівнянні з E . Тому ця схема застосовується, головним чином, для вимірювання динамічних деформацій з використанням підсилювачів змінного струму, які реагують тільки на зміну ΔE . При вивченні статичних деформацій в схему необхідно вводити температурні компенсатори. Так як вихід потенціометричної схеми ΔE прямо пропорційний напрузі джерела живлення V , то останній повинен бути досить стабільним. Як джерело струму зазвичай використовуються батареї.

3.5.2 Мостова схема

Друга схема, яка часто використовується для реєстрації змін опору датчика, являє собою відомий місток

Уїтстона. Подібно до потенціометричної схеми, місток Уїтстона застосовується для вивчення динамічних і статичних деформацій. Мостова схема може бути використана для безпосереднього зчитування ΔE , величина якої пов'язана з деформацією, або для вимірювань за методом збалансованого мосту (нульовий метод).

Найпростіша мостова схема представлена на рис. 3.4. Місток складено з чотирьох резисторів (опорів), з яких один є датчиком і три – резисторами постійного опору (компенсаційні); до однієї діагоналі містка подано напругу живлення V , а до іншої підключений реєструючий прилад.



R_1 – робочий датчик; R_2, R_3, R_4 – компенсаційні датчики

Рисунок 3.4 – Найпростіша мостова схема

Вихідна напруга в цьому випадку визначається за формулою:

$$\begin{aligned}
 E &= V_{BB} = V_{AB} - V_{AB} = \\
 &= \frac{R_1}{R_2 + R_1} V - \frac{R_4}{R_3 + R_4} V = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

Напруга E дорівнюватиме нулю і місток знаходиться в рівновазі, коли

$$R_1 R_3 = R_2 R_4. \quad (3.13)$$

Ця властивість схеми використовується для вимірювання деформацій; спочатку місток балансується до $E = 0$, після додатка зовнішнього навантаження з'являється неузгодженість ΔE , яка обумовлена зміною опору датчика. Напругу виходу можна отримати з виразів (3.12) і (3.13), нехтуючи членами другого порядку малості, і представити у вигляді:

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (3.14)$$

Це рівняння є базовим для оцінки мостової схеми. Так само, як і в разі потенціометричної схеми, нелінійністю даного рівняння можна знехтувати при вимірюванні деформацій менше $\varepsilon = 0,05$.

Коефіцієнт чутливості мостової схеми визначається за формулою:

$$K_M = \frac{\Delta E}{\varepsilon} = \frac{V}{\varepsilon} \cdot \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (3.15)$$

Цей вираз показує, що чутливість залежить від вхідної напруги V , коефіцієнта чутливості тензодатчика $k = \Delta R_1 / R_1 \varepsilon$ і співвідношення опорів R_1 і R_2 .

З графіка, наведеного на рис. 3.5, видно, що, за інших рівних умов, ефективність мостової схеми є максимальною при $R_1 = R_2$.

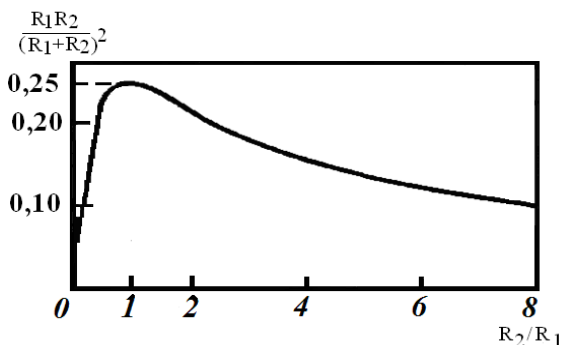


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнта ефективності мостової схеми від співвідношення опорів

3.5.3 Чутливість електричних кіл (ланцюгів)

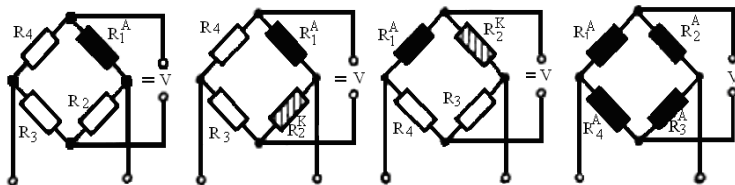
Якщо напруга у колі (електричному ланцюзі) обирається з умови максимально допустимого струму, чутливість мостової схеми буде залежати від числа робочих датчиків і їх взаємного розташування. На рис. 3.6 представлені чотири загальноприйняті схеми.

У першому випадку місток містить єдиний активний датчик R_1 . Ця схема, в основному, використовується для вимірювання динамічних й, іноді, статичних деформацій, коли не потрібна температурна компенсація.

Коефіцієнт чутливості такої схеми визначається за такою залежністю:

$$K_M = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I R_1 k . \quad (3.16)$$

З цієї формули видно, що чутливість залежить від двох чинників: ефективності ланцюга, яка при $R_2 = 9R_1$ дорівнює 90%, і параметра датчика $I R_1 k$.



R^A – робочі датчики; R^K – компенсаційні датчики

Рисунок 3.6 – Основні схеми включення тензорезисторів у мостову схему:

Друга схема містить активний датчик R_1 і компенсаційний R_2 , який необхідний для зменшення впливу температури. Коефіцієнт чутливості схеми при $R_1 = R_2$ визначається за формулою:

$$K_M = \frac{1}{2} I R_1 k. \quad (3.17)$$

В цьому випадку, ефективність кола постійна і дорівнює $1/2$, так як $R_1 = R_2$. Звідси випливає, що введення в схему датчика R_2 дозволяє здійснити температурну компенсацію, але це знижує ефективність кола до 50 %.

На вибір тієї чи іншої схеми включення робочого тензорезистору, в основному, впливають два фактори: характер вимірюваних деформацій (статичні або динамічні) і необхідність температурної компенсації. У динамічних додатках, коли не потрібна температурна компенсація, застосовні як потенціометрична, так і мостова схема.

Чутливість і діапазон вимірювань у цих колах однакові. Потенціометрична схема має деякі переваги, так як вона не вимагає початкового балансування, а загальне заземлення кола підсилювача і реєструючого приладу

значно знижує рівень електронних перешкод. У тих випадках, коли необхідна температурна компенсація, місток Уїтстона може мати більш високу чутливість, ніж потенціометрична схема. Проте, застосування останньої доцільно, коли наявність загального заземлення компенсує деяку втрату чутливості.

При вивченні статичних деформацій перевагу слід віддати мостовій схемі з вимірюванням за нульовим методом, тому що такі прилади прості у керуванні, дозволяють здійснювати температурну компенсацію і мають ціну поділки шкали близько 10^{-6} . Там, де необхідно безпосереднє зчитування даних, мостова схема є найбільш раціональною. Рекомендації щодо застосування різних схем і їх чутливість наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика мостової і потенціометричної схем включення тензорезисторів

Деформація	Температурна компенсація	Схема з'єднання	Коефіцієнт чутливості схеми
Динамічна	Ні	Потенціометрична	$\frac{r}{r+R} kIR$
	Так	Мостова	$\frac{R_2}{R_1+R_2} kIR$
Статична	Так	Мостова з вимірюванням за нульовим методом	До 10^{-6}
	Ні	Мостова з безпосереднім зчитуванням	$\frac{R_2}{R_1+R_2} kIR$

3.6 Температурна компенсація

Одним з найбільш важливих факторів, що впливають на роботу датчиків, є температура або, більш коректно, її зміна під час проведення експерименту.

Коливання температури призводять до зміни довжини провідника тензорезистору ($\Delta l/l = \alpha \Delta t$) і базового матеріалу ($\Delta l/l = \beta \Delta t$), а також температурного коефіцієнта опору матеріалу датчика ($\Delta R/R = \gamma \Delta t$). Сумарний ефект від дії цих чинників призводить до зміни опору тензорезистора:

$$\Delta R' / R = [(\beta - \alpha)K + \gamma] \Delta t, \quad (3.18)$$

де α і β – температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу датчика і об'єкта відповідно;

γ – температурний коефіцієнт опору матеріалу тензорезистора;

K – коефіцієнт тензочутливості датчика.

Якщо, наприклад, $\alpha \neq \beta$, то тензорезистор буде піддаватися дії фіктивних деформацій, які відсутні в досліджуваному об'єкті і виникають в результаті неоднакового температурного подовження датчика і об'єкта. Так як вихідний сигнал пропорційний зміні опору тензорезистора, то розрізнити сигнали, викликані фіктивною або дійсною деформацією, неможливо.

Коли матеріал датчика і об'єкта мають однакові коефіцієнти лінійного розширення, зміна опору буде залежати тільки від γ . Температурну компенсацію можна здійснити або в самому тензорезисторі, або в ланцюзі, де він встановлений.

Один з варіантів конструкції температурно-компенсаційного тензорезистору складається з наступного. Два різних сплави підбираються таким чином, щоб при зміні температури загальний опір датчика залишався

постійним. Таким шляхом виготовляють тензорезистори, які практично не реагують на зміну температури в певному діапазоні. Встановлено, що існує оптимальна температура, невеликі відхилення від якої дають незначну помилку; великі зміни температури призводять до істотних похибок.

Розглянемо основну ідею компенсації на прикладі потенціометричної схеми (див. рис. 3.3), в якій R_1 і R_2 є датчиками опору. Робочий тензорезистор R_1 призначений для вимірювання деформацій і розташований в даній точці досліджуваної поверхні. Тензорезистор R_2 наклеюється на поверхню зразка, виготовленого з матеріалу об'єкта (його можна встановлювати на поверхню об'єкта, яка не деформується), і працює в таких самих температурних умовах. Такий датчик називають компенсаційним.

У робочому датчику загальну зміну опору обумовлено двома причинами: деформацією об'єкта (ΔR_1^e) і зміною температури (ΔR_1^t). В компенсаційному тензорезисторі зміна опору є наслідком лише коливання температури (ΔR_1^t). Тоді:

$$\Delta E = \frac{R_2 R_1}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1^e}{R_1} + \frac{\Delta R_1^t}{R_1} - \frac{\Delta R_2^t}{R_2} \right) V. \quad (3.19)$$

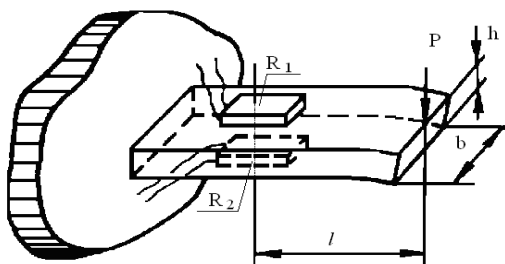
З виразу (3.19) видно, що температурна компенсація здійснюється за рахунок того, що ΔR_1^t і ΔR_2^t входять у рівняння з різними знаками і повна компенсація буде при рівності відповідних членів.

Така компенсація ефективна тоді, коли обидва датчики мають ідентичні параметри (взяті з однієї партії), наклеюються одним і тим же клеєм на однаковий матеріал і знаходяться в адекватних температурних умовах. При порушенні однієї з цих умов повної температурної компенсації досягти не вдається. Так як в цьому випадку

$R_1 = R_2$, то ефективність потенціометричної схеми стає рівною 0,5; таким чином, врахування впливу температури призводить до втрати чутливості кола. Якщо ж коефіцієнт чутливості є чинником визначальним, то такий спосіб компенсації непридатний і слід використовувати спеціальні самокомпенсуючі датчики.

Іноді, для збільшення вихідного сигналу, обидва датчика R_1 та R_2 можна використовувати як робочі. Наприклад, на рис. 3.7 показана консольна балка, на верхній бік якої наклеїли датчик R_1 , на нижній – R_2 . Так як деформації на цих боках мають різні знаки, то зміни опорів будуть дорівнювати:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_2}{R} = k \frac{6Pl}{bh^2}. \quad (3.20)$$



P – деформуюча сила; h та b – висота та ширина перерізу балки; l – відстань від точки прикладення сили до датчиків

Рисунок 3.7 – Схема наклеювання тензорезисторів R_1 і R_2 при вимірюванні деформацій вигину

Коефіцієнт чутливості потенціометричного кола з двома робочими датчиками визначається за формулою:

$$K_{II} = \frac{k}{R_1}. \quad (3.21)$$

Порівняння (3.11) і (3.21) показує, що при $R_1 = R_2$ відбувається збільшення вихідного сигналу вдвічі.

Температурна компенсація у мостових схемах проводиться аналогічним чином.

3.7 Вивчення плаского напружено-деформованого стану

Для повного опису двовимірного поля деформацій необхідно знати величини головних деформацій $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ та їх напрямки θ . Щоб визначити напруження, потрібно мати дані про механічні характеристики матеріалу.

В окремих випадках напружений стан може бути знайдено за показаннями тільки одного датчика. Так, при одновісному розтягуванні або стисненні вісь датчика розташовується за напрямком дії головного напруження σ_x .

Тоді:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x. \quad (3.22)$$

Розглянемо ізотропну область, де $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ і $\tau_{xy} = 0$. У цьому випадку тензорезистор може бути наклеєний в будь-якому напрямку і величина напружень визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{E}{1-\mu} \varepsilon, \quad (3.23)$$

де E – модуль пружності.

У тих випадках, коли напрямки головних напружень відомі заздалегідь, для повного опису напруженого стану в точці досить наклеїти два датчика за цими напрямками. За отриманими в результаті вимірювання величинами

головних деформацій ε_1 та ε_2 обчислюють головні напруження за такими залежностями:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1). \quad (3.24)$$

Напруження, що діють на будь-яких інших площадках, можуть бути знайдені за відомими рівняннями теорії напружень. У загальному випадку експериментального аналізу величини і напрямки головних деформацій невідомі. З теорії деформацій відомо, що для визначення положення головних осей і величин головних деформацій необхідно знати величини лінійних деформацій у двох взаємно перпендикулярних напрямках і кутової деформації між ними. Так як вимір кутових деформацій є трудомістким та не досить точним, то доцільно визначати ε_1 , ε_2 і θ , використовуючи лише лінійні деформації. Покажемо, що для цього достатньо трьох датчиків. Використовуючи формули теорії деформацій, можна записати рівняння зв'язку між показаннями датчиків А, Б і В (рис. 3.8, а), і деформаціями: ε_x , ε_y і γ_{xy} :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_A &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_A + \varepsilon_y \sin^2 \theta_A + \gamma_{xy} \sin \theta_A \cos \theta_A; \\ \varepsilon_B &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_B + \varepsilon_y \sin^2 \theta_B + \gamma_{xy} \sin \theta_B \cos \theta_B; \\ \varepsilon_C &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_C + \varepsilon_y \sin^2 \theta_C + \gamma_{xy} \sin \theta_C \cos \theta_C. \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Вирішуючи систему рівнянь (3.25) відносно декартових компонент деформацій, можна визначити величини і напрямки головних деформацій:

$$\left. \begin{aligned} 2\varepsilon_{1,2} &= (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \pm \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}; \\ \operatorname{tg} 2\theta_{1,2} &= \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}, \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

де $\theta_{1,2}$ – кут між напрямками σ_1, σ_2 і віссю x .

Рішення рівнянь (3.25) не викликає принципових труднощів, але для спрощення розрахункових формул датчики розташовують під фіксованими кутами $0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ і 90° у вигляді розеток (див. рис. 3.8).

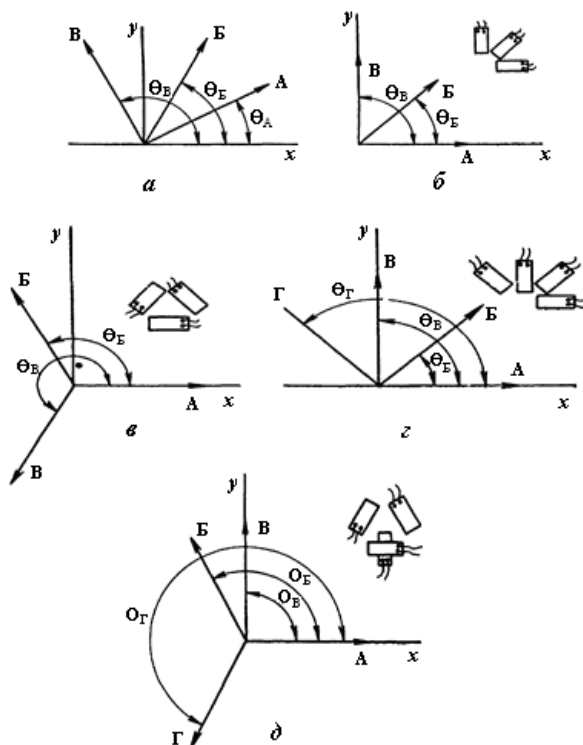


Рисунок 3.8 – Схема довільно розташованих датчиків А, Б, В (а); стандартна (прямокутна) розетка тензорезисторів (б); дельтоподібна (рівнокутна) розетка тензорезисторів (в); прямокутна розетка з чотирьох тензорезисторів (г); рівнокутна розетка з четвертим тензорезистором (д)

Стандартна прямокутна розетка. Така розетка складається з трьох однакових тензорезисторів, наклеєних на одну підкладку, під кутами 0° , 45° і 90° (рис. 3.8, б). Для цього випадку рівняння (3.25) спрощуються до виду:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_A; \quad \varepsilon_y = \varepsilon_B; \quad \gamma_{xy} = 2\varepsilon_A - \varepsilon_A - \varepsilon_B. \quad (3.27)$$

Таким чином, шляхом вимірювання деформацій можна легко визначити Декартові компоненти деформацій. Підставляючи співвідношення (3.27) в (3.26), отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} 2\varepsilon_{1,2} &= (\varepsilon_A + \varepsilon_B) \pm \sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_B)^2 + (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_B)^2}; \\ \operatorname{tg} \theta_{1,2} &= \frac{2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_B}{\varepsilon_A - \varepsilon_B}. \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

Друге з рівнянь (3.28) дає два значення кута θ , а саме: θ_1 між напрямком осі x і σ_1 та θ_2 – між x і σ_2 . Для ідентифікації кута θ_1 можна скористатися таким правилом:

$0^\circ < \theta_1 < 90^\circ$, якщо $2\varepsilon_B > \varepsilon_A + \varepsilon_B (\gamma_{xy} > 0)$;

$-90^\circ < \theta_1 < 0^\circ$, якщо $2\varepsilon_B < \varepsilon_A + \varepsilon_B (\gamma_{xy} < 0)$;

$\theta_1 = 0^\circ$, якщо $\varepsilon_A > \varepsilon_B$ і $\varepsilon_A = \varepsilon_1 (\gamma_{xy} = 0)$;

$\theta_1 = 90^\circ$, якщо $\varepsilon_A < \varepsilon_B$ і $\varepsilon_A = \varepsilon_2 (\gamma_{xy} = 0)$.

За подібним принципом розраховуються головні деформації та кути для інших випадків, наведених на рис. 3.8. Більш докладно викладено у джерелі [1].

Визначення напружень. Для переходу від компонент тензора деформацій, отриманих за допомогою цих розеток, до відповідних компонентів напруженого стану в пружній області необхідно скористатися законом Гука (3.24) [1].

Вимірювання зсувних деформацій. Звичайні тензодатчики прямо не дозволяють вимірювати деформації зсуву, однак, як впливає з першого співвідношення теорії деформації, можна, шляхом відповідного монтування

тензорезисторів на досліджувану поверхню та їх включення в мостову схему, реєструвати безпосередньо зсувні деформації.

Розглянемо систему з двох довільно орієнтованих датчиків А і Б (рис. 3.9), деформації вздовж осей яких можуть бути записані в наступному вигляді:

$$2\varepsilon_A = (\varepsilon_x - \varepsilon_y) + (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \cos 2\theta_A + \gamma_{xy} \sin 2\theta_A;$$

$$2\varepsilon_B = (\varepsilon_x - \varepsilon_y) + (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \cos 2\theta_B + \gamma_{xy} \sin 2\theta_B.$$

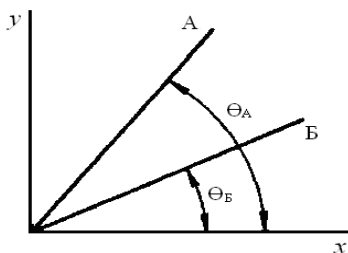


Рисунок 3.9 – Довільно орієнтовані тензорезистори А і Б

Віднімаючи з першої рівності другу, отримаємо:

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\varepsilon_A - \varepsilon_B) - (\varepsilon_x - \varepsilon_y)(\cos 2\theta_A - \cos 2\theta_B)}{\sin 2\theta_A - \sin 2\theta_B}. \quad (3.29)$$

Легко бачити, що при $\cos 2\theta_A = \cos 2\theta_B$ другий член чисельника наближається до нуля, і тому:

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\varepsilon_A - \varepsilon_B)}{\sin 2\theta_A - \sin 2\theta_B}. \quad (3.30)$$

Беручи $\theta_A = -\theta_B$, остаточно отримаємо:

$$\gamma_{xy} = \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_B}{\sin 2\theta_A} = -\frac{\varepsilon_A - \varepsilon_B}{\sin 2\theta_B}. \quad (3.31)$$

Таким чином, система з двох датчиків дозволяє вимірювати величину зсувної деформації, напрямок якої відповідає бісектрисі кута між ними. Коли кут між датчиками складає 90° , знаменники в формулах (3.29) – (3.31) стають рівними одиниці і величина зсувної деформації чисельно дорівнює різниці нормальних деформацій. Якщо тензорезистори А і Б включити в сусідні плечі містка Уїтстона, то отримаємо розетку для автоматичного вимірювання зсувних деформацій. Вочевидь, що якщо осі датчиків збігаються з напрямом головних деформацій, то вихідний сигнал такого напівмістка пропорційний величині максимальної деформації зсуву.

При проведенні експериментів з великою кількістю тензодатчиків обробка результатів вимірювань стає дуже трудомісткою. У зв'язку з цим розроблено спеціальні таблиці і номограми, що дозволяють визначати головні деформації за даними різних розеток. В останні роки для таких цілей стали широко використовуватися обчислювальні машини загального призначення. Найбільш перспективним є створення автоматизованих систем отримання і обробки експериментальних даних. Вихідний сигнал в цьому випадку подається безпосередньо на ЕОМ.

3.8 Вимірювання силових і кінематичних параметрів у обробці металів тиском

Електротензометрія отримала широке застосування у процесах обробки металів тиском (ОМТ) для вимірювання сили деформування, питомих тисків металу на інструмент, сил тертя на контактних поверхнях та обертаючих (крутильних) моментів.

Вимірювання сил та моментів. Деформації на поверхнях деталей виникають під дією різних силових

факторів: розтягування, стискання, згинання і кручення. Розглянемо деякі приклади вимірювання цих величин за допомогою тензорезисторів.

Найпростіше визначаються величини *сил* (P) при центральному розтягуванні (стисканні), оскільки тут має місце однорідний напружено-деформований стан:

$$P = E \cdot \varepsilon \cdot F ,$$

де E – модуль пружності матеріалу стрижня;

ε – ступень деформації;

F – площа поперечного перерізу стрижня.

У разі чистого вигину бруса можна визначити величину *моменту, що вигинає*:

$$M = E \cdot \varepsilon \cdot W ,$$

де W – момент опору поперечного перерізу бруса.

При спільній дії вигину і розтягування (стискання) силові фактори можуть бути знайдені окремо, за допомогою декількох тензорезисторів. Так, два датчики, що наклеєні на протилежних сторонах поверхні круглого стрижня (рис. 3.10, *а*), дозволяють відокремити розтягування від згинання. Щоб зареєструвати розтягування, необхідно включити датчики так, як це показано на рис. 3.10, *б–г*. В цих випадках прилад реагує тільки на зміну сумарного опору обох датчиків. На рис. 3.10, *д*, *є* наведені схеми з'єднання тензорезисторів для реєстрації тільки деформації вигину, оскільки тут вихідний сигнал пропорційний різниці змін опору обох датчиків.

При обертанні головні площадки розташовані під кутом 45° до осі бруса і тому тензорезистори наклеюються на його поверхню саме в цих напрямках (рис. 3.11, *а*). Схему включення датчиків в електричне коло при реєстрації деформації кручення наведено на рис. 3.11, *б–г*.

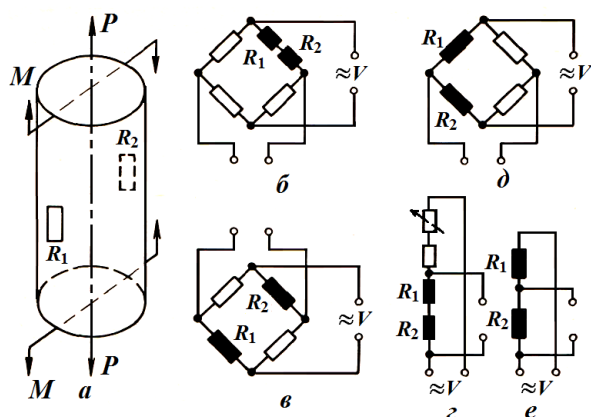


Рисунок 3.10 – Схема наклейки робочих датчиків (а) та їх вмикання для вимірювання деформацій розтягування (б, в, г) та вигину (д, е); чорним прямокутником зображені робочі датчики

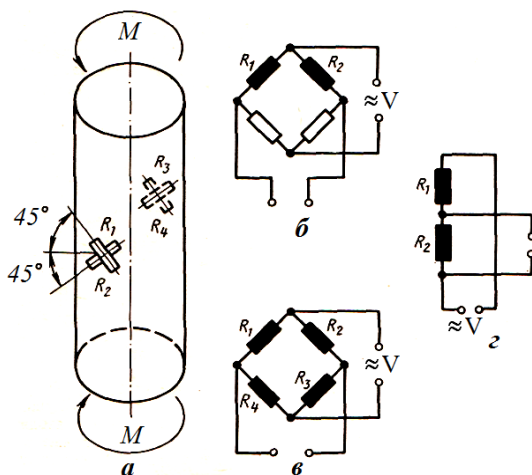


Рисунок 3.11 – Схема наклейки робочих датчиків (а) та їх вмикання у мостову (б, в) і в потенціометричну (г) схеми для вимірювання деформації обертання

Елементи устаткування як датчики моментів і сил.

Одним із основних параметрів, необхідних для проектування та експлуатації металургійного устаткування, особливо прокатного, є момент, що обертається, величина якого визначає завантаженість основних вузлів і деталей.

Крутильний момент вимірюють двома способами: *непрямим* та *прямим*.

Перший спосіб заснований на вимірюванні електромеханічних параметрів електродвигуна: сили струму, напруги і швидкості обертання. Цей метод має обмежене застосування в силу ряду властивих йому не достатків: необхідно вимірювати та обчислювати велику кількість різних параметрів (потужність, швидкість обертання, момент холостого ходу, ККД різних передач, динамічний момент і момент тертя); точність визначення деяких з них недостатня.

У зв'язку із цим поширеніший спосіб, заснований на вимірюванні деформацій валу, за допомогою якого передається момент, що крутить. Зазвичай деформації вимірюють за допомогою тензорезисторів опору.

Якщо датчики на валу розташовані так, як показано на рис. 3.10, то величина моменту визначається таким чином:

$$M_{кр} = \frac{\pi E d^3}{4(1 + \mu)} \varepsilon ,$$

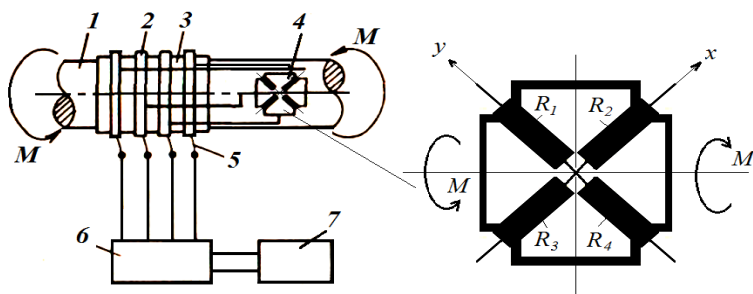
де d – діаметр валу;

μ – коефіцієнт Пуансона;

E – модуль пружності матеріалу валу.

Для передачі електричного сигналу від тензодатчиків, наклеєних на валу, що обертається,

використовують кільцеві струмоз'ємні пристрої з ковзаючими контактами (рис. 3.12).



- 1 – вал; 2 – струмоз'ємні кільця; 3 – ізолятор;
 4 – тензорезистори; 5 – ковзаючі контакти;
 6 – підсилювач; 7 – реєструвальний пристрій

Рисунок 3.12 – Кільцевий струмоз'ємник з ковзаючими контактами

Відомо багато конструкцій струмоз'ємників, але частіше за інших використовуються щіткові, струнні та підшипникові. Струмоз'ємники вносять в результати вимірювань додаткові похибки, які викликані нестабільністю опорів в точках контакту. Тому, якщо це можливо, слід уникати застосування таких пристроїв. Останнім часом з'явилися нові конструкції, які основані на безконтактній передачі сигналу за допомогою електромагнітних хвиль з різною довжиною.

Щоб отримати надійні результати, тарирування датчиків необхідно робити безпосередньо на робочому валу, для чого проводять ступінчасте вантаження валу моментами відомою величини. Якщо тарирування тензорезисторів на валу неможливе, то можна рекомендувати установку двох мостів на одному і тому ж

валу; коли їх показання близькі, вимірювання можна вважати достовірними.

Деформації кручення валу:

$$\varepsilon = \varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{M}{2GW_p}; \quad W_p = \frac{\pi d^3}{16}.$$

Зміна опору тензодатчика:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0(1 - \gamma)\varepsilon,$$

де $\gamma = \frac{K_n}{K_0}$ – відношення поперечної та подовжньої чутливості тензодатчика.

Сумарний розбаланс мосту:

$$\varepsilon_R = \frac{2K_0(1 - \gamma)}{G\omega_p} M = \frac{\Delta R_1}{\Delta R} + \frac{\Delta R_2}{\Delta R} + \frac{\Delta R_3}{\Delta R} + \frac{\Delta R_4}{\Delta R},$$

де R_1, R_2, R_3 та R_4 – опір плечей мосту.

В загальному випадку розрізняють наступні *методи вимірювання крутильного моменту* при прокатці (M_{np}).

1. За записаними на екрані кривими зміни електричної потужності N та оборотами n електродвигуна:

$$M_{np} = \left[\frac{9,55(N - N_{x.x})\eta_0}{n} \right] i_{n..m} \cdot \eta_{n..m} - M_{т.п},$$

де $N_{x.x}$ – електрична потужність, виміряна при холостому ході;

η_0 – ККД двигуна;

$i_{n..m}$ – передавальне число передавального механізму;

$\eta_{n..m}$ – ККД передавального механізму;

$M_{m..n}$ – момент тертя у передавальному механізмі.

2. За записаною на екрані кривою тиску металу на валки (P):

$$M_{np} = 2aP ,$$

де a – плече моменту.

Даний метод має низьку точність, через складність точного визначення плеча моменту.

3. Вимірювання зміни M_{np} у головній лінії стану, а саме:

а) по моментах, що виміряні на шпинделях прокатних валків:

$$M_{np} = M_{\text{в}} + M_{\text{н}} - M_{m..n} - 2M_{x..x..ш.},$$

де $M_{\text{в}}$ – момент на верхньому шпинделі;

$M_{\text{н}}$ – момент на нижньому шпинделі;

$M_{x..x..ш.}$ – момент на шпинделі при холостому ході,

б) по виміряному моменту на корінному валу (M_{κ}):

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

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

Іншим важливим параметром є *сила деформації*, яка може бути виміряна шляхом реєстрації пружних деформацій елементів устаткування або за допомогою месдоз. Методи, в яких елементи устаткування використовуються як датчики сил, знаходять обмежене

застосування на практиці, оскільки вони дають невисоку точність вимірювань, і як правило, вимагають великих перерв в роботі технологічного устаткування для монтажу і наладки вимірювальних схем. Розглянемо основні особливості застосування цього способу на прикладі вимірювання сили прокатки.

З деталей прокатного стану в якості датчика сил необхідно вибирати такі, які безпосередньо передають силу прокатки, знаходяться в умовах одновісного напруженого стану і зручні для монтажу тензорезисторів. Найбільш відповідним елементом є станина прокатного стану, оскільки напружений стан валків і подушок кліті неоднорідний, а вимірювати деформацію натискного гвинта досить складно, оскільки для цього потрібні монтаж тензорезисторів і застосування струмознімачів. Строго кажучи, напружений стан станини також не є однорідним і тому використання наведених нижче формул опору матеріалів вносить додаткову похибку у результати вимірювань. При розрахунках клітей прокатних станів, зазвичай, вважають, що стійкі станини піддаються одночасній дії розтягування і вигину, тому їх деформацію можна визначити за формулою:

$$\varepsilon = \left(\frac{P}{F} + \frac{M}{I} y \right) \frac{1}{E}, \quad (3.32)$$

де F та I – площа і момент інерції поперечного перерізу станини;

y – відстань від головної центральної осі;

P та M – подовжня сила і момент, що вигинає, станини, що діють на стойку станини.

Найбільша деформація виникає на внутрішній поверхні стойки, де напруження вигину і розтягування підсумовується, а найменша - на зовнішній. Щоб отримати

надійні результати, тензорезистори бажано розташовувати на нейтральній осі, що дозволяє виключити вплив моменту, що вигинає. Розрахунок за формулою (3.32) є досить наближеним і тому для отримання точніших результатів необхідно проводити тарирування тензорезисторів безпосередньо на стоячій станині. Для цього за допомогою спеціальних пристроїв (гідравлічних або механічних пресів, домкратів) станину навантажують ступінчасто, навантаженнями заданої величини.

Деформації станини, як правило, невеликі, що призводить до малого сигналу тензорезистору і, отже, потрібно застосування високочутливих підсилювальних схем.

Вимірювання сил за допомогою месдоз. Спеціальний пристрій, що дозволяє визначати силу через величину деформацій його пружного елемента, називається месдозою. Для отримання точніших результатів її рекомендується розташовувати в зоні безпосередньої дії вимірюваної сили. Наприклад, при вимірюванні сили прокатки месдозу встановлюють під натискними гвинтами стану, при визначенні сили штампування – під нижнім бойком і т.і. Умови роботи месдоз на металургійному устаткуванні дуже важкі через динамічний характер навантаження, велику його величину, високу температуру оброблюваного металу, вологість тощо. Тому, при проведенні промислових експериментів, робочі елементи месدوزи мають бути ретельно захищені від дії води, мастила, емульсії і пари. Крім того, до конструкцій месдоз пред'являється ряд загальних вимог: міцність окремих елементів і з'єднань; наявність лінійної залежності вихідного сигналу від вимірюваного навантаження; незалежність показань від неточної установки та ін.

У літературі описана велика кількість різноманітних конструкцій месдоз, які розрізняються формою пружного елемента (циліндр, кільце, куля), типом вживаного датчика

(ємнісні, магнітопружні, індуктивні і т.і.), а також конструктивним оформленням допоміжних елементів. Останні призначаються для кріплення месдоз, герметизації її, виведення дротів, охолодження тощо. Розглянемо деякі найбільш поширені типи месдоз з використанням дротяних і фольгових тензорезисторів.

На рис. 3.13, *а* представлена спрощена конструкція месдоз з циліндричним пружним елементом, на поверхню якого наклеєні датчики опору за схемою рис. 3.10.

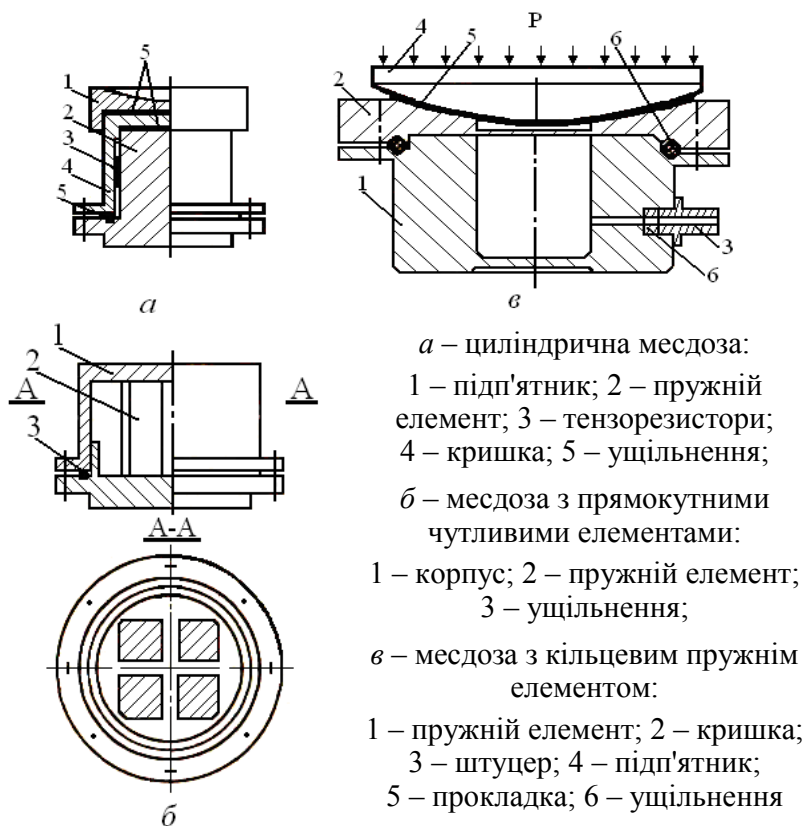


Рисунок 3.13 – Спрощена конструкція месдоз

Для захисту тензодатчиків від механічних ушкоджень і дії навколишнього середовища пружний елемент поміщається у герметизований сталевий кожух. Щоб забезпечити хороше центрування месдоз, на неї іноді встановлюється підп'ятник, поверхня якого відповідає поверхні деталі, що сполучається. При конструюванні месдоз особливу увагу необхідно приділити правильному виборі відношення діаметру d пружного елементу до його висоти h . Річ у тому, що при малому відношенні циліндр може втратити стійкість, а при великому – на характеристики месдоз матимуть значний вплив контактні сили тертя. Аналіз напруженого стану циліндра при дії на його торцях дотичного напруження, а також численні експериментальні дані показують, що для досягнення необхідної стабільності і точності результатів досить мати $d/h = 0,4/0,5$. Оскільки в процесах ОМТ месдоз, як правило, працюють при великих тисках, то необхідно провести попередній міцнісний розрахунок пружного елементу на стискання. У багатьох випадках, при встановленні месдоз на діючому устаткуванні, в силу обмеженості вільного простору, не вдається використати месдозу з одним пружним елементом через надзвичайно велику його висоту. Для зменшення висоти таку месдозу виготовляють з декількома пружними елементами.

Тут сумарна площа усіх стрижнів повинна дорівнювати площі одного розрахункового пружного елементу, висота циліндрів при цьому значно зменшується, а точність вимірювань залишається приблизно такою ж, оскільки відношення d/h задовольняє оптимальним умовам. До недоліків багатострижневих месдоз з циліндричними пружними елементами слід віднести відносну складність виготовлення стрижнів однакової довжини і труднощі в наклеїтці тензорезисторів через обмеженість простору між стрижнями. Простішою у

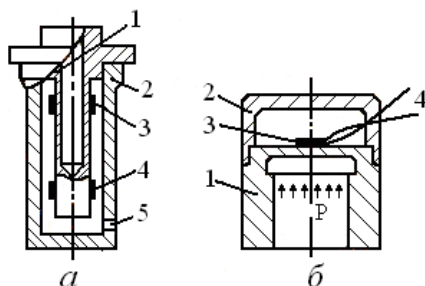
виготовленні і монтажі є месдоза, що складається з робочих стрижнів, виготовлених у вигляді прямокутних паралелепіпедів на загальній основі (рис. 3.13, б). Аналіз роботи такої месدوزи показує, що за ідентичних умов вона працює не гірше за циліндричну, але висота пружного елементу при цьому буде дещо більше.

Різновидом циліндричних месдоз є кільцеві, де пружний елемент має вигляд порожнистого циліндра, на поверхню якого наклеюються тензодатчики (рис. 3.13, в). Такі месدوزи використовуються, коли вимірюються невеликі сили; їх робочий елемент має бути виконаний так, щоб отримати велике напруження в стінці.

У деяких видах металургійного устаткування (пресах, молотах) сила деформування створюється за допомогою гідравлічних пристроїв і тому силові параметри можна визначити шляхом вимірювання тиску робочої рідини, повітря і пари. При статичних вимірюваннях застосовують месدوزи з пружним елементом трубчастого або мембранного типу. Конструкція датчика тиску з циліндричним трубчастим пружним елементом приведена на рис. 3.14, а. Відкритий кінець трубки пов'язаний з гідросистемою, в якій вимірюється тиск. У стінці пружного елементу виникає схема напруженого стану двовісного розтягування. Робочі тензорезистори розташовуються перпендикулярно до твірної циліндру вздовж напрямку головного напруження σ_1 . Якщо середній радіус циліндра R набагато більше товщини стінки h , тобто, при $R/h > 10$, то розподіл напруження за її товщиною можна вважати рівномірним і величина тиску p визначається за формулою:

$$p = \frac{Eh\varepsilon}{R(1-\mu^2)}.$$

При виборі розмірів циліндра необхідно враховувати, що для виключення впливу контактних сил тертя тензорезистори повинні розташовуватися на відстані зверху $2R$ від його кінців. Такі месдози мають лінійну залежність вихідного сигналу від вимірюваного тиску, високу стабільність характеристик і цілком достатню точність.



- a* – циліндричний датчик: 1 – пружний елемент; 2 – корпус;
 3 – робочі тензорезистори; 4 – компенсаційні
 тензорезистори; 5 – отвір для виводу дротів;
б – датчик мембранного типу: 1 – корпус; 2 – кришка;
 3 – тензорезистор; 4 – вивідні дроти

Рисунок 3.14 – Конструкція датчика тиску

Схема датчика тиску мембранного типу приведена на рис. 3.14, *б*. В даному випадку пружним елементом є тонка пластинка, товщина якої h залежно від радіусу R визначається по формулі:

$$h = 0,866R \sqrt{\frac{P}{[\sigma]}},$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження матеріалу мембрани на розтягування.

Припускаючи, що тензодатчики наклеєні в центрі круглої пластинки, закладеної по контуру і навантаженої рівномірно розподіленим тиском p , можна записати:

$$p = \frac{Eh^2\varepsilon}{3R^2(1-\mu^2)}. \quad (3.33)$$

Для підвищення вихідного сигналу в атом випадку застосовується спеціальний фольговий тензодатчик (рис. 3.15). У зв'язку з тим, що обчислення за формулою (3.33) може бути виконане тільки приблизно, такі датчики тиску вимагають попереднього тарирування. Месдозы мембранного типу прості та зручні в експлуатації, мають стабільні в часі характеристики і мають хорошу точність.

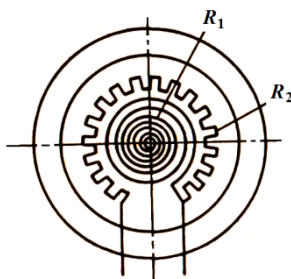
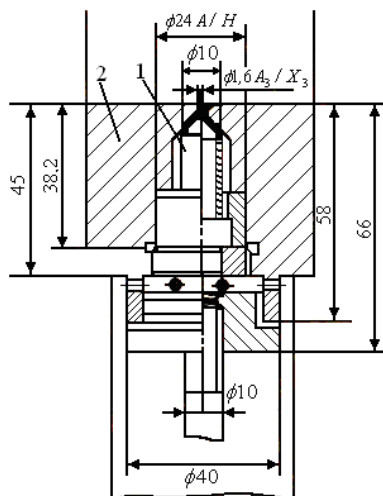


Рисунок 3.15 – Спеціальний фольговий датчик

Вимірювання контактних напружень. Велике значення у теорії і практиці процесів ОМТ має контактні напруження, від величини і характеру розподілу яких залежить стійкість робочого інструменту, якість продукції і економічність процесів. Для вимірювання питомих тисків і сил тертя застосовують так звані точкові (штифтові) месдозы, які перетворюють силу, що діє в цій точці, у пружні деформації елементів месдозы.

Розглянемо конструкцію однієї з месдоз, що призначена для вимірювання контактного напруження (рис. 3.16). Месдоза складається з циліндричного корпусу, який монтується у валок, і штифта, який складається з двох циліндрів, зв'язаних усіченим конусом. Частина штифта, що призначена для наклеювання тензорезисторів, виконується, зазвичай, у вигляді тонкостінного циліндру для збільшення деформаційної чутливості.



1 – штифт; 2 – корпус

Рисунок 3.16 – Конструкція точкової месدوزи

Окрім цих основних елементів, в конструкцію вводяться допоміжні регулювальні і настановні деталі. В процесі вимірювання на контактну поверхню штифта в загальному випадку діє нормально стискаюча P і поперечна T сили, які дорівнюють:

$$P = pF \quad \text{та} \quad T = \tau F,$$

де p – питомий тиск;
 τ – сила тертя;
 F – площа торця штифту.

Таким чином, штифт навантажений одночасно моментом, що вигинає, і стискаючою силою, які можуть бути зареєстровані окремо шляхом включення тензорезисторів у визначену схему. Слід мати на увазі, що задовільні результати для визначення дотичного напруження можуть бути отримані при строгому орієнтуванні штифта відносно робочого інструменту - це досягається відповідною розміткою штифта при наклеїці тензорезисторів і орієнтацією поверхонь, що сполучаються. Кільцевий проміжок між кінцем штифта і корпусом месдозы повинен складати приблизно 30 мкм на сторону. При великому проміжку матеріал, що деформується, може затікати, що призводить до заклинювання штифта. Якщо проміжок занадто малий, то під дією сил тертя поверхні штифта і корпусу можуть стикатися, а це спотворює результати. Проте практично виготовити досить міцний і жорсткий штифт діаметром менше 1 мм з необхідними допусками і чистотою поверхні дуже важко: крім того, в цьому випадку на результати вимірювань починають впливати мікронерівності контактуючих поверхонь. Тому зазвичай діаметр штифта вибирають у межах від 1,5 мм до 2,5 мм. Розміри окремих елементів штифта розраховують за відомими формулами опору матеріалів. Конфігурація контактної поверхні корпусу месдозы виконується відповідно до форми тієї частини робочого інструменту, де вона встановлюється. Для забезпечення точності вимірювань деформації корпусу месдозы та штифту під дією робочого навантаження повинні бути однаковими, це забезпечується конічною формою зведення корпусу.

Слід зазначити, що такі месдозы володіють певними недоліками. При штифтовому методі реєструються безпосередньо контактне напруження, а його інтегральні значення (сили), що діють на торцеву поверхню штифта. Найбільші спотворення виходять на вході і виході з контактної зони, а також на ділянках з великим градієнтом контактного напруження, що пов'язано, головним чином, з неточковим характером вимірювань. При використанні штифтових месдоз порушується цілісність робочого інструменту, що дещо змінює характер його роботи і призводить до затікання оброблюваного металу в проміжки. Ці фактори можуть істотно спотворити результати вимірювань.

Оскільки точкові месдозы призначені для реєстрації нормального і дотичного напруження, то при їх тарируванні чутливий елемент має бути навантажений нормальною і дотичною силами. Для більшої достовірності результатів операцію тарирування рекомендується проводити як до, так і після випробувань.

Реєстрація переміщень та швидкостей. Методи визначення переміщень та швидкостей не мають принципових відмінностей, оскільки швидкість – це є зміна переміщення в одиницю часу, тому надалі розглядатимуться тільки вимірювання переміщень.

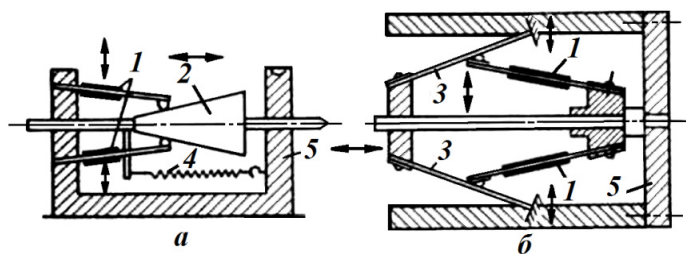
Переміщення в процесах ОМТ вимірюють для отримання величин обтискань при куванні і прокатці, випередження і відставання при прокатці, прогинів і т.і.

Вибір того або іншого способу реєстрації залежить, значною мірою, від величини переміщень і необхідної точності його вимірювань, а також від конструктивних особливостей досліджуваного об'єкту. Датчики переміщень, зазвичай, встановлюють безпосередньо на елементи металургійного устаткування або на тіло, що деформується. Створення універсального реєстратору,

здатного вимірювати переміщення в широкому діапазоні, дуже важке і, тому для досягнення високої точності і стабільності показань, застосовують ряд реєстраторів, працюючих в певному діапазоні.

В якості чутливого пружного елементу в реєстраторах переміщень використовується консольна балка, на обох сторонах якої наклеєні тензорезистори (див. рис. 3.17); прогин балки здійснюється за допомогою спеціальних механічних пристроїв, виконаних у вигляді клину, конуса або похилих пластин.

Таким чином, процес вимірювання складається з двох етапів: на першому – лінійне переміщення за допомогою механічних приладів перетворюється в прогин пружного елементу, а на другому – неелектрична величина перетворюється тензодатчиками в електричний сигнал.



1 – консольні балки з тензорезисторами; 2 – клин або конус; 3 – регульована пластина; 4 – пружина; 5 – корпус

Рисунок 3.17 – Принципіальна конструкція датчиків переміщення конусного типу (а) та для вимірювання великих переміщень (б)

Для вимірювання переміщень до 10 мм використовують механічні перетворювачі у виді клина або конуса (рис. 3.16, а), до виготовлення яких пред'являються підвищені вимоги точності і чистоти поверхні. Щоб

забезпечити надійну роботу датчика, необхідно усунути проміжки в рухливих з'єднаннях, забезпечити співвісну ось конуса (клину) з напрямом переміщення і плавність прогину балки. Конічний перетворювач набагато простіше у виготовленні і експлуатації, тому йому слід віддати перевагу. Крім того, установка декількох пружних чутливих елементів навколо конуса дозволяє збільшити вихідний сигнал, зменшити вплив биття в підшипниках шляхом підключення певним чином тензорезисторів в мостову схему. Ці датчики добре працюють при нормальних та підвищених температурах, а при наявності системи охолодження можуть бути використані при температурі до 1000 °С. Для вимірювань переміщень до 200 мм рекомендується замість рухливого клину застосовувати похилу регульовану пластину (рис. 3.17, б). Основною її гідністю є простота виготовлення і наладки, а також можливість юстирування в процесі роботи. Приведені конструкції датчиків переміщень мають нелінійну залежність, що призводить до похибок вимірювань близько 2 %. Одним з основних факторів, що впливають на точність вимірювань, є коректний вибір пружного елементу. Зазвичай консольна балка виготовляється з листової інструментальної сталі завтовшки близько 0,2 мм. Оскільки її товщина майже така, як товщина дроту і підкладки тензорезистора, то при обчислюванні коефіцієнта тензочутливості необхідно враховувати зміщення дроту тензорезистора відносно поверхні балки:

$$\varepsilon_T = \varepsilon(1 + 2t/h + d/h),$$

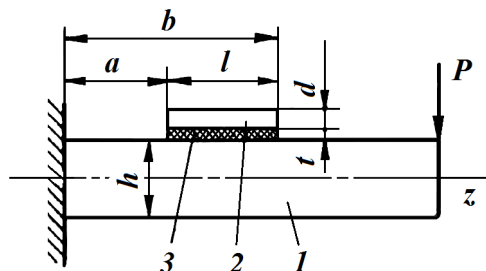
де ε_T та ε – відносна деформація дроту тензорезистору та поверхні балки відповідно;

h та t – товщина балки та діелектричної основи;

d – діаметр дроту.

В якості пружного елементу доцільно застосовувати балку рівного опору, інакше при розрахунку необхідно оперувати з величиною середньої відносної деформації, яка для випадку, приведеного на рис. 3.18, має вид:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{a}{l} \cdot \int_a^b \varepsilon dz$$



1 – консольна балка; 2 – дріт; 3 – підкладка тензорезистора

Рисунок 3.18 – Розрахункова схема для обчислення коефіцієнту тензочутливості

Як зазначалося вище, для збільшення вихідного сигналу і температурної компенсації вимірювального мосту тензорезистори треба наклеювати на обидві поверхні пружного елементу.

При вимірюванні переміщень до 1000 мм і вище механічна величина переміщень перетвориться в електричний сигнал за допомогою реохордів або реостатів.

Вибір тензодатчика. Похибки запису, викликані нестабільністю переходів опорів щіток, зменшуються зі збільшенням опорів плечей мосту. Тому бажаними є тензодатчики з великим (>400 Ом) опором. Можливе наклеювання не чотирьох, а восьми тензодатчиків.

При використанні тензодатчиків з більшими базами (25...30 мм) слід враховувати, що в них більша подовжня і менша поперечна чутливість (поперечну чутливість слід визначати додатково). Кріплення тензодатчиків проводять через трафарет (наприклад, під кутом 45°).

Струмоз'ємні пристрої. Розрізняють такі типи струмоз'ємних пристроїв: 1) струнні; 2) за принципом підшипника кочення; 3) щіткові (ковзаючі контакти).

Масштаб (M) запису визначають: 1) градуванням вимірювального комплексу; 2) розрахунковим шляхом.

Градування проводять у координатах $M = f(y)$, причому, тип такого графіку, зазвичай, є лінійним, а y – це відхилення показчика на приладі.

Масштабний коефіцієнт:

$$M_M = \frac{M_1}{y_1}.$$

Зв'язок між y та M визначають функцією:

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

де K^1 – коефіцієнт чутливості тензопідсилювача та гальванометру:

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

тут R_0 – відомий опір, який підключають до мосту;

$$y_0 = K^1 \frac{R}{R_0 + R} - \text{відхилення на екрані комп'ютеру,}$$

осцилографу або фотоплівці.

Тоді масштабний коефіцієнт розраховують як

$$M_M = \frac{GW_p}{2y_0 \left(1 + \frac{R_0}{R}\right) K_0 (1 - \gamma)}.$$

Торсіометри. Торсіометри – прилади для перетворювання кута закручування валу на певній довжині (базі), що викликаний крутильним моментом $M_{кр}$, у переміщення, яке, за допомогою датчиків переміщення, перетворюється в електричний сигнал.

Основні елементи, з яких складається торсіометр:

- 1) первинний перетворювач (перетворює кручення у переміщення);
- 2) датчик переміщення;
- 3) струмоз'ємний прилад.

Торсіометри з тензометричним датчиком переміщення дозволяють вимірювати:

- 1) кут повороту хомутів:

$$\Delta\varphi = \frac{LM}{GI_p},$$

де L – база первинного перетворювача,

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32};$$

2) відносну деформацію пластинки датчика переміщення:

$$\varepsilon_0 = \frac{h}{l} \Delta\varphi,$$

де h – відстань від центру валу до осі пластини;
 l – робоча довжина пластинки датчика переміщення.

Тоді отримуємо:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0(1 - \lambda\mu)\varepsilon_0; \quad \varepsilon_R = \frac{2K_0(1 - \gamma\mu)hL}{GI_p l} M.$$

Для визначення масштабу запису повідомляється $\Delta l_{\max}$ – максимально можливе подовження, для якого отримують $y_{\max}$ – максимальне відхилення покажчика.

Для подальшого градування використовують залежності:

$$y = \frac{y_{\max}}{\Delta l_{\max}} \Delta l; \quad M = M_m \cdot y,$$

де
$$M_m = \frac{\Delta l_{\max}}{y_{\max}} \frac{GI_p}{hL}.$$

Питання для самоконтролю

1. Що таке тензометрія, електротензометрія? Назвіть види тензометрів?

2. Поясніть принцип роботи дротяних датчиків опору та зарисуйте їх конструкцію.

3. Аналітично поясніть фізичні основи електротензометрії. Які вимоги пред'являють до характеристик матеріалів тензодатчиків?

4. Як проводять тарирування датчиків? Зобразіть схему тарирування тензорезисторів за допомогою консольної балки рівного опору.

5. Чим визначається коефіцієнт тензочутливості ДДО?

6. Зобразіть схему тарирування тензорезисторів за допомогою балки постійного поперечного перерізу, що працює на чистий вигин.

7. Зобразіть потенціометричну схему включення тензодатчика в електричне коло. Дайте її характеристику.

8. Зобразіть найпростішу мостову схему включення тензодатчика в електричне коло. Дайте її характеристику.

9. Що таке чутливість електричних кіл (ланцюгів) та чим вона визначається? Зобразіть основні схеми включення тензорезисторів у мостову схему.

10. Що таке температурна компенсація? Аналітично поясніть вплив зміни температури на роботу датчиків.

11. Поясніть особливості вивчення плоского напружено-деформованого стану

12. В чому полягають особливості вимірюванні сил та моментів у процесах ОМТ?

13. Як використовують елементи устаткування в якості датчиків моментів і сил?

14. Які методи вимірювання моментів Ви знаєте?

15. Поясніть конструкцію месдоз. Опишіть методику вимірювання сил месдозами.

16. Поясніть конструкцію датчиків тиску.

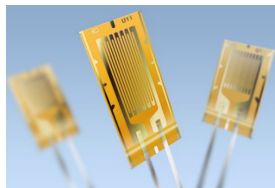
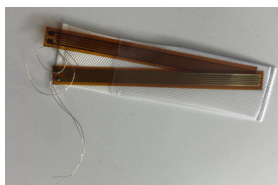
17. В чому полягає особливість реєстрації переміщень та швидкостей?

18. Де використовують стумоз'ємні пристрої в устаткуванні та засобах автоматизації процесів ОМТ?

19. Що таке торсіометри, їх сфера застосування?

Додаток В

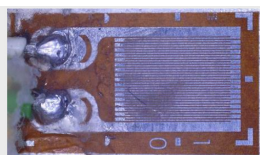
Дротяні та фольгові датчики опору та їх конструкції



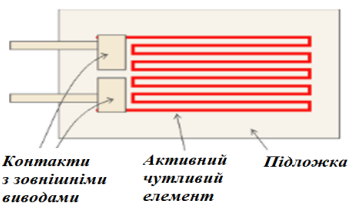
Товарний вигляд тензорезисторів



- 1 – підкладка;
- 2 – дріт;
- 3 – вивідні кінці;
- l – база датчика

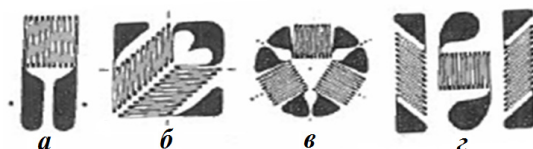


[<https://10i5.ru/raznoe/podklyuchenie-tenzodatchika.html>]



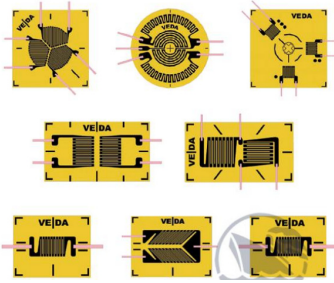
[https://www.bookasutp.ru/Chapter6_3_5.aspx]

Структура металевого тензодатчика (ДДО)



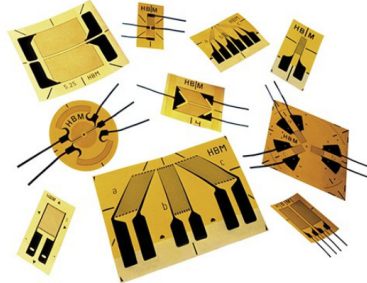
Типові конструкції фольгових тензодатчиків:

- a – з паралельними решітками (ґратками);
- b – двоелементна прямокутна; v – рівнокутна;
- z – стандартна прямокутна



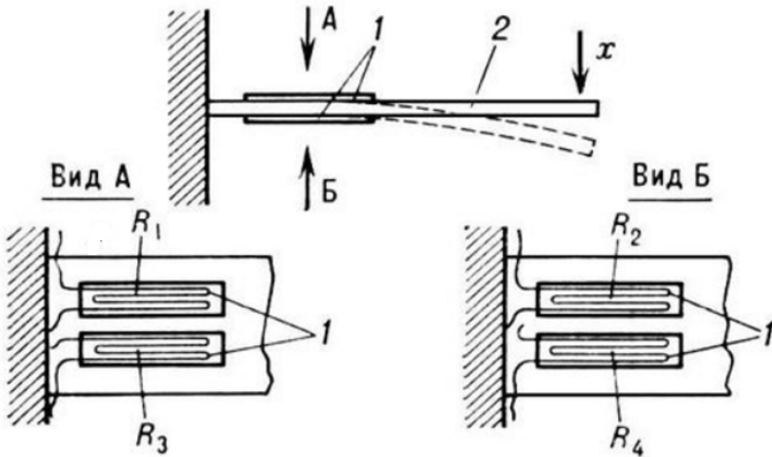
[<https://pg-fregat.ru/pribor/tenzorezistory-kf5>]

Тензорезистори фольгові
КФ5



[<https://www.elec.ru/market/tenzorezistory-folgovye-tipov-c-y-g-k-v-s-e-d-a-u-14940664883.html>]

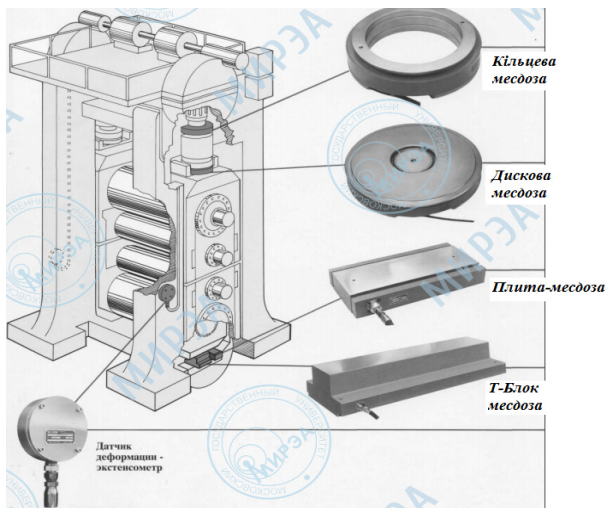
Тензорезистори фольгові
типів C, Y, G, K, V, S, E,
D, A, U



[<https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/109/788.htm>]

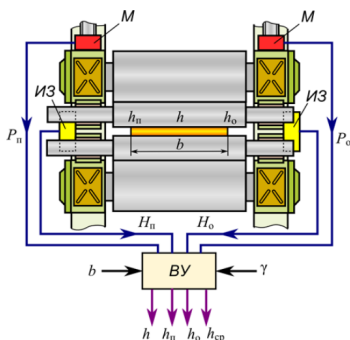
Схема кріплення тензорезисторних датчиків:

1 – решітки (дроти); 2 – пружний елемент;
 $R1, \dots, R4$ — тензорезистори; x – вимірюваний параметр



[<http://промкаталог.рф/PublicDocuments/0412474.pdf>]

Системи вимірювання сили прокатки – монтування месдоз на прокатному стані за каталогом фірми ROLLMAX



[http://wwwcdl.bmstu.ru/mt10/UTS/frame_s3-5.html]

Схема вимірювання товщини штаби за відстанню між шейками робочих валків:

М – месдозы;

ИЗ – вимірювачі зазорів;

ВУ – обчислювальний пристрій



[<https://www.cta.ru/cms/f/448402.pdf>]

Мембранні гідрокапсули (месдозы), встановлені у пазах подушок верхнього валка стану ДУО-850

(В. Грицюк, А. Созонтов, С. Счастливцев, Е. Леонідов-Каневський, П. Гагарін)

4 МЕХАНІЧНІ, ОПТИЧНІ, ПНЕВМАТИЧНІ ТА СТРУННІ ТЕНЗОМЕТРИ

У цій темі описані широковживані механічні і оптичні прилади для вимірювання деформацій. Такі прилади знаходять застосування до теперішнього часу, вони визначили цілий напрямок розвитку техніки тензометрії. Особливу увагу приділено основам техніки вимірювання деформацій механічними та оптичними методами і методиці застосування тензометрів.

4.1 Механічні тензометри

Вимірювання деформацій при застосуванні механічних тензометрів завжди зводиться до визначення зміни певної довжини бази, яку обмежено призмами або кернами тензометру.

При статичних вимірюваннях часто висувають вимогу малої бази тензометра, так як на підставі вимірюваних значень відносного подовження визначається розподіл напружень на поверхні досліджуваної деталі.

Динамічні вимірювання деформацій слугують, найчастіше, для визначення зовнішніх сил (навантажень). У зв'язку з цим, при таких вимірюваннях база тензометра може бути більшою. Переміщення при вимірюваннях деформацій бувають у всіх випадках дуже малими і повинні бути тим чи іншим способом збільшені для можливості візуального спостереження.

При статичних вимірюваннях можна обмежитися безпосереднім відліком вимірюваної величини за шкалою тензометра. При динамічних вимірюваннях обов'язковим є безперервний запис деформацій. У першому випадку, основне значення має достатня чутливість приладу, тобто досить велике збільшення. У другому випадку, найбільш важливо забезпечити якомога меншу інерційність приладу.

Деформації повинні вимірюватись на зовнішніх волокнах матеріалу деталі.

Тензометри, які працюють за механічним принципом, відіграють особливо важливу роль в області вимірювання статичних деформацій, при яких інерційність приладу не грає ролі. Однак, і при динамічних вимірюваннях механічні тензометри дозволяють отримувати хороші результати при умові вибору достатньо малого масштабу запису.

Тензометри для статичних вимірювань. Збільшення вимірюваного переміщення в механічних тензометрах для статичних вимірювань, зазвичай, обмежено вузькими межами, обумовленими габаритними розмірами тензометра. Масштаб збільшення і необхідна чутливість визначають базу приладу, яка, у зв'язку з цим, не може бути менше деякого мінімального значення.

Тензометри поділяються на два класи, з яких одні *закріплюють* на досліджуваній деталі на весь час вимірювання, а інші – наводяться у дотик із деталлю тільки на час відліку деформацій. Тензометри другого класу надалі будуть позначатися як *«тензометри, що не закріплюють»*.

Тензометри, що закріплюють на деталі на весь час вимірювання. Такі тензометри повинні бути закріплені досить міцно. При цьому, однак, сила натискання тензометра не має бути занадто великою, щоб уникнути пошкодження призми або кернів тензометра. Надмірно велика сила натискання на тензометр, в деяких випадках, може викликати також появу неприпустимо високих напружень у досліджуваній деталі. Сила притискання може бути обрана малою завдяки малому зусиллю, що необхідне для переміщення механізму тензометра (сила вимірювання), і малій масі. Ці дві характеристики тензометра мають бути як можливо меншої величини.

Найбільш відомим з тензометрів, що закріплюють на деталі, є тензометр Гугенбергера та його різні модифікації (рис. 4.1 та рис. 4.2). Такі прилади чудово зарекомендували себе в багатьох галузях техніки. Особливою перевагою цих тензометрів є мала величина сили вимірювання.

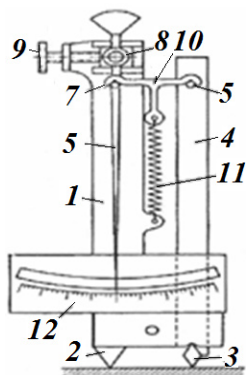


Рисунок 4.1 – Тензометр Гугенбергера з базою 10 мм

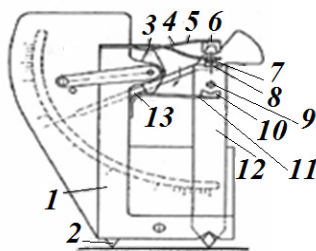


Рисунок 4.2 – Тензометр DVL

На рис. 4.1 показана модель тензометра з базою 10 мм, що відрізняється особливо малою вагою. Корпус тензометра 1 має внизу поперечину з нерухомою призмою 2 і вирізом під рухому призму 3. Рухома призма є одним з кінців двоплечового важеля 4, що має на другому кінці штифт 5. Стрілка тензометру 6, що переміщується перед дзеркальною шкалою 12, шарнірно закріплена у верхній частині корпусу тензометра. Важіль 4 і стрілка 6 з'єднані траверсою 10, що спирається на штифти 5 і 7, до яких вона притискається натягом пружини 11. Стрілку тензометра можна переставляти шляхом переміщення опори підшипника 8 стрілки за допомогою гвинта 9. Всі з'єднання важільного механізму тензометра виконані на призмах, що забезпечує високу точність вимірювань. Тензометр закріплюється на деталі за допомогою

струбчинки будь-якого типу, кінець якої входить в отвір у поперечині корпусу приладу. Шкала тензометру має 40 поділок і при вимірюванні може бути пройдена кілька разів за рахунок перестановки опори підшипника стрілки. Збільшення тензометра дорівнює 2000. Габаритні розміри тензометра складають 175 мм × 48 мм × 12 мм, маса 28 г.

В іншій модифікації приладу збільшення дорівнює 1200, габаритні розміри 165 мм × 52 мм × 15 мм, маса – 70 г; сила натиснення близько 30 Н. Точність вимірювання у нормальних умовах – 0,3 мк.

Слід відзначити також тензометри з базою, що безперервно змінюється, для вимірювання відносного подовження в зонах концентрації напружень за диференціальним методом Рюля-Фішера, а також вимірювачі кривизни для визначення напружень вигину.

В деяких випадках, наприклад, при вимірюваннях деформацій у зразках з пластмаси і на целюлоїдних моделях, буває достатня відносно низька чутливість тензометру при незмінних вимогах щодо малих габаритних розмірів і малої маси приладу.

Тензометр для такого роду вимірювань з базою 20 мм розроблений в Німецькому дослідному авіаційному інституті (DVL). Конструкція тензометра показана на рис. 4.2. Тарирувальну характеристику наведено на рис. 4.3. На нижньому кінці корпусу 1 тензометра з нерухомою призмою 2 встановлена у вирізі корпусу рухома призма, яка є одним кінцем двоплечового важеля 12. До торцевої поверхні другого кінця важеля, за допомогою пласкої пружини 4, притиснутий циліндричний валик 5 діаметром 0,5 мм, що котиться по цій поверхні при повороті важеля 12. З валиком з'єднана стрілка 13, яка переміщується попереду дзеркальної шкали. Перед закріпленням на досліджуваній деталі тензометр повинен бути арретований шляхом повороту кулачка 3 в напрямку,

показаному стрілкою. При цьому важіль 12 фіксується за допомогою двох упорів 10 з вирізами, укріплених на пласкій пружині 11, та притискає їх до штифта 9 важелем 12. Аналогічним чином фіксується циліндричний валик, на кінцях якого закріплені призми 7, до яких при арретуванні тензометру притискається закріплена на пласкій пружині 5 вилка 6 відповідного профілю. Шкала тензометру розділена на 60 частин з нулем посередині. Збільшення приладу складає близько 600 і, як видно з рис. 4.3, залишається практично постійним у межах всієї шкали приладу.

Габаритні розміри тензометру складають 80 мм × 30 мм × 15 мм, маса 80 г. Точність вимірювання при нормальних умовах становить $\pm 0,6$ мк.

Цікавий принцип вимірювання покладено в основу конструкції тензометра Йогансона, показаного в нормальному виконанні з базою 50 мм на рис. 4.4. На корпусі 1 тензометра закріплені пластина 2 з нерухомою призмою 3 і пласка пружина 4, яка служить шарніром для рухомої призми 6. До кронштейна рухомої призми притискається важіль 5. Збільшення вимірюваного переміщення здійснюється за допомогою металевої стрічки 7 прямокутного поперечного перерізу, яку закручено навколо поздовжньої осі по один бік від середнього перерізу за годинниковою стрілкою, а по інший бік – проти годинникової стрілки. Один кінець стрічки з'єднаний за допомогою кронштейна 10 з корпусом 1 тензометра, другий кінець – з важелем 5, причому стрічка знаходиться в напруженому стані, що змінюється при переміщенні рухомої призми 6. Зміна напруження у стрічці супроводжується поворотом закріпленої на стрічці стрілки 5 на кут, що відлічується за шкалою 9. Збільшення тензометра залежить від перерізу стрічки та числа обертів, на яке вона закручена. Є тензометри цього

типу із збільшенням 100, 200, 1000 та 5000. Розроблені також тензометри цього типу менших розмірів з базою від 3 мм до 10 мм.

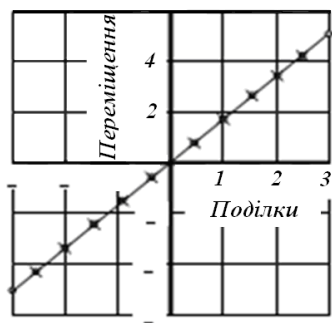


Рисунок 4.3 –
Тарировальна крива
тензометру DVL

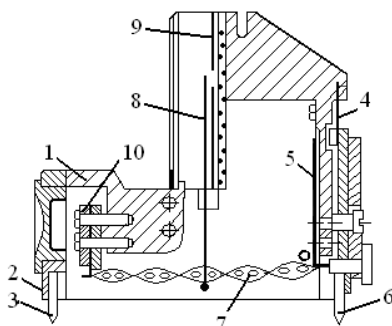


Рисунок 4.4 –Тензометр
Йогансона з закрученою
стрічкою з базою 50 мм

Тензометри, що не закріплюють. У тих випадках, коли потрібно визначити зміну напруженого стану за відомий проміжок часу, зручно застосовувати тензометри, що не закріплюються на деталі. При цьому, за допомогою одного такого пристрою можна визначити деформації у низці точок конструкції. При таких вимірюваннях на досліджуваній поверхні розмічають бази вимірювання, по їх кінцях встановлюють сталеві кульки невеликого діаметру (близько 1,5 мм). При роботі з металевими деталями ці кульки запресовують в отвори в деталі; при роботі з деталями із неметалічних матеріалів – закріплюють (за допомогою клею, мастики і т.і.) невеликі металеві пластинки із попередньо запресованими кульками. Тензометр, що не закріплюють, має замість призм рухому і нерухому ніжки з поглибленнями відповідної форми, якими тензометр притискають при вимірюванні до кульок, що запресовані у деталь. Для

можливості врахування подовжень деталі, зумовлених змінами температури, застосовується контрольна пластинка з того ж матеріалу, що і досліджувана деталь, з запресованими кульками на відстані, яка рівна базі тензометра. Контрольна пластинка розташовується при вимірюваннях таким чином, щоб температура дорівнювала температурі деталі, а механічні напруження відсутні. Контрольна пластинка служить також для повсякденної перевірки тензометру та усунення похибок, пов'язаних зі зношуванням ніжок та ін.

З числа тензометрів описуваного типу слід зазначити прилад Пфендера, що відрізняється особливим зручністю застосування також і у важкодоступних місцях. На рис. 4.5 показана схема цього тензометра і метод його застосування. У корпусі 1 приладу з нерухомою ніжкою 2 шарнірно закріплений кутовий важіль 4, коротке плече якого є другою рухомою ніжкою приладу. Переміщення рухомої ніжки відносно нерухомої викликає збільшення в п'ять разів переміщення вільного кінця довгого плеча важеля, що натискає на штифт стрілочного індикатора 3, закріпленого у корпусі приладу. При установці тензометра для вимірювання штифт індикатора піднімають шляхом підняття важеля 5 для аретирування, звільняючи кутовий важіль (положення I). Потім важіль 5 опускають вниз, фіксуючи ним кутовий важіль у положенні вимірювання і опускаючи на його вільний кінець штифт індикатора (положення II). У цьому положенні прилад може бути знятий з кульок, запресованих в досліджувану деталь, і, потім, може бути проведений відлік по індикатору. База приладу може змінюватися покроково шляхом перестановки нерухомої ніжки від 20 мм до 100 мм. Кожна поділка шкали індикатора відповідає переміщенню його штифта на 10 мк, й, таким самим, переміщенню ніжки приладу на 2 мк. Похибка вимірювання не перевищує

± 1 мк; сила переміщення механізму тензометра дуже мала, що дозволяє використовувати прилад також і при вимірюванні відносного подовження паперу або інших матеріалів, що легко деформуються.

Тензометр, що не закріплюють, з базою 20 мм, показання якого відраховують за допомогою спеціального приладу, розробленого Швайгерером в лабораторії випробування матеріалів в Штутгарті, наведено на рис. 4.6.

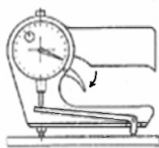
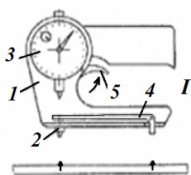


Рисунок 4.5 – Схема пристрою тензометру, що не закріплюють (прилад Пфендера)

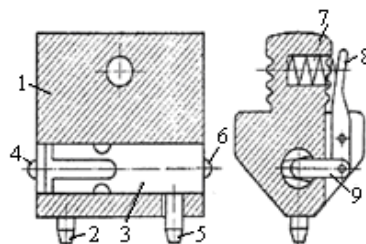


Рисунок 4.6 – Тензометр, що не закріплюють

В корпусі 1 приладу закріплені нерухома ніжка 2 і кулька 4, і розміщується валик 3 з другою рухомою ніжкою 5 і друга кулька 6. Валик закінчується на одному кінці двома пружними пластинками клиноподібної форми, між якими при аретируванні приладу вводиться штифт 9 з напівсферичною головкою, які переміщуються силою гвинтової пружини 7 через проміжний важіль 8. Для розарретування приладу попереду встановлювання на кульки, які запресовані у деталі, при вимірюванні натискають на проміжний важіль. Після розарретування валик може вільно переміщуватись в осьовому напрямку. Після установки приладу на кульки важіль звільняють і потім знімають прилад з кульок у арретованому стані.

4.2 Оптичні тензометри

Оптичні тензометри використовують для вимірювання статичних напружень. В оптичних тензометрах для статичних вимірювань легко досягається достатня чутливість навіть при дуже малій базі приладу. У багатьох поширених конструкціях тензометрів описуваного типу використовується *дзеркальна система відліку*. У деяких тензометрах застосовують *автоколімаційний дзеркальний відлік*.

При суб'єктивній дзеркальній системі відліку, схема якої показана на рис. 4.7, за відображенням шкали Sk спостерігають крізь рухоме дзеркальце Sp приладу через зорову трубу F (рис. 4.7). Шкалу і зорову трубу встановлюють окремо від тензометру. Кут повороту дзеркальця визначають по переміщенню зображення шкали щодо перехрестя ниток зорової труби за формулою:

$$e = Atg2\varphi \approx 2A\varphi, \quad (4.1)$$

де A – відстань від дзеркальця приладу до шкали.

Часто застосовуються пристрої, в яких на шкалу направляється вузький світловий (лазерний) промінь, відбитий від дзеркальця приладу. При цьому способі відліку залишається в силі формула (4.1), проте величина e в такому разі являє собою переміщення світлової плями за шкалою. Незавжно зауважити, що більше збільшення приладу легко досягається шляхом збільшення відстані між дзеркальцем і шкалою.

З багатьох тензометрів з суб'єктивним відліком розглянемо тільки один – прилад з базою 1,5 мм, розроблений на двигунобудівельних заводах Юнкерс. Конструкція приладу показана на рис. 4.8.

рис. 4.8, за допомогою ексцентрика 3, який притискає шарнірно укріплений в корпусі приладу важіль 4 до установчого гвинта на виступі важеля 7. При повороті ексцентрика 3 в напрямку, показаному стрілкою, важіль 4 повертається під дією натягу пласкої пружини 5 і звільняє важіль 7. Будь-яке переміщення корпусу приладу при вимірюванні може бути враховане за допомогою другого дзеркала 12, укріпленого на корпусі. Для кріплення тензометра у нижній частині корпусу є отвір. Слід відзначити, що, при досить малих розмірах, збільшення описуваного тензометра при відстані між дзеркальцем і шкалою 1,5 м становить близько 10 000.

На рис. 4.9 показана схема розробленого С. Бергом тензометра з об'єктивним відліком шляхом спостереження зображення щілини, освітленого світлом лампи на фоні шкали. На одному з кінців корпусу 1 приладу є дві нерухомі призми 2, виконані разом з корпусом. На іншому кінці встановлена на пружинному шарнірі 4 рухома призма, що є частиною важеля 5. До торцевої поверхні натисканням важеля пласкої пружини 8 притискається циліндричний вал 6, з яким з'єднане дзеркальце приладу 7. При переміщенні рухомої призми, валик котиться по поверхні важеля 5. Описаний пристрій закріплюється у виїмці корпусу приладу. Власні переміщення корпусу приладу, закріпленого на досліджуваній деталі, як і в попередньому випадку, враховуються за допомогою другого дзеркальця, укріпленого на корпусі тензометра.

Тензометри описаного типу виготовляють з базою від 5 мм до 20 мм. Габаритні розміри приладу менше, ніж у тензометра Юнкерса. Вимірювальний пристрій з оптичним тензометром, в більшості випадків, допускає зручний контроль. Тому, будь-якого роду несправності та похибки у роботі приладу виявляються так саме легко, як і при застосуванні механічних тензометрів. Проте, усунення

несправностей в оптичних тензометрах не завжди буває так само простим, як в механічних.

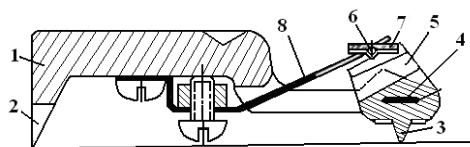


Рисунок 4.9 – Тензометр Берга з дзеркальною системою відліку

Збільшення приладу при відстані між дзеркальцем і шкалою 1,5 м становить 7 000...10 000.

При статичних вимірюваннях часто буває необхідна дуже мала база тензометру. В оптичних тензометрах ця вимога задовольняється без особливих труднощів. Тим не менш, як правило, виявляється необхідним додаткове механічне (оптичне) збільшення.

Тензометри з дзеркальним відліком, у зв'язку з необхідністю великої площі для розміщення всього вимірювального пристрою, зазвичай, використовують тільки в лабораторіях, де можна розраховувати на високу кваліфікацію і ретельну підготовку експериментатора, а також де врахування власних переміщень тензометра, закріпленого на деталі, не викликає великих труднощів. У цих умовах можна забезпечити достатньо високу чутливість приладу, навіть при самій малій довжині бази. У зв'язку з цим, тензометри з дзеркальним відліком використовують, головним чином, при вимірюванні напружень у зонах концентрації: на галтелях валів, отворів тощо. Відстань між дзеркальцем приладу і шкалою, в деяких випадках, може бути досить великою. Сам тензометр неважко виконати з малими габаритними розмірами та масою для виключення труднощів при кріпленні тензометра на досліджуваній деталі.

Тензометри з автоколімаційною дзеркальною системою відліку не вимагають багато місця для виконання вимірювань і, крім того, відрізняються тим, що власні переміщення тензометра, закріпленого на деталі, не впливають на результати вимірювання. Однак, чутливість цих тензометрів нижче, ніж у приладів з дзеркальною системою відліку. Рівним чином, кріплення тензометрів до деталі здійснюється не так просто, як у попередньому випадку, у зв'язку з великими габаритними розмірами і масою тензометрів. Можливість вільного від паралакса відліку результатів вимірювання на матовому склі, вільно утримуваному в руці де-небудь поблизу тензометра, дозволяє проводити вимірювання у важкодоступних місцях і, навіть, у темряві.

Закрита конструкція тензометрів запобігає проникненню всередину приладу пилу, вологи тощо, і забезпечує зручність поводження з приладом. Тензометри з малою базою застосовують при дослідженнях у зонах високих градієнтів напружень. Похибка вимірювання одновісного напруження в сталі становить при нормальних умовах експерименту: ± 3 МПа – при базі тензометру 20 мм, ± 10 МПа – при базі тензометру 3 мм і ± 20 МПа – при базі тензометру 1 мм.

4.3 Вимірювання деформацій пневматичними тензометрами

Принцип пневматичного перетворення в конструкції тензометра відомий досить давно, але пневматичні тензометри налічують менше років розвитку, ніж більшість інших приладів для вимірювання деформацій. Тим не менш, на підставі наявного досвіду, можна зробити об'єктивні висновки про можливості та обмеження цього методу вимірювання деформацій.

Принцип дії пневматичного перетворювача.

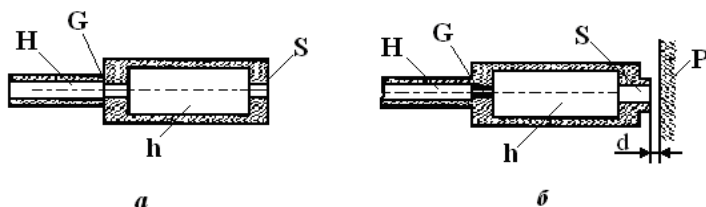
Принцип дії пневматичного перетворювача, відомого під назвою перетворювача "солекс", полягає у використанні зміни перепаду тиску в соплі при зміні витрат повітря, яке проходить крізь сопло із певним прохідним перерізом.

Якщо пропускати стиснене повітря при постійному надлишковому тиску H через два послідовно включених сопла G і S (рис. 4.10, *a*), то в камері між соплами встановиться тиск h , що визначатиметься, у першому наближенні, за формулою:

$$h = \frac{H}{1 + \frac{S^2}{G^2}}, \quad (4.2)$$

де S і G – ефективні площі прохідних перерізів обох сопел.

Формула (4.2) застосовна тільки при надлишкових тисках H , що не перевищують деякого граничного значення, до якого розширення повітря є адіабатичним.



S – вимірювальне сопло; G – головне сопло; h – тиск у камері; H – тиск перед камерою; P – пластинка

Рисунок 4.10 – Схема пневматичного перетворювача

При незмінному надлишковому тиску H і постійній площі прохідного перерізу головного сопла G зміна ефективного прохідного перерізу сопла S буде викликати

зміну тиску h . Прохідний переріз сопла S змінюється за рахунок зміни відстані d між краєм сопла і пластинкою p (див. рис. 4.10). Зважаючи на це, сопло S називають вимірювальним соплом.

Прямий метод вимірювання. При прямому методі вимірювання за допомогою пневматичного перетворювача вимірюється надлишковий тиск h в камері між соплами.

Функція $h = f(S)$ має точку перегину, в околицях якої ця залежність наближено може вважатися лінійною (рис. 4.11). Цю лінійну частину кривої $h = f(S)$, зазвичай, і використовують при аналізі роботи пневматичного перетворювача. На жаль, протяжність лінійної частини кривої невелика. Якщо по осі абсцис відкладати відстань d від краю сопла S до пластини p , то лінійна частина кривої займає інтервал від $h = 0,6H$ до $h = 0,75H$.

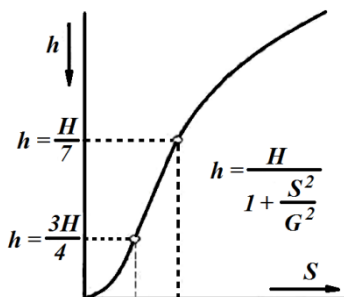


Рисунок 4.11 – Робоча діаграма пневматичного перетворювача

Диференційний метод вимірювання. Лінійну частину діаграми пневматичного перетворювача можна зробити значно довше при використанні диференційного принципу вимірювання. Для цієї мети в перетворювачі використовують два головних сопла G і два вимірювальних сопла S , спрямованих назустріч один до одного, з встановленою між ними рухомою пластинкою,

переміщення якої є функцією вимірюваної величини. При переміщенні зазначеної пластинки тиск у двох камерах перетворювача змінюються. Відхилення стрілки показуючого приладу пропорційно різниці цих тисків Δh .

Диференційний метод вимірювання вимагає істотного ускладнення конструкції перетворювача і тому застосовується тільки в тих випадках, коли буває необхідна велика протяжність діапазону вимірювань.

Використання пневматичних перетворювачів широко застосовують для експериментальних досліджень міцності не на деталях в їх натуральну величину, а на їх моделях, виконаних у масштабі, що дозволяє отримувати бажані результати з достатньою точністю при менших витратах.

Недоліки пневматичних тензометрів. У зв'язку з великим збільшенням, необхідним для тензометра з базою 2 мм, пневматичний перетворювач працює відносно повільно, і час встановлення, наприклад, водяного стовпа манометру вимірюється декількома секундами. Зважаючи на це, пневматичний тензометр може бути використаний тільки для вимірювання статичних напружень (інерційність манометра є досить наявною).

Пневматичний перетворювач за своїм принципом дії заснований на витіканні струменя повітря у вільну атмосферу. У зв'язку з цим, пневматичний тензометр не може бути використаний для вимірювань ні в якому середовищі, крім атмосферного повітря.

В системі пневматичного тензометра є фільтр, призначений для очищення повітря від сторонніх частинок, які могли б порушити роботу тензометра. Тим не менш, досвід показує, що для гарантійного виключення потрапляння частинок пилу в вимірювальне сопло і появи похибок вимірювання, тензометр повинен працювати в досить чистій атмосфері.

Ще один недолік пневматичного тензометру, як вже згадувалось, пов'язаний з формою його тарирувальної кривої. Лінійна частина цієї кривої має настільки малу протяжність, що при збільшенні в 200 000 разів робоча область тензометру відповідає вимірюваному переміщенню всього у 1 мк. Як вказувалося вище, можна значно розширити зону лінійності шляхом застосування диференціальної системи, однак, досвід показав, що пов'язане з цим ускладнення конструкції тензометра зазвичай виявляється недоцільним.

Якщо розглядати випадок монтажу на досліджуваній деталі тільки одного тензометра, то для можливості його роботи в заздалегідь заданій області значень відносного подовження достатньо вибрати діапазон зміни навантаження на деталь, що, зазвичай, може бути зроблено без будь-яких труднощів. Однак, при встановленні на деталі декількох тензометрів, які можуть вимірювати різні відносні подовження, діапазон зміни навантаження не можна вибрати довільно. Це утруднення легко можна усунути, якщо зменшити збільшення тих тензометрів, які вимірюють найбільше відносне подовження. Для цього досить замінити головні сопла, які пов'язані з відповідними приладами, що показують.

Для розширення робочої зони пневматичного тензометра можна під час вимірювань змінювати відстань між пластинкою і вимірювальним соплом (у разі потреби – кілька разів), що дозволяє кожен раз приводити робочу точку до початку лінійної частини тарирувальної кривої. Однак, при вимірюваннях у виробничій обстановці і наявності декількох пневматичних тензометрів на одній деталі, такий метод призводить до надмірного ускладнення роботи.

Переваги пневматичних тензометрів. Простота конструкції основних деталей пневматичного тензометра

дозволяє виконати тензометр при достатній міцності та жорсткості з дуже малою масою – близько 9 г, і малими габаритними розмірами – не більше 32 мм по висоті. Збільшення у 200 000 разів виявляється достатнім для будь-яких вимірювань. Зміна висоти водяного стовпа у манометрі на 1 мм відповідає зміні напружень у сталевій деталі на 0,5 МПа. Така висока чутливість не є лише теоретичною характеристикою тензометра, через те, що точність відтворення результатів вимірювання – того ж самого порядку. Численні вимірювання показали, що виміряні значення відносного подовження при повторних вимірюваннях відрізняються не більше ніж на $1 \cdot 10^{-5}$, що відповідає одновісному напруженню у сталі близько 1 МПа.

Простота обслуговування пневматичного тензометру, завжди готового до дії, дозволяє систематично отримувати хороші результати вимірювань, навіть при не дуже високій кваліфікації експериментатора.

Поправки на вплив температури, зазвичай, вводити не потрібно, через те, що збільшення пневматичного тензометра мало змінюється при зміні температури.

У тих випадках, коли можуть мати місце значні зміни температури за час експерименту, можливі похибки вимірювання через відмінності у термічному розширенні досліджуваного зразка і деталей тензометру. Однак, при статичних вимірюваннях, зазвичай, легко запобігти такого роду похибкам. Слід зауважити, що такі похибки мають місце також і для інших типів тензометрів.

Вимірювання деформацій за допомогою пневматичних тензометрів є зручним в тому відношенні, що, завдяки гнучкості шланга, який з'єднує датчик тензометру з показуючим приладом, практично відпадають обмеження щодо місця кріплення датчика і не виникає ніяких незручностей при відліку показання тензометра, де б він не був встановлений.

4.4 Струнні тензометри та їх застосування

Принцип дії струнного тензометру. Власна частота натягнутої струни при поперечних коливаннях, крім довжини і питомої маси (щільності) матеріалу, залежить також і від натягу струни і може бути знайдена за формулою:

$$fn = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \quad (4.3)$$

де fn – власна частота n -ної форми коливання;
 l – вільна довжина струни;
 σ – розтягуюче напруження;
 ρ – щільність матеріалу струни.

Якщо кінці струни закріпити на досліджуваній деталі, у матеріалі якої діють механічні напруження, то подовження, що виникає під дією напружень деталі, буде повідомлено струні. Тоді деформація деталі, одержувана при її навантаженні, буде викликати зміну власної частоти струни. На підставі цього, вимірюючи зміну власної частоти струни при поперечних коливаннях, можна визначити відносне подовження матеріалу деталі. Важлива особливість методу вимірювання деформацій за допомогою струни, що коливається, полягає в тому, що при цьому методі використовується не амплітуда і не фаза коливання, а його частота. Це виключає можливість спотворення результатів вимірювання під час їх передачі від датчика тензометру до приладу, що показує.

Так, наприклад, одержуваний від датчика сигнал з частотою 500 Гц не може бути прийнятий, як сигнал з частотою 501 Гц. При використанні в якості чутливого елемента струни, що коливається, виключаються похибки вимірювання, пов'язані з коливаннями напруги живлення,

змінами коефіцієнтів підсилення підсилювачів, зміною омичного опору з'єднувальних проводів тощо.

Ці особливості методу дозволяють проводити вимірювання напружень за допомогою струнних тензометрів на дуже великих відстанях (до декількох кілометрів), так як частота коливань струни, яка визначається при вимірюваннях, залишається незмінною незалежно від зменшення амплітуди сигналу при передачі його на великі відстані.

Струнний тензометр Шефера-Майгака.

Описуваний тензометр працює за наступним принципом. Подовження, яке підлягає вимірюванню, передається сталевій струні тензометра, що має деякий попередній натяг, що призводить до зміни власної частоти струни (у струнному тензометрі М. М. Давіденкова спостерігаються не вільні, а вимушені коливання струни, викликані електромагнітом). Збудження коливань струни виконується електричним методом, шляхом пропускання імпульсу струму через обмотку невеликого електромагніту, полюси якого розташовані в безпосередній близькості від струни. Після збудження коливань струна коливається з власною частотою і амплітудою, яка поступово зменшується, та, при цьому, індукуює в обмотці того ж електромагніту, який використовується для збудження коливань струни, змінну напругу, частота якої дорівнює частоті коливань струни. Ця напруга підводиться по проводах до вимірювального пристрою, в якому частота сигналу порівнюється з частотою коливань другої струни, що змінюється оператором до збігу частот коливань.

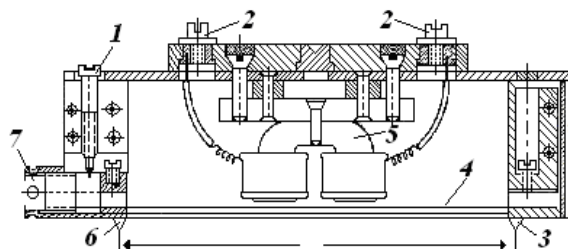
Описувана система дозволяє визначити власну частоту вимірювальної струни і, таким чином, повідомлене їй відносно подовження. Для збудження коливань вимірювальної струни, зазвичай, використовуються ті ж

проводи, по яких потім передається сигнал при вимірюваннях.

Через те, що збудження вимірювальної струни може бути здійснено з будь-якої відстані і через те, що, у відповідності з вищесказаним, умови передачі вимірюваної величини не залежать від характеристик з'єднувальних проводів, описуваний тензометр найбільш підходить для виконання вимірювань на великих відстанях.

На рис. 4.12 показана конструкція звичайного струнного тензометру з базою 100 мм. Корпус тензометра виконаний у вигляді рамки, в якій між рухомою 3 і нерухомою 6 призми натягнута сталева струна 4. Після закріплення датчика тензометра на досліджуваній конструкції та відпускання аретирувального гвинта 1 натяг струни регулюється за допомогою гвинта до отримання заданої власної частоти. У центрі датчика, в безпосередній близькості до струни, розміщені полюса електромагніту 5, який слугує для збудження коливань струни за допомогою імпульсу електричного струму та для отримання електричної напруги при вимірюванні.

На рис. 4.13 показана електрична схема вимірювального пристрою зі струнним тензометром. В датчику 1, закріпленому на досліджуваній конструкції, є натягнута вимірювальна струна 2. Датчик з'єднаний двома проводами 3 з вимірювальним пристроєм 4. У вимірювальному пристрої є друга струна 5, яка здійснює незатухаючі коливання у системі генератора 12 з електромеханічним зворотнім зв'язком. Частоту коливань струни 5 можна змінювати шляхом обертання ручки 8. Для збудження коливань вимірювальної струни натискають кнопку 6, посилаючи цим імпульс струму в обмотку електромагніту 7 датчика 1.



- 1 – аретир; 2 – затискачі для приєднання проводів;
 3 – рухома призма; 4 – вимірювальна струна;
 5 – електромагніт; 6 – нерухома призма;
 7 – регулювальний гвинт

Рисунок 4.12 – Поздовжній розріз струнного тензометру з базою 100 мм

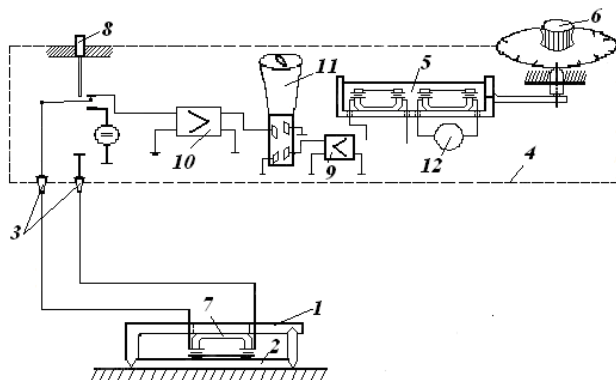


Рисунок 4.13 – Схема вимірювального пристрою Шефера-Майгака

Порівняння частот коливань обох струн проводиться оптико-електричним шляхом.

Для цієї мети змінна напруга з обмоток електромагнітів вимірювальної та контрольної струн

підводиться до підсилювачів 9 та 10, а потім – до взаємно-перпендикулярних відхиляючих пластин електронно-променевої трубки 11 або до комп'ютеру із відповідним програмним забезпеченням. При цьому, на екрані трубки або комп'ютера з'являються фігури Ліссажу того чи іншого виду. Комп'ютерна техніка із відповідним програмним забезпеченням дозволяє розшифровувати сигнал. Зсув фаз, порівнюваних за частотою напруги, не відіграє ніякої ролі. Єдина вимога полягає в тому, щоб відрегулювати натяг контрольної струни таким чином, щоб частота її коливань збіглася з частотою коливань вимірювальної струни. Мить збігу обох частот на екрані трубки виражається в тому, що рухомі фігури Ліссажу приймають вигляд замкненої кривої, а, саме, еліпсу, який не має точок перетину. При постійній амплітуді коливань вимірювальної струни, еліпс на екрані трубки або монітору залишається нерухомим. При загасанні вільних коливань струни, після початкового поштовху і збігу частот коливань обох струн, початковий еліпс поступово звужується, не обертаючись, і, нарешті, переходить у пряму, що відповідає коливанням тільки однієї контрольної струни.

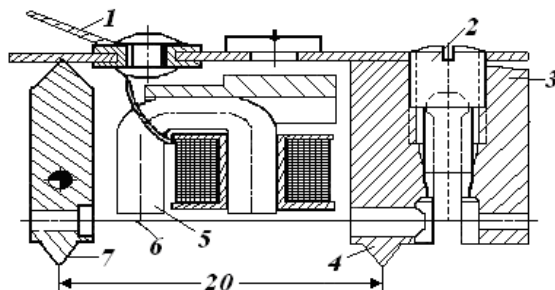
Вимірювальний прилад виконується з перемикачем, що має десять положень і дозволяє послідовно проводити вимірювання статичних деформацій в десяти різних точках за допомогою десяти закріплених у цих точках тензометрів. При використанні проміжних перемикачів можна, за допомогою одного вимірювача, проводити вимірювання в як завгодно великому числі точок. При одному з положень перемикача може бути перевірена сталість частоти коливань контрольної струни. Для цієї мети частота коливань струни при певному показанні за шкалою приладу порівнюється з частотою коливань наявного у вимірювачі камертону. Якщо частота коливань контрольної струни трохи відхилилася від норми, що

виявляється у невідповідності до частоти коливань камертону, то натяг струни регулюють за допомогою мікрометричного гвинта, домагаючись збігу частот. Так як камертон дуже точно зберігає свою частоту коливань, то описаний метод контролю дозволяє досліджувати деформації за допомогою струнного тензометра протягом досить тривалого часу.

Характеристики струнних тензометрів. Струнні тензометри, що застосовуються при вимірюванні деформацій, виготовляються з базою 100 мм, 50 мм і 20 мм. Тензометр з базою 20 мм, конструкція якого показана на рис. 4.14, дещо відрізняється від описаного вище тензометра. У цьому тензометрі електромагніт 5 виконаний більш компактним. Натяг струни 6 регулюється за допомогою розрізної втулки 3 з конічним отвором і регулювального гвинта 2. Діапазон вимірювання трьох різних тензометрів відповідає напрузі в сталевій деталі 100 МПа, 200 МПа і 400 МПа. Точність вимірювання у всіх випадках відповідає 1/500 діапазону вимірювання, що відповідає значенням напружень 0,2 МПа; 0,4 МПа і 0,8 МПа. В середньому при вимірюваннях використовується тільки половина діапазону вимірювання, що відповідає максимальній похибці не більше $\pm 0,5\%$. Наведені дані з точності вимірювання отримані без урахування похибки тарирування і наступних перевірок обох струн і при допущенні, що тарирування вимірювальної струни не змінюється з плином часу.

Як видно з рівняння (4.3), залежність між частотою коливань і натягом струни не є лінійною. Однак, при порівнянні частот, їх величини не визначаються безпосередньо, через те, що експериментатор відрховує поділки шкали, при обертанні якої здійснюється відоме подовження контрольної струни. Співвідношення між подовженням струни і кутом повороту ручки, які

відраховуються за шкалою, є лінійним, що дозволяє встановити сталу тарирування струни. Стала тарирування кожного струнного датчика для вимірювання деформацій повідомляється фірмою-виробником.



- 1 – виводи для підключення; 2 – регулювальний гвинт;
 3 – розрізна втулка з конічним отвором;
 4 – нерухома призма; 5 – електромагніт;
 6 – вимірювальна струна; 7 – рухома призма

Рисунок 4.14 – Поздовжній розріз струнного тензометра з базою 20 мм

Для отримання даних з лінійності характеристики, гістерезису, температурного коефіцієнту і силі вимірювання струнних тензометрів фірмою Майгак були проведені спеціальні випробування декількох тензометрів типу MDS 13 з базою 100 мм і одного тензометра типу MDS 14 з базою 50 мм. При цьому, були отримані наступні результати:

А. В області відносних подовжень від 0 до $1,5 \cdot 10^{-3}$ п'ять досліджених тензометрів типу MDS 13 виявили незначні відхилення від лінійної характеристики, що не перевищують 1 % від вимірюваної величини.

Б. При навантаженні досліджуваної деталі з встановленим тензометром до деякого значення відносного подовження і подальшого розвантаження деталі – показання тензометру, зазвичай, не повертаються точно на нуль, тобто тензометр виявляє явище гістерезису.

З рис. 4.15 видно, що при розтягуючому навантаженні може мати місце як позитивний, так і негативний гістерезис. При стискаючому навантаженні, найчастіше, має місце негативний гістерезис. При відносному подовженні (під навантаженням), яке не перевищує $\pm 0,4 \cdot 10^{-3}$, можна очікувати на гістерезис, що відповідає відносному подовженню порядку $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. При відносному подовженні (під навантаженням) $\pm 1,6 \cdot 10^{-3}$, яке практично не зустрічається у сталевих конструкціях, гістерезис може досягати $\pm 20 \cdot 10^{-6}$.

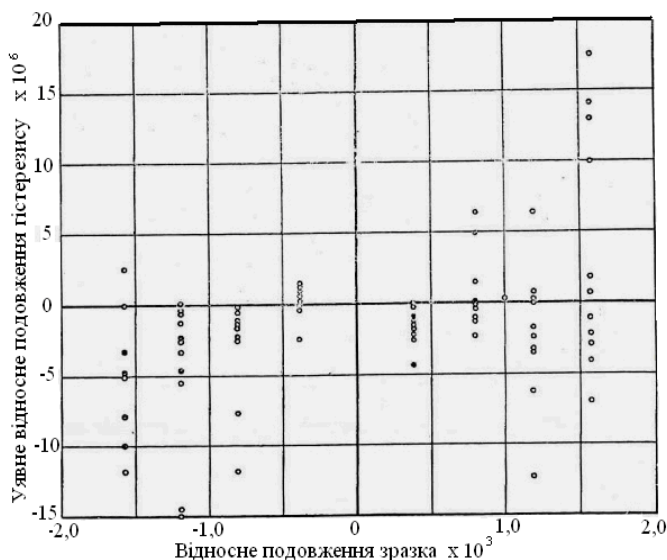


Рисунок 4.15 – Гістерезис при вимірюванні деформацій за допомогою струнних тензометрів MDS 13 фірми Майгак

В. При нагріванні досліджуваної деталі, на якій закріплений струнний тензометр, має місце теплове розширення деталі, що визначається величиною лінійного коефіцієнту теплового розширення матеріалу δ_w . Через те, що струнний тензометр міцно закріплений на деталі, та конструкція його, зазвичай, має значно меншу жорсткість, то відносно подовження деталі, обумовлене зміною температури, повністю передається тензометру. Якщо коефіцієнт теплового розширення конструкції тензометра δ_G не відрізняється від коефіцієнту теплового розширення матеріалу деталі δ_w , і якщо тензометр та деталь нагріваються до однієї і тієї ж температури, нагрівання не впливає на результати вимірювання. Якщо $\delta_w \neq \delta_G$, то теплове розширення проявляється як уявне відносне подовження, при цьому відповідний коефіцієнт теплового розширення δ_T визначається за формулою:

$$\delta_T = \delta_w - \delta_G.$$

Проведені на десяти тензометрах типу MDS 13 вимірювання в області температур від +20 °С до +40 °С показали середнє значення δ_G близько $8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Відповідний коефіцієнт для тензометру типу MDS 14 виявився рівним $7,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Питання для самоконтролю

1. Поясніть принцип роботи механічних тензометрів.
2. Перечисліть моделі механічних тензометрів.
3. Поясніть конструкцію тензометрів, що закріплюють, область застосування і принцип дії.
4. Поясніть конструкцію тензометрів, що не закріплюють, область застосування і принцип дії.
5. Поясніть принцип роботи оптичних тензометрів.

6. Поясніть конструкцію тензометрів з дзеркальною системою відліку. Схема дзеркальної системи відліку Гаусса-Поггендорфа.

7. Що таке пневматичний тензометр? Поясніть принцип пневматичного перетворення у конструкції тензометру. Зобразіть схему пневматичного перетворювача.

8. Поясніть принцип прямого методу вимірювання за допомогою пневматичного перетворювача.

9. Поясніть принцип диференційного методу вимірювання за допомогою пневматичного перетворювача. Відтворить робочу діаграму простого пневматичного перетворювача.

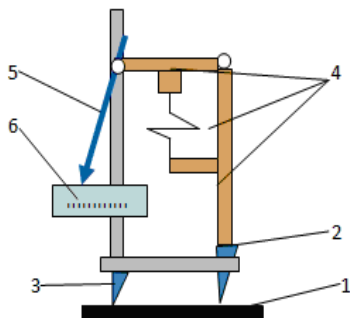
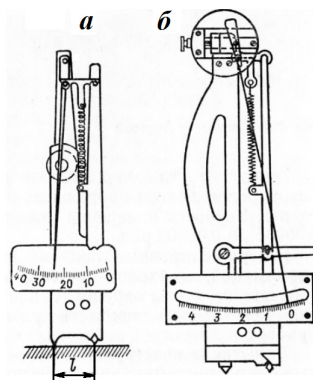
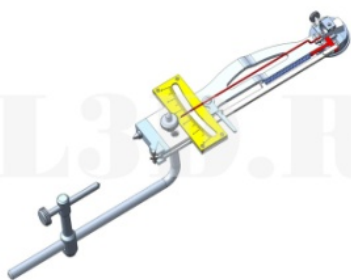
10. Назвіть переваги і недоліки пневматичних тензометрів.

11. Поясніть принцип роботи струнних тензометрів та назвіть області їх застосування. .

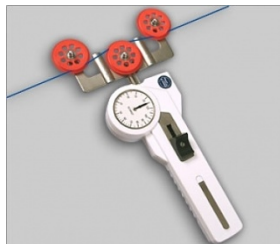
12. Поясніть конструкцію струнного тензометру Шефера-Майгака.

Додаток Г

Г.1 Механічні тензометри, що закріплюються

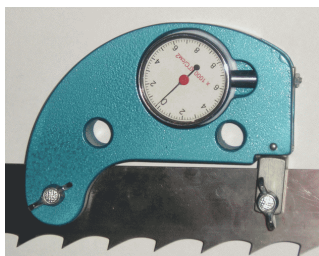


Тензометри Гугенбергера:
а – перша модель; *б* – друга модель; 1 – поверхня (об'єкт) вимірювання, 2 – рухома призма, 3 – нерухома призма; 4 – важелі; 5 – стрілка показчика; 6 – шкала



Тензометри для вимірювання сили натягу канату або маси вантажів

Г.2 Механічні тензометри, що не закріплюються

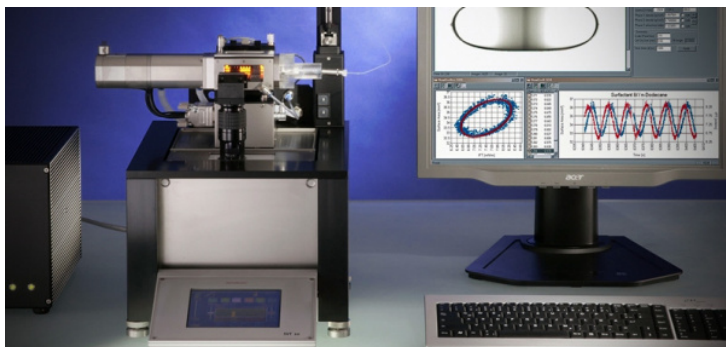


Механічні тензометри з
індикаторами
годинникового типу



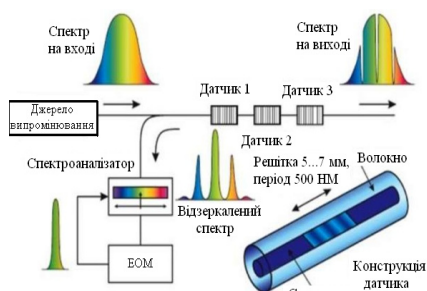
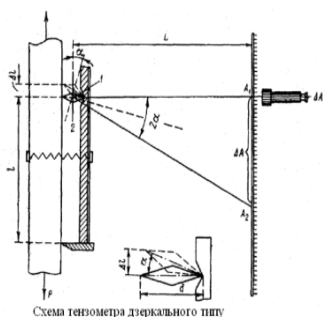
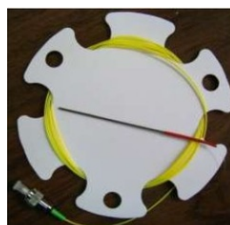
Механічний тензометр
фірми Honsberg для
вимірювання напружень
у полотнах стрічкових пил
для різки металу

Г.3 Оптичні тензометри



[<http://tensiometer.ru/products/svt>]

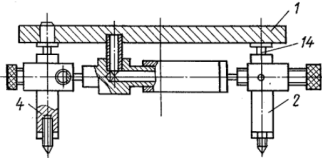
Оптичний тензометр SVT 20 N для вимірювання дуже малого міжфазного (поверхневого) натягу



[<https://ppt-online.org/219741>]

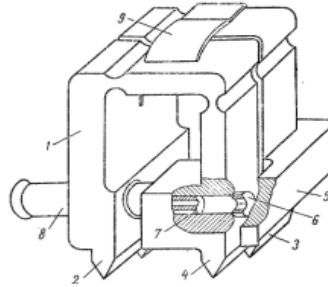
Волоконно-оптичні тензометри

Г.4 Пневматичні тензометри



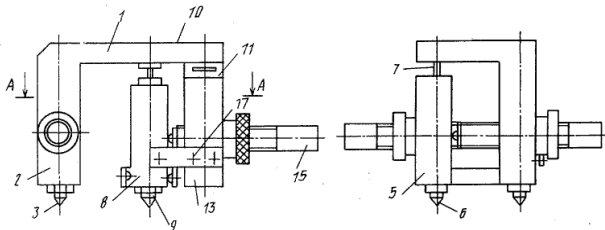
(Авторське свідоцтво 1308832, SU,
Дадамухамедов Е.У. та ін., 1987)

1 – корпус; 2, 4 – опорні ніжки;
14 – пружні шарніри



(Авторське свідоцтво 208312, SU,
Сергеев А.С., 1967)

1 – корпус; 2 – нерухомий ніж;
3, 4 – рухомий ніж; 5 – заслінка;
6 – вимірювальне сопло; 7 – змінне
головне сопло; 8 – штуцер;
9 – пружна пластина;
10 – об'єкт вимірювання;
11 – вкладиш;



(Авторське свідоцтво 855393, SU, Дадамухамедов Е.У. та ін., 1981)

1 – корпус; 2 – нерухома опора; 3, 6, 9 – опорні призми;
4, 15, 16 – вимірювальні сопла; 5, 8 – рухома опора;
7, 11, 12 – плоский шарнір; 10 – циліндричний шарнір;
13, 14 – стойки; 17, 18, 19, 20 – обмежувачі



Пневматичні датчики тиску

Г.5 Струнні тензометри



[<http://nsd52.ru/tenzometry>]



[http://tehnotest.kz/equipment/?SECTION_ID=98&ELEMENT_ID=410]



[<http://sodmostov.ru/45/>]



[<http://www.devicesearch.ru.com/article/8523>]



[<https://www.tensom.ru/publications/271/>]

Конструкції струнних тензометрів, їх кріплення і
моніторинг стану конструкцій та будівель

5 ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ОПТИЧНІ МЕТОДИ

У теперішній час при дослідженні напружень і деформацій широке поширення набули методи, засновані на використанні різних оптичних явищ. Серед них найбільш відомим є поляризаційно-оптичний метод, інтерферометрія та голографія. Ці методи вигідно відрізняються наочністю, високою точністю і достовірністю отриманих результатів.

5.1 Фізичні основи поляризаційно-оптичних методів

Світло є електромагнітними коливаннями з довжиною хвилі від 0,4 мкм (фіолетовий колір) до 0,65 мкм (червоний колір). Якщо джерело випромінює хвилі з однаковою частотою коливань, то спостерігаємо однотонне монохроматичне світло. Біле світло є накладанням хвиль різної частоти. При кількісному описі оптичних явищ відповідне світловому променю електромагнітне коливання зручно характеризувати вектором, перпендикулярним осі променя.

Поляризація світла. Природне світло є хаотичним набором поперечних хвиль змінної частоти та орієнтації. Якщо якимось чином впорядкувати орієнтацію хвиль, то будемо мати поляризоване світло. Є три основних види поляризації: пласка, кругова і еліптична. Пласко (лінійно) поляризоване світло виходить в тому випадку, коли світловий вектор коливається в єдиній площині, що називається площиною поляризації. Світло, поляризоване по колу, виходить, якщо кінець світлового вектора описує окружність в площині, перпендикулярній до напрямку поширення світла. При еліптичній поляризації кінець вектора описує еліпс. Зазначимо, що еліптичний тип

поляризації є найбільш загальним, а два інших можна вважати його частинними випадками.

Пласко-поляризоване світло отримують за допомогою спеціальних оптичних елементів, що називають лінійними поляризаторами, які мають властивість гасити усі коливання, напрямки яких не збігаються з їх оптичною віссю. Таким чином, поляризатор є оптичним фільтром, який пропускає коливання, паралельні його оптичній осі, і поглинає всі інші. Нехай на поляризатор падає плаский промінь світла:

$$A = a \sin \omega t = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} ct, \quad (5.1)$$

де a – амплітуда;
 A – довжина хвилі;
 c – швидкість світла у вакуумі;
 t – час;
 ω – кругова частота.

Тоді пройдена A_1 і поглинена A_2 складові променя можуть бути записані у вигляді:

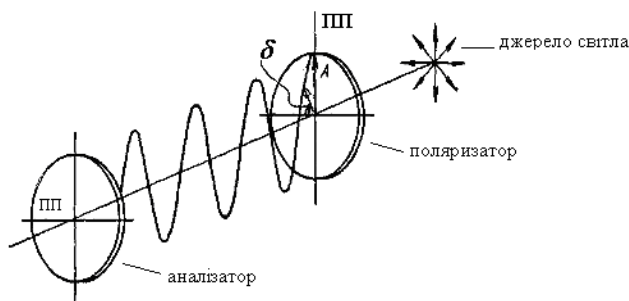
$$A_1 = a \sin \omega t \sin \delta; \quad A_2 = a \sin \omega t \cos \delta, \quad (5.2)$$

де δ – кут між віссю поляризації і напрямком світлового вектора.

Було запропоновано кілька способів отримання пласко-поляризованого світла: використання світла, відбитого при куті падіння 57° ; пропускання світла через пакет скляних пластин; застосування спеціальних призм і низка інших. В останні роки стали широко використовувати поляроїдні плівки, що дозволяють отримати порівняно дешеві поляризатори хорошої якості і практично будь-якого розміру. Такі поляроїди являють

собою розтягнуту прозору плівку, покриту кристалами йоду, які орієнтовані в напрямку розтягування. Для захисту від зовнішніх впливів і додання жорсткості поляроїд заклеюють між двома пластинками з скла або з інших прозорих матеріалів.

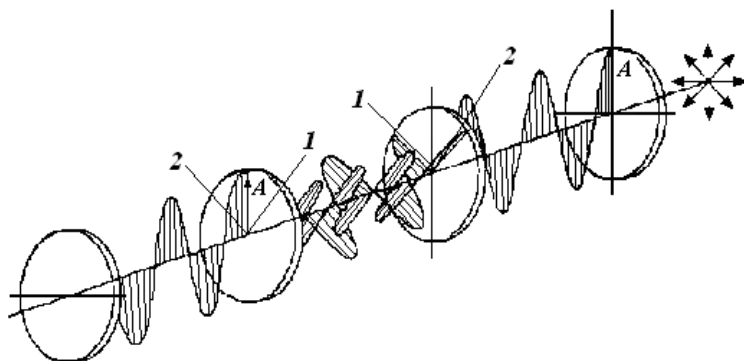
Конструкція полярископа. Плаский полярископ є найпростішим оптичним приладом, використовуваним в поляризаційно-оптичному методі. Він складається з джерела світла і двох пласких поляроїдів (рис. 5.1), найближчий до джерела світла поляроїд називають поляризатором, а дальній – аналізатором. У пласкому полярископі оптичні осі поляризатора і аналізатора взаємно перпендикулярні і тому світло практично не проходить через аналізатор.



ПП – площина поляризації

Рисунок 5.1 – Схема плаского полярископа

Круговий полярископ містить джерело світла і чотири основних оптичних елементи: поляризатор, дві чвертьхвильових ($\lambda/4$) пластини і аналізатор (рис. 5.2). Перша пластина $\lambda/4$ встановлюється так, щоб її головні оптичні осі становили кут $\pi/4$ з площиною поляризації поляризатора.



1 і 2 – головні осі чвертьхвильових пластин

Рисунок 5.2 – Схема кругового полярископа

Після проходження цієї пластини отримують світло, поляризоване по колу. Осі другої пластини $\lambda/4$ повернені на $\pi/2$ по відношенню до першої. Тут світло, поляризоване по колу, перетворюється в плоско-поляризоване.

Осі поляризатора і аналізатора схрещені. Така орієнтація оптичних елементів дозволяє отримати темне поле і є основною схемою при роботі полярископів. Залежно від взаємного положення осей поляризатора, аналізатора і чвертьхвильових пластин можливі ще три варіанти роботи кругового полярископа (табл. 5.1).

У всіх випадках осі чвертьхвильових пластинок складають кути 45° з осями поляроїдів.

П'єзооптичний ефект. Цей ефект полягає в тому, що практично всі прозорі матеріали змінюють свої оптичні властивості під дією зовнішніх навантажень. Матеріали, що мають яскраво виражений п'єзооптичний ефект, отримали назву оптично-чутливих.

Таблиця 5.1 – Основні типи полярископів

Полярископ	Розташування осей		Отримана інформація
	поляроїдів	чверть-хвильових пластинок	
Плаский	Схрещені	Відсутні	Картина ізохром в чорному полі разом з чорною ізокліною, параметри якої визначаються кутом нахилу осей поляроїдів
Круговий схрещений	-----	Схрещені	Картина ізохром в чорному полі (Цілі порядки смуг)
Круговий паралельний	Паралельні	Паралельні	Те ж
Круговий схрещено-паралельний	Схрещені	Те ж	Картина ізохром в білому полі (половинні порядки смуг)
Круговий паралельний	Паралельні	Схрещені	Те ж

Розглянемо пласку модель, виготовлену з оптично-чутливого матеріалу. У ненавантаженому стані коефіцієнт заломлення однаковий у всіх точках моделі. Після прикладення зовнішнього навантаження оптичні властивості пластини внаслідок п'єзооптичного ефекту змінюються і виникає штучне подвійне променезаломлення, яке призводить до різниці ходу променів на виході з моделі. Іншими словами, в кожній точці моделі є дві взаємно перпендикулярні головні оптичні осі, вздовж яких світло поширюється з різною швидкістю. Різниця швидкостей, як було зазначено вище, призводить до появи різниці ходу променів на виході з моделі; встановлено, що ця різниця залежить від напружено-деформованого стану.

Відповідно до теорії Максвелла, зміна коефіцієнтів заломлення прямо пропорційна головним напруженням y_1 і y_2 :

$$n_1 - n_0 = C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2; \quad n_2 - n_0 = C_1 \sigma_2 + C_2 \sigma_1, \quad (5.3)$$

де n_0 – коефіцієнт заломлення в ненавантаженому стані;
 n_1 і n_2 – коефіцієнти заломлення уздовж головних осей, співпадаючих з y_1 і y_2 відповідно;

C_1 і C_2 – оптико-механічні коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу, моделі і довжини хвилі світла.

Враховуючи співвідношення (5.3), різницю ходу складових компонент лінійно-поляризованого світла можна записати у вигляді:

$$\Delta = \frac{2\pi h(C_1 - C_2)}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (5.4)$$

Вираз (5.4) носить назву закону Вертгейма і є основним законом фотопружності: «відносна різниця ходу, прямо пропорційна різниці головних напружень».

Для використання в інженерній практиці його зручно записувати у вигляді:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{m \sigma_0^{1,0}}{h}, \quad (5.4)$$

де h – товщина моделі (в одиницях товщини, наприклад, мм);

$m = \Delta/2p$ – відносна різниця ходу, яка вимірюється у кількості інтерференційних смуг;

$$\sigma_0^{1,0} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{m} h, \quad (5.5)$$

де $\sigma_0^{1,0}$ – ціна смуги матеріалу за напруженнями, що дорівнює величині різниці головних напружень, яка призводить до появи однієї смуги в моделі на одиницю товщини.

Якщо матеріал підкоряється закону Гука, то можна записати:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{m\varepsilon_0^{1,0}}{h}; \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_0^{1,0} = \frac{1+\mu}{E} \sigma_0^{1,0}, \quad (5.7)$$

де $\varepsilon_0^{1,0}$ – ціна смуги матеріалу за деформаціями.

5.2 Навантажена модель у полі поляризкопу

Вище було показано, що різниця головних напружень може бути визначена по оптичній різниці ходу. Для вимірювання останньої застосовують спеціальні прилади – полярискоспи.

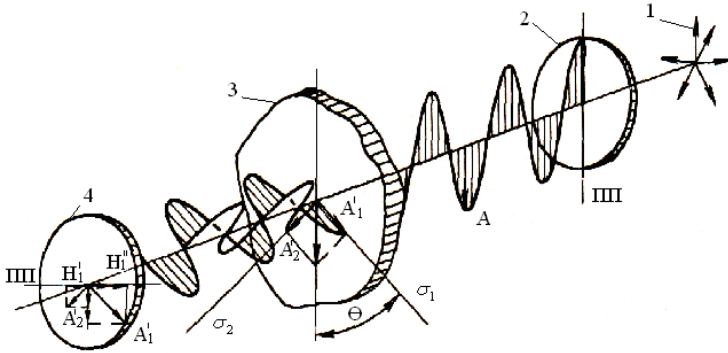
Плаский полярискосп. Розглянемо оптичні явища, що відбуваються в пласкому полярискоспі, в полі якого знаходиться навантажена модель. Нехай напрям головного напруження σ_1 складає кут θ з оптичною віссю поляризатора (рис. 5.3).

Світло, що пройшло через поляризатор, стає лінійно поляризованим і може бути представлено у вигляді функції:

$$A = A_0 \sin \omega t. \quad (5.8)$$

Так як модель характеризується п'єзооптичним ефектом, то цей світловий вектор розкладеться на дві складові A_1 та A_2 , що відповідні головним напрямкам:

$$A_1 = A_0 \sin \omega t \cos \theta; \quad A_2 = A_0 \sin \omega t \sin \theta. \quad (5.9)$$



1 – джерело світла; 2 – поляризатор; 3 – модель;
4 – аналізатор

Рисунок 5.3 – Навантажена модель у полі плоского полярископу

Ці дві компоненти проходять модель з різними швидкостями, і на виході з неї матимуть різницю фаз, величина якої визначається виразом (5.9). Тоді компоненти A_1' і A_2' , що виходять з моделі, представляють у вигляді:

$$A_1' = A_0 \sin\left(\omega t + \frac{\Delta}{2}\right) \cos \theta; \quad A_2' = A_0 \sin\left(\omega t - \frac{\Delta}{2}\right) \sin \theta.$$

Надалі компоненти A_1' і A_2' , потрапляючи на аналізатор, вісь якого перпендикулярна осі поляризатора, розкладаються на горизонтальні і вертикальні складові; при цьому останні гасяться, а горизонтальні складові H_1' і H_1'' рівні за величиною і інтерферують між собою. Результуюче коливання (на виході аналізатора) може бути записано у вигляді:

$$H = H'_1 - H''_1 = A'_2 \cos \theta - A'_1 \sin \theta = A_0 \cos \omega t \sin 2\theta \sin \frac{\Delta}{2}. \quad (5.10)$$

З оптики відомо, що інтенсивність світла I , яке пройшло через аналізатор, може бути зареєстрована приладом або оком та пропорційна квадрату амплітуди. Тому з отриманої формули витікає, що гасіння світла (тобто $I = 0$) може відбуватися у двох випадках:

$$1) \Delta = 2\pi n;$$

$$2) 2\theta = 2\pi n,$$

де $n = 0, 1, 2, \dots$ цілі числа.

Гасіння світла настає тоді, коли напрямки головних напружень в тілі збігається з осями поляризатора і аналізатора. Відповідні темні смуги є геометричним місцем точок, в яких кути нахилу одного з головних напружень, постійні. Такі лінії називають *ізоклінами*.

Всі точки, в яких різниця ходу однакова, з'єднують безперервні темні лінії. Такі лінії називають *ізохромами*.

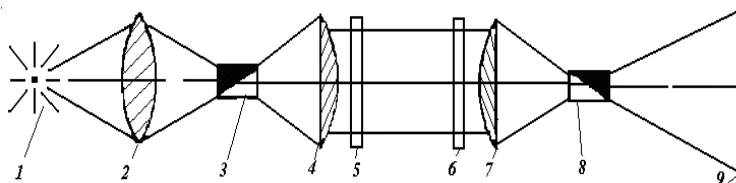
Це геометричне місце точок, де $(\sigma_1 - \sigma_2) = \text{const}$. Різниця ходу Δ прямо пропорційна $(\sigma_1 - \sigma_2)$.

На екрані плаского полярископу спостерігається обидва сімейства ліній. Коли використовують монохроматичне світло, ці лінії мають однаковий окрас. Збільшення різності ходу приводить до гасіння хвиль відповідно до спектральної послідовності кольорів (від фіолетового до червоного). Зі збільшенням порядку смуг відбувається гасіння додаткових кольорів, що призводить до деякій зміні окрасу ізодром та зменшенню їх контрастності. Оскільки утворення ізоклін не залежить від довжини хвилі світла, то вони завжди залишаються темними.

5.3 Апаратура

Існує багато різних конструкцій поляризаційно-оптичних установок, що розрізняються цільовим призначенням (прохідного і відбитого світла), джерелом світла, кількістю і якістю оптичних елементів і т. д. Але у всіх цих приладах можна виділити дві основні частини: 1) вузол поляризатора, до складу якого можуть входити джерело світла; теплофільтр, світлофільтр, поляризатор, пластина і лінзи; 2) вузол аналізатора, який, зазвичай, складається з чвертьхвильової пластини, поляризатора, лінзи, екрану чи реєструючого пристрою. В якості джерел світла найчастіше використовують ртутні лампи високого тиску, натрієві, кадмієві, кінопроекційні лампи розжарювання і, останнім часом, оптичні квантові генератори. Розглянемо конструкції деяких полярископів.

Поляризаційно-проекційна установка. Її оптична схема показана на рис. 5.4.



- 1 – джерело світла; 2 – конденсор; 3 – поляризатор;
4 і 7 – лінзи; 5 і 6 – чвертьхвильові пластинки;
8 – аналізатор; 9 – екран

Рисунок 5.4 – Оптична схема поляризаційно-проекційної установки

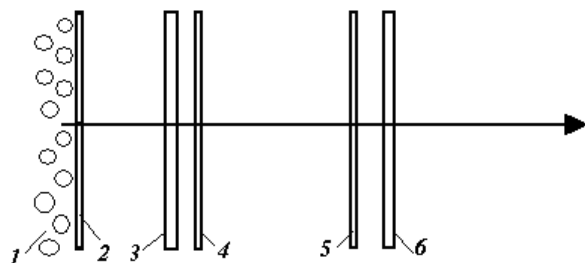
Установка призначена для проведення досліджень у світлі, що проходить. Джерелом світла є ртутна лампа ДРШ-250. Кадмієва лампа і лампа розжарювання встановлені на турелі в одному корпусі, тут монтується

теплофільтр і конденсор, призначений для отримання збіжного пучка. Блок світлофільтрів виконаний у вигляді револьверної головки, при повороті якої можна отримувати монохроматичне світло з певною довжиною хвилі ($\lambda = 436$ мкм; 546 мкм; 578 мкм; 644 мкм). Для отримання кольорових ізохром використовують або лампу розжарювання, або ртутну лампу без світлофільтра. Поляризатор і аналізатор пов'язані селініним зв'язком для забезпечення синхронного обертання (передбачене і незалежне обертання поляроїдів для здійснення компенсації за способами Тарді і Сенармона [1]).

Для фіксації і реєстрації ізохром та ізоклін є фотокамера і екран, переміщенням якого можна змінювати масштаб зображення. Всі елементи установки монтуються на двох оптичних лавах, встановлених на спеціальних підставках. Керують установкою з пересувного пульта. Система лінз забезпечує просвічування моделі паралельним пучком світла діаметром 120 мм. Навантажувальний пристрій важельного типу дозволяє здійснювати наступні види навантаження: розтяг, стиск, чистий і поперечний вигин з максимальною силою 8 кН. При цьому навантажена модель може переміщатися по вертикалі і горизонталі.

Дифузійний полярископ прохідного світла. Ці полярископи відрізняються простотою конструкції, так як у них відсутні оптичні елементи, призначені для формування пучка світла. Прилад складається з джерела розсіяного світла, двох поляроїдів і пластин $\lambda/4$, розташованих на двох оптичних лавах (рис. 5.5). В якості джерела світла зазвичай використовують кілька рядів однакових ламп (розжарювання, люмінесцентні, кадмієвих тощо), змонтованих в одному корпусі. Рівномірна освітленість поля досягається «шаховим» розташуванням ламп і пластинкою з матового скла. У дифузійних

полярископах розміри світлового поля практично не обмежені (зазвичай 300...400 мм), тому картини смуг можна спостерігати безпосередньо через поляроїд неозброєним оком.



- 1 – джерело світла; 2 – матове скло; 3 – поляризатор;
4 і 5 – чвертьхвильові пластини; 6 – аналізатор;
7 – спостерігач або фотокамера

Рисунок 5.5 – Оптична схема дифузійного полярископа

При фотографуванні необхідно мати на увазі, що промені світла, які проходять через модель, взагалі кажучи, не перпендикулярні до її площині і, отже, зображення окремої точки моделі утворюється конусом світла (а не одним променем, як у лінзовому полярископі з паралельним пучком світла). Кут при вершині цього конуса обмежує точність вимірювань і знижує роздільну здатність оптичної установки. Величина цього кута залежить від ставлення діафрагми об'єктива фотокамери до відстані між моделлю та фотокамерою. Тому бажано фотокамеру встановлювати як можна далі від іншої апаратури (2...4 м). Роздільну здатність дифузійного полярископа можна збільшити шляхом зменшення діафрагми, але, при цьому, зростає час експозиції.

Щоб знизити вплив спотворень, викликаних непаралельністю променів світла, рекомендується найбільш важливі ділянки моделі (наприклад, зону

концентрації напружень) розташовувати в середині фотознімку.

Важливою перевагою полярископів з джерелом розсіяного світла є їх мала чутливість до якості поверхні моделі. Якщо в полярископах з паралельним ходом променів шорсткість пласкої поверхні моделі може привести до сильного відхилення променів світла і спотворення картини смуг, то в дифузійному полярископі оптична картина практично не залежить від шорсткості поверхні, так як джерело розсіяного світла (на відміну від точкового) створює в будь-якій точці моделі промені різних напрямків. Це, зокрема, дозволяє використовувати для виготовлення моделей ряд напівпрозорих матеріалів, в той час як для лінзових полярископів застосовні лише прозорі матеріали. Недоліком дифузійного полярископа є відсутність паралельності променів світла, що проходять крізь модель, однак деяка втрата точності в значній мірі компенсується такими його перевагами, як великі розміри робочого поля, простота налагодження та експлуатації, порівняно невисока вартість.

Крім того, відомі конструкції координатно-синхронного поляриметру (КСП), полярископу, що відбиває світло, дифузійного відбиваючого полярископу тощо. Особливості їх конструкцій викладені у джерелі [1].

5.4 Матеріали для двовимірної фотопружності

Ідеальний матеріал для моделювання пружних завдань повинен мати: мінімальний коефіцієнт розсіювання (тобто бути прозорим); лінійну залежність між порядком ізохром, напруженнями та деформаціями; оптичну і механічну ізотропність; стійкі оптико-механічні характеристики, високий модуль пружності і межу міцності. Крім того, матеріал не повинен мати крайового

ефекту і залишкових напружень. Реальні оптично-чутливі матеріали не можуть відповідати всім перерахованим вище вимогам, тому при їх виборі необхідно, в першу чергу, орієнтуватися на ті характеристики, які узгоджуються з метою експерименту.

Властивості основних матеріалів. Встановлено, що більшість прозорих матеріалів володіють п'єзооптичним ефектом і багато з них можуть бути використані для практичних застосувань.

У нашій країні більшість дослідників застосовують матеріали на основі епоксидних смол, так як вони найбільш повно відповідають вимогам, що пред'являються оптично-активним матеріалам, і їх властивості можна регулювати введенням пластифікаторів. Відомості про склад компаундів і технологічні режими виготовлення матеріалів досить повно викладені в спеціальній літературі. Наприклад, для виготовлення пластин з епоксидної смоли можна рекомендувати таку технологію. Готують компаунд, до складу якого входять основний матеріал, затверджувач (малеїновий ангідрид) і іноді пластифікатор. Компоненти розігрівують до 60-80°C, ретельно перемішують до утворення однорідної маси. Потім компаунд заливають в попередньо нагріту до 80°C форму, внутрішня поверхня якого має бути покрита тонким антикогезійним шаром (наприклад, дібутілдіхлорсіланом). Це покриття необхідно для того, щоб готова пластина не прилипла до стінок форми. Весь процес виготовлення матеріалу потрібно вести у витяжній шафі, так як більшість використовуваних матеріалів має високу токсичність, особливо при підвищених температурах.

Полімеризацію матеріалу проводять в спеціальних термостатах з певним режимом, який складається з трьох основних стадій: нагрівання компаунда до 90-120 °C (зі

швидкістю не вище 10 °С в годину), витримка при максимальній температурі і повільне охолодження до 30-40 °С (зі швидкістю 2 °С в годину).

Для оцінки жорсткості і оптичної чутливості використовується коефіцієнт якості $K = E / \sigma_0^{1,0}$ і коефіцієнт чутливості $S = \sigma_{m\phi} / \sigma_0^{1,0}$ матеріалу. Найбільш високими оптико-механічними властивостями володіють матеріали на основі епоксидних смол.

Тарирування матеріалів. Щоб кількісно оцінити напружено-деформований стан моделі, необхідно визначити ціну смуги матеріалу $\sigma_0^{1,0}$, з якого вона виготовлена. У зв'язку з тим, що властивості матеріалів змінюються у часі, а іноді вони різні і у матеріалів однієї партії, перед кожним експериментом потрібно проводити тарирування. Для тарирування використовують в основному три види випробувань: розтягнення плоского зразка, чистий згин бруса прямокутного перерізу і діаметральне стиснення плоского диска. Для кожного з цих випадків відомо теоретичний розподіл напружень, а зразки мають просту конфігурацію. Щоб підвищити точність вимірювань, навантаження здійснюють ступенями з фіксацією порядку смуг і навантаження на кожній ступені.

Розглянемо розтягнення зразка шириною b і товщиною t ; тоді: $\sigma_1 = P / bt$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, де P – приріст навантаження. Підставляючи ці співвідношення в (5.4), отримаємо: $\sigma_0^{1,0} = P / bm$, де $\sigma_0^{1,0}$ – ціна смуги матеріалу, що дорівнює величині розтягуючого напруження, яка призводить до появи однієї смуги в моделі товщиною 1,0 см. Виконується п'ять-шість навантажень і будується графік $P = f(m)$; тангенс кута нахилу прямої лінії, проведеної через ці точки, і рівний P/m , дозволяє усереднити деяку похибку вимірювання зусиль і порядку смуги.

При чистому вигині ізохром розташовуються на однаковій відстані одна від одної паралельно осі балки, яка співпадає з нульовою смугою. Ціна смуги матеріалу визначається за формулою:

$$\sigma_0^{1,0} = \frac{12M_{изг}}{mh^3} y, \quad (5.11)$$

де $M_{изг}$ – згинаючий момент;
 h – висота балки;
 m – порядок найбільш віддаленої ізохром;
 y – відстань від нейтрального шару до ізохром m -го порядку.

Якщо відомий порядок ізохром на контурі балки, то ця формула перетвориться до виду:

$$\sigma_0^{1,0} = \frac{6M_{изг}}{mh^2}. \quad (5.12)$$

З теорії пружності відомо, що в діаметрально стиснутому диску головні напруження в точках діаметра, перпендикулярного лінії дії навантаження, визначаються за формулами:

$$\sigma_1 = \frac{2P}{\pi h D} \left(\frac{D^2 - 4x^2}{D^2 + 4x^2} \right)^2; \sigma_2 = \frac{2P}{\pi h D} \left[\frac{4D^4}{(D^2 + 4x^2)^2} - 1 \right], \quad (5.14)$$

де D – діаметр диска;
 h – його товщина;
 x – координата точки, яка вимірюється від центру диска.

З цих співвідношень можна отримати:

$$\sigma_0^{1,0} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{m} h = \frac{8P}{\pi D m} \frac{D^4 - 4D^2 x^2}{(D^2 + 4x^2)^2}. \quad (5.15)$$

Це рівняння може бути використане для визначення ціни смуги тільки при одному навантаженні. В цьому випадку для кожної ізохром, що лежить на діаметрі, знаходять відповідну координату x , обчислюють кілька значень $\sigma_0^{1,0}$ і середнє значення приймають за ціну смуги. Однак більш зручно вести навантаження ступенями і реєструвати порядок смуг в центрі диска, ціна смуги матеріалу буде дорівнювати:

$$\sigma_0^{1,0} = \frac{8P}{\pi D m}. \quad (5.16)$$

За результатами випробувань будується графік прямої $P = f(m)$, тангенс кута нахилу якої використовується при обчисленні величини $\sigma_0^{1,0}$.

У деяких випадках, коли відома різниця головних напружень в будь-якій точці моделі, можна обійтися без тарировальних випробувань; тоді для знаходження ціни смуги моделі досить встановити порядок ізохром в цій точці.

5.5 Аналіз полів ізохром та ізоклін

Після того як поля ізохром і ізоклін отримані, потрібно провести їх дослідження, тобто визначити порядок ізохроматичних смуг і уточнити місце розташування і порядок ізоклін. В деяких випадках аналіз лише однієї ізохроматичної картини дозволяє провести якісну (а іноді і кількісну) оцінку напруженого стану.

Поле ізохром. Щоб визначити порядок смуг, можна скористатися таким простим прийомом, як повільне

навантаження і (або) розвантаження моделі. Тоді порядок смуги у фіксованій точці моделі встановлюється безпосереднім підрахунком минулих ізодром, при збільшенні навантаження від нуля до заданої величини. Цей спосіб зручний і надійний, але його не завжди можна здійснити на практиці.

Визначити порядок смуг можна також, використовуючи загальні закономірності створення і розвитку сімейства ізохроматичних ліній. При збільшенні навантаження загальне число смуг зростає, при цьому ізохромии зміщуються в бік менших порядків. Области виникнення нових смуг називаються джерелами, а зникнення смуг – стоками. У більшості практичних випадків ізохроматична картина є простою і на ній присутня смуга нульового порядку. Порядки ізохром для такої картини відраховують від нульової смуги в напрямку джерела смуг.

Класичним прикладом може служити картина ізохром, отримана при чистому вигині балки: нульова смуга розташована в середній частині балки, а джерела смуг збігаються з найбільш віддаленими волокнами. Якщо модель має ненавантажені виступаючі кути, то вони служать початком відліку, так як тут напруження дорівнюють нулю, і отже, порядок смуги дорівнює нулю. Різновидом нульової смуги є ізотропні точки, в яких $\sigma_1 = \sigma_2$. Якщо ж $\sigma_1 \neq \sigma_2$, то такі точки називаються простими.

Для виявлення нульових смуг і ізотропних точок можна використовувати білий світ, так як в цьому випадку тільки зони з нульовою різницею ходу будуть чорними, інше поле буде кольоровим. Оскільки положення нульової смуги не залежить від довжини хвилі монохроматичного джерела світла, то їх положення можна встановити, спостерігаючи ізохроматичну картину при двох довжинах

хвиль. Такий же ефект виходить при зміні зовнішнього навантаження.

На вільному від навантаження контурі по картині смуг можна визначити величину одного з головних напружень, яке діє по дотичній до контуру. Друге головне напруження, що діє нормально до контуру, дорівнює нулю. На практиці ця обставина дозволяє істотно спростити аналіз напруженого стану в зоні концентраторів напружень. В окремому випадку, коли на контур діє рівномірно розподілений тиск p (наприклад, внутрішня поверхня товстостінної судини під внутрішнім тиском), величина головного напруження, перпендикулярного до контуру, дорівнює $\sigma_n = -p$; інше головне напруження можна визначити за формулою $\sigma_t = \pm(\sigma_1 - \sigma_2) - p$.

Коли порядок смуг визначено, тоді в будь-якій точці пружної моделі можна обчислити величину різниці головних напружень. Так як теорія максимальних дотичних напружень широко використовується при проектуванні та розрахунку елементів конструкцій, розглянемо деякі особливості визначення $\tau_{\max}$ по ізохроматичній картині. У разі плаского напруженого стану $\tau_{\max}$ обчислюється по одній з наступних формул:

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2; \tau_{\max} = \sigma_1/2; \tau_{\max} = \sigma_2/2. \quad (5.17)$$

Перша формула справедлива, коли головні напруження σ_1 і σ_2 , що діють в площині моделі, протилежні за знаком і максимальні дотичні напруження знаходяться безпосередньо за картою ізохром. Для інших випадків $\tau_{\max}$ по картині смуг можна визначити тільки на вільному контурі; по всьому полю моделі це можна зробити тільки після поділу головних напружень.

Поле ізоклін. Параметром ізокліни θ називають кут, який становить напрямок найбільшого головного напруження з позитивним напрямком осі x і є позитивним при відліку проти годинникової стрілки.

З визначення випливає, що параметр ізокліни може мати будь-який знак і змінюється в межах від -360 до $+360^\circ$. У зв'язку з тим, що в формулу (5.18)

$$\begin{aligned} 2\tau_{xy} &= (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta; \\ \sigma_x - \sigma_y &= (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \end{aligned} \quad (5.18)$$

входять тригонометричні функції від 2θ , то для практичних цілей достатньо змінювати параметр ізокліни у межах 180° . При вирішенні практичних завдань зручно вважати, що параметр ізокліни змінюється від -90 до $+90^\circ$, бо в цьому випадку і дотичні напруження τ_{xy} збігаються.

Початкове значення параметра ізокліни визначають або з граничних умов, або з фізичних міркувань (зокрема по знаку τ_{xy} , яке вважається позитивним, якщо діагональ дотичних напружень проходить через I-III квадранти прямокутної системи координат). Відзначимо, що слід розрізняти параметри ізокліни 0 і 90° . Якщо величина і знак θ проставлені відповідно до введених для них правилами, то знаки дотичного напруження і різниці нормальних напружень $(\sigma_x - \sigma_y)$, обчислені за наведеними вище формулами, будуть виходити автоматично.

Відзначимо основні закономірності полів ізоклін, які є корисними при їх аналізі та коригуванні. Параметр ізокліни, що виходить на вільний контур, визначається кутом нахилу дотичній до контуру, якщо напруження, що діє в цій точці, є розтягуючим, або кутом нахилу нормалі, якщо напруження стискаюче.

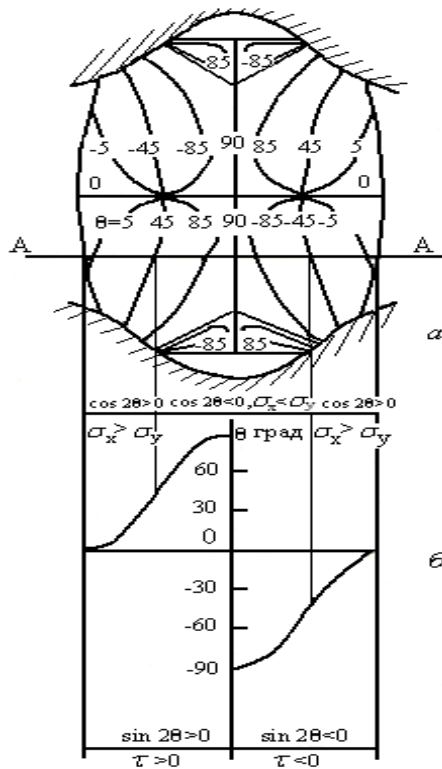


Рисунок 5.6 – Картина ізоклін (а) і епюра (б) для перетину А-А при куванні квадратної заготовки профільними бойками

З рис. 5.6 видно, що ізокліни $\theta = 5^\circ$ при переході через ізотропну точку стає ізокліною $\theta = -85^\circ$. Ізокліна $\theta = 45^\circ$ переходить у ізокліну $\theta = -45^\circ$, ізокліна $\theta = 0^\circ$ – у $\theta = 90^\circ$. Таким чином, при переході через ізотропну точку параметр ізокліни змінюється на 90° .

Ізокліни всіх параметрів проходять через точки, в яких прикладені зосереджені зовнішні сили. Якщо ізотропна точка не лежить на контурі, то через неї

проходять ізокліни всіх параметрів. Якщо на одній частині контуру діють напруження розтягу, а на іншій – стискання, то вони повинні бути розділені нульовим значенням контурного напруження. Іншими словами, в цьому випадку на контурі обов'язково буде точка, в якій $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$. Отже, ізотропні точки, що лежать на вільному контурі, завжди є простими точками і зазвичай є точками переходу контурних напружень від розтягування до стиснення. Інша важлива умова для ненавантаженого контуру або контуру, вільного від дотичних напружень, формулюється так: в точці, де по контуру нормальні напруження досягають екстремуму, ізокліна повинна бути нормальна до контуру.

Так як згідно з визначенням параметра θ необхідно розрізняти ізокліни 0° і 90° , то осі симетрії є ізоклінами одного і того ж параметра (наприклад, $\theta = 0^\circ$) тільки за умови, що осі симетрії не містять ізотропних точок. Зокрема, при переході через ізотропну точку ізокліна 0° стає ізокліною 90° . Тому осі геометричної симетрії є ізоклінами одного параметра, якщо вони не проходять через ізотропні точки; при переході через ізотропну точку параметр ізоклін змінюється на 90° .

Побудова траєкторій напружень. Для пружного ізотропного тіла по відомому полю ізоклін можливо побудувати траєкторії головних напружень – ізостати, тобто лінії, дотичні (або нормалі) до яких збігаються з напрямками головних напружень. Як правило, побудову починають від нульової ізокліни (рис.7.4, а), яка ділиться на довільне число частин (зазвичай рівних). Через вибрані точки a_1, a_2, a_3 і т.і. проводять перпендикуляри до перетину з найближчою ізокліною θ_1 . З середини відрізків a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3 і т. і. проводяться промені під кутом θ_1 до перетину з наступною ізокліною θ_2 , а відповідні відрізки цих променів діляться навпіл. Потім процедура

повторюється до тих пір, поки все поле покриється сукупністю ламаних ліній. Поєднуючи точки перетину цих ліній з ізокліною плавною кривою, одержимо перше сімейство траєкторій головних напружень. Друге сімейство будується ортогонально першому.

Відзначимо деякі властивості ізостат. Так як на вільному контурі одне з головних напружень дорівнює нулю, то траєкторії рівних напружень розташовуються або паралельно, або перпендикулярно контуру. Ізостати ніколи не проходять через ізотропні точки, вони або огинають, або розходяться від них (рис. 5.7, а, б).

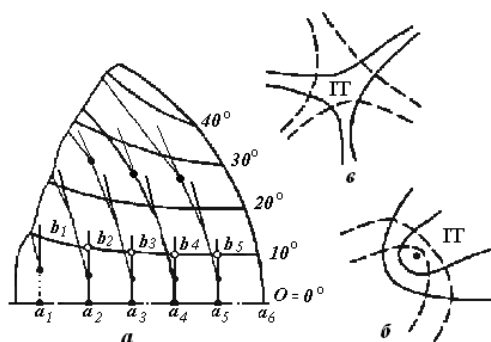


Рисунок 5.7 – Схема побудови ізостат (а) та їх поведінка в районі негативної (б) і позитивної (в) ізотропних точок

У першому випадку ізотропна точка вважається позитивною, у другому – негативною. Якщо ізотропні точки відсутні, то система траєкторій головних напружень розташовується на два ортогональних сімейства кривих: дотичні кривим одного сімейства будуть збігатися з напрямками максимальних, а іншого – мінімальних головних напружень. Це положення часто використовують для визначення знаків напружень на ненавантаженому контурі; якщо в будь-якій точці контуру знаходяться траєкторії різних сімейств, то контурні напруження

змінюють свій знак. Таким чином, якщо відомі напрямки σ_1 і σ_2 хоча б в одній точці, то за допомогою поля ізостат можна встановити знаки в усіх точках вільного від навантаження контуру.

Також можна побудувати траєкторії максимальних дотичних напружень; для цього промені, які перетинають ізокліни, можна проводити під кутом ($\theta = \pm 45^\circ$).

5.6 Способи розділення напружень

Вище було показано, що картина ізохром дозволяє отримувати різницю головних напружень і тільки в деяких окремих випадках визначити величини σ_1 і σ_2 окремо. У загальному випадку обчислити ці значення по всьому полю моделі можна при використанні додаткових експериментальних даних або чисельних методів. Способів поділу напружень досить багато, розглянемо найбільш поширений.

Спосіб різниці дотичних напружень. Цей спосіб найбільш універсальний і широко використовується на практиці. В основу його покладено рівняння рівноваги для пласкої задачі:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial x} = 0.$$

Розглянемо процедуру поділу напружень для перетину II, який співпадає з віссю x (рис. 5.8).

Інтегруючи перше з цих рівнянь по x , отримаємо:

$$(\sigma_x) = (\sigma_x)_0 - \int_{x_0}^{x_n} \frac{\partial \tau}{\partial y} dx, \quad (5.19)$$

де $(\sigma_x)_0$ – значення напруження у початковій точці.

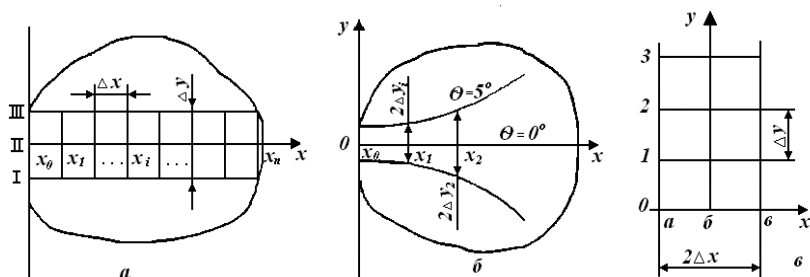


Рисунок 5.8 – Схеми поділу напружень за методом різниці дотичних напружень (а), за способом Файлона (б) і без використання ізоклін (в)

Нульову точку доцільно вибирати на вільному контурі моделі, тоді:

$$(\sigma_x)_0 = \sigma_t \cos^2 \alpha, \quad (5.20)$$

де σ_t – головне напруження, що діє по дотичній до контуру і визначається безпосередньо по картині ізохром;

α – кут між віссю x і дотичною t .

Рівняння (5.19) можна представити в скінченно-різницевій формі:

$$(\sigma_x)_n = (\sigma_x)_0 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta \tau}{\Delta x} \Delta x \right)_i. \quad (5.21)$$

Для визначення величини $\frac{\Delta \tau}{\Delta x}$ проводимо два допоміжних перерізи I і III, віддалених від основного перерізу II на відстань $\pm \Delta y / 2$, тоді:

$$\frac{\Delta \tau}{\Delta x} = \frac{(\tau)_{III} - (\tau)_I}{\Delta y}. \quad (5.22)$$

5.7 Порядок проведення експерименту

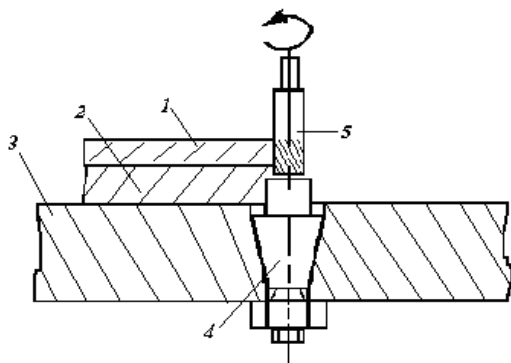
У цьому параграфі будуть розглянуті питання, пов'язані з механічною обробкою моделей, їх зберіганням, навантаженням і деякими особливостями реєстрації первинних дослідних даних.

Механічна обробка. Для виготовлення моделей з оптично чутливих матеріалів, за винятком поліуретанових гум, можна використовувати всі види обробки різанням. Відомо, що процес механічної обробки супроводжується значним виділенням тепла, яке може привести до появи температурних напружень по всьому контуру моделі і ускладнює (а іноді унеможлиблює) кількісний аналіз. Щоб отримати високоякісну модель, необхідно використовувати новий, добре заточений інструмент (краще алмазний), а обробку вести з максимальним числом обертів інструменту (моделі) і мінімальної подачею при інтенсивному охолодженні. Плaskі моделі будь-якої конструкції зручно виготовляти за допомогою металевого шаблону, який виконаний за формою моделі (рис. 5.9).

Обробку здійснюють фрезою з набором пальців різного діаметру, які задають величину подачі інструменту.

Додаткові напруження. Усі оптично-чутливі матеріали мають здатність поглинати (або віддавати) вологу з навколишнього середовища: крім того, виділяються деякі летючі компоненти компаунда. Це призводить до того, що на контурі пластини (моделі) з часом виникає оптична різниця ходу, викликана появою внутрішніх напружень. Таке явище називається крайовим ефектом часу і значно ускладнює якісний і кількісний аналізи картин ізохром та ізоклін. Смуги, що виникають з-за крайового ефекту, розташовуються паралельно контуру

і спотворюють ізохроматичну картину, обумовлену зовнішнім навантаженням, що призводить до дуже великих помилок при визначенні контурних напружень.



1 – модель з оптично чутливого матеріалу;
2 – металевий шаблон; 3 – стіл; 4 – палець; 5 – фреза

Рисунок 5.9 – Пристосування для виготовлення плоских моделей

Щоб уникнути появи цього ефекту, бажано проводити експеримент в той же день, коли виготовлена модель. У тих випадках, коли це не вдається здійснити, рекомендується зберігати модель в імерсійній рідині або покривати її тонким шаром парафіну. Для матеріалів на основі епоксидних смол процес дифузії протікає досить швидко. Тому, якщо витримати такий матеріал протягом декількох місяців в умовах постійної вологості і проводити випробування моделі при тій же вологості, то крайовий ефект не виникає.

В процесі виготовлення і зберігання матеріалу в ньому можуть виникнути залишкові напруження, які також призводять до значних похибок вимірювань. Так як вплив залишкових напружень врахувати практично неможливо,

то найкраще виготовляти модель з тих ділянок пластини, на яких відсутня початкова оптична різниця ходу. У деяких випадках можна зменшити рівень залишкових напружень за допомогою відпалу матеріалу в масляній ванні.

Реєстрація первинних даних. При проведенні експерименту необхідно звернути увагу на вибір навантаження і установку моделі в полі полярископа. Величину зовнішнього навантаження зазвичай вибирають близько 80 % від гранично допустимої, так як при цьому виходить досить велика кількість смуг і модель цілком знаходиться в пружній області. Не рекомендується використовувати дуже тонкі моделі, так як вони можуть втратити стійкість в процесі навантаження. Щоб картина ізохром була чіткою і безперервною, навантаження повинне рівномірно розподілятися по товщині моделі, для цього доцільно застосовувати тонкі прокладки з м'яких матеріалів (папір, гума та т. д.).

Контур моделі в полі лінзового полярископа може бути погано видно з двох причин — через погане її виготовлення і неправильну установку. Якщо на екрані контур спостерігається у вигляді темної смуги, то модель розташована не перпендикулярно пучку світла і, повертаючи її, потрібно домогтися такого положення, щоб ширина темної смуги стала мінімально можливою. Для моделі з прямокутним поперечним перерізом (ідеально виготовлена модель) контур буде видно у вигляді дуже тонкої лінії; встановлення моделі рекомендується проводити в білому полі.

При використанні дифузійного полярископа наявність темної смуги вздовж контуру обумовлена ходом променів і виключити її можна тільки тоді, коли ділянки контуру розташовуються в центрі кадру; порядок смуги на

контурі моделі можна встановити також шляхом екстраполяції.

Для фотографування статичних картин смуг можуть використовуватися фотоапарати усіх типів, в тому числі цифрові, при цьому широкоформатні камери і високоякісні об'єктиви, природно, дозволяють отримувати кращі результати.

Множення смуг досягають при обробці зображень фотографічним або цифровим способом на ЕОМ, для цього фотографують ізохром в чорному і білому полі, потім складають ці негативи і отримують третю картину смуг (рис. 5.10). Так як порядки смуг на такій змішаній картині відповідають 0,25 і 0,75 смуги, то її використання разом з двома звичайними дозволяє визначити кількість смуг в чотири рази більше.

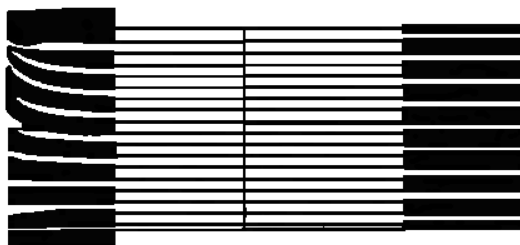


Рисунок 5.10 – Множення картини ізохром фотографічним методом

Ізокліни можна отримати або безпосередньо замальовкою на екрані полярископа, або замальовкою по негативах; при цьому бажано використовувати біле джерело світла, так як на тлі кольорових ізохром вони краще видні. У ряді випадків для отримання ізоклін можна

виготовити другу модель з матеріалу з малою оптичною чутливістю (наприклад, з оргскла).

Для уточнення місця розташування ізоклін в процесі реєстрації рекомендується трохи змінювати навантаження, так як в цьому випадку ізокліни залишаються нерухомими, а ізохромні переміщуються. Іншим способом є плавне коливання площини поляризації близько даного положення.

При фіксуванні картини ізоклін необхідно враховувати їх властивості та операції проводити в наступній послідовності:

- 1) відтворити контур моделі і нанести осі симетрії;
- 2) визначити точки виходу ізоклін на вільний контур;
- 3) за картиною ізоклін намітити ізотропні і прості точки;
- 4) послідовно відтворити ізокліни 0 і 45°.

Як правило, ізокліни фіксують через 5 або 10°.

Перенесення результатів з моделі на натуру. Так як модель, виготовлена з оптично-активного матеріалу, зазвичай відрізняється від натури масштабом, пружними характеристиками, зовнішнім навантаженням і т. п., то з'являється необхідність в перенесенні результатів з моделі на натуру. У разі двовимірної моделі зазвичай використовують такі співвідношення:

$$\sigma_H = \sigma_M \frac{l_M}{l_H} \frac{h_M}{h_H} \frac{P_H}{P_M}; \quad u_H = u_M \frac{P_H}{P_M} \frac{h_M}{h_H} \frac{E_M}{E_H}, \quad (5.23)$$

де σ , l , h , P і u – напруження, лінійний розмір, товщина, зовнішнє навантаження і переміщення відповідно.

Індексами «М» і «Н» позначені величини, що відносяться до моделі і натури. Необхідно відзначити, що ці співвідношення справедливі для однорідного

ізотропного матеріалу в межах пружних деформацій і при відсутності в моделі отворів, навантажених по контуру.

5.8 Аналіз напруженого стану прокатних валків

Дослідження напруженого стану прокатних валків становить інтерес у зв'язку з інтенсифікацією процесів обробки металів тиском, зростанням швидкостей деформування і збільшенням одиничних обтиснень, що призводить до зростання вимог, які пред'являються до міцності і довговічності валків (рис. 5.11).

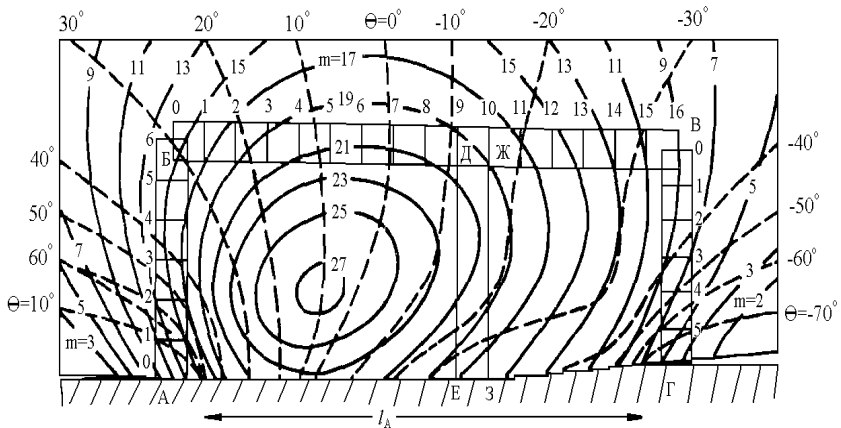


Рисунок 5.11 – Картини ізохром (суцільні лінії) і ізоклін (штрихові лінії) в валку при прокатці тонкої смуги

Розглянемо задачу визначення напруженого стану інструменту на прикладі моделювання процесу прокатки смуги. Вихідними даними для поділу напружень і, зокрема, визначення контактних напружень є картина ізохром і сімейство ізоклін від -90 до $+90^\circ$ (рис. 5.11). Різниця нормальних напружень ($\sigma_x - \sigma_y$) і величина дотичного напруження τ визначаються за відомими

формулами теорії напружень. Поділ нормальних напружень проводили за методом різниці дотичних напружень. Величини напружень, що були визначені після дослідження, наведені в табл. 5.2. На ненавантаженому контурі напруження τ дорівнює нулю. Цифрами позначені порядки смуг, буквами – перетини, що розглядаються; l_A – довжина дуги захоплення.

Таблиця 5.2 – Значення напружень у смугах

Перетин ДЕ				Перетин ЖЗ			
σ_x	σ_y	τ_{xy}	$\sigma_1 - \sigma_2$	σ_x	σ_y	τ_{xy}	$\sigma_1 - \sigma_2$
1,3	-16,5	-3,8	19,4	0,7	-14,9	-4,8	18,3
1,4	-17,7	-4,2	20,9	1,3	-15,2	-5,1	19,0
1,4	-19,0	-5,0	22,7	0,8	-16,0	-5,7	20,2
0,2	-20,1	-5,4	22,9	0,3	-16,7	-6,0	20,2
-3,2	-21,1	-5,6	21,1	-2,5	-17,3	-6,2	19,3
-7,7	-21,7	-6,8	19,5	-8,0	-17,5	-7,5	17,8
-16,5	-22,4	-8,1	17,2	-12,5	-17,5	-7,6	16,0

Оскільки похибку даних поляризаційно-оптичного методу обчислюють безпосередньо за формулами, використання ЕОМ дозволяє істотно підвищити точність і надійність обчислень, зменшити кількість випадкових помилок.

Питання для самоконтролю

1. Поясніть фізичні основи поляризаційно-оптичних методів та конструкцію полярископа.
2. Які основні типи полярископів Ви знаєте?
3. Поясніть сутність п'єзооптичного ефекту. Зобразіть схему навантаженої моделі в полі плаского полярископа.

4. Поясніть роботу навантаженої моделі у полі плаского полярископа та компенсатора Краснова.

5. Перечисліть відомі конструкції поляризаційно-оптичних установок. Зобразіть оптичну схему поляризаційно-проекційної установки.

6. Зобразіть оптичну схему дифузійного полярископа.

7. Які матеріали використовують для двомірної фотопружності, їх властивості та особливості тарирування.

8. Що таке поле ізохром та поле ізоклін? Поясніть методику аналізу полів ізохром та ізоклін.

9. Поясніть сутність способу поділу напружень.

10. Зобразіть схему поділу напружень за методом різниці дотичних напружень.

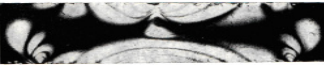
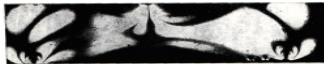
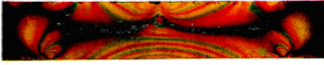
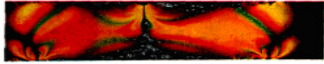
11. Зобразіть схему поділу напружень за способом Файлона.

12. Зобразіть схему поділу напружень без використання ізоклін.

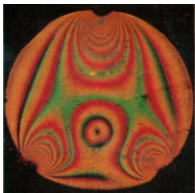
13. Наведіть порядок проведення експерименту та особливості механічної обробки матеріалів для поляризаційно-оптичних методів.

Додаток Д

Поляризаційно-оптичні методи



Картина ізохром з
ізокліною 0° (а, в)
та 45° (б, г) при
поперечному згинанні
балки у разі
монохроматичного (а, б)
і білого (в, г)
джерела світла [1]

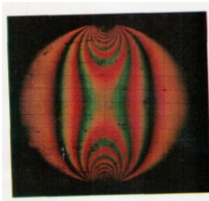


а



б

Картина ізохром у чорному (а) та білому (б) полі для
диска, навантаженого трьома зосередженими силами [1]



а



б

Картина ізохром для діаметрально стиснутого диска (а)
та чистого вигину бруса (б) [1]

6 СТРУКТУРНО-СПАДКОВІ МЕТОДИ

6.1 Метод ліній ковзання

При пластичній деформації на поверхні металів виникає сімейство природних взаємно ортогональних ліній, які називаються лініями ковзання, і у разі плоскої деформації вони співпадають з траєкторіями максимального дотичного напруження. Уперше ці лінії описані В. Людерсом і Д. Черновим. Широкий розвиток методу лінії ковзання для дослідження пластичної формозміни металів обумовлено тим, що він дозволяє визначити поля напружень і швидкостей плину (течії) в перерізах металу, що деформується, і проводити дослідження в окремих зонах. Спостереження за виникненням послідовним поширенням цих ліній дає важливу інформацію про пластичну течію і, зокрема, дозволяє встановити межі фактичного осередку деформації.

Для того, щоб встановити основні закономірності, розглянемо рівновагу елементарної призми [1], утвореної двома координатними площинами і площиною, нахиленою під кутом α до осі x , на якій діють максимальні дотичні напруження $\tau_{max} = K$. Осі t_1 і t_2 є дотичними до ліній ковзання в цій точці.

З умови рівноваги сил, що прикладені до призми, можна записати:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau \sin 2\alpha, \\ \tau_{max} &= K = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau \cos 2\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Використовуючи сітку ліній ковзання, як природну систему, координат і диференціюючи рівняння за α , отримаємо:

$$\frac{d\sigma_o}{d\alpha} \Big|_{t_x=const} = -(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\alpha - 2\tau \cos 2\alpha .$$

Підставивши в це рівняння відомі співвідношення:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_0 + K \sin 2\alpha; \\ \sigma_x &= \sigma_0 - K \sin 2\alpha; \\ \tau &= K \cos 2\alpha. \end{aligned} \quad (6.2)$$

остаточно матимемо:

$$(d\sigma_0)_{t_x=const} = -2Kd\alpha . \quad (6.3)$$

Для ортогонального сімейства ліній прирошення середнього нормального напруження дорівнює:

$$(d\sigma_0)_t = const = -2Kd\alpha . \quad (6.4)$$

Можна показати, що ці рівняння є диференціальними рівняннями рівноваги елементу, вирізаного лініями ковзання.

Якщо в якійсь точці "а" відома величина середньої напруження, то в точці "б", що лежить на тій же лінії ковзання, воно може бути визначене інтегруванням рівнянь:

$$(\sigma_0)_b = (\sigma_0)_{a-} + 2K(\alpha_a - \alpha_b), \quad (6.5)$$

де α_a і α_b – кути нахилу дотичної до лінії ковзання в точках "а" і "б".

Ці вирази носять назву співвідношень Генки.

Таким чином, для жорстко-пластичного середовища, знаючи напружений стан в якій-небудь точці тіла (наприклад, на вільному контурі) і маючи сітку ліній ковзання, можна визначити компоненти тензора напружень у будь-якій точці досліджуваної області. Після визначення компонентів тензору напружень можна знайти деформації або швидкість деформації, використовуючи рівняння теорії пластичної течії.

Були запропоновані ряд експериментальних способів виявлень ковзання на металах. Розглянемо деякі з них. Лінія ковзання з'являється на шліфованій поверхні неметалевого тіла через зміну її рельєфу і може спостерігатися і фотографуватися при відповідному виборі кута падіння світла. Якщо ця поверхня спочатку була оптичною, то для реєстрації ліній ковзання може бути використаний інтерферометр відбитого світла. Для визначення ліній ковзання можна застосовувати оптично чутливі покриття: по полю ізоклін побудувати траєкторії дотичного напруження, за якими можна передбачити початкову картину пластичної течії. При розвиненій пластичній течії ізохромии витягуються уздовж лінії ковзання.

Відомо, що в результаті пластичної деформації відбувається зміна фізико-хімічних властивостей матеріалу, тому лінії ковзання можуть бути виявлені за допомогою операцій травлення. Відмітимо ряд важливих властивостей ліній ковзання, які дозволяють коригувати, а в деяких випадках і добудовувати поля, отримані експериментальним шляхом: вони безперервні, ортогональні і перетинають траєкторії головного напруження під кутом 45° , зміна середнього нормального напруження при русі уздовж лінії ковзання пропорційна куту її повороту. Кут перетину дотичних до двох ліній ковзання одного сімейства в точках перетину лінією

ковзання другого сімейства залишається постійним; центри кривизни дуг одного сімейства, що перетинають фіксовану лінію ковзання іншого сімейства, співпадають з евольвентою останньої. Окрім перерахованих властивостей, сітка ліній ковзання повинна задовольняти відповідним граничним умовам, які визначаються значенням дотичного напруження на вільній і контактній поверхнях тіла, що деформується. Так, якщо тертя на поверхні контакту досягає своєї максимальної величини ($\tau_{max} = K$), то напрям одного з сімейств буде перпендикулярним контуру. На вільній поверхні тіла і на поверхні контакту при повній відсутності тертя лінії ковзання перетинають межі під кутом 45° .

6.2 Метод крихких покриттів

Основні відомості. Цей метод, так само як і метод ліній ковзання, народився із спостережень за поведінкою окалини і плівок оксидів на поверхнях металу, що деформувався. Було помічено, що у результаті формозміни ці природні покриття руйнуються, відбиваючи процес течії металу. Надалі метод удосконалювався і став застосовуватися для якісного і навіть кількісного вивчення головним чином пружних деформацій. Метод крихких покриттів забезпечує простий і безпосередній аналіз великого класу різних практичних завдань, де не потрібна висока точність.

Суть методу полягає в тому, що покриття з певними характеристиками наносять на досліджувану поверхню. Відповідна адгезія забезпечує трансляцію деформацій, що виникають в об'єкті, до покриття, яке під дією виникаючого поля напружень руйнується і покривається сіткою тріщин. Оскільки границя міцності зазвичай значно

нижче цієї ж величини досліджуваного матеріалу, то цей метод можна віднести до неруйнівних способів аналізу.

Основними *перевагами* методу є: можливість дослідження натуральних об'єктів, порівняльна простота обробки первинних даних отримання інформації про величину напряду головного напруження по усьому полю на досить великих поверхнях будь-якої конфігурації.

До *недоліків* слід віднести істотний вплив умов поведінки експерименту (температура, вологість, товщина покриття, історія навантаження і т.і.) на точність кінцевого результату. Досвід показує, що достовірність результатів значною мірою пов'язана з кваліфікацією і інструкцією експериментатора.

Теоретичні передумови. Застосування методу крихких покриттів припускає рішення двох основних завдань: по-перше, встановлення зв'язку між картиною тріщин і напружено-деформованим станом покриття, по-друге, визначення напружень і деформацій на поверхні об'єкту за цими даними.

Розглянемо випадок двовісного напруженого стану $\sigma_z = 0$. Через те, що товщина покриття в порівнянні з товщиною досліджуваного об'єкту мала, можна вважати, що деформації в покритті розподілені рівномірно по товщині і дорівнюють складовим поверхневим деформаціям об'єкту:

$$\varepsilon_x^n = \varepsilon_x^0; \quad \varepsilon_y^n = \varepsilon_y^0; \quad \sigma_z^n = \sigma_z^0 = 0, \quad (6.6)$$

де індекс "n" відноситься до покриття, "0" – до об'єкту.

Зв'язок між напруженнями і деформаціями визначається рівняннями теорії пружності :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x^0 &= \frac{1}{E^o} (\sigma_x^0 - \mu_o \sigma_y^0); & \varepsilon_y^0 &= \frac{1}{E^o} (\sigma_y^0 - \mu_o \sigma_x^0); \\ \varepsilon_x^{\Pi} &= \frac{1}{E^n} (\sigma_x^n - \mu_o \sigma_y^n); & \varepsilon_y^{\Pi} &= \frac{1}{E^n} (\sigma_y^n - \mu_o \sigma_x^n). \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

Підставляючи другий вираз у перший, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^{\Pi} &= \frac{E^{\Pi}}{E^o(1 - \mu_{\Pi}^2)} [(1 - \mu_o \mu_{\Pi}) \sigma_x^o + (\mu_{\Pi} - \mu_o) \sigma_y^o]; \\ \sigma_y^{\Pi} &= \frac{E^{\Pi}}{E^o(1 - \mu_{\Pi}^2)} [(1 - \mu_o \mu_{\Pi}) \sigma_y^o + (\mu_{\Pi} - \mu_o) \sigma_x^o]. \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

Отримане рівняння зв'язує компоненти тензора напружень об'єкту і покриття. Для переходу від картини тріщин до напружень в покритті необхідно скористатися теоріями крихкого руйнування, з яких найбільше підтвердження на практиці отримали теорії Мору і максимальних відносних деформацій. Використання однієї з теорій залежить головним чином від характеристик покриття.

Теорія Мору. Згідно цієї теорії, проміжне головне напруження σ_2 мало впливає на початок крихкого руйнування, яке задовольняє наступному співвідношенню :

$$\sigma_1 / \sigma_{\text{в.р.}}^n - \sigma_3 / \sigma_{\text{в.с.}}^n = 1,$$

де $\sigma_{\text{в.р.}}^n$ і $\sigma_{\text{в.с.}}^n$ – границі міцності матеріалу покриття при розтягуванні і стискуванні відповідно.

Ця залежність є рівнянням прямої лінії, справедливості якого можна встановити шляхом проведення випробувань матеріалу покриття при різних комбінаціях $\sigma_1^n \geq 0$, $\sigma_2^n = 0$ і $\sigma_3^n \leq 0$. Якщо прийняти σ_x^n і σ_y^n

за головні напруження, можна виділити три основні випадки:

- 1) $\sigma_x^n \geq \sigma_y^n \geq 0$; 2) $\sigma_x^n \geq 0 \geq \sigma_y^n$; 3) $0 \geq \sigma_x^n \geq \sigma_y^n$ (варіанти $\sigma_x^n \geq \sigma_y^n$ призводять до аналогічних результатів), для яких попереднє рівняння набере вигляду:
- 2) $\sigma_x^n / \sigma_{\epsilon.p.}^n = 1$; $\sigma_x^n / \sigma_{\epsilon.p.}^n - \sigma_y^n / \sigma_{\epsilon.c.}^n = 1$; $\sigma_y^n / \sigma_{\epsilon.c.}^n = 1$.

Ці рівняння визначають зв'язок між картиною тріщин і напруженим станом покриття, величини напружень об'єкта обчислюють за формулами (6.8).

Теорія максимальних відносних деформацій. За цією теорією руйнування настає тоді, коли максимальні відносні подовження (ϵ_1 або ϵ_3) досягають деякого граничного значення ϵ^* , яке залежить від характеристик матеріалу, тобто:

$$\epsilon_1^n = \frac{1}{E^n} [\sigma_1^n - \mu_n (\sigma_2^n + \sigma_3^n)] = \epsilon_*^n.$$

Тут слід розглянути тільки два основні випадки:

$$\sigma_x^n = \sigma_1^n, \text{ коли } \sigma_x^n \geq \sigma_y^n \geq 0 \text{ або } \sigma_x^n \geq 0 \geq \sigma_y^n;$$

$$\sigma_1^n = 1, \text{ коли } 0 \geq \sigma_x^n \geq \sigma_y^n,$$

для яких матимемо:

$$\frac{\sigma_x^n - \mu_n \sigma_y^n}{E^n} = 1 \text{ і } -\frac{\mu_n}{E^n \epsilon_*^n} (\sigma_x^n + \sigma_y^n) = 1. \quad (6.9)$$

Підставляючи це рівняння, можна визначити напруження на поверхні об'єкту.

Теорія максимальних нормальних напружень. З рівнянь видно, що аналіз двовимірного поля деформацій в загальному випадку досить важкий, тому у більшості

випадків при рішенні практичних завдань нехтують впливом другої компоненти напруження на руйнування покриття. Тоді головні напруження в об'єкті, які перпендикулярні тріщині в покритті, можна визначити по простій формулі:

$$\sigma_1^0 = E^0 \varepsilon_x^n. \quad (6.10)$$

Величина відносної деформації ε_x^n визначається з тарирувальних випробувань. Напрями головного напруження σ_2 співпадають з тріщинами. Таким чином, сітка тріщин дає поле ізостатик. Напрями σ_1 перпендикулярні σ_2 і можуть бути побудовані по попередній картині або отримані з виду поля тріщин, якщо нанести покриття на навантажений об'єкт з подальшим зняттям навантаження. У тих випадках, коли напруження змінюється прямо пропорційно навантаженню, величини головних напружень σ_1 і σ_2 можна визначити по модифікованій формулі:

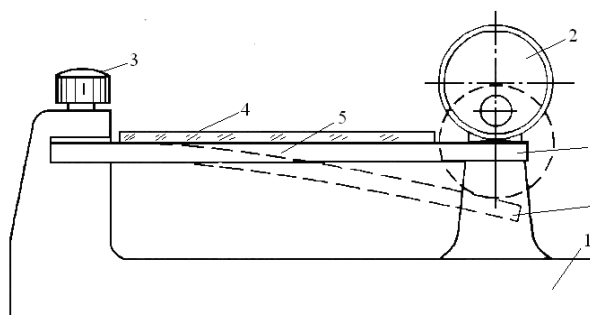
$$\sigma_0 = E_0 \varepsilon_x^n \frac{P}{P^*}, \quad (6.11)$$

де P – робоче навантаження, для якого необхідно визначити σ_0 ;

P^* – навантаження, при якому отримана картина тріщин.

Тарирування крихких покриттів. Для визначення величин напружень або деформацій, пов'язаних з кожною лінією, що сполучає кінці тріщин, після кожного вантаження, необхідно провести тарирування покриття. Ця процедура здійснюється шляхом вигину консольної балки з покриттям. На рис. 6.1 представлений простий

тариувальний пристрій, в якому величина прогину f задається за допомогою ексцентрика [1].



1 – корпус; 2 – ексцентрик; 3 – затискний гвинт;
4 – крихке покриття; 5 – зразок

Рисунок 6.1 – Пристрій для тариування крихких покриттів

Вимірюючи відстань від крайньої тріщини a до закладення, можна підрахувати деформації на поверхні зразка:

$$\varepsilon_*^{\text{II}} \approx \varepsilon^0 = \frac{\sigma^0}{E^0} = \frac{3hf}{2l^3}(l-a), \quad (6.12)$$

де l і h – довжина і висота балки.

При проведенні тариувальних випробувань спостерігається значне відхилення у величинах ε_x^n , тому для отримання надійніших даних рекомендується проводити серію випробувань $N = 10 \dots 15$.

Величину граничної деформації, яка використовується для обчислення напружень, можна визначити по формулі:

$$\varepsilon_*^{\Pi} = \left(\varepsilon_*^{\Pi} \right)_{cp} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\varepsilon_*^{\Pi} \right)_i, \quad (6.13)$$

а значення дисперсії, що відповідає їй, буде:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\left(\varepsilon_*^{\Pi} \right)_i - \left(\varepsilon_*^{\Pi} \right)_{cp} \right]^2. \quad (6.14)$$

Тоді похибка експериментально отриманої величини ε_x^n дорівнює $\pm \sigma$ при довірчій вірогідності $\alpha = 0,68$ або $\pm 2\sigma$ при $\alpha = 0,95$. Відносна похибка буде дорівнювати σ / ε_x^n або $2\sigma / \varepsilon_x^n$ відповідно.

В деяких випадках тарирування крихкого покриття можна проводити безпосередньо на досліджуваному об'єкті, якщо відома величина деформації в якій-небудь точці. Зокрема, для цього доцільно використати тензорезистори, які наклеюються в зоні руйнування покриття. Якщо датчики розташовуються уздовж напрямку головного напруження, тобто уздовж тріщини і перпендикулярно їй, то напруження розраховуються по формулах для розетки датчиків, а граничні деформації можна визначити по формулі:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1). \quad (6.15)$$

Порядок проведення експерименту. Для проведення експерименту на досліджуваній об'єкт наносять покриття певної товщини. Залежно від цілей експерименту покриття наносять на навантажений або ненавантажений об'єкт. Перед нанесенням покриття необхідно ретельно зачистити поверхню і знежирити її. Для сприятливіших умов виявлення тріщин рекомендується наносити на поверхню напилюванням шар алюмінію, який покращує відбивну здатність досліджуваної поверхні.

Після висихання покриття об'єкт піддають ступінчатому навантаженню. Після кожного етапу кінці тріщин з'єднують плавною лінією, що є геометричним місцем точок з приблизно постійним головним напруженням σ_1 , величину якого обчислюють, наприклад, по формулі (6.11). Необхідно звернути увагу на те, що експеримент і тарирувальні випробування повинні проводитися в ідеальних умовах. Після завершення процесу навантаження картину тріщин з лініями рівних значень головних напружень, що відповідає різним етапам навантаження, фотографують.

Важливим етапом при проведенні експерименту є виявлення і фотографування картини тріщин. Встановлено, що тріщини мають V-подібну форму, глибина їх дорівнює товщині покриття, а ширина складає приблизно 50 мкм. Щоб краще визначити межі тріщин, по яких проводяться лінії $\sigma = const$, доцільно освітити досліджувану поверхню сфокусованим пучком світла. При цьому світло має бути спрямоване перпендикулярно тріщинам і під деяким кутом до поверхні, покриття протирають тампоном, змоченим в спеціальному барвнику, який заповнює тріщини. Через деякий час (приблизно 1...2 хв.) зайву фарбу видаляють з поверхні покриття. Ця процедура дозволяє отримати чіткі і контрастні фотографії тріщин. Процес фотографування рекомендується вести в розсіяному світлі з мінімально можливою діафрагмою.

Основні картини тріщин. Виникнення і розвиток тріщин (рис.6.2) в покритті залежить від схеми напруженого стану досліджуваної області [1]. Розглянемо наступні окремі випадки.

1. $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 > 0$. У цьому разі утворюється тільки одне сімейство тріщин, напрям яких перпендикулярний σ_1 і паралельний σ_2 . Така картина зустрічається при вивченні

елементів конструкції, які працюють на розтягування і вигин;

2. $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$. Тут може виникнути два сімейства тріщин: перше з них – таке ж, як і в першому випадку, друге – ортогональне першому – утворюється під дією напруження σ_2 . Відзначимо, що друге поле тріщин з'являється тоді, коли σ_2 стає досить великим. Картина тріщин такого типу часто зустрічається при випробуваннях тонкостінних і товстостінних циліндрів, де окружне напруження σ_1 в два рази більше осьового напруження σ_2 ;

3. $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$. Області, в яких реалізується ця умова, називаються ізотопними, і в них всі напруження є головними, тому руйнування покриття відбувається випадково. Такий розподіл тріщин характерний для сферичних елементів конструкцій, що знаходяться під дією внутрішнього тиску.

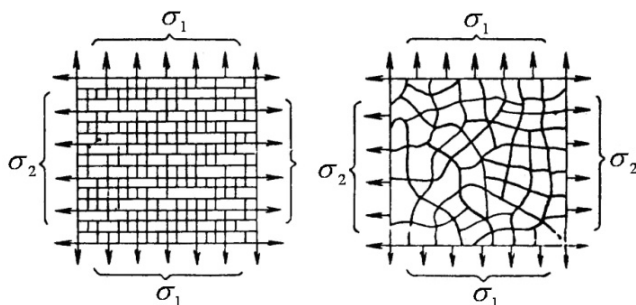


Рисунок 6.2 – Типові картини тріщин; головне напруження одного знаку

Матеріали покриттів. Основною характеристикою матеріалу покриття є величина граничної деформації ε_x^n , яка обумовлює можливість його використання для тих або інших об'єктів. Вибір покриття значною мірою визначається механічними характеристиками матеріалу

об'єкту, оскільки високо-крихкі покриття не дозволяють вивчати великі деформації, а еластичні мають малу чутливість. Найбільше поширення отримали покриття на основі резината цинку або барію, розчиненого в сірководнеці (CS_2) з додаванням дибутилфталата в якості пластифікатора. Такі лаки призначені для проведення випробувань при температурі від $15^\circ C$ до $35^\circ C$. Збільшення кількості пластифікатора призводить до збільшення граничних деформацій (ε_x^n) і зменшення чутливості покриття (рис. 6.3). На рис. 6.3 приведена якісна залежність ε_x^n від кількості пластифікатора [1]. При граничній деформації вище 0,12 % тріщини, які утворилися в покритті, можуть закритися після зняття навантаження, і їх реєстрація стає неможливою. Якщо граничні деформації не досягають 0,04 %, то покриття може зруйнуватися в процесі сушки через виникнення великого залишкового напруження.

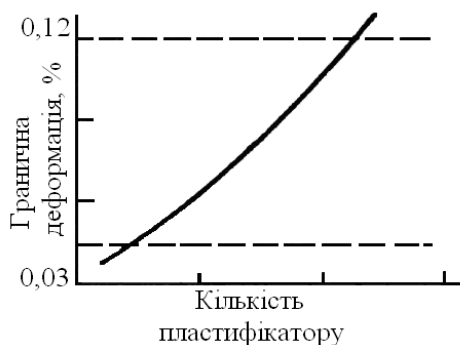


Рисунок 6.3 – Якісна залежність граничної деформації покриття від кількості пластифікатора (штриховими лініями відмічені верхня і нижня межа роботи покриття)

Технологія приготування лаку на основі резината барію складається з наступних операцій:

- 1) розплавлення високоякісної каніфолі;
- 2) введення гідрата окису барію в розплавлену каніфоль при $t = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 3) підвищення температури до $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ з подальшим її охолодженням;
- 4) розчинення отриманого резината при кімнатній температурі в сірковуглеці.

Такий лак можна зберігати достатньо довго. Цей матеріал летючий, токсичний і вогнебезпечний, а тому вимагає особливої акуратності при його застосуванні. Нанесення лаку на об'єкт дослідження робиться за допомогою пензлика або пульверизатора. Залежно від товщини покриття, наносять 7...10 шарів лаку. При цьому кожен наступний шар наносять перпендикулярно до попереднього напрямку. Зазвичай товщина покриття лежить в таких межах 50...250 мкм. Для отримання стабільних і надійних результатів необхідно строго дотримуватися термомічних режимів виготовлення і нанесення лаку.

Розроблені покриття на керамічній основі, призначені для випробувань при температурах до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Крім того, такі покриття малочутливі до змін температури і вологості довкілля. Проте вони не отримали широкої поширеності із-за високої температури затвердіння ($500\text{...}600\text{ }^{\circ}\text{C}$), яка обмежує, з одного боку, розмір досліджуваної деталі, а з іншого боку, може викликати безповоротні зміни в матеріалі об'єкту, що вивчається.

6.3 Вимірювання твердості

Численними дослідженнями встановлено, що при холодній пластичній деформації металу зміна його фізико-хімічних властивостей обумовлює зміну твердості. Таким чином, знаючи зв'язок між величиною твердості і відповідними механічними характеристиками металу,

можна судити про його напружено-деформований стан в цій стадії формозміни.

Основні положення. Існує ряд способів вимірювання твердості; найбільш поширені методи Бринелля, Роквелла і Виккерса, в яких твердість характеризується глибиною або площею відбитку, отриманого при зануренні у метал індикатора певної конфігурації (сталеві кульки, алмазного конуса або піраміди). Для дослідження деформованого стану найбільш прийнятний спосіб Виккерса, оскільки він забезпечує мінімальну пластичну зону навколо відбитку, що дозволяє проводити достатню кількість вимірювань на невеликій площі. Число твердості в даному випадку визначається як відношення навантаження до площі бокової поверхні відбитку. Спосіб Роквелла відрізняється малою стабільністю результатів, а спосіб Бринелля – наявністю значної пластичної зони навколо відбитку. Відзначимо, що вимірювання твердості пред'являють певні вимоги до однорідності матеріалу – розмір діагоналі відбитку повинен істотно перевищувати розмір окремих структурних складових. Досліджувана поверхня має бути полірованою, а мінімальна товщина зразка повинна перевищувати діагональ відбитку в 1,2 рази для сталі і в 1,5 разу для кольорових металів. Відстань між центрами відбитків має бути в 2,5 рази більше довжини діагоналі. Слід звернути увагу на те, що тарирувальні та робочі випробування повинні проводитися в ідентичних умовах і за єдиною методикою. Метод вимірювання твердості може бути використаний для вивчення як внутрішніх об'ємів, так і зовнішніх поверхонь металу. У першому випадку необхідно розрізати зразок або деталь і видалити шар накопиченого при цій операції металу.

У обох випадках експеримент проводять в наступному порядку:

а) будують тарирувальну залежність «інтенсивність напруження – твердість – інтенсивність деформації» (рис. 6.4);

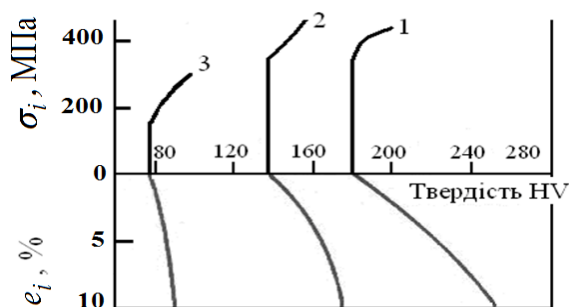


Рисунок 6.4 – Тарирувальна залежність «інтенсивність напружень – твердість – інтенсивність деформації»

б) вимірюють у точках в різних місцях поверхні досліджуваного об'єкту після його деформації;

в) результати вимірювань наносять на креслення поверхні і сполучають плавною кривою точки з однаковою величиною твердості;

г) значення інтенсивностей напружень та деформацій, що відповідають кожній кривій, знаходять з тарирувального графіку;

д) використовуючи рівняння рівноваги і визначення інтенсивності напружень, отримують компоненти напружено-деформованого стану.

Побудова тарирувальної залежності. Для експериментального визначення залежності між твердістю HV та інтенсивністю напружень σ_i і деформацій ε_i використовують прості види механічних випробувань, для яких напружено-деформований стан на будь-якій стадії може бути легко знайдений по відомих формулах опору матеріалів. Випробування на кручення недоцільні,

оскільки вони ускладнюють процедуру вимірювань твердості і вносять додаткові похибки.

Інтенсивності деформацій та напружень при розтягуванні та стисканні обчислюють по формулах:

$$\varepsilon_i = \ln(l/l_0); \quad \sigma_i = P/F, \quad (6.16)$$

де l_0 і l – початкова і кінцева довжина (висота) зразка;

P – зусилля деформації;

F – площа поперечного перерізу зразка.

Навантаження тарирувальних зразків роблять ступінчасто, на кожній стадії вимірюють твердість і обчислюють ε_i і σ_i . Щоб зменшити розкид дослідних даних, рекомендується робити вимірювання у декількох точках (трьох-п'яти) на пласкій ділянці поверхні. При випробуванні циліндричних зразків в місцях вимірювань бажано знімати лиски, щоб виключити вплив криволінійності поверхні. Необхідно відмітити, що при розтягуванні формули справедливі тільки до моменту утворення шийки, оскільки надалі напружений стан зразка вже не є лінійним. Тому для отримання достовірних результатів випробування повинні проводитися при порівняно невеликих деформаціях. При розвиненій пластичній течії використовують випробування на стискування. Для реалізації лінійного напруженого стану необхідно вжити відповідні заходи для зменшення контактних сил тертя і періодично обточувати поверхню деформованих зразків для збереження циліндричної форми. В той же час випробування на стискування не дає надійних результатів в області малих деформацій, коли відбувається найбільш інтенсивна зміна поверхні. Тому ці два види випробувань взаємно доповнюють один одного і їх рекомендується застосовувати спільно. Відмітимо, що при деформації $\varepsilon_i > 0,2$ залежність між інтенсивністю

напружень і твердістю за Віккерсом приблизно описується співвідношенням $\sigma_i = HV (0,33 \dots 0,37)$. Це співвідношення може бути використане для перевірки результатів вимірювань твердості при великих деформаціях або для безпосереднього використання як тарирувальної залежності.

Визначення деформацій. За методом вимірювання твердості головні деформації можуть бути отримані тільки для окремих випадків, оскільки для їх обчислення є тільки два рівняння. У разі пласкої деформації величини головних деформацій пропорційні інтенсивності деформацій ε_i :

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_i . \quad (6.17)$$

Величина ε_i визначається за допомогою тарирувальної залежності безпосередньо за вимірюванням твердості. Для визначення напрямів ε_1 і ε_3 необхідно скористатися якими-небудь додатковими умовами (наприклад, уздовж осей симетрії ці напрями відомі) або експериментами (наприклад, метод крихких покриттів). Для осесиметричної задачі уздовж осі симетрії зсувні деформації дорівнюють нулю, а окружна ε_φ і радіальні ε_r деформації рівні між собою, тому:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon_z}{2} = \pm \frac{\varepsilon_i}{2} . \quad (6.18)$$

Розглянемо тепер площину симетрії $z = 0$. Тут маємо два рівняння:

$$\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\varphi^2 + \varepsilon_r \varepsilon_\varphi = \frac{3}{4} \varepsilon_i^2 ; \quad \frac{d\varepsilon_\varphi}{dr} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi}{r} . \quad (6.19)$$

Вирішуючи ці рівняння спільно, можна визначити величини усіх деформацій, якщо відомі ε_φ і ε_z хоч би в одній точці площини.

6.4 Мікроструктурний метод

Процес пластичної формозміни, як відомо, супроводжується значною неоднорідністю деформації по об'єму, що призводить до різної за величиною і напрямом деформації окремих зерен металу. Оскільки зерна мають досить чіткі межі, то вони можуть бути використані в якості природних свідків, які дозволяють якісно і навіть кількісно оцінити деформований стан даної області. Цей метод був вперше запропонований Г. О. Смирновим-Аляєвим і отримав розвиток в роботах його співробітників.

На першому етапі розвитку методу оцінку деформованого стану проводили таким чином. В околицях даної точки вільної поверхні тіла робили мікрошліф, який аналізували до та після деформації.

У вихідному стані намічали низку характерних точок (зазвичай точки різкої зміни контуру зерен) і вимірювали відстані між різними парами діаметрально розташованих точок (рис. 6.5). Потім заміряли відстані для цих же точок після деформації.

Відношення ρ/ρ_0 різні для різних пар точок і залежать від кута θ , який визначає напрям відрізка ρ по відношенню до вибраної системи координат. Зазвичай напрями координатних осей задавали так, щоб вони співпали з характерними контурами досліджуваного тіла. Згідно з положеннями теорії кінцевих деформацій, матеріальна частка, що мала сферичну форму, перетвориться в процесі деформації в еліпсоїд, а для плаского завдання – круг в еліпс. Тому функціональна

залежність відношення $(\rho/\rho_0)^2$ від кута θ повинна підкорятися синусоїдальному закону:

$$(\rho/\rho_0)^2 = a_1 \sin 2\theta + a_2 \cos 2\theta + a_3. \quad (6.20)$$

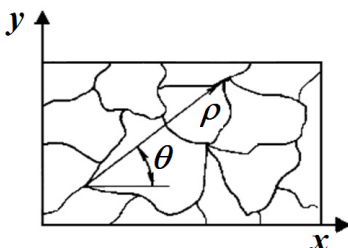


Рисунок 6.5 – Вимірювання відстані між різними парами діаметрально розташованих точок (метод Г. О. Смирнова-Аляєва)

Через наявність похибок експерименту, а також неоднорідність структури металу, визначення параметрів (тобто коефіцієнтів a_1, a_2, a_3) деформованого стану за величинами (ρ/ρ_0) і θ вимагає проведення значної кількості вимірювань (рекомендується робити не менше 20 вимірювань). Подальша математична обробка, ґрунтована на застосуванні методу найменших квадратів, призводить до наступної системи лінійних рівнянь алгебри:

$$\left. \begin{aligned} a_1 n + a_2 \sum_{i=1}^n \cos 2\theta_i + a_3 \sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i &= \sum_{i=1}^n (\rho_0/\rho)_i; \\ a_1 \sum_{i=1}^n \cos 2\theta_i + a_2 \sum_{i=1}^n \cos^2 2\theta_i + a_3 \sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i \cos 2\theta_i &= \sum_{i=1}^n (\rho_0/\rho)_i \cos 2\theta_i; \\ a_1 \sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i + a_2 \sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i \cos 2\theta_i + a_3 \sum_{i=1}^n \sin^2 2\theta_i &= \sum_{i=1}^n (\rho_0/\rho)_i \sin 2\theta_i \end{aligned} \right\} \quad (6.21)$$

Значення максимуму і мінімуму відношень визначають значення (ρ/ρ_0) головних компонент деформацій, а кути θ , що відповідають їм, – їх напрями. Описана методика має істотний недолік – для її здійснення необхідно виготовляти шліфи і вимірювати відстані між точками в початковому стані тіла, що збільшує трудомісткість методу і обмежує його застосування тільки для аналізу вільних поверхонь тіла.

Спеціальні дослідження показали, що величина прямолінійного відрізка, на якому укладесться заздалегідь встановлена кількість зерен (8...10), статистично не залежить від направлення відрізка і його місцезнаходження. Це положення покладено в основу нової методики, в якій за первинну величину відрізка ρ_0 приймається середньостатистична довжина відрізка, що залежить від фізико-хімічних властивостей металу і його структури. Експеримент проводиться в наступному порядку: визначають величину ρ_0 або по мікроструктурі недеформованого металу, або за наявними даними; виготовляють фотографії мікроструктури деформованого металу; через дану точку проводять відрізки з постійним кутовим кроком 30° (з метою підвищення точності методу крок може бути зменшений до $10...15^\circ$).

Для зручності вимірювань доцільно з прозорого матеріалу виготовити спеціальний трафарет, що є колом і радіусами із заданим кутовим кроком (рис. 6.6); вимірюють довжину відрізків ρ вздовж радіусів, на яких укладається 10 зерен; за формулами обчислюють коефіцієнти рівняння еліпсу; використовуючи формули теорії кінцевих деформацій, визначають величини головних деформацій:

$$\varepsilon_1 = -\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)_{\min} ; \varepsilon_2 = -\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)_{\max} ; \varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2). \quad (6.22)$$

Для отримання точніших і надійніших результатів бажана мати рівноосну однорідну структуру, для якої величина ρ_0 є постійною. Цього можна досягти відповідним підбором режимів термообробки недеформованого металу. Мікроструктурний аналіз дозволяє визначати деформований стан як на поверхні тіла, так і у внутрішніх його об'ємах.

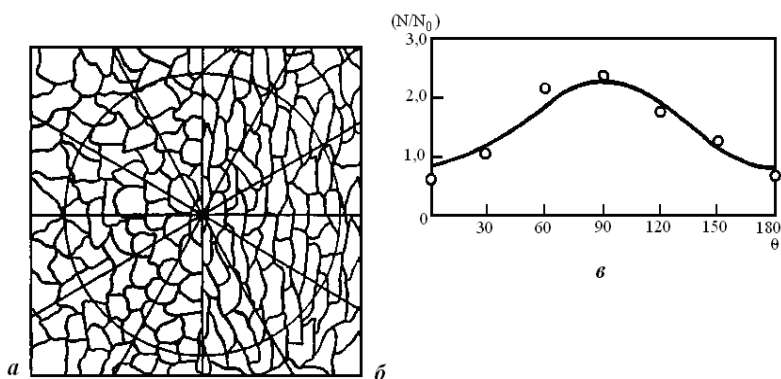


Рисунок 6.6 – Схема мікрошліфа до (а) та після (б) деформації з нанесеною радіальною сіткою ліній з кроком 30° і порівняння результатів (в) безпосередньої обробки мікроструктури (кружечки) з розрахунковими даними (суцільні лінії)

Приведені два різновиди методу не виключають, а взаємно доповнюють один одного. За допомогою фіксації характерних точок структури до і після деформації доцільно досліджувати деформації до величини порядку 10 % так як при великих пластичних деформаціях важко знайти ці точки. В той же час використання усередненої величини ρ_0 дає добрі результати в діапазоні від 10 % до 70 % деформації; при деформаціях більше за 70 % поява

текстури утрудняє визначення меж зерен, а при деформаціях менше 10 % знижується точність.

Можливо також подальше спрощення методики отримання первинної інформації: накладається трафаретна фотографія мікроструктури і підраховується число N меж зерен, яке перетинає фіксований радіус. Відношення середньостатистичного числа ρ_0 меж зерен, що відповідає ρ_0 до N , аналогічно відношенню ρ_0 / ρ . Таким чином, операція вимірювання довжини замінюється простим підрахунком точок перетину.

У ряді випадків зручніше використовувати Декартову систему координат, для якої рівняння рівноваги можна записати в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_0}{\partial x} - \sigma_i \cos 2\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial x} - \sigma_i \sin 2\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial y} + \frac{\cos 2\alpha}{2} \cdot \frac{\partial \sigma_i}{\partial y} - \frac{\sin 2\alpha}{2} \cdot \frac{\partial \sigma_i}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_0}{\partial y} - \sigma_i \cos 2\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial y} - \sigma_i \sin 2\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\sin 2\alpha}{2} \cdot \frac{\partial \sigma_i}{\partial y} - \frac{\cos 2\alpha}{2} \cdot \frac{\partial \sigma_i}{\partial x} &= 0. \end{aligned}$$

Якщо інтенсивність дотичного напруження змінюється незначно, тобто коли поведінку реології середовища можна описати рівняннями ідеально-пластичного тіла, то двома останніми додатками цих рівнянь можна нехтувати.

Дотичне напруження у разі пласкої задачі можна визначити за відомою формулою:

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_i}{2} \sin 2\theta, \quad (6.23)$$

де σ_i – напруження, що визначене вимірюванням твердості, а кут θ – визначений за картиною ізоклін.

Нормальне напруження, наприклад, знаходять інтеграцією σ_x диференціального рівняння рівноваги:

$$(\sigma_x)_n = (\sigma_x)_0 - \int \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx. \quad (6.24)$$

Інше нормальне напруження σ_y обчислюють за формулою:

$$\sigma_y = \sigma_x - \sigma_i \cos 2\theta = \sigma_x \pm \sqrt{\sigma_i^2 - 4\tau_{xy}^2}. \quad (6.25)$$

Якщо по картині ізоклін побудувати траєкторії головних і максимальних дотичних напружень, то обробку отримані даних можна проводити так само, як це робиться при спільному використанні вимірювання твердості з методами хрумких покриттів і ліній ковзання.

Геометричні методи і вимірювання твердості. Можливо також комбінування методу вимірювання твердості з координатною сіткою, мікроструктурним аналізом і муаровими полосами. Тут по деформованому стану визначають напрямок головного напруження, а по твердості — величину інтенсивності дотичного напруження; надалі процес розшифрування принципово не відрізняється від розглянутих вище випадків.

6.5 Оптично чутливі покриття

Метод оптично чутливих (фотопружних) покриттів відомий близько 90 років, але його широке застосування для вирішення пружних і непружних завдань стало можливим тільки останніми роками завдяки появі нових полімерних матеріалів (епоксидних смол, поліуретанових каучуків і т.і.).

Сутність методу. Використовуючи оптично чутливі покриття (ОЧП), можна вивчати як моделі, так і натурні конструкції (рис. 6.7).

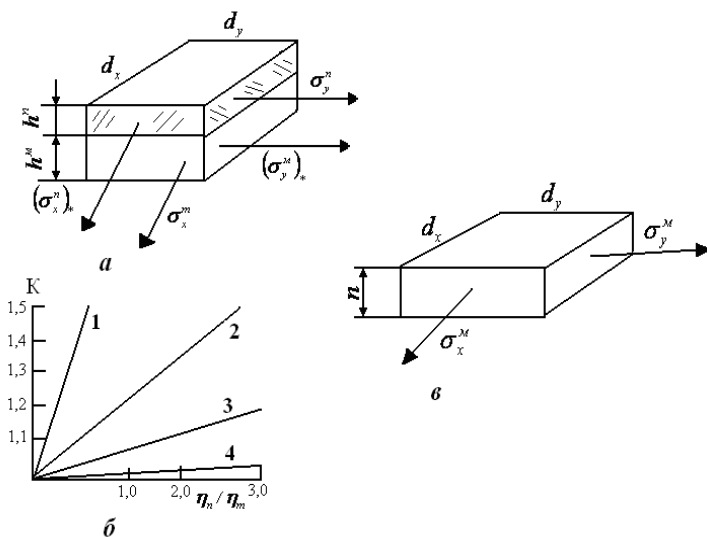


Рисунок 6.7 – Принцип вимірювання за методом оптично чутливих покриттів

Метод ОЧП ґрунтований на тому, що на досліджувану поверхню наноситься тонкий шар оптично-чутливого матеріалу, який фактично є датчиком деформацій і дозволяє визначити по усьому полю різницю головних деформацій і їх напрями. Якщо адгезія ОЧП з поверхнею зразка достатня, то деформація поверхні, що виникає в результаті докладання зовнішнього навантаження, повністю передається покриттю, що обумовлює виникнення в ньому подвійного променезаломлення. Відповідну картину ізохром та ізоклін можна спостерігати за допомогою відбивних полярископів. Щоб деформації зразка транслювалися в ОЧП без спотворення, покриття має бути досить тонким і мати відповідну жорсткість. Якщо усі перелічені вище умови виконані, то $\sigma_z = \sigma_3 = 0$; $\varepsilon_1^{\text{II}} = \varepsilon_1^{\text{M}}$; $\varepsilon_2^{\text{II}} = \varepsilon_2^{\text{M}}$, де величини з

індексами "П" і "М" відносяться до покриття і моделі відповідно.

Оскільки принципи роботи ОЧП і крихких покриттів ідентичні, то можна записати:

$$\begin{aligned}\sigma_1^P &= \frac{E^n}{E^M(1 - \mu_P^2)} \left[(1 - \mu_M \mu_P) \sigma_1^M + (\mu_P - \mu_M) \sigma_2^M \right]; \\ \sigma_2^P &= \frac{E^n}{E^M(1 - \mu_P^2)} \left[(1 - \mu_M \mu_P) \sigma_2^M + (\mu_P - \mu_M) \sigma_1^M \right].\end{aligned}\quad (6.26)$$

Віднімаючи цю рівність, отримаємо:

$$\sigma_1^M - \sigma_2^M = \frac{E^P(1 + \mu_M)}{E^M(1 + \mu_P)} (\sigma_1^M - \sigma_2^M). \quad (6.27)$$

Аналіз цієї формули показує, що різниця головних напружень, що діють в покритті, прямо пропорційна різниці головних напружень, що діють на поверхні зразка. Коефіцієнт пропорційності залежить від пружних постійних матеріалу моделі і покриття і, наприклад, для пари сталь – епоксидна смола він дорівнюватиме 0,04. З урахуванням основного закону фотопружності співвідношення (6.27) можна перетворити до виду:

$$\sigma_1^M - \sigma_2^M = \frac{E^M(1 + \mu_n)}{E^n(1 + \nu_M)} \frac{\sigma_0 m^1}{2h}. \quad (6.28)$$

Використовуючи закон Гуку, матимемо:

$$\varepsilon_1^M - \varepsilon^M = \frac{\varepsilon_0 m^{01}}{2h} = \frac{\sigma_0^{1,0}}{2h} \left(\frac{1 + \mu_P}{E^P} \right). \quad (6.29)$$

Методика проведення експерименту. В якості матеріалів покриттів зазвичай використовують або

епоксидні смоли, або поліуретанові гуми. Якщо поверхня пласка, то можна застосовувати пластинки, які зазвичай служать для виготовлення моделей в двовимірній фотопружності.

Перед склеюванням поверхні зразка і пластинки зачищають дрібною шкуркою і знежирюють. Якщо відбивна здатність досліджуваної поверхні недостатня, то на поверхню покриття рекомендується наносити відбиваючий шар шляхом вакуумного напилення алюмінію або приклеювати тонку фольгу (близько 10 мкм). В якості клею застосовують компаунд з епоксидної смоли і поліетиленполіамін або ціакриновий клей [<https://kley.site/vidy/drugie/ciakrinovyj-klej.html>] (у побуті – звичайний «суперклей»), який наноситься тонким рівним шаром. Для забезпечення міцного приклеювання до поверхні покриття рекомендується прикладати розподілене навантаження близько 0,2 МПа на період полімеризації клею, яка проводиться або при кімнатній температурі, або в термостаті.

На рис. 6.8 приведені схеми просвічування оптично чутливого покриття.

ОЧП можна отримати шляхом заливки компаунда і подальшою його полімеризацією безпосередньо на поверхню, що вивчається. Необхідно враховувати, що п'єзооптичний ефект буде пропорційним подвоєній товщині матеріалу, оскільки промінь світла проходить через покриття двічі.

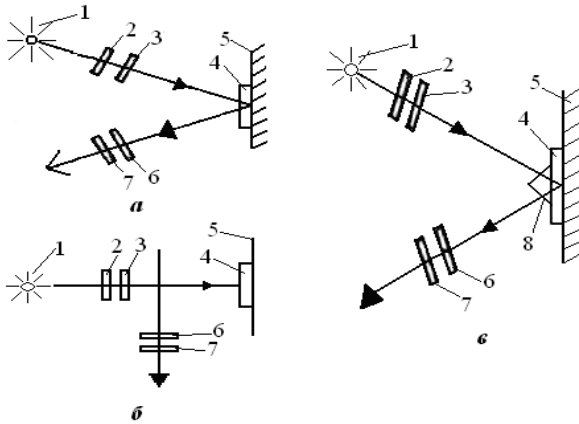
Підкріплюючий вплив ОЧП. При навантаженні зразка з ОЧП частина навантаження сприймається покриттям, тобто воно посилює (підкріплює) досліджуваний зразок. У багатьох випадках можна оцінити цей ефект і встановити поправочні коефіцієнти.

Розглянемо два елементарні паралелепіеди, що вирізані з однієї і тієї ж точки тіла і знаходяться в умовах

плаского напруженого стану, на одному з яких є покриття (див. рис. 6.7). Прирівнюючи сили, що діють на ці елементи у напрямку осей x і y , отримаємо:

$$\sigma_x^M = (\sigma_x^M)_* + \frac{h_n}{h_M} \sigma_x^{\Pi}; \quad (6.30)$$

$$\sigma_n^M = (\sigma_n^M)_* + \frac{h_n}{h_M} \sigma_n^{\Pi}. \quad (6.31)$$



a – V -подібна схема; $б$ – T -подібна схема; $в$ – нахилена схема; 1 – джерело світла; 2 – поляризатор; 3 і 6 – чвертьхвильові пластинки; 4 – покриття; 5 – досліджувана поверхня; 7 – аналізатор; 8 – призма

Рисунок 6.8 – Схеми просвічування оптично чутливого покриття

Вважаючи, що виконуються співвідношення (6.30) і (6.31), і використовуючи закон Гука, після нескладних перетворень матимемо:

$$\varepsilon_x^M - \varepsilon_y^M = K(\varepsilon_x^{\Pi} - \varepsilon_y^{\Pi}), \quad (6.32)$$

де K – поправочний коефіцієнт, який враховує підкріплюючі дії покриття, що дорівнює:

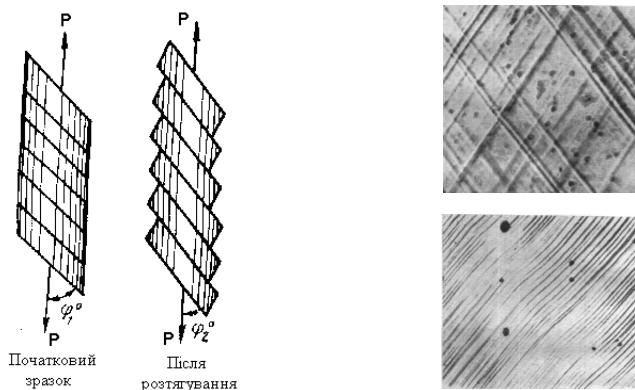
$$K = 1 + \frac{h_{II} E^{II} (1 + \mu_M)}{h_M E^M (1 + \mu_{II})}.$$

Питання для самоконтролю

1. Поясніть сутність методу ліній ковзання.
2. Поясніть сутність методу крихких покриттів.
3. В чому полягає сутність теорії Мору?
4. В чому сутність теорії максимальних відносних деформацій?
5. Поясніть сутність теорії максимальних нормальних напружень.
6. Наведіть методику тарирування крихких покриттів.
7. Наведіть порядок проведення експерименту при використанні методу крихких покриттів.
8. Які матеріали покриттів використовують для застосування у методі крихких покриттів.
9. Поясніть основні картини тріщин, що виникають при застосуванні методу крихких покриттів, їх зв'язок з напруженнями.
10. Наведіть основні положення методу визначення напружено-деформованого стану за вимірюванням твердості.
11. Як будують тарирувальну залежність у методі вимірювання твердості.
12. Поясніть сутність мікроструктурного методу.
13. Поясніть сутність методу оптично чутливих (фотопружних) покриттів.
14. Наведіть методику проведення експерименту при використанні методу оптично чутливих покриттів.

Додаток Е

Е.1 Метод ліній ковзання



[<http://mrmarker.ru/p/page.php?id=4168>]

Поява площин зсуву при розтягування монокристалів металу та зафіксовані на шліфованій поверхні лінії ковзання

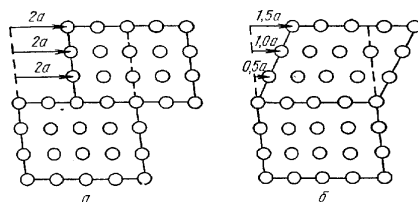
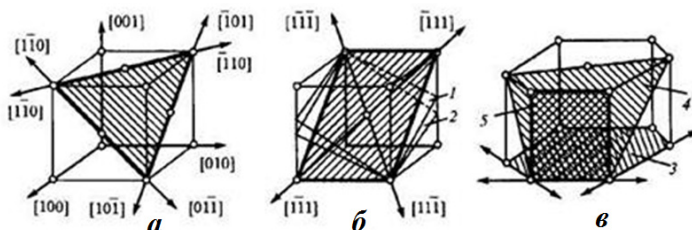
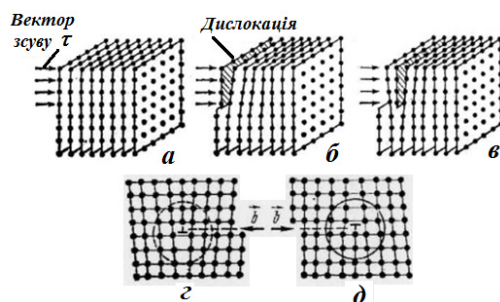


Схема зміщення атомів при ковзанні (а) і двійникуванні (б)

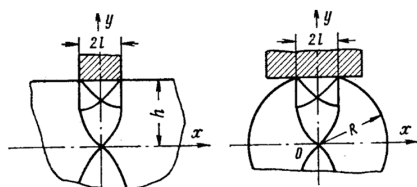


[<http://metal-archive.ru/metallovedenie/680-zavisimost-svoystv-mono-i-polikristallov-ot-napravleniya.html>]

Системи ковзання в металах з ГЦК (а), ОЦК (б) та ГЦУ (в) ґратками і площини найбільш легкого ковзання

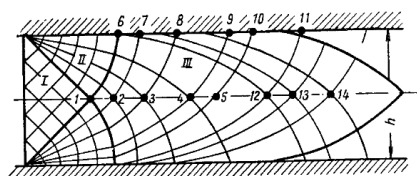


Крайові дислокації: a , b , $в$ – зсуви, що створюють крайову дислокацію; $г$ – позитивна дислокація; $д$ – негативна дислокація

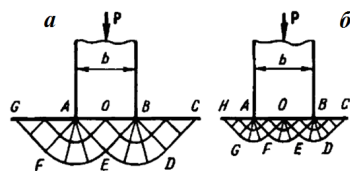


[<https://mash-xxl.info/page/210201079017076161011207225127224162120181196100>]

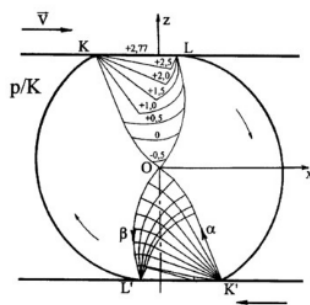
Лінії ковзання при куванні штаби вузькими бойками та при радіальному осаджуванні круглої заготовки



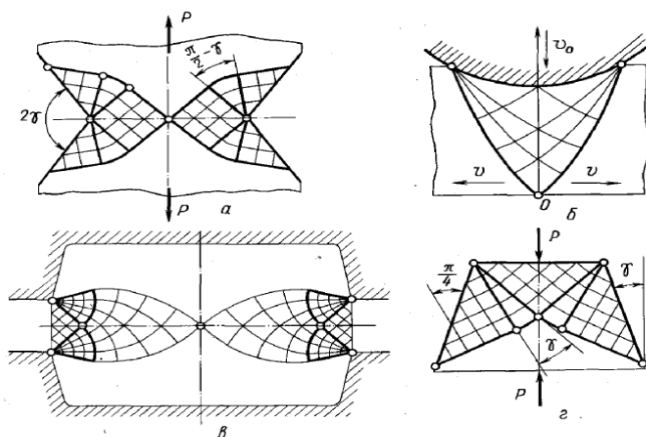
Лінії ковзання при осаджуванні прямокутної заготовки з великим відношенням поперечного розміру до висоти



Можливе утворення сітки ліній ковзання при вдавлюванні пуансону у заготовку за Л. Прандтлем (а) та Р. Хіллом (б) (Кучеряєв Б.В.)



Утворення сітки ліній ковзання при прокатці круглої заготовки у плитях



Приклади сіток ліній ковзання: *a* – розтягування зразка з вирізом; *б* – вдавлювання пуансону; *в* – початок плинину металу в проміжок між штампами (за Л.А. Шофманом); *г* – стискання тупого клину (Аркуліс Г.Е. та ін.)

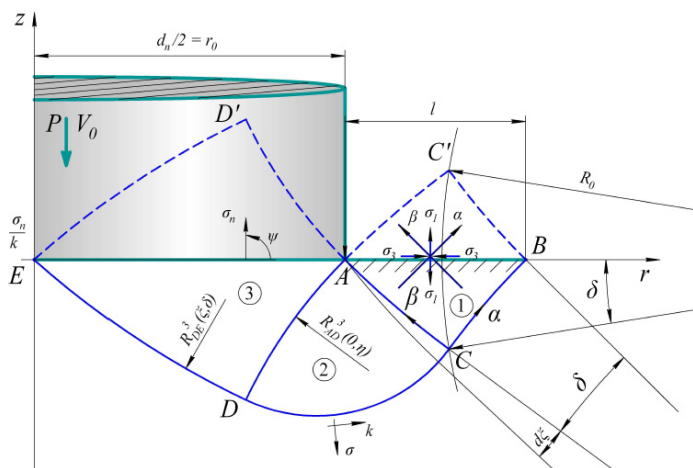
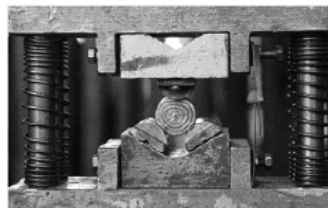
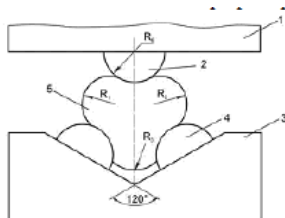


Схема процесу і побудова поля ліній ковзання при початковому втискуванні гладкого плоского циліндричного штампу в жорстко пластичний на півпростір (Г.В. Панфілов, С.В. Недошивін, Д.А. Пермінов)

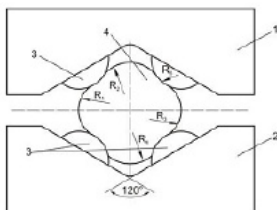


а – схема процесу

б – фото процесу

Схема обтискання круглої заготовки комбінованими профільованими бойками:

1 – бойок верхній вирізний, 2 – вставка опукла верхня, 3 – бойок вирізний нижній, 4 – дві опуклі вставки, 5 – заготовка
(Каргін С.Б., Каргін Б.С., Кухар В.В.)



а – схема процесу

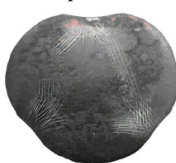
б – фото процесу

Схема обтискання круглої заготовки вирізними профільованими бойками:

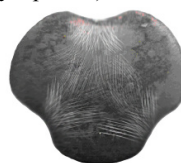
1 – бойок верхній вирізний, 2 – бойок нижній вирізний,
3 – чотири опуклі вставки, 4 – заготовка
(Каргін С.Б., Каргін Б.С., Кухар В.В.)



а) $\varepsilon \approx 7\%$;



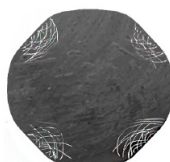
б) $\varepsilon \approx 14\%$;



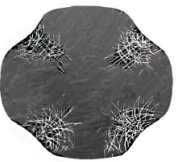
в) $\varepsilon \approx 21\%$

Фізичні поля ліній ковзання при обтисканні круглої заготовки профільованими комбінованими бойками с різною мірою деформації

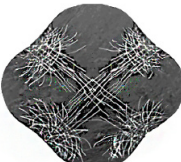
(Каргін С.Б., Каргін Б.С., Кухар В.В.)



а) $\varepsilon \approx 7\%$;



б) $\varepsilon \approx 14\%$;

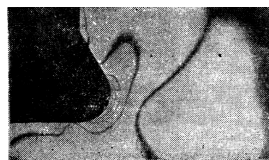
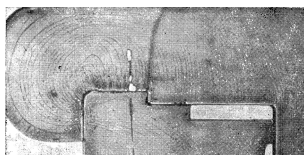
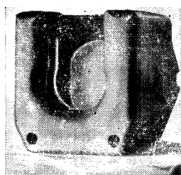


в) $\varepsilon \approx 21\%$

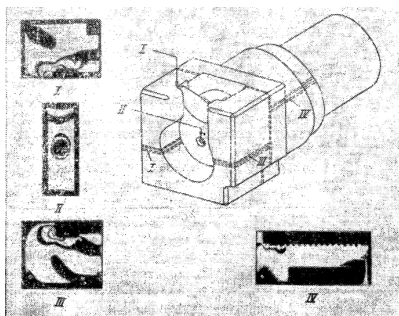
Фізичні поля ліній ковзання при обтисканні круглої заготовки вирізними профільованими бойками с різною мірою деформації

(Каргін С.Б., Каргін Б.С., Кухар В.В.)

Е.2 Метод крихких покриттів



Результати дослідження конструкції казенника способом крихких покриттів (Б'юкс, 1949 р.)



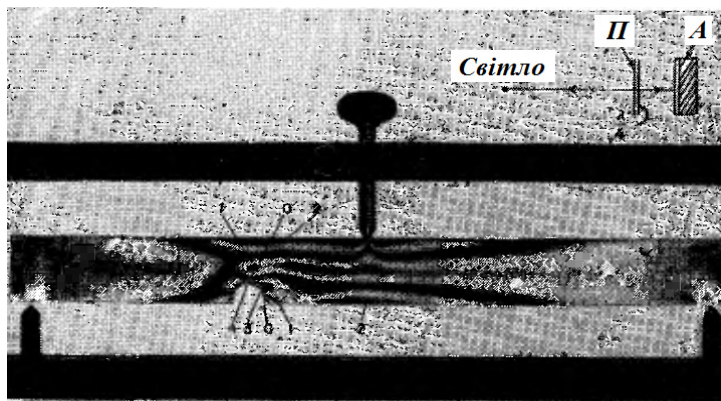
Результати дослідження розподілу напруги у радіусі переходу казенника методом фотопружних покриттів (Б'юкс, 1949 р.)

Результати дослідження (Пурд'є, 1954 р.) різних ділянок казенника методом тривимірних фотопружних покриттів.

Цифрами зазначений порядок інтерференційних смуг.

Відношення напруги до внутрішнього тиску дорівнює 2,65 для радіусу переходу першого гребінця конічного різьблення на зрізі

Е.3 Метод оптично-чутливих покриттів



[<https://mash-xxl.info/page/169054215045033032144169246200096161228060077111>]

Картина ізохром, яка була створена при оптично чутливому покритті (товщиною 3,2 мм з епоксидної смоли), приклеєному на алюмінієву балку А (цифрами позначені порядки смуг інтерференції); П – поляризатор-аналізатор

7 ОСНОВИ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Первинні експериментальні дані, як правило, не можуть бути використані безпосередньо для аналізу напружень і деформацій, що виникають в інструменті і металі при обробці металів тиском. У зв'язку з цим з'являється необхідність обробки дослідних даних, що пов'язано з проблемами інтерполяції, диференціювання і інтегрування функції, значення якої відомі з експерименту з деякою похибкою. При цьому найбільш «примхливою» операцією є знаходження похідних функцій; це обумовлено тим, що процес диференціювання є розбіжним (нестійким) і тому навіть невеликі помилки у вихідних даних приводять до істотних похибок при обчислюванні похідних. Операція інтегрування дослідних даних зустрічається значно рідше, є менш чутливою до похибок первинної інформації і тому в подальшому не розглядається.

7.1 Способи обробки дослідних даних

Одночасно з появою перших робіт, присвячених експериментальному вивченню процесів пластичної формозміни, виникла проблема обробки дослідних даних. У роботах вітчизняних і зарубіжних вчених в області математики і механіки твердого тіла, що деформується запропоновано багато різноманітних способів інтерполяції і диференціювання експериментальних даних. На рис. 7.1 дана класифікація основних способів обробки дослідних даних, у розвитку яких можна виділити кілька етапів.

Спочатку найбільшого поширення набули графічні способи, засновані на чисто геометричних побудовах і вимірюваннях. Надалі були запропоновані графоаналітичні

методи, трудомісткість яких знижувалася завдяки розумному поєднанню нескладних графічних побудов і найпростіших математичних операцій. Прогрес, досягнутий в області обчислювальної техніки, стимулював активну розробку і використання аналітичних методів обробки дослідних даних, що в даний час призвело не тільки до стирання граней між теоретичними і експериментальними методами, а й до створення нових експериментально-теоретичних методів вирішення завдань.

Експериментальні способи обробки, деякі з яких описані в попередніх розділах, є порівняно новими і їх поява стала можливою завдяки розвитку техніки і методики проведення експериментальних робіт. Мабуть, в деяких випадках доцільно використовувати комбіновані способи обробки: експериментально-графічний, експериментально-аналітичний та експериментально-графо-аналітичний.

Найбільш поширені варіанти трьох основних способів обробки дослідних даних:

1. Графічного:

- а) вимірювання кута нахилу дотичної;
- б) вимірювання кута нахилу нормалі;
- в) вимірювання відстані між зсунутими кривими;

2. Аналітичного:

- а) інтерполяція поліномами;
- б) найменші квадрати (апроксимація по всіх точках);
- в) локальна апроксимація;
- г) регуляризація;

3. Експериментального:

- а) муар від муару;
- б) механічні зсуви копій решітки;
- в) механічні зсуви зображень решітки.

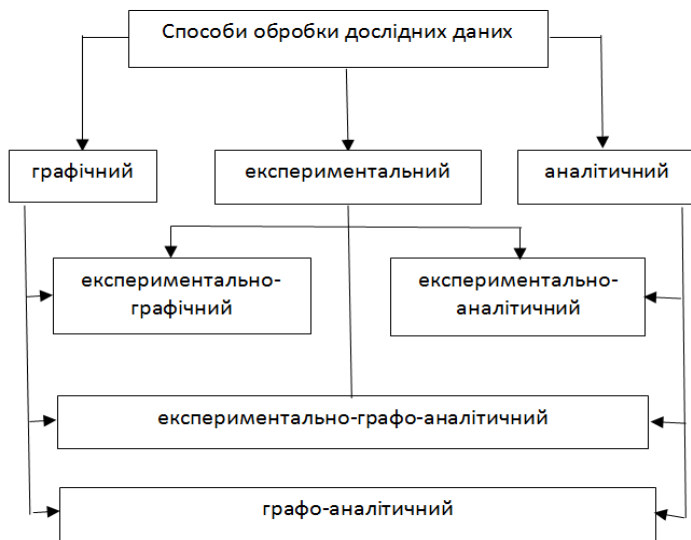


Рисунок 7.1 – Класифікація способів обробки дослідних даних

При обробці дослідних даних важливо вміти оцінювати похибку отриманого результату, яка обумовлена наступними причинами. По-перше, вихідні числові дані, з якими проводяться обчислення, отримані з експерименту і, отже, неточні, тому що будь-які вимірювання неминуче супроводжуються похибками. В силу цього завдання не може бути вирішено точно і виникає помилка – фатальна помилка. По-друге, наближені вихідні дані будуть піддаватися не тим операціям, які потрібні для виконання завдання, а псевдоопераціям, оскільки при обчисленні (навіть на ЕОМ) можна використовувати обмежене число розрядів. Виникає нова помилка – похибка округлення (наприклад, при множенні і діленні, при використанні ірраціональних чисел і таке інше). Нарешті, у багатьох випадках існуючі методи розв'язання задач можуть дати точну відповідь тільки після

нескінченного числа кроків. Через те, що на практиці доводиться обмежуватися кінцевим числом кроків, задана задача, фактично, замінюється іншою, і тому отримане рішення буде відрізнятися від точного рішення вихідної задачі; з'являється третій вид помилки – похибка методу.

Нехай потрібно вирішувати задачу: $y = \Phi(x)$. Щоб ця задача могла бути вирішена чисельно, необхідно привести її до виду $y_1 = \Phi_1(x)$. Далі, через неточності початкових даних і в результаті заокруглень, фактично вирішується завдання $y_2 = \Phi_2(x)$. Повну похибку, що складається з трьох видів похибок, можна записати таким чином:

$$y - y_2 = (y - y_1) + (y_1 - y_2).$$

У цьому рівнянні перша з дужок дає похибку методу. Друга дужка визначає вплив непереборної похибки і похибки округлення і називається обчислювальною похибкою. Оскільки на кожному кроці обчислювального процесу обчислювальна похибка складається з непереборної похибки і похибки округлення, то при складанні програми бажано процес вести так, щоб одні похибки округлення компенсували інші. При аналізі обчислювальної похибки необхідно враховувати структуру функцій Φ_1 і Φ_2 , тому що величина похибки округлення істотно залежить від послідовності операцій над числами. Вплив цих похибок на точність результату може виявитися значним навіть при не дуже складних обчисленнях.

Різниця між точним значенням деякої величини X і її наближеним значенням x , з яким проводиться обчислення, називається абсолютною похибкою: $A(x) = X - x$. Абсолютна похибка є однією з характеристик точності числа, і межі її зміни визначаються способом віднімання близьких за величиною чисел. Іноді це вдається зробити деяким перетворенням розрахункових формул або заміною

віднімання близьких чисел безпосередніми вимірюваннями: наприклад, при експериментальному дослідженні явища випередження замість реєстрації швидкостей валка і металу, що прокатується. окремо доцільно вимірювати різницю цих швидкостей.

При роботі з наближеними величинами, якими завжди є результати вимірювань, доводиться вирішувати такі основні завдання:

1) давати математичні характеристики точності наближених величин;

2) оцінювати точність результату при відомій точності вихідних даних;

3) знаходити точність вихідних даних, що забезпечують задану точність результату;

4) узгоджувати точність різних вихідних даних, щоб не витратити зайвої роботи при вимірюванні або обчисленні одних даних, якщо інші дані занадто грубі;

5) стежити в процесі обчислень за точністю проміжних результатів, щоб, з одного боку, забезпечити необхідну точність остаточного результату і, з іншого боку, по можливості спростити обчислення.

Останні два пункти мають важливе значення при експериментальних дослідженнях. Нехай, наприклад, при вивченні напружено-деформованого стану в прокатних валках за допомогою поляризаційно-оптичного методу крок інтегрування складає 1 см. З огляду на те, що похибка вимірювання координати становить $\pm 0,03$ см, і що на одному кроці порядок ізохром буде змінюватися приблизно на дві одиниці, визначення порядку ізохром необхідно проводити теж з точністю близько 5 %, або $\pm 0,10$ смуги. Тому можна відмовитися від точного, але малопродуктивного способу компенсації для вимірювання порядку смуги на користь більш простого способу інтерполяції смуг. Далі, визначення порядку ізоклін по

фотографіях можливо з точністю $\pm 2^\circ$, тому знаходити по таблиці і використовувати в обчисленнях значення синусів і косинусів більш ніж з трьома знаками після коми явно недоцільно.

7.1.1 Графічні способи обробки

Будь-яка функція, що представлена у вигляді графіка, може бути продиференційована графічно. Наприклад, в методі муар залежності переміщень від координат отримують з'єднанням плавною лінією точок, що утворюються в результаті перетинання вибраних перерізів з муаровими смугами, а тангенси кутів нахилу дотичної в кожній точці цих графіків дають значення відповідних частинних похідних. При безпосередньому вимірюванні кута з абсолютною похибкою $\pm A(\varphi)$ значення тангенса, тобто величина похідної, буде визначатися з відносною похибкою:

$$O(tg\varphi) = \frac{A(tg\varphi)}{tg\varphi} = \frac{tg[\varphi + A(\varphi)] - tg\varphi}{tg\varphi}. \quad (7.1)$$

На рис. 7.2 наведені графіки зміни відносної похибки визначення величини похідної в залежності від кута нахилу дотичній φ при різній точності вимірювання цього кута $\pm A(\varphi)$; з графіків, зокрема, випливає, що найбільш точні результати отримуються при вимірюванні кутів в межах від 20 до 70° і значне збільшення помилок спостерігається поза цього діапазону.

Замість кута φ нахилу дотичної можна вимірювати кут ψ нахилу нормалі; похибка у величині похідної також визначається наведеною вище формулою. Для більш акуратного знаходження положення нормалі і дотичної рекомендується застосовувати пласке дзеркало (дзеркальну

лінійку), яке можна досить точно встановити на кресленні перпендикулярно дотичній у цій точці шляхом поєднання кривої та її зображення в безперервну гладку лінію.

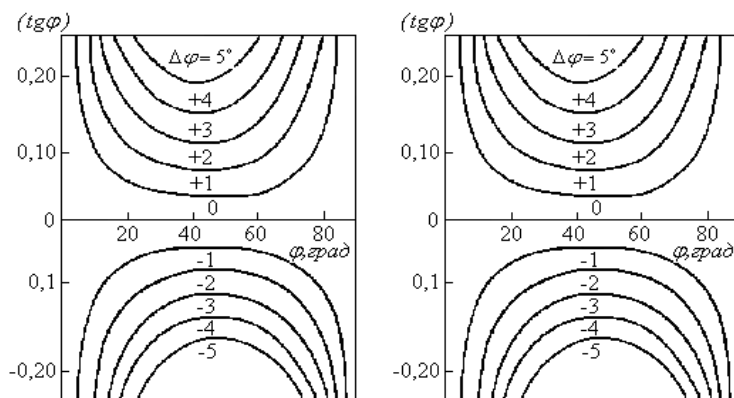


Рисунок 7.2 – Оцінка точності графічного способу

Тангенс кута нахилу дотичної часто обчислюють шляхом ділення значення функції в даній точці на довжину відрізка, що дорівнює відстані між координатою цієї точки і точки перетину дотичної з віссю абсцис. Недоліком цього способу є значне збільшення розмірів креслення при малих кутах нахилу. Більш зручно отримувати ординати $v(x)$, якщо $tg\varphi$ представити у вигляді відношення катетів прямокутного трикутника з постійною основою, довжина якої дорівнює s . Графічне диференціювання можна здійснити методом січних (хорд), який аналогічний методу дотичних, якщо все дотичні замінити хордами.

Якщо графік $v(x)$ розбити рядом вертикальних прямих на рівні інтервали і з початку кожного інтервалу на кривій провести горизонталь до перетину її з наступною вертикаллю, то, як неважко бачити, прирощенню функції Δv на кожній ділянці будуть відповідати пропорційні величині похідної в середній точці інтервалу.

Безсумнівний інтерес представляє наступний спосіб, який є, фактично, геометричною інтерпретацією інтерполяційного методу. Ідея методу полягає в тому, що побудований графік зсувається відносно самого себе на невелику відстань Δx (рис. 7.3).

Оскільки величина зсуву постійна для всього графіка, то різниця між двома кривими Δv відповідає величині похідної в деякому масштабі. Якщо $\Delta v / \Delta x$ відносити до початкового або кінцевого стану кривої, то ця величина буде наближеним виразом першої похідної, а її похибка еквівалентна похибці інтерполяційної формули при апроксимації поліномом першого ступеня. Якщо величина $\Delta v / \Delta x$ розглядається як наближене значення першої похідної для середнього положення зсунутої кривої, то відношення $\Delta v / \Delta x$ адекватно результату обчислень для центральної точки при апроксимації поліномом другого ступеня.

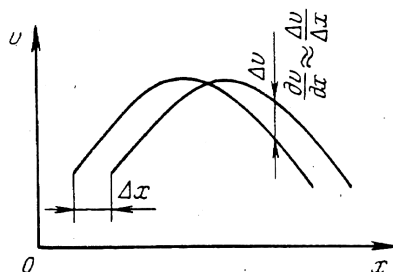


Рисунок 7.3 – Визначення похідних способом зсуву кривої

В цілому застосування способів, які вимагають численних графічних побудов, для обробки даних експериментальних методів механіки твердого тіла, що деформується має значною мірою історичний характер і недоцільно не тільки тому, що їх точність багато в чому залежить від кваліфікації та індивідуальних схильностей експериментатора, але головним чином тому, що вони

досить трудомісткі, громіздкі і погано піддаються автоматизації. Однак, графічні способи виявляються корисними з огляду на їх простоту і наочність.

7.1.2 Аналітичні способи

Класичний підхід чисельного аналізу полягає в тому, щоб використовувати деякі вузли функції для отримання наближеного поліному і потім виконати аналітичну операцію (інтерполювання, диференціювання, інтегрування тощо) над цим поліномом. Цей процес може бути названий «аналітичною заміною», так як та функція, яку неможливо обробити, замінюється іншою функцією, над якою вже можна виконувати необхідні операції. Зазвичай остаточний результат виявляється лінійною комбінацією значень функцій і (або) їх похідних в початкових вузлах.

Інтерполяція поліномами. При обробці експериментальної інформації часто доводиться мати справу з функціями $\Phi(x)$, заданими таблицями деякої кінцевої безлічі значень x_p . У процесі виконання завдання необхідно використовувати значення $\Phi_p = \Phi(x_p)$ для проміжних значень аргументу. В цьому випадку будують функцію $\varphi(x)$, досить просту для обчислення, яка в заданих точках x_p приймає задані значення Φ_p , а в інших точках області наближено представляє функцію $\Phi(x)$ з тим або іншим ступенем точності. Надалі при вирішенні завдання замість функції $\Phi(x)$ оперують функцією $\varphi(x)$ – побудова такої функції $\varphi(x)$ називається інтерполяцією. Так як з поліномами легко поводитися і теорія їх розвинена краще, велика частина класичного чисельного аналізу ґрунтується на наближеннях поліномами.

Оскільки в якості апроксимуючої функції з точки зору математичного узгодження найкраще вибирати

ламану лінію, то нерідко при знаходженні проміжних значень експериментально отриманої функції $\Phi(x)$ вдаються до лінійної інтерполяції. Такий спосіб наближення має в своїй основі гіпотезу, що на невеликих відрізках зміни аргументу функція може бути досить добре наближена за допомогою прямої лінії. У цьому випадку розрахункова формула має такий вигляд:

$$\varphi(x) = A_0 + A_1x = \Phi_p + \frac{\Phi_{p+1} - \Phi_p}{x_{p+1} - x_p}(x - x_p). \quad (7.2)$$

У загальному випадку поліном

$$\varphi(x) = A_0 + A_1x + \dots + A_mx^m = \sum_m A_mx^m$$

має $(m + 1)$ коефіцієнт, і тому для визначення коефіцієнтів A_m необхідно накласти $(m + 1)$ умов на цей поліном. Зокрема, можна зажадати, щоб він проходив через $(m + 1)$ точку, що означає виконання умов

$$\varphi(x_p) = \sum_m A_mx_p^m, p = 1, 2, \dots, (m + 1). \quad (7.3)$$

Ця система рівнянь завжди має рішення, і її можна вирішити одним з відомих методів вищої алгебри. Отриманий таким чином інтерполяційний поліном може бути представлений у вигляді різних за зовнішнім виглядом формул: розділених, правих, лівих і центральних різниць; поліномів Грама, Лагранжа, Ньютона і т.і.

Розглянемо питання корекції вихідних даних і вибору ступеня апроксимуючого поліному для випадку, коли експериментальні значення деякої функції $\Phi(x)$ задані в точках x_p з постійним кроком $\Delta x = H$. Назвемо кінцевими різницями першого порядку наступні величини:

$$\Delta^1\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_0; \Delta^1\Phi_1 = \Phi_2 - \Phi_1 \dots$$

З різниць першого порядку можна утворити кінцеві різниці другого порядку:

$$\Delta^2\Phi_0 = \Delta^1\Phi_1 - \Delta^1\Phi_0; \Delta^2\Phi_1 = \Delta^1\Phi_2 - \Delta^1\Phi_1 \dots$$

Аналогічно визначаються різниці третього і більш високого порядку. Для зручності їх зазвичай розташовують в таблицю різниць (табл. 7.1 та 7.2).

Кінцеві різниці m -го порядку від поліному ступеня m постійні, а різниці більш високого порядку дорівнюють нулю (табл. 7.1).

Таблиця 7.1 – Таблиця різниць для функції $\Phi = x^4$

x	Φ	$\Delta_1\Phi$	$\Delta_2\Phi$	$\Delta_3\Phi$	$\Delta_4\Phi$	$\Delta_5\Phi$
0	0					
		1				
1	1		14			
		15		36		
2	16		50		24	
		65		60		0
3	81		110		24	
4	256		194		24	
				108		
5	625		302			
		369				
6	1296					

Таким чином, якби значення функції в таблиці різниць були б значеннями поліному m -го порядку, то його різниці, починаючи з $(m + 1)$ -го порядку, повинні були б

звернутися в нуль, а то, що залишилося б у таблиці різниць, було б наслідком «шуму». Труднощі полягають у тому, що функція не обов'язково повинна бути поліномом; більш того, якщо навіть ця функція є поліномом, то заздалегідь невідома його ступінь і тому незрозуміло, якого порядку різниці потрібно взяти. На практиці в сприятливих випадках різниці мають тенденцію спочатку зменшуватися за величиною, а потім збільшуватися, одночасно відчувуючи стійку тенденцію чергувати знаки. В цьому випадку зазвичай вважають, що перший стовпець різниць, наступний за мінімальним, існує внаслідок шуму.

Сильна негативна кореляція у послідовних різницях високого порядку дає можливість виявити окремі помилки у таблиці. Табл. 7.2 показує, як єдина помилка, що дорівнює E , для функції $\Phi(x) = 0$ поширюється у таблиці різниць.

Таблиця 7.2 – Поширення помилки в таблиці різниць

x	Φ	$\Delta_1\Phi$	$\Delta_2\Phi$	$\Delta_3\Phi$	$\Delta_4\Phi$	$\Delta_5\Phi$	$\Delta_6\Phi$
x_{p-3}	0		0		0		E
		0		0		E	
x_{p-2}	0		0		E		-6E
		0		E		-5E	
x_{p-1}	0		E		-4E		15E
		E		-3E		10E	
x_p	E		-2E		6E		-20E
		-E		3E		-10E	
x_{p+1}	0		E		-4E		15E
		0		-E		5E	
x_{p+2}	0		0		E		-6E
		0		0		-E	
x_{p+3}	0		0		0		-E

7.1.3 Чисельне диференціювання

До чисельного диференціювання доводиться вдаватися в тому випадку, коли функція $\Phi(x)$, для якої потрібно знайти похідну, задана таблицею або її аналітичний вираз має вельми складний вид. У першому випадку, який повністю належить до отриманих дослідним шляхом даних, методи диференціального обчислення безпосередньо незастосовні, і тому замість функції $\Phi(x)$ розглядають інтерполювання функцію $Y(x)$, тобто:

$$\Phi(x) = Y(x) + \mathcal{E}(x), \quad (7.4)$$

де $\mathcal{E}(x)$ – залишковий член інтерполяційної формули.

Диференціюючи цю рівність, матимемо:

$$\Phi^{(k)}(x) = Y^{(k)}(x) + \mathcal{E}^{(k)}(x). \quad (7.5)$$

Оскільки за наближене значення похідної функції $\Phi^{(k)}(x)$ приймають $Y^{(k)}(x)$, то похибка від такої заміни дорівнює $\mathcal{E}^{(k)}(x)$.

При побудові інтерполюючої функції $Y(x)$ допускається, що залишковий член $\mathcal{E}(x)$ малий, проте з цього не випливає, що мала і похідна $\mathcal{E}^{(k)}(x)$, так як похідні від малої функції можуть бути вельми великі. Досвід показує, що формули чисельного диференціювання, в основі яких лежить інтерполювання за допомогою алгебраїчних поліномів, мають порівняно велику похибку і, мабуть, обчислення значень похідних другого порядку є практичним межею цього способу.

Для обробки експериментальних даних зручніше використовувати формули чисельного диференціювання, виражені безпосередньо через значення функції.

Найчастіше використовують формули при $m = 2$, так як вони мають порівняно простий вид і дають досить надійні значення перших похідних.

Чисельне диференціювання детермінованих змінних передбачає обчислення $d\Phi/dx$ або вищих похідних при деякому довільному значенні незалежної змінної x , збільшення кроку до 0,25 призводить до зростання похибки на 5 %, але в той же час до зниження числа вимірювань у 2,5 рази; зменшення кроку до 0,04 не приводить до якого-небудь підвищення точності вимірювань і тому недоцільно, оскільки призводить значного зростання первинної інформації. Представлені дані дозволяють вирішувати і зворотну задачу, тобто, який крок h необхідно мати, щоб забезпечити задану точність обчислення першої похідної. Нехай, наприклад, в розглянутому вище прикладі потрібно визначити похідну функцію горизонтального переміщення з точністю не нижче 5 %; тоді з графіка (див. рис. 7.4) знаходимо, що ця умова буде виконана, якщо $0,01 \leq n \leq 0,25$.

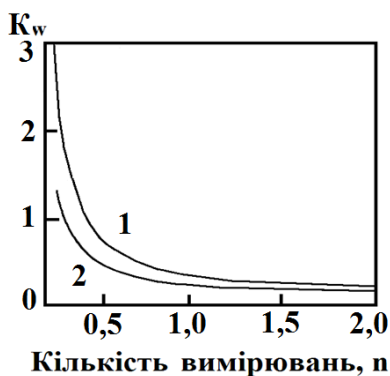


Рисунок 7.4 – Сумарна похибка Π обчислення першої похідної функції горизонтального переміщення за трьохточковою інтерполяційною формулою та її складові Π_1 і Π_2

Значення $n = 0,01$ недоцільно вибрати з-за різкого збільшення числа вимірювань; в той же час нераціонально

застосовувати $n = 0,025$, так як прийнята в обчисленнях найбільша величина третьої похідної є вельми наближеною і тому є небезпека «не помітити» вищі градієнти функції.

Таким чином, в даному випадку крок вимірювань, що рекомендується, лежить в межах $0,05 \leq n \leq 0,15$; остаточний вибір робиться експериментатором на основі додаткових відомостей: попередніх дослідів, аналізу літературних даних, вивчення технічних можливостей.

7.1.4 Метод найменших квадратів

Нехай задана функція $\Phi(x)$, відома своїми значеннями в кінцевому числі точок x_p . Аналітичну формулу $\varphi(x)$ для наближеного опису функції $\Phi(x)$ будемо шукати у вигляді суми добутків функцій $T_m(x)$, що залежать від координати x і коефіцієнтів A_m , тобто:

$$\varphi(x) = \sum_m A_m T_m(x). \quad (7.6)$$

Вид функцій $T_m(x)$ і кількість коефіцієнтів A_m іноді відомі з яких-небудь додаткових міркувань. Часто характер функціональної залежності може бути встановлений з графіка, побудованого за відомими значеннями функції $\Phi(x)$. Число коефіцієнтів і їх значення підбираються так, щоб отримана формула була досить проста і відповідала результатами спостережень; в деяких випадках можна рекомендувати отримання ряду функцій, що наближають, а також відображають поведінку функції $\Phi(x)$ в більш вузьких межах зміни координат.

Коефіцієнти A_m визначимо з умови, що сума квадратів помилок:

$$E = \sum_p \left\{ \Phi(x_p) - \sum_m A_m T_m(x_p) \right\}^2 = \sum_p \left\{ \Phi(x_p) - \varphi(x_p) \right\}^2, \quad (7.7)$$

що виникають при заміні функції $\Phi(x)$ на $\varphi(x)$ в розглянутих точках, була найменшою. Величина E є невід'ємною функцією коефіцієнтів A_m і, отже, завжди має мінімум. Звідси випливає, що коефіцієнти A_m задовольняють системі лінійних рівнянь:

$$\frac{\partial E}{\partial A_k} = 0, k = 1, 2, \dots, m,$$

або в розгорнутому вигляді:

$$\sum_m A_m \left\{ \sum_p T_m(x_p) T_k(x_p) \right\} = \sum_p \Phi(x_p) T_k(x_p). \quad (7.8)$$

Отримана система нормальних рівнянь справедлива і для випадку функції декількох змінних, якщо під x_p розуміти багатовимірний вектор, який визначає положення точки в багатовимірному просторі координат. Наприклад, для випадку двох змінних, який часто має місце на практиці, матимемо:

$$\sum_m A_m \left\{ \sum_i \sum_j T_m(x_i, x_j) T_k(x_i, x_j) \right\} = \sum_i \sum_j \Phi(x_i, x_j) T_k(x_i, x_j).$$

Незважаючи на те, що принципово задача вирішена, на практиці вирішувати систему нормальних рівнянь не так легко, тому що визначник системи часто буває вельми близький до нуля. Взагалі кажучи, коли число визначених коефіцієнтів не перевищує п'яти-шести, пряме рішення нормальних рівнянь прийнятно; але при більшому їх числі, швидше за все, зустрінуться труднощі. Щоб обійти труднощі рішення системи з дуже малим визначником,

доцільно в якості $T_m(x)$ вибирати ортогональні функції, що призводить до рівнянь, у яких всі члени поза головною діагоналлю рівні нулю. Класичною системою ортогональних функцій з періодом 2π є ряди Фур'є.

Застосуємо метод найменших квадратів для обробки експериментальних даних методу координатної сітки. Нехай в результаті вимірювань отримані координати вузлів сітки до деформування X_{ij} , Y_{ij} і після деформування x_{ij} , y_{ij} (i – номер стовпця, j – номер рядка діляльної сітки). Позначивши u – переміщення в напрямку осі x , а v – у напрямку осі y , отримаємо x і y :

$$u_{ij} = x_{ij} - X_{ij}; \quad v_{ij} = y_{ij} - Y_{ij}.$$

Збільшення числа муарових смуг збільшує точність обчислення похідних, однак ефективність цього впливу знижується, коли число смуг перевищує 10...15. Достатня точність забезпечується в разі, коли кожна з муарових картин містить не менше 10 смуг. Збільшення числа циклів згладжування значно покращує «гладкість» результатів, але призводить до збільшення помилки внаслідок спотворення вихідної інформації. Розрахунки показують, що трьох-чотирьох циклів згладжування в багатьох випадках цілком достатньо для значного зменшення шуму первинних даних при незначному зниженні точності. Результати обробки великого числа картин муару для процесів пластичної формозміни вказують, що похибки зазвичай не перевищують 5 %.

7.2 Статистична обробка результатів вимірювань

Основними завданнями статистичної обробки результатів випробувань є визначення середнього значення розглянутого параметра і оцінка точності його обчислення. Оскільки характеристики зазвичай вивчають шляхом

випробувань обмеженого числа зразків, то відповідні числові характеристики будуть відрізнятися від так званих генеральних характеристик, які могли бути отриманими від великого числа зразків. Обмежена сукупність зразків або результатів випробувань називається вибіркою. На практиці значення генеральних характеристик оцінюють з більшим або меншим ступенем точності за вибірковими (емпіричними) характеристиками, при цьому зазвичай приймають нормальний закон розподілу помилок.

Вибіркове середнє значення обчислюється за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (7.9)$$

де x_i – значення вимірюваної величини для i -го зразка;
 n – число випробуваних зразків (обсяг вибірки).

Очевидно, при збільшенні n величина $\bar{x}$ буде наближатися до істинного значення x .

Для оцінки випадкової похибки вимірювань найбільш часто використовують величину вибіркового середньоквадратичного відхилення або середньоквадратичної похибки (стандарт вимірювань):

$$\sigma \approx s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (7.10)$$

Строго кажучи, середньоквадратичної помилкою a називається межа, до якого прагне величина s при збільшенні числа вимірювань до нескінченності, тобто при $n \rightarrow \infty$. Вибіркові числові характеристики дають хороші кількісні оцінки для генеральних характеристик лише при великому обсязі вибірок; при обмежених обсягах випробувань необхідно вказати ступінь точності і

надійності таких оцінок. Нехай в результаті випробування $n \rightarrow \infty$. Зразків отримано середньоарифметичне значення $\bar{x}$. Позначимо через α ймовірність того, що величина відрізняється від істинного значення $\bar{x}$ на величину, меншу ніж Δx , тобто:

$$P(\bar{x} - \Delta x < \bar{x} < \bar{x} + \Delta x) = \alpha. \quad (7.11)$$

Ймовірність α називається довірчою ймовірністю, а інтервал значень випадкової величини від $\bar{x} - \Delta x$ до $\bar{x} + \Delta x$ називається довірчим інтервалом.

Ширина довірчого інтервалу характеризує точність, а довірна ймовірність – надійність оцінки невідомого параметра $\bar{x}$ за допомогою вибіркового середнього значення $\bar{x}$.

Природньо, що чим більше необхідна надійність, тим більше при тому ж обсязі вибірки повинен бути відповідний довірчий інтервал, і, навпаки, чим більше довірчий інтервал, тим більша ймовірність того, що результати вимірювань не вийдуть за його межі. При звичайних випробуваннях можна обмежитися довірчої ймовірністю 0,9 або 0,95.

Ширина довірчого інтервалу Δx для математичного очікування визначається числом вимірювань n , вибілковими значеннями $\bar{x}$, s і обчислюється за такою формулою:

$$\Delta x = \frac{s}{\sqrt{n}} t, \quad (7.12)$$

де t – коефіцієнт Стюдента, величина якого залежить від обсягу вибірки n і заданої довірчої ймовірності α (табл. 7.3).

Таблиця 7.3 – Залежність коефіцієнта Стьюдента від
обсягу вибірки n і заданої довірчої ймовірності

Кількість спостережень	Довірча ймовірність α					Кількість спостережень	Довірча ймовірність α				
	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99		0,50	0,90	0,95	0,98	0,99
2	1,00	6,31	12,71	31,82	63,66	10	0,70	1,84	2,26	2,76	3,25
3	0,82	2,92	4,30	6,96	9,92	15	0,69	1,76	2,14	2,60	2,98
4	0,77	2,35	3,18	4,54	5,84	20	0,69	1,73	2,09	2,53	2,86
5	0,74	2,13	2,78	3,75	4,60	30	0,68	1,70	2,04	2,46	2,76
6	0,73	2,01	2,57	3,65	4,03	60	0,68	1,67	2,00	2,39	2,66
7	0,72	1,94	2,45	3,14	3,71	120	0,68	1,66	1,98	2,36	2,62
8	0,71	1,90	2,36	2,97	3,50	∞	0,67	1,65	1,96	2,33	2,58
9	0,71	1,86	2,31	2,90	3,36						

7.3 Організація експерименту

Питання організації експериментальних досліджень процесів стають все більш актуальними, що пов'язано зі зростаючими вимогами до одержуваної інформації. Так як проведення досліджень у виробничих умовах не завжди можливо і економічно виправдано, то коректна постановка дослідів в лабораторних умовах повинна ґрунтуватися на законах теорій подібності і моделювання.

Процеси пластичної формозміни характеризуються складністю явищ, що здійснюються, а також залежать від геометричних і силових факторів, структурних особливостей, температури і т.і. Тому оптимальне проведення експерименту часто неможливо без використання сучасних статистичних методів. Експериментальні дослідження постійно ускладнюються і

їх реалізація стає скрутною без застосування сучасних методів планування, управління і контролю.

7.3.1 Постановка дослідження в зв'язку з особливостями процесів обробки металів тиском

Перш ніж приступити до проведення того чи іншого дослідження, необхідно провести інформаційний пошук, за результатами якого уточнюються основні чинники, що визначають закономірності даного процесу і вибирається методика проведення досліджень. Розглянемо деякі загальні питання постановки експериментальних досліджень, пов'язаних з особливостями вивчення пластичного формозміни.

Вибір методу. Для того щоб коректно вирішити поставлене завдання необхідно правильно вибрати експериментальний метод. У ряді випадків цьому питанню не приділяється належної уваги. Дослідники керуються або особистими схильностями, або поглядами, які склалися історично. Це призводить до отримання надлишкової або, навпаки, недостатньої інформації, подорожчання і ускладнення експерименту, а іноді і до помилкових результатів. Визначальним фактором при виборі методу є та експериментальна інформація, яку необхідно отримати.

Мета експерименту значною мірою зумовлює фізичний зміст результатів вимірювання, а це в свою чергу впливає на вибір методу. Так, якщо вивчається зміна геометричних параметрів процесу (наприклад, дуга захоплення при прокатці, витяжка і розширення при куванні і прокатці тощо), то доцільно отримувати первинні дослідні дані у вигляді переміщень, тому в даному випадку обґрунтовано застосування геометричних методів. Задачі про глибину проникнення пластичних деформацій, форму і розміри фактичного осередку деформацій, нерівномірності

розподілу тощо вимагають оцінки деформованого стану. Тут первинні експериментальні дані бажано отримувати у вигляді деформацій за допомогою поляризаційно-оптичного методу, який безпосередньо визначає різницю головних деформацій або геометричних методів, що дозволяють отримати частинні похідні переміщень по координатах. Поляризаційно-оптичний метод більш точний і наочний, але не може бути застосованим для вивчення ряду процесів, що протікають при підвищених температурах, вимагає використання спеціальної апаратури і матеріалів. Відзначимо, що якщо вихідна інформація отримана у вигляді переміщень, то точність визначення компонент деформованого стану знижується через наявність проміжних операцій диференціювання.

При аналізі міцності і пластичності в загальному випадку необхідно знати не тільки деформований, а й напружений стан. У пластичній області інформацію про напружений стан можна отримати за допомогою методів фотопластичності або вимірювання твердості при пружному деформуванні; хороші результати дають методи фотопружності та тензометрія. Використання інших експериментальних методів пов'язано, як правило, з введенням додаткових припущень і складною математичною обробкою, що призводить до отримання менш достовірних результатів.

Експериментальні методи дозволяють отримувати інформацію в різному вигляді. Деякі з них, наприклад, вимірювання твердості, координатна сітка, тензометрія, визначають значення вимірюваних параметрів в дискретній формі; за допомогою методу крихких покриттів, ліній ковзання, інтерферометрії, муару отримують безперервні поля відповідних параметрів і, нарешті, поляризаційно-оптичний метод, голографія дають можливість реєструвати інформацію як в дискретній, так і

в безперервній формі. Дослідні дані, одержувані в дискретному вигляді, як правило, реєструються з більшою точністю, але вони не дають наочного уявлення про розподіл вимірюваних величин. Практичне використання такої інформації пов'язане з великою кількістю вимірювань, що призводить до збільшення трудомісткості експерименту в цілому. Тому дискретні методи доцільно застосовувати для проведення прецизійних одиничних досліджень. Навпаки, при постановці масового експерименту краще мати дослідні дані у вигляді безперервних полів, так як вони дозволяють здійснити попередньо якісний аналіз процесу, не вдаючись до оброблення вихідної інформації. Це особливо важливо при вивченні динамічних і швидкоплинних процесів.

При постановці експерименту потрібно звернути увагу на раціональний вибір масштабу. Взагалі кажучи, бажано, щоб розміри були якомога більшими, так як при цьому спрощується процес виготовлення моделі і знижуються вимоги до абсолютної точності вимірювання. Але моделювання у збільшеному масштабі в багатьох випадках неможливо через порівняно великі розміри реальних металургійних об'єктів, крім того, потужність лабораторного обладнання і труднощі виготовлення зразків великого розміру значно обмежують вибір масштабу. Тому, зазвичай, користуються зменшеними моделями. Але слід мати на увазі, що при надмірному зменшенні масштабу зростають вимоги до точності вимірювання, утруднюється реалізація геометричної подоби і, в ряді випадків, процес у модельних умовах не може бути здійсненим. Практикою моделювання процесів встановлено, що оптимальні значення геометричного масштабу лежать в межах $1/3 \dots 1/10$.

7.3.2 Планування експерименту

При експериментальних дослідженнях важливу роль відіграють пошуки раціональної послідовності і обсягу отримання дослідних даних про параметри досліджуваного об'єкта. План експерименту бажано скласти так, щоб отримати максимум інформації при мінімальних затратах коштів і (або) часу. Розроблені в останні роки методи математичного планування експериментів дозволяють досить швидко і економно наблизитися до поставленої мети експерименту і спростити статистичну обробку результатів вимірювань. На відміну від традиційних «пасивних» статистичних методів математичне планування експерименту є активною процедурою, яка визначає досить жорстку схему проведення випробувань і аналізу отриманих даних. Відзначимо, що використання методів математичного планування досягає найбільшого ефекту тоді, коли завдання поставлене коректно, а відправні дані обрані раціонально, що залежить в першу чергу від кваліфікації і досвіду експериментатора.

Визначення числа дослідів. При постановці будь-якого дослідження перед експериментатором виникає альтернатива: з одного боку, для отримання достовірних результатів потрібно провести велику кількість дослідів, з другого боку, економія коштів і часу вимагають приведення мінімально можливої кількості випробувань. Вирішення цієї проблеми ґрунтується на гіпотезі і нормальному законі розподілу результатів вимірювань, розкид яких обумовлений неминучою похибкою вибраного експериментального методу і неоднорідністю властивостей досліджуваного об'єкта.

При проведенні експерименту отримуємо набір величин $x_1, \dots, x_n$, середньоарифметична яких визначається за формулою (7.9). Оскільки визначення величини

вибіркового середньоквадратичного відхилення S_n за формулою (7.10) достатньо громіздко, то при порівняно невеликому числі випробувань ($n < 20$) без великих похибок розрахунок величини S_n можна здійснити за допомогою простої формули:

$$S_n = W_n / d_n, \quad (7.13)$$

де $W_n = (x_n - x_l)$ – розмах варіювання, що дорівнює різниці крайніх значень вимірюваної величини x_i ;

d_n – коефіцієнт, що залежить від числа вимірювань n і знаходиться за даними, наведеними у табл. 7.4.

Таблиця 7.4 – Значення коефіцієнту d_n

n	d_n	n	d_n	n	d_n
2	1,128	8	2,847	14	3,407
3	1,693	9	2,970	15	3,427
4	2,059	10	3,078	16	3,532
5	2,326	11	3,173	17	3,588
6	2,534	12	3,258	18	3,640
7	2,704	13	3,336	19	3,689

Також можна спростити оцінку меж довірчих інтервалів середньоарифметичного значення:

$$\Delta x = k_w W_n,$$

де k_w – коефіцієнт, який залежить від рівня довірчої ймовірності α і його можна знайти за графіками рис. 7.5.

Відзначимо, що ці експрес-методи дають досить точні для практики, хоча і дещо завищені в порівнянні з класичними прийомами, значення оцінок параметрів.

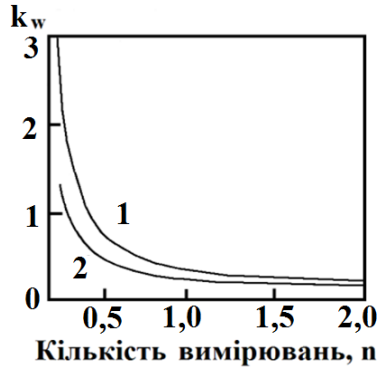


Рисунок 7.5 – Графіки зміни коефіцієнта k_w для рівня довірчої ймовірності $\alpha = 0,99$ (1) і $\alpha = 0,95$ (2)

Значення середньоарифметичної $\bar{x}$ величини, отриманої з обмеженого числа вимірювань n , є оцінкою істинного значення $\bar{x}_{icm}$ і тому, можна записати:

$$\bar{x}_{icm} = \bar{x}_n \pm \Delta x = \bar{x}_n \pm \frac{S_n t_{n-1}}{\sqrt{n}}, \quad (7.14)$$

де t_{n-1} – значення коефіцієнту Стюдента; t_{n-1} береться з табл. 7.3 для відповідної ймовірності α при числі вимірювань $(n - 1)$;

Δx – довірчий інтервал, на величину якого може відрізнитися справжнє значення $\bar{x}_{icm}$ від вибіркового $\bar{x}_n$ з ймовірністю α .

Наведені формули можна перетворити до вигляду, зручного для вирішення задачі про знаходження найменшої кількості випробувань, які будуть забезпечувати отримання середньоарифметичного значення із заданим максимально допустимим відхиленням $\bar{x}$ при певній ймовірності α .

Для цього необхідно провести попередні експерименти з меншим числом вимірювань m , щоб оцінити ступінь розкиду результатів експерименту. Тоді:

$$n = \left(\frac{S_m t_{m-1}}{\Delta \bar{x}} \right)^2 = \left(\frac{W_m t_{m-1}}{\alpha_m \Delta \bar{x}} \right)^2 = m \left(\frac{W_m k_W}{\Delta \bar{x}} \right)^2. \quad (7.15)$$

Достовірність, з якої можна оцінити число необхідних вимірювань n , залежить від точності визначення величини істинної середньоквадратичної помилки $S_{уст}$. Для довірчої ймовірності $a = 0,68$, якій відповідає довірчий інтервал, рівний $2S$, матимемо:

$$n = m \left[\frac{W_m k_W}{\Delta \bar{x}} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2n}} \right) \right]^2. \quad (7.16)$$

Ця формула дає можливість визначити необхідну кількість дослідів n , залежну від необхідної ймовірності a і від числа m попередніх випробувань.

Необхідна кількість планованих експериментів буде наступною:

$$n = \left(\frac{S_m t_{m-1}}{\Delta \bar{x}} \right)^2 \left(1 + \frac{1}{2m} + \frac{2}{\sqrt{m}} \right). \quad (7.16)$$

Обсяг попереднього і основного експериментів визначається конкретними умовами випробувань: так, при проведенні одноразового експерименту недоцільно витрачати час на велике число попередніх вимірювань; в той же час при проведенні масових однотипних випробувань збільшення кількості попередніх дослідів цілком виправдано. У будь-якому випадку оцінка необхідного числа експериментів має важливе практичне значення, так як дозволяє науково обґрунтовано вирішити

питання про трудові і матеріальні витрати, необхідні для проведення планованого експерименту.

Математичне планування експерименту. Наступним завданням планування експерименту є визначення кількості дослідів, які необхідні для виявлення залежності між досліджуваними змінними величинами, які змінюються експериментатором в процесі випробувань.

Коефіцієнти степеневого ряду β – це коефіцієнти регресії. Їх можна оцінити за допомогою вибіркового коефіцієнтів регресії, які визначають за результатами кінцевого числа дослідів. Тоді:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \dots \quad (7.17)$$

де y – вибіркова оцінка.

Повний факторний експеримент. Двофакторна лінійна модель:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 (+ b_{12} x_1 x_2); \quad (7.18)$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{N}, \quad (7.19)$$

де i, j – номери відповідно фактора і дослідів;
 N – загальне число дослідів.

Багатофакторний експеримент. При багатофакторному експерименті один фактор фіксують, а інші варіюють. Припускають аналітичний зв'язок між факторами і відгуком (рівнянням). Потрібно вибрати мінімальне число дослідів, що дозволяють знайти область оптимальних значень параметрів, тобто побудувати математичну модель процесу.

Математично треба знайти рівняння поверхні відгуку:

$$\eta = \omega(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

де η – параметр оптимізації;
 x_i – фактори, які впливають на η .

Для більшості завдань вид поверхні відгуку заздалегідь відомий, тому функцію η представляють у вигляді статистичного ряду:

$$\eta = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (7.20)$$

Питання для самоконтролю

1. Наведіть класифікацію способів обробки дослідних даних.

2. Які основні завдання переслідує робота з наближеними величинами?

3. Поясніть сутність графічного способу обробки дослідних даних.

4. В чому полягає сутність аналітичних способів обробки дослідних даних?

5. Поясніть методику чисельного диференціювання.

6. Поясніть сутність методу найменших квадратів.

7. Що є основними завданнями статистичної обробки результатів випробувань?

8. Які особливості організації експерименту при дослідженнях процесів ОМТ Ви знаєте?

9. Як визначити кількість дослідів, що потрібно проводити у експерименті?

10. В чому полягає сутність математичного планування експерименту.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

Основні

1. Чиченев Н. А. Методы исследования процессов обработки металлов давлением (экспериментальная механика) / Н. А. Чиченев, А. Б. Кудрин, П. И. Полухин. – М.: Металлургия, 1977. – 312 с.
2. Финк К. Измерение напряжений и деформаций. Перев. с нем. / К. Финк, Х. Рорбах. – М.: Машгиз, 1961. – 536 с.
3. Чекмарев А. П. Методы исследования процессов прокатки / А. П. Чекмарев, С. А. Ольдзиевский. – М.: Металлургия, 1989. – 296 с.
4. Меерович И. М. Измерение усилий при прокатке / И. М. Меерович, А. С. Филатов. – М.: Металлургиздат, 1993. – 227 с.
5. Напряжения и деформации в деталях и узлах машин / Под ред. Н. И. Пригоровского. – М.: Машгиз, 1991. – 564 с.
6. Блатнер М. Е. Методика исследования металлов и обработка опытных данных / Блатнер М. Е. – М.: Металлургиздат, 1972. – 444 с.
7. Измерения в промышленности. Справочник. Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
8. Боднер В. А. Измерительные приборы / В. А. Боднер, А. В. Алферов. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 223 с.
9. Методы неразрушающих испытаний. Пер. с англ. / Под ред. Р. Шарпа. – М.: Мир, 1992. – 495 с.
10. Унксов Е. П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением / Е. П. Унксов. – М.: Машгиз, 1975. – 280 с.
11. Теоретические основыковки и горячей штамповки / Е. М. Макушок и др. – Минск: Наука и техника, 1978. – 407 с.
12. Зябрева Н. Н. Лабораторные занятия по курсу «Основы технических измерений и взаимозаменяемости» / Н. Н. Зябрева, М. Я. Шегал. – М.: Машиностроение, 1986. – 348 с.
13. Ренне И. П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов

давлением с помощью делительной сетки / И. П. Рене. – Тула: НТО Машпром, 1980. – 164 с.

14. Кухарь В. В. Измерение технологических и энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением [Электронный ресурс] : курс лекций по дисциплине «Измерение технологических и энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением» для студентов направления подготовки 6.050401 «Металлургия» дневной и заочной формы обучения / В. В. Кухарь. – Мариуполь : ПГТУ, 2015. – 188 с. – Режим доступа: <http://umm.pstu.edu/handle/123456789/9137>.

15. Измерение технологических и энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением [Электронный ресурс] : методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Измерение технологических и энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением» для студентов специальностей 6.050401 и 7.05040104 «Обработка металлов давлением» / сост. В. В. Кухарь. – Мариуполь : ПГТУ, 2011. – 11 с. – Режим доступа: <http://umm.pstu.edu/handle/123456789/1543>.

16. Вимірювання технологічних і енергосилових параметрів у процесі обробки металів тиском [Електронний ресурс] : методичні вказівки з самостійного вивчення дисципліни «Вимірювання технологічних і енергосилових параметрів у процесі обробки металів тиском» для студентів напряму підготовки 6.050401 «Металургія та матеріалознавство» спеціальності 6.05040104 «Обробка металів тиском» денної, заочної та прискореної форм навчання / уклад. В. В. Кухарь, – Мариуполь : ПДТУ, 2016. – 19 с. – Режим доступа: <http://umm.pstu.edu/handle/123456789/9364>.

17. Чижииков Ю. М. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением / Ю. М. Чижииков. – Москва: Металлургия, 1970. – 296 с.

18. Шломчак Г. Г. Развитие поляризационно-оптического метода и новые экспериментальные решения / Г. Г. Шломчак, Т. И. Фирсова // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2000. – N 8–9. – С. 99–101.

19. Шломчак Г. Г. Основи наукових досліджень. Теорія експерименту в обробці металів тиском : Навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Г. Г. Шломчак; Нац. металург. акад. України. – Д. : Пороги, 2005. – 159 с.

20. Кучеряев Б. В. Механика сплошных сред / Б. В. Кучеряев. – Учебник для вузов. М.: МИСиС. 2000. – 320 с.

21. Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел (технологические задачи обработки давлением) / В. К. Воронцов, П. И. Полухин, В. А. Белевитин, В. В. Бринза – М.: Металлургия, 1990. – 480 с.

22. Смирнов-Аляев Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – М.: Машиностроение, 1972. – 360 с.

23. Воронцов В. К. Фотопластичность. Применение метода к исследованию процессов обработки металлов давлением / В. К. Воронцов, П. И. Полухин. – Москва: Металлургия, 1969. – 400 с.

24. Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел (технологические задачи обработки давлением) / Воронцов В. К., Полухин П. И., Белевитин В. А., Бринза В. В. – Москва: Металлургия, 1990. – 480 с.

25. Дель Г. Д., Новиков Н. А. Метод делительных сеток / Г. Д. Дель, Н. А. Новиков. – Москва, Машиностроение, 1979. – 144 с.

26. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Касаткин Б. С., Кудрин А. Б., Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Полухин П. И., Чиченев Н. А. – Киев: Наукова думка, 1981. – 584 с.

27. Кудрин А. Б. Голография и деформация металлов / Кудрин А. Б., Полухин П. И., Чиченев Н. А. – Москва: Металлургия, 1982. – 152 с.

28. Сухарев И. П. Исследования деформаций и напряжений методом муаровых полос / Сухарев И. П., Ушаков Б. Н. – Москва: Машиностроение, 1969. – 208 с.

29. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк; Пер. с англ. Е. Г. Коваленко; Под ред. Н. П. Бусленко. – М.: Мир, 1972. – 382 с.

30. Маслов В. Е. Экспериментальное исследование процессов обработки давлением. Учебное пособие для вузов / Маслов В. Е., Шаповал В. Н. – Киев: Вища школа, 1983. – 232 с.

Додаткові

31. Анализ пластического формоизменения в частных задачахковки и штамповки : монография / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, М. В. Краев, В. А. Бурко. – Мариуполь : изд-во ЗАО «Газета “Приазовский рабочий”», 2011. – 336 с. – ISBN 978-966-8208-78-2.

32. Тузенко О. А. Моделирование и анализ динамических процессов : учебное пособие / О. А. Тузенко, В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева. – Мариуполь : ПГТУ, 2016. – 157 с. – ISBN 978-966-604-190-9.

33. Кухарь В. В. Расчет напряжений в станинах кривошипных прессов открытого типа в условиях внецентренного приложения силы штамповки относительно оси ползуна [Раздел] / В. В. Кухарь, А. С. Анищенко, В. В. Глазко // Пластична деформація металів : колективна монографія. – Дніпро, 2017. – С. 271–281. – ISBN 978-966-291-124-8.

34. Кухарь В. В. Исследование деформаций станины кривошипного прессы открытого типа при работе с упругими компенсаторами погрешностей направления ползуна / В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева // Металлургические процессы и оборудование. – 2008. – № 4. – С. 30–34.

35. Кухарь В. В. Экспериментальное исследование напряжений в станине кривошипного прессы открытого типа при работе с упругими компенсаторами перекосов ползуна [Электронный ресурс] / В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії / ДДМА. – Краматорськ, 2008. – № 3Е (14). – С. 119–125.

36. Кухарь В. В. Смещенные объемы при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми плитами / В. В. Кухарь, В. А. Бурко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 177–182.

37. Кухарь В. В. Экспериментальные исследования раскрытия станины открытого кривошипного прессы при работе с упругими компенсаторами погрешностей системы пресс–

штамп / В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2008. – Вип. 10. – С. 167–172.

38. Каргин С. Б. Построение полей линий скольжения при протяжке круглой заготовки двумя профилированными бойками / С. Б. Каргин, В. В. Кухарь, В. Ф. Левандовский // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 3–9.

39. Кухарь В. В. Исследование процесса получения удлинённых изделий с концевым заострением продольным разрывом заготовок / В. В. Кухарь // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / НТУ «ХПІ». – Харків, 2011. – Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях, № 46. – С. 3–14.

40. Анализ процесса осадки заготовок коническими плитами методом смещённых объёмов / В. В. Кухарь, Р. В. Суглобов, Б. С. Каргин, Р. С. Николенко // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2012. – Вип. 14. – С. 63–66.

41. Тузенко О. А. Исследование математических моделей в планировании эксперимента методом сравнительного анализа / О. А. Тузенко, В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева, А. В. Дубинина // Вісник національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / НТУ «ХПІ». – Харків, 2013. – Темат. вип. : Інформатика та моделювання, № 39 (1012). – С. 182–187.

42. Кухарь В. В. Экспериментальное исследование распределения деформаций и напряжений в заготовке при различных режимах кузнечной протяжки с обкаткой в комбинированных бойках / В. В. Кухарь, О. В. Василевский // Пластическая деформация металлов, 2014. Научное издание = Plastic deformation of metals, 2014. Scientific edition. – Днепропетровск: НМетАУ, 2014. – Том 1 (Vol. 1). – С. 197–202.

43. Експериментально-розрахунковий аналіз розподілу висотних деформацій при осаджуванні заготовок випуклими бойками різного радіусу / Р. В. Суглобов, В. В. Кухар, О. О. Тузенко, В. А. Бурко // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія : Технічні науки. – Вінниця, 2014. – Випуск 1 (84). – С. 47–55.

44. Николенко Р. С. Применение пакета DEFORM 3D для анализа вариантов штамповки поковок типа «пластина с острым концом» / Р. С. Николенко, В. В. Кухарь // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. / СХУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2014. – № 1 (15). – С. 45–53

45. Применение статистических методов при обработке данных формоизменения заготовок с обкаткой в комбинированных бойках / Е. Ю. Балалаева, В. В. Кухарь, О. В. Василевский, О. А. Тузенко // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2014. – Серія : Технічні науки, Вип. 29. – С. 27–36.

46. Теоретическое определение параметров расчетной делительной сетки применительно к исследованию процесса протяжки заготовок в комбинированных бойках / В. В. Кухарь, О. А. Тузенко, Е. Ю. Балалаева, О. В. Василевский, С. А. Никольченко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 68–74.

47. Кухарь В. В. Анализ технологических вариантов горячей объемной штамповки плоских сложнопрофильных поковок / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 155–161.

48. Анищенко А. С. Сравнительный анализ критериев достоверности экспериментального исследования силовых режимов деформации титановых сплавов / А. С. Анищенко, В. В. Кухарь, А. Г. Присяжный // Проблемы трибологии = Problems of Tribology. – 2017. – № 2. – С. 31–36.

49. Анищенко А. С. Аппроксимация формулами Ляме-Гелиса контура оболочек при сверхпластической формовке листовых заготовок / А. С. Анищенко, В. В. Кухарь, Е. А. Мкртчян // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2017. – Серія : Технічні науки, Вип. 34. – С. 7–17.

50. Анищенко А. С. Материал для физического моделирования процессов обработки металлов давлением в состоянии сверхпластичности / А. С. Анищенко, В. В. Кухарь,

А. Г. Присяжний // Вісник машинобудування та транспорту. – 2017. – № 1 (5). – С. 4–10.

51. Кухар В. В. Методика розрахунку напружено-деформованого стану листової заготовки при гнутті з врахуванням зміцнення матеріалу / В. В. Кухар, О. С. Аніщенко, М. М. Нагнібеда // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії, № 37 (1259). – С. 36–41.

52. Анищенко А. С. Применение формул Ляме для анализа деформированного состояния оболочек при сверхпластической формовке / А. С. Анищенко, В. В. Кухарь, А. Г. Присяжний // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 2 (45). – С. 11–16.

53. Методика експериментального дослідження енергосилових режимів прокатки жерсті при різних параметрах станів холодної прокатки / Ю. В. Коновалов, І. В. Кармазіна, А. Г. Присяжний, В. В. Кухар // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії, № 30 (1306). – С. 32–38.

54. Сагіров Ю. Г. Сучасний стан та перспективи оптимізації проектування металоконструкцій порталних кранів / Ю. Г. Сагіров, В. В. Суглобов, В. В. Кухар // Наука та виробництво : зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Вип. 19. – Маріуполь : ПДТУ, 2018. – С. 59–67.

55. Курпе О. Перевірка математичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA» [Checking The Mathematic Model Of The Rolling Technological Process At Ferriera Valsider Spa Steckel Mill] / О. Курпе, В. Кухар // Mechanics and Advanced Technologies. – Kyiv, NTUU “KPI”, 2018. – Vol. 84. – No. 3. – pp. 98–105.

Наукове видання

**ОСНОВИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ**

Навчальний посібник

КУХАР Володимир Валентинович
АНИЩЕНКО Олександр Сергійович
ПРИСЯЖНИЙ Андрій Григорович

Формат 60×84 1/16. Умовн. друк. арк.
Тираж 300 прим. Замовл. № __

Надруковано у Поліграфічному центрі
ДВНЗ «Приазовський державний
технічний університет»
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555,
Донецька обл., Україна
Тел. (0629) 44-64-07

Свідоцтво внесення суб'єкту
видавничої діяльності
ДК № 3729 від 15.03.2010 р.