Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Курочкін Олег Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 548.73
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Контроль напруженого стану виробів радіаційним методом
(назва роботи)

(назва освітньої програми)

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(шифр і назва спеціальності)

Студент_____ Курочкін О. О.
(підпис, ініціали та прізвище

Науковий керівник _____ Боднар Роман Тарасович ., к. т. н, доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІВТ

професор*_____*О. Є. Середюк
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент
_____
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Івано-Франуівськ– 2024 рік

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень Магістр_____

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ

_____ ***О. Є. Середюк***

«____» _____2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Курочкін Олег Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Контроль напруженого стану виробів радіаційним методом

Керівник роботи Боднар Роман Тарасович ., канд. техн. наук, доцент **,**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "15" 12. 2023 року №734/7

Строк подання студентом роботи 19.01.20123 р.

Вихідні дані до роботи: метал Ст. 20, для якого напруження σ = 12,6 Па.

Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): провести теоретичні дослідження для практичної реалізації цього методу, встановити зв'язок між інтерференційними лініями на рентгенографічних знімках контрольованих обєктів і величини механічного напруження; розробити структурну схему контролю та складальне креслення установки для проведення контролю; розробити методику для визначення напруженого стану даною установкою; здійснити метрологічний аналіз установки для визначення напруження.

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Схема електрична принципова (А3); Функціональна схема установки (А3); Технологічна схема (А3); Складальне креслення установки (А3); Метрологічний аналіз визначення напружень; Математична модель методу контролю (А3); Дифракція іонізаційного випромінювання на полікристалі (А3).

Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

. Дата видачі завдання _11.12.2023_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка

Студент _____ Курочкін Олег
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Боднар Р.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 94 с., 31 рис., 19 джерела, 7 аркушів плакатів.

Об’єкт дослідження – напружений стан обєктів, які маєть кристалічну будову.

Мета роботи – розробка методики і пристрою для контролю напруженого стану обєктів із кристалічною будовою.

Метод дослідження – математичне моделювання фізичних процесів контролю напруженого стану обєктів із кристалічною будовою.

Здійснено аналіз основних методів контролю напруженого стану і вибрано для контролю радіаційний метод. Якісним параметром якого є зміщення атомної решітки і подальше його вимірювання з використанням дифракції рентгенівського випромінювання. Спроектовано прилад, що дозволяє вимірювати напруженння в виробах. Наведений метрологічний аналіз даного приладу. Здійснено аналіз питань по охороні праці при роботі з спроектованою установкою.

ДИФРАКЦІЯ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, РЕНТГЕНОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ, КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, МЕТОД ДУБЛЕТИ, МЕТОДИКА

ABSTRACT

Master's work: pp.94, Fig.31, , sources 19, 7 sheets of drawings.

The object of research - stress objects that have a crystalline structure.

The purpose of work - development of methods and devices for monitoring the stressed state of the crystal structure of objects.

Testing method - mathematical modeling of physical processes control the stress condition of the crystal structure of objects.

The analysis of the main methods to control stress and is selected to control the radiation method. Quality parameters which are the atomic lattice displacement and further its measurement using X-ray diffraction. Designed device that allows you to measure products. The following measurement analysis of this unit. The analysis for the Protection of works designed to work with the installation.

DIFFRACTION OF X-RAY PHOTOGRAPHY RADIATION, X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS, CONTROL OF QUALITY, METHOD DUPLICATES, METHOD

ЗМІСТ

Вступ……..8

1.Огляд методів та приладів для контролю напруженого стану ……11

1.1 Методи дослідження внутрішніх напружень в твердих тілах ……...11

1.2 Метод контролю напруженого стану з використанням спеціальних лаків ……12

1.3 Метод контролю напруженого стану з використанням струни ……...14

1.4 Радіаційний метод контролю. ……..…14

1.5 Вимірювання деформацій і напружень в матеріалі з допомогою тензорезисторів……...15

1.6 Вимірювання деформацій і напружень в матеріалі з допомогою магнітопружних перетворювачів ……..17

1.7 Ультразвуковий метод визначення внутрішніх напружень ……..19

1.8 Поляризаційно-оптичний метод дослідженнянапружень 20

1.9 Аналіз відомих пристроїв для дослідження механічних напружень ……24

1.10 Постановка задачі на магістерську роботу ……26

2 Теоретичне обгрунтування обраного методу контролю ……28

2.1 Поняття про деформації та напруження ……28

2.2 Типи внутрішніх напружень……32

2.3 Типи деформацій……33

2.4 Деформацій при розтягуванні і стисненні Закон Гука ……35

2.5 Діаграма напруження……37

2.6 Хвильова взаємодія іонізуючого випромінювання

із кристалічною граткою…….…….40
2.7 Одержання рентгенограми……..52
2.8 Визначення механічних напружень по рентгенограмі…….54
2.9 Визначення величини мікронапружень методом апроксимації……58
2.10 Розділення отриманої кривої інтенсивності на дублети…….64
3. Розроблення структурної схеми приладу та методики контролю…....67
3.1 Розроблення структурної схеми установки контролю напруженого стану обєктів……67
3.2 Розроблення електрично-принципової схеми блоку приводу та її опис…….75
3.3 Розроблення методики проведення вимірювання напруженості у виробах……76
3.4 Розрахунок напружень за допомогою дифрактограм з використанням методу апроксимації……79
4 Метрологічний аналіз установки для визначення напруження…..86
4.1 Класифікація основних видів похибок……86
4.2 Аналіз сумарної похибки приладу для визначення напруженого стану виробів…….96
Висновки……..
Список посилань на джерела……..
Додатки

ВСТУП

У 1912 р. Лауе відкрив явище дифракції рентгенівських променів, що проходять крізь кристалічні речовини. Відкриття Лауе і ряд подальших дослідів довели, що цими променями є електромагнітні хвилі. Кристали були використані для розкладання рентгенівських променів в спектр. Виникла і розвинулася спектроскопія рентгенівських променів, що дала цінні відомості про будову електронних оболонок атомів. Отримав широкий розвиток рентгено-спектральный аналіз, що дозволяє надзвичайно швидко визначати хімічний склад багатокомпонентних матеріалів. За допомогою рентгенівських мікроаналізаторів вдається визначити хімічний склад шаруючи завтовшки 10^7 *см* з поверхнею в 10 *мкм*^{2}.

Особливо велике значення отримав інший напрям використання рентгенівських променів — рентгеноструктурний аналіз. Шляхом його застосування вдалося визначити взаємне розташування атомів в кристалах тисяч речовин. Виникла нова наука — кристаллохімія, що встановлює зв'язок між хімічним складом речовини, його кристалічною структурою і властивостями. Заснована на даних рентгеноструктурного аналізу кристаллохімія нині — один з найважливіших розділів науки про твердий тель. Жодна діаграма стану сплавів не вважається зараз за достатньо надійну, якщо сплави системи, що вивчається, не досліджені детально методами рентгеноструктурного аналізу.

Завдяки застосуванню цього аналізу виявилося можливим визначити ступінь досконалості кристалів, їх орієнтування, глибоко вивчити структурні зміни, що протікають в сплавах при їх пластичній і термічній обробці, в процесі експлуатації, під дією проникаючого випромінювання. Методи рентгеноструктурного аналізу використовують для встановлення оптимальних режимів технології виготовлення і обробки

найрізноманітніших матеріалів. На багатьох заводах цими ж методами контролюють режим технологічного процесу.

Рентгеноструктурний аналіз дозволяє об'єктивно встановлювати структуру кристалічних речовин, у тому числі таких складних, як вітаміни, антибіотики, координаційні з'єднання й т.д. Повні структурні дослідження кристалу часто дозволяють вирішити й чисто хімічні задачі, наприклад встановлення або уточнення хімічної формули, типу зв'язку, молекулярної ваги при відомій щільності або густини при відомій молекулярній вазі, симетрії і конфігурації молекул і молекулярних іонів. Рентгеноструктурний аналіз з успіхом застосовується для вивчення кристалічного стану полімерів. Цінні відомості дає рентгеноструктурний аналіз і при дослідженні аморфних та рідких тіл. Рентгенограми таких тіл містять кілька розмитих дифракційних кілець, інтенсивність яких швидко падає зі збільшенням q. По ширині, формі та інтенсивності цих кілець можна робити висновки про особливості ближнього порядку в тій чи іншій конкретній рідкій або аморфній структурі.

Важливою сферою застосування рентгенівських променів є рентгенографія металів і сплавів, яка перетворилася на окрему галузь науки. Поняття «рентгенографія» включає в себе, поряд з повним або частковим рентгеноструктурний аналіз, також і інші способи використання рентгенівських променів – рентгенівську дефектоскопію (просвічування), рентгеноспектральний аналіз, рентгенівську мікроскопію та інше. Визначено структури чистих металів і багатьох сплавів. заснована на рентгеноструктурному аналізі Кристалохімія сплавів – один з провідних розділів металознавства. Жодна діаграма стану металевих сплавів не може вважатися надійно встановленою, якщо дані сплави не досліджено методами рентгеноструктурного аналізу. Завдяки застосуванню методів рентгеноструктурного аналізу виявилося можливим глибоко вивчити структурні зміни, що протікають в металах і сплавах при їх пластичній і

термічній обробці.

Методом рентгеноструктурного аналізу властиві й серйозні обмеження. Для проведення повного рентгеноструктурного аналізу необхідно, щоб речовина добре кристалізувалася і давало досить стійкі кристали. Іноді необхідно проводити дослідження при високих або низьких температурах. Це сильно затрудняє проведення експерименту. Повне дослідження дуже трудомістке, тривале і пов'язане з великим обсягом обчислювальної роботи.

Для встановлення атомної структури середньої складності (~ 50 - 100 атомів в елементарній комірці) необхідно вимірювати інтенсивності декількох сотень і навіть тисяч дифракційних відбиттів. Цю досить трудомістку й копітку роботу виконують автоматичні мікроденсітомери і дифрактометри, керовані ЕОМ, іноді протягом декількох тижнів і навіть місяців (наприклад, при аналізі структур білків, коли число віддзеркалень зростає до сотень тисяч). У зв'язку з цим в останні роки для вирішення завдань рентгеноструктурного аналізу отримали широке застосування швидкодіючі ЕОМ. Однак навіть із застосуванням ЕОМ визначення структури залишається складною і трудомісткою роботою. Застосування в дифрактометри кількох лічильників, які можуть паралельно реєструвати відображення, час експерименту вдається скоротити. Дифрактометричне вимірювання перевершують фотореєстрації по чутливості і точності. Дозволяючи об'єктивно визначити структуру молекул і загальний характер взаємодії молекул в кристалі, дослідження методом рентгеноструктурного аналізу не завжди дає можливість з потрібним ступенем достовірності судити про відмінності в характері хімічних зв'язків усередині молекули, так як точність визначення довжин зв'язків і валентних кутів часто виявляється недостатньою для цієї мети .

Серйозним обмеженням методу є також труднощі визначення положень легких атомів і особливо атомів водню.

Об’сктом дослідження є процес взаємодії рентгенівського випромінювання з досліджуваними об’єктами.

Предметом дослідження є способи контролю якості досліджуваних об’єктів.

Наукова новизна магістерської робота полягає у використанні радіаційного контролю для встановлення напруженого стану об’єктів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена установка є досить дешевою, дає досить швидкий контроль напруженого стану досліджуваних об’єктів .

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ПРИЛАДІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

1.1 Методи дослідження внутрішніх напружень в твердих тілах

При проведенні зварювання [1] металевих виробів внаслідок температурних градієнтів неминуче виникають механічні напруження. У поєднанні з втомою металу вони з часом приводять до виникнення тріщин, які будуть розвиватись і можуть привести до аварійних ситуацій. Становлять небезпеку механічні напруження не зварених з'єднань, але й прогини, наприклад, внаслідок зсувів грунтів газопроводів. Механічні напруження приводять до деформацій (стискування, зсув, прогин, кручення), які при всій своїй різноманітності виникають в результаті двох фізичних процесів: ковзання – одна атомна площина зісковзує по іншій та роздвоєння – ділянка кристалічної ґратки внаслідок дуже малих зміщень атомів із вузлів ґратки у нові рівноважні положення перетворюється у своє дзеркальне відображення.

Знання розподілу внутрішніх механічних напружень в об'єкті контролю несе суттєву інформацію про те, де розташовані максимальні внутрішні напруження, тобто де є набільш небезпечні місця даної споруди.

З метою виявлення внутрішніх механічних напружень неруйнівними методами використовуються поляризаційний оптичний, радіаційний, тензорезистивний, магнітопружний, з використанням спеціальних лаків, струнний та акустичний методи контролю. Оптичний поляризаційний метод дуже чутливий до внутрішніх напружень та наочний, але він придатний тільки до контролю прозорих виробів або моделей деталей, виготовлених із органічного скла. Акустичний метод для визначення внутрішніх механічних напружень ефективний при забезпеченні надійного акустичного контакту давача з об»єктом контролю при знанні швидкості поширення ультразвуку в ненапруженому зразку.

1.2 Метод контролю напруженого стану з використанням спеціальних лаків

Даний метод свого часу досить поширено використовувася в різних галузях народного господарства.

Суть цього методу полягає у наступному, спершу на об’єкт контролю необхідно з допомогою спеціального технолоічного процесу нанести шар спеціального лаку так, щоб при висиханні він надійно прикріпився до поверхні ОК. Таким чином ми зможемо виявляти місця виникнення механічних деформацій і за одно напруженого стану.

При виникненні напруженого стану на поверхні лаку, яка до того має бути дзеркальною, будуть виникати тріщинки (рис.1.1). І основною властивістю цього процесу є те, що тріщини будуть виникати у перпендикулярному напрямку до утвореного внутрішнього механічного напруження.

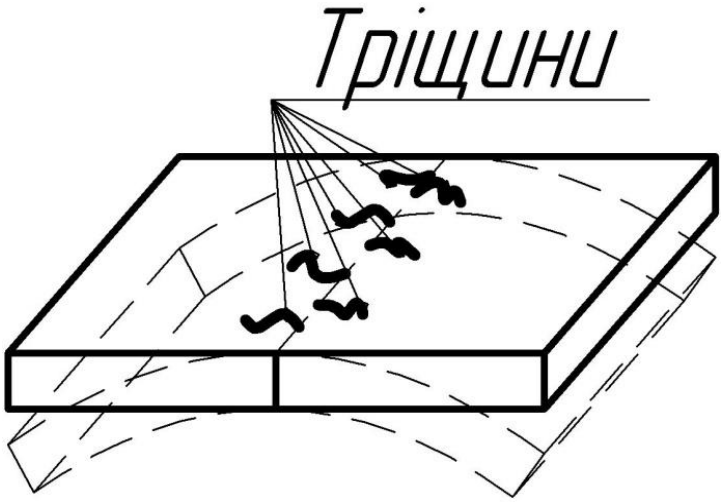


Рисунок 1.1 – Графічна ілюстрація методу використання лаків

Візуально оцінюють виникнення напруженого стану з допомогою оптичних приладів таких, як різного роду лупи і мікроскопи з різним коефіцієнтом збільшення.

Так за величеною пошкодженого шару лаку можна робити висновок про площу, яка піддалася механічній деформації.

1.3 Метод контролю напруженого стану з використанням струни

Даний метод свого часу, так само як і попередній метод, досить поширено використовувася в різних галузях народного господарства.

Суть цього методу полягає у тому, що на контрольовану ділянку об’єкта контролю жорстко закріплюють дві металічні опори. Між якими натягується струна (рис.1.2).

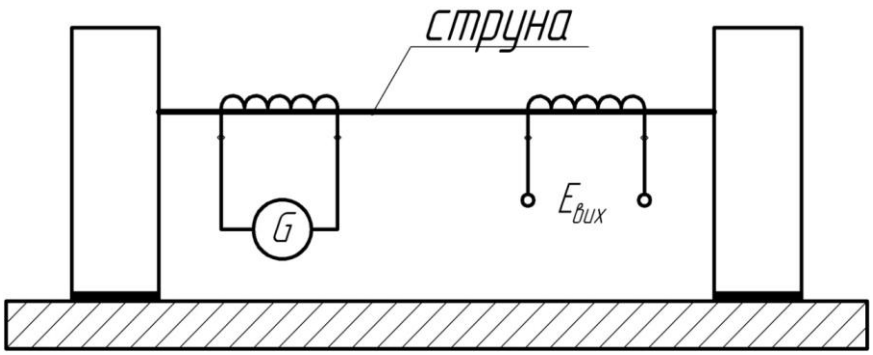


Рисунок 1.2 – Метод виявлення напружень з використанням струни

До струни підєднана електрична частина, яка складається із двох котушок індуктивності. До однієї котушки слід під’єднати електричний генератор частоти, а до другої котушки ми під’єднуємо вимірювальний прилад, ним може служити мілівольтметр або електричний рівноважний міст для вимірювання ЕРС, яке там буде виникати.

В даному методі використовується залежність коливань струни від напруження $\nu = f(\sigma)$.

Таким чином за величиною коливань натягнутої струни можна зробити висновок, про величину внутрішнього механічного напруження.

1.4 Радіаційний метод контролю.

Полікристалічне тіло складається з безлічі ідеальних кристаликів [2], які хаотично орієнтовані своїми гранями в ньому. Всю множину кристаликів можна розглядати сукупність підмножин, кожна з яких буде містити кристалики з паралельно орієнтованими гранями, але кожна підмножина буде мати різний

кут орієнтації по відношенню до якої-небудь площини поверхні твердого тіла.

Причому кристалики однієї підмножини будуть хаотично розташовані по всьому об'єму твердого тіла.

Якщо пустити пучок монохроматичного іонізуючого випромінювання з довжиною хвилі *X* під кутом *ф* до атомної площини кристалика, то внаслідок того, що паралельні атомні площини кристалика утворюють просторову дифракційну гратку, то буде виникати дифракція іонізуючого випромінювання на ній.

Умова дифракційно-інтерференційного максимуму записується у вигляді рівняння Вульфа-Брегга

$$2 \cdot d \cdot \sin \vartheta = n \cdot \lambda, \qquad (1.1)$$

де *d*-міжатомні віддалі в даній атомній площині; $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$

1.5 Вимірювання деформацій і напружень в матеріалі з допомогою тензорезисторів.

Великого поширення як перетворювачі набули тензорезистори.

У основі роботи тензорезисторів [1] лежить властивість матеріалів змінювати свій електричний опір під дією прикладеної до них сили. Широке застосування тензорезисторів полягає насамперед у їх малих розмірах і вазі, можливість вимірювати як статичні, так і динамічні деформацій. В даний час мають розповсюдження дротяні, фольгові і напівпровідникові тензорезисторы.

Дротяні тензорезистори. У найбільш простому випадку дротяні тензорезистори є дротина, кінці якої (або весь відрізок) жорстко закріплюються за допомогою клею або цементу на деталі, що пружно деформується. Стискування або розтягування деталі викликає пропорційне розтягування або стискування дроту, внаслідок чого змінюються його довжина, поперечний переріз і питомий опір, що приводить до зміни електричного опору дроту. Так, якщо в початковому стані електричний опір дроту рівний:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \qquad (1.2)$$

де ρ — питомий опір матеріалу дроту; l — початкова довжина ділянки дроту, що деформується; S — площа поперечного перерізу дроту.

При розтягуванні дроту її опір зміниться, на величину і складе $R+\Delta R$.

Відносна зміна опору тензорезистора визначається співвідношенням

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} \cdot (1 + 2 \cdot \mu), \qquad (1.3)$$

де ΔR — зміна довжини; μ — коефіцієнт Пуассона.

Ділення відносної зміни опору $\frac{\Delta R}{R}$ на відносну зміну довжини провідника в межах пружної деформації характеризується постійною величиною, яка рівна:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = k, \qquad (1.4)$$

і отримало назву коефіцієнта тензочутливості, який разом з номінальним опором R і довжиною решітки (базою) $l_б$ є основною характеристикою тензорезистора. Величина коефіцієнта тензочутливості K залежить від властивостей матеріалу, з якого виготовлений тензорезистор, і технології його виготовлення. Велике значення має також якість підкладки (основи) і клея.

В основу визначення напружень положений відомий зв'язок між відносною деформацією ε і напруженням σ

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \qquad (1.5)$$

де Е– модуль пружності; ε – відносна деформація; σ – напруження.

Для визначення при одноосному напруженому стані тензорезистор наклеюють на досліджуваний елемент в необхідному перетині, так, щоб його подовжня вісь співпала головній деформації .

Величина в цьому випадку буде виражатися залежністю:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\frac{\Delta R}{R}}{k} = E \cdot \frac{4 \cdot \Delta U}{k \cdot U}. \qquad (1.6)$$

Вимірявши напругу на діагоналі моста ΔU (рис. 1.3), можна за відомими k, U і E визначити напруження σ.

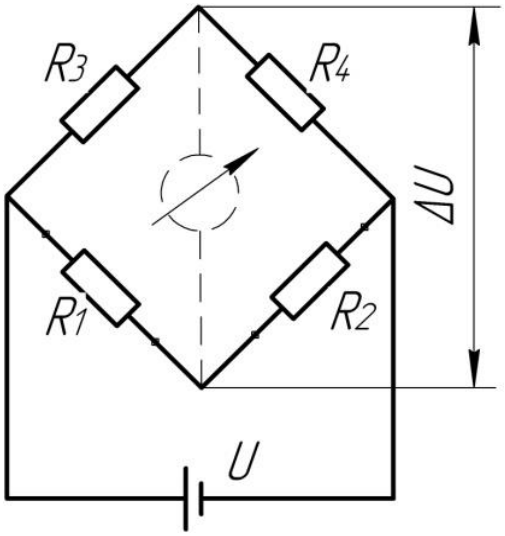
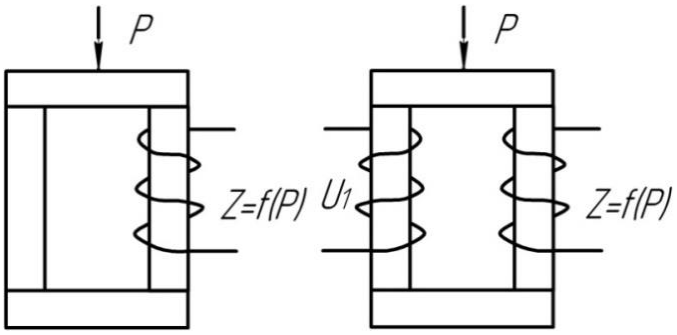


Рисунок 1.3 – Вимірювання напружень з допомогою тензорезисторів

1.6 Вимірювання деформацій і напружень в матеріалі з допомогою магнітопружних перетворювачів

Робота магнітопружних [1] перетворювачів заснована на зміні магнітній проникності μ (або індукції *B)* феромагнітних тіл під впливом прикладених до них механічних сил *P* або напруження σ (рис. 1.4).

У загальному випадку ця залежність, визначена також величиною напруженості поля Н, має досить нелінійний характер. Проте, вибираючи оптимальні режими, можна отримати відносно лінійну залежність $\sigma = f(\mu, P)$.



а) б)

Рисунок 1.4 Конструкції магнітопружних перетворювачів

Оскільки магнітопружні перетворювачі застосовуються в основному для вимірювання сил або напруження, то в цьому випадку має сенс під чутливістю перетворювача розуміти відношення відносної магнітної проникності $\varepsilon_\mu = \frac{\Delta\mu}{\mu}$ до механічного напруження, тобто величину

$$k_\sigma = \frac{\varepsilon_\mu}{\sigma}. \qquad (1.7)$$

За принципом дії дані перетворювачі можна розбити на дві групи :

– Перетворювачі дросельного типу (рис. 1.4, а);

– Перетворювачі трансформаторного типу (рис. 1.4,б).

У перетворювачах першого типу зміна магнітній проникності сердечника приводить до зміни повного електричного опору Z котушки дроселя.

При невеликому поверхневому ефекті відносна зміна опору перетворювача при нехтуванні активним опором котушки може бути прийняте рівним $\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta\mu}{\mu}$.

Тоді чутливість перетворювача може бути виражена у вигляді:

$$k_0 = \frac{\frac{\Delta Z}{Z}}{\sigma}. \qquad (1.8)$$

Чутливість трансформаторного перетворювача при припущенні, що

відносна зміна ЕРС вторинної обмотки рівна відносній зміні проникності $\frac{\Delta e_2}{e_2} = \frac{\Delta \mu}{\mu}$, може бути виражена відношенням:

$$k = \frac{\frac{\Delta e_2}{e_2}}{\sigma} \qquad (1.9)$$

1.7 Ультразвуковий метод визначення внутрішніх напружень

Відомий ультразвуковий (УЗ) спосіб контролю [1] механічного напруження в твердих тілах, що полягає у випромінюванні у виріб до і після прикладання навантаження двох імпульсів УЗ коливань зсувних хвиль з взаємноперпендикулярною орієнтацією вектора , вимірюванні зміни їх швидкостей і обчисленні величини по відносній зміні швидкості УЗ коливань, і акустопружному коефіцієнту . Недоліком цього способу є низька точність, обумовлена фактичною стю акустопружного коефіцієнта при зміні величини .

Відома також безліч способів вимірювання напружень у металевих виробах . У основі найбільш поширених різновидів УЗ способів лежить ефект акустопружної залежності швидкості пружних коливань від напруженого стану матеріалу:

$$\frac{\Delta C}{C} \beta \cdot \sigma , \qquad (1.10)$$

де $\frac{\Delta C}{C}$ відносна зміна швидкості пружних коливань при зміні напруженого стану; β - акустопружний коефіцієнт; σ - величина механічного напруження.

Як показують практичні і теоретичні дослідження, акустопружний коефіцієнт не є постійною величиною, він залежить від стану матеріалу , від форми виробу і умов вимірювання . Все це затрудняє визначення акустопружного коефіцієнта і значно знижують достовірність і точність визначення величини .

Відомий також спосіб контролю внутрішньої механічної напруженності, що полягає в тому, що в досліджуваний об'єкт по його осі вводять безперервні

УЗ коливання до і після навантаження, аналізують параметри сталих коливань і по їх співвідношенню судять про величину внутрішніх напружень.

Недоліком цього способу є низька точність і недостатня достовірність результатів, обумовлені залежністю параметрів УЗ коливань від температури об'єкту, його геометрії і властивостей матеріалу.

1.8 Поляризаційно-оптичний метод дослідження напружень

Даний метод [3] заснований на властивості більшості прозорих ізотропних матеріалів (скло, целулоїд, желатин, пластмаси - оптично чутливі або пьезооптичні матеріали) ставати при деформації оптично анізотропними, тобто на виникненні штучного подвійного променезаломлення (т.з. пьезооптичного ефекту). Головні значення тензора діелектричної проникності лінійно пов'язані з головною напруженністю.

Якщо [4] на пластинку *D* в круговому полярископі (рис. 1.5) падає світло перпендикулярно до її площини, то оптична різниця ходу променів рівна: D = *d* (*n1* - *n2*) або D = *cd* (σ 1 - σ 2), де *d* - товщина пластинки (σ 1 і σ 2) - головне напруження,*c* - т.з. відносний оптичний коефіцієнт напруження.

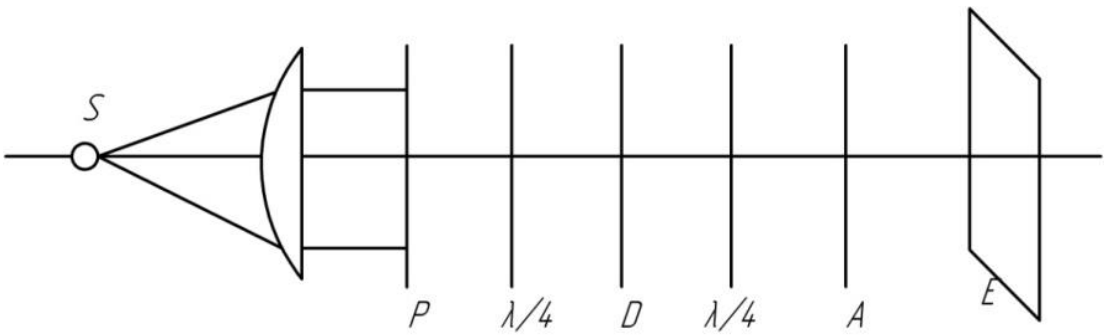


Рисунок 1.5 – Схема кругового полярископа.

Це рівняння (т.з. рівняння Вертгейма) - основне при вирішенні плоских завдань. При просвічуванні монохроматичним світлом в точках інтерференційного зображення моделі, в яких D = *m*l (*m* - ціле число), спостерігається погашення світла; у точках, де

D = (2m + 1)l/2, - максимальна освітленість.

На зображенні моделі (рис.1.6) виходять світлі і темні смуги різних порядків m (картина смуг). точки,які лежачі на одній і тій же смузі, мають однакову D, тобто однакові $\sigma 1 - \sigma 2 = 2t_{мах} = D/cd$ (де $t_{мах}$ - максимальна сколююче напруження).

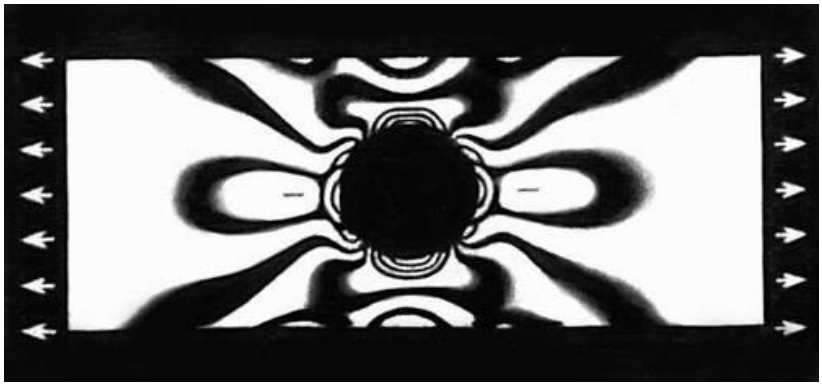


Рисунок 1.6 – Інтерференційна картина при рівномірному розтягуванні пластинки

При білому світі точки з однаковими t_{max} з'єднуються лініями однакового забарвлення - ізохромами. Для визначення $\sigma 1 - \sigma 2$ (або t_{max}) в даній точці досить визначити c для матеріалу моделі і виміряти компенсатором D або можна визначити (σ_0 моделі і підрахувати порядок смуги m $\sigma 0 = l/cd$ - різниця головного напруження в моделі, що викликає різницю ходу
$D = l$; c і σ_0 отримують при простому розтягуванні, стискуванні або чистому вигині на зразках з матеріалу моделі). Т. до. при нормальному просвічуванні плоскої моделі можна отримати тільки різницю головного напруження і їх напрям, то для визначення ($\sigma 1$ і $\sigma 2$) окремо існують додаткові физико-механичні способи вимірювання ($\sigma 1 + \sigma 2$), а також графообчислюванні методи розділення ($\sigma 1$ і $\sigma 2$) по відомих $\sigma 1 - \sigma 2$ і їх напряму, що використовують рівняння механіки суцільного середовища.

Для дослідження [5] напруги на об'ємних моделях застосовується складніша техніка експерименту. Об'ємна модель часто досліджується із застосуванням методу «заморожування» деформацій. Модель з матеріалу,

«заморожування» (затверділі епоксидні, фенолформальдегідні смоли і ін.), що нагрівається до температури високоеластичного стану, навантажується і під навантаженням охолоджується до кімнатної температури (температури скління). Після зняття навантаження деформації, що виникають у високоеластичному стані, і супроводжуюча їх оптична анізотропія фіксуються. Наочно описати це явище можна за допомогою умовної двофазної моделі матеріалу. При нагріві до 80-120 °С (високоеластичний стан) одна частина матеріалу розм'якшується, інша залишається пруженою. Навантаженню, прикладеному до нагрітої моделі, протистоїть скелет, що не розм'якшується. При охолоджуванні навантаженої моделі до кімнатної температури частина, що розм'якшується, знову застигає («заморожується») і утримує деформацію в скелеті після зняття навантаження. «Заморожену» модель розпилюють на тонкі пластинки (зрізи) завтовшки 0,6- 2мм, які досліджують в звичайному полярископі. Застосовується також метод розсіяного світла, при якому тонкий пучок паралельних променів поляризованого світла пропускається через об'ємну модель і дає в кожній точці на своєму шляху розсіяне світло, яке спостерігається в напрямі, перпендикулярному до пучка. Стан поляризації по лінії кожного променя від точки до точки міняється відповідно напруженню в цих точках.

Існує метод, при якому у виготовлену з оптично нечутливого до напруження прозорого матеріалу (спеціальні органічні скла) об'ємну модель вклеюють тонкі пластинки з оптично чутливого матеріалу. Вимірювання у вклейках проводять, як на плоскій моделі, - з просвічуванням нормально або під кутом до поверхні вклейки. Описаний метод. застосовується для вивчення напруження в плоских і об'ємних деталях в межах пружності в тих випадках, коли застосування обчислювальних методів утруднене або неможливе. Напруження використовується для вивчення пластичних деформацій (фотопластичність), динамічних процесів, температурної напруги (фототермопружність), для моделювання при рішенні завдань повзучості

(фотоповзучість) і ін. нелінійних завдань механіки тіла, що деформується. Розроблений також метод оптично чутливих наклейок (шарів), що наносяться на поверхні дійсних деталей. Шар оптично чутливого матеріалу наноситься на поверхню металевої деталі або її моделі в рідкому вигляді і потім піддається полімеризації або наклеюється на деталь у вигляді пластинки; це забезпечує рівність деформацій навантаженої деталі і покриття. Деформації в покритті визначаються по виміряній в нім різниці ходу у відбитому світлі за допомогою односторонніх полярископів. Оскільки напружень ведуться на моделях, то вони закінчуються переходом від напружень в моделі до напружень в деталі. У простому випадку $\sigma_{\text{дет}} = \sigma_{\text{мод}}\, b/a^2$

1.9 Аналіз відомих пристроїв для дослідження механічних напружень

В ультразвуковому приладі [9] ИН-5101А реалізована новітня технологія вимірювання механічних напружень, заснована на застосуванні ефекту акустопружності. Прилад є 3 канальним мікропроцесорним пристроєм, виконаним на базі персонального ПК. У приладі ИН-5101А використовується принцип збудження в матеріалі високочастотних імпульсів з плавним обвідної та прецизійного вимірювання швидкостей поздовжніх і зсувних хвиль, багаторазово відбиваються від поверхонь виробів. Безпосередній вплив на об'єкт контролю здійснюється за допомогою суміщених 3 - х компонентних п'єзоперетворювачів, що встановлюються на поверхні об'єкту. Прилад дає усереднені за обсягом прозвучування значення двовісних напружень в точці вимірювання.

Прилад акустичний АП-23ПР [10] призначений для контролю попередніх напружень в канатах, стрижневої і дротяної арматури частотним методом в умовах заводів залізобетону. У діапазоні частот 3-200 Hz прилад може бути використаний також для вимірювання періоду вільних коливань інших об'єктів.

Метрологічна інформація - період коливань (ms) і напруги (MPa) - а

також дані, які контролюється, відображаються рідкокристалічним індикатором. Дані контрольованої арматури, а також результати вимірювання можуть бути занесені в пам'ять приладу і за необхідності відтворені на цифровому індикаторі, а також

на роз’ємні інтерфейсу в послідовному коді. Прилад портативний з автономним живленням 12 V. Автоматичне вимкнення основного живлення приладу після закінчення циклу вимірювань або введення даних дозволяє економити ресурс батарей.

Для дослідження полів механічних напружень можуть використовуватися прилади серії Комплекс – 2, що відносяться до класу електромагнітних вимірювачів напружень [11]. Принцип їх дії заснований на властивості феромагнітних матеріалів змінювати магнітне стан під впливом механічних напружень. Теоретично це явище обгрунтоване в ряді робіт. На магнітопружному ефекті заснований принцип дії структури та магнітоанізотропних перетворювачів. Магнітоанізотропні перетворювачі, з якими працюють прилади серії "Комплекс-2", використовують анізотропію магнітних властивостей, що виникає у феромагнетику при навантаженні зовнішньою силою, і позбавлені недоліків тих приладів, що використовують магнітопружні перетворювачі.

Прилад дифрактометр X3000 [9] для рентгенівської дефектоскопії металовиробів. Широко використовується у всьому світі для контролю якості в авіакосмічній, автомобільній, нафтогазової, енергетичної та інших галузях промисловості, є незамінним інструментом при наукових дослідженнях стану матеріалів.

Дифрактометр XSTRESS 3000 - це мобільний, сучасний дифрактометр. Будучи надзвичайно швидким, точним і універсальним, він незамінний для контролю технологічних процесів, в лабораторіях і особливо в польових умовах, може використовуватися, наприклад, всередині контейнерів, резервуарів зберігання, в трубопроводах або при зведенні опор. Дифрактометр

XSTRESS 3000 важить всього 25 кг, тому може бути легко занурений, вивантажений і перенесений однією людиною. Прилад самодостатній і вимагає лише підключення до мережі живлення 110 - 240 Вольт.

Точність вимірювання дифрактометри XSTRESS 3000 порівнянна з точністю, одержуваної при роботі аналогічного стаціонарного обладнання. Прилад легкий у використанні, проте може виконувати і дуже складні операції, що відповідають вимогам сучасних наукових досліджень. Програмне забезпечення дифрактометри X3000 дозволяє отримати доступ до всіх параметрів і даних вимірювання за будь-якої прийнятої методики вимірювання.

1.10. Постановка задачі на магістерську роботу

На даний час існує велика кількість методик вимірювання механічного напруження у виробах, а саме:

- радіаційний метод контролю;
- вимірювання деформацій і напружень в матеріалі з допомогою тензорезисторів;
- вимірювання деформацій і напружень в матеріалі з допомогою магнітопружних перетворювачів;
- ультразвуковий метод визначення внутрішніх напружень;
- поляризаційно-оптичний метод дослідження напружень ,які можна застосовувати для вимірювання деформації та механічного напруження.

Всі ці методи мають свої переваги і недоліки. Метод вимірювання деформацій і напружень в матеріалі з допомогою тензорезисторів має такий недолік, як складність нерухомо закріпити тензодавач на обєкт контролю.

Вимірювання напруження ультразвуковим метод вимагає точного знання швидкості поширення ультразвукових хвиль в ОК, який перебуває як в напруженому так і в ненапруженому станах, також тут присутня така проблема як забезпечення надійного акустичного контакту між давачем і ОК. Цих недоліків позбавлений поляризаційно-оптичний метод, але він лише придатний

до оптично прозорих обєктів.

Із вищевказаного ми вибираємо для контролю механічного напруження радіаційний метод, перевагою якого є чітко задокументовані результати дослідження, що дозволить їх повторне розшифрування.

Основною задачою магістерської роботи буде провести теоретичні дослідження для практичної реалізації цього методу, встановити зв'язок між інтерференційними лініями на рентгенографічних знімках контрольованих обєктів і величини механічного напруження. Також буде розроблено структурну схему контролю та складальне креслення установки для проведення контролю. Та розроблено методику для визначення напруженого стану даною установкою.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

2.1 Поняття про деформації та напруження

Як елементи конструкцій, так і конструкції в цілому при дії зовнішніх сил більшою чи меншою мірою змінюють свої розміри і форму і врешті-решт можуть руйнуватися. Ця зміна носить загальн назву— деформація.[6]

Величини і характер деформацій пов'язані із структурою, будовою використовуваних матеріалів. Всі ці матеріали можуть бути розбиті на два класи:

- кристалічні;
- аморфні.

Кристалічні матеріали складаються з величезної кількості дуже малих кристалічних зерен. Кожне з цих зерен є системою атомів, розміщених на дуже близьких відстанях один від одного правильними рядами. Ці ряди утворюють так звану кристалічну гратку (рис. 2.1). У аморфних матеріалах не має правильного розташування атомів. Атоми утримуються в рівновазі силами взаємодії. Деформація тіл відбувається за рахунок зміни розташування атомів, їх зближення або віддаленням.

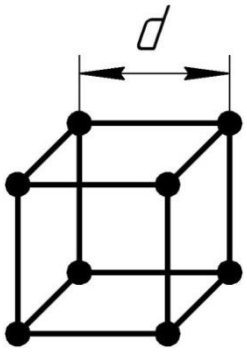


Рисунок 2.1 – Кристалічна гратка

Деформації розділяються на пружні і залишкові.

Пружними деформаціями називаються такі зміни форми і розмірів

елементів, які зникають після видалення сил, що викликали їх, - тіло повністю відновлює свою колишню форму. Ці деформація пов'язані лише з пружними спотвореннями атомних граток. Досвід показує, що пружні деформації спостерігаються, поки величина зовнішніх сил не перевищила відомої межі.

Якщо ж зовнішні сили перейшли цю межу, то після їх видалення форма і розміри елементу не відновлюються в первинному вигляді; різниці розмірів, що залишилися, називаються залишковими деформаціями. Ці деформації в кристалічних матеріалах пов'язані з необоротними переміщеннями одних шарів кристалічної решітки щодо інших. При видаленні зовнішніх сил шари атомів, що змістилися, зберігають своє положення.

Зсув атомів при деформації матеріалу під дією зовнішніх сил супроводжується зміною сил взаємодії між атомами — сил тяжіння і відштовхування.

У елементах конструкції під дією зовнішніх сил виникають додаткові внутрішні сили, які супроводжують деформацію матеріалу. Ці внутрішні сили чинять опір намаганню зовнішніх сил зруйнувати елемент конструкції, змінити його форму, відокремити одного його частина від іншої. Вони прагнуть відновити колишню форму і розміри деформованої частини конструкції. Щоб чисельно характеризувати ступінь дії зовнішніх сил на деформований елемент, необхідно вимірювати і обчислювати величину внутрішніх міжатомних сил, що виникли як результат деформації, викликаної певними зовнішніми силами. Для цього користуються так званим методом перетинів, який ми пояснимо на наступному прикладі.

Уявимо собі стержень (рис. 2.2) під дією двох рівних і прямо протилежних сил P і в умовно розділимо його на дві частини I і II площиною mn. Під дією сил P обидві половини стержня прагнуть відокремитися і утримуються разом за рахунок сил взаємодії між атомами, що знаходяться по обидві сторони площини mn.

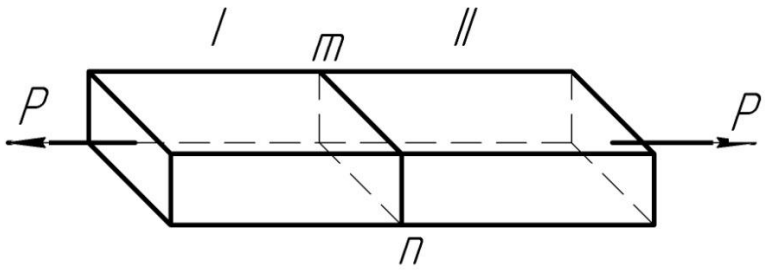


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення методу перетинів

Рівнодіюча цих сил взаємодії називається зусиллям, що передається через перетин тп від однієї частини стержня на іншу, і назад. Внутрішня сила взаємодії, що прикладено на одиницю площі, виділену у якої-небудь точки перетину mn, називається напруженням в цій точці по проведеному перетину. Напруження, що діє від частини II на I і від I на II, за законом рівності дії і протидії рівні між собою.

Через одну і ту ж точку стержня можна провести цілий ряд перетинів, що розділяють стержень різним чином на дві частини. Величина і напрям напруження, що передається в даній точціі від однієї частини на іншу, будуть різними залежно від того, як проведений переріз.

Таким чином, не можна говорити про напруження, не вказуючи перетину, через який відбувається передача цього напруження. Тому говорять про «напруженнях по такій то площадці і перетину». Величина напруження в кожній точці і є мірою внутрішніх сил, які виникають в матеріалі як результат деформації, викликаної зовнішніми силами. Зусилля, що передається від частини I сетржня на II (рис. 2.2), утримує частину II в рівновазі, цим самим врівноважує систему зовнішніх сил, прикладених до частини II. Зусилля ж може бути виражено через шукане напруження; якщо виділити елемент площі dF в проведеному перетині, то елементарне зусилля, що діє на цю частину площі, буде рівне *pdF*, при цьому *p* — напруження в тій точці, де виділений элемент площі. Сума цих елементарних зусиль і дасть повне зусилля, що передається через проведений перетин.

Таким чином, для обчислення напруження треба умовно розділити даний елемент конструкції перетином на дві частини і скласти умови рівноваги для системи сил, прикладених до однієї з відсічених частин; ця система включатиме зовнішні сили, прикладені до виділеної часгини стержня, а також зусилля, що передається через проведений перетин і виражене через шукане напруження.

Роблячи висновок, можна сказати, що результатом дії зовнішніх сил на елементи конструкції є виникнення в них деформацій, що супроводжуються напруженнями.

2.2 Типи внутрішніх напружень

В основі класифікації внутрішніх напружень лежить відмінність в обсягах, в яких ці напруги врівноважуються [6].

1. Під зональними (залишковими) напруженнями (макронапруження або напруження I-роду) розуміють пружні спотворення, які врівноважуються в обємі усього виробу або в його значній частині. При наявності макронапружень видалення будь-якої частини деталі призводить до порушення рівноваги між іншими її частинами, що викликає деформування (викривлення і розтріскування) виробу. Руйнування відбувається здебільшого під дією розтягуючих напружень. Стискаючі напруження (їх можна створювати спеціальними технологічними процесами) знижують чутливість матеріалу до концентраторів напружень і підвищують втомну міцність матеріалу.

2. Під мікронапруженнями (II-роду) розуміють напруження, які врівноважуються в обємі окремих кристалітів або частин кристалітів (мозаїчних блоків). Вони можуть бути як неорієнтованим, так і орієнтованими (у напрямку зусилля, яка викликає пластичну деформацію).

3. Під статичними спотвореннями гратки (III-роду) розуміють напруження, які врівноважуються в межах невеликих груп атомів. У деформованих металах статичні спотворення врівноважуються в групах атомів,

що лежать біля границь зерен, площин ковзання і т.д. Такі викривлення можуть бути пов'язані з дислокаціями. Зміщення атомів з ідеальних положень (вузлів гратки) можуть також виникати в кристалах твердого розчину через розходження розмірів атомів і хімічної взаємодії між однойменними і різнойменних атомами, що утворюють твердий розчин. При наявності мікронапряжень та статичних спотворень видалення частини тіла не призводить до їх перерозподілу.

Напруження різних типів призводить до різних змін рентгенограм і дифрактограм, що дозволяє вивчати внутрішні напруження рентгенографічними методами. Макронапруженя викликають зсув інтерференційних ліній, що стає особливо помітним під великими бреггівськими кутами. Мікронапряження і зменшення блоків мозаїки (області когерентного розсіювання) призводять до розширення ліній. Найбільша зміна ширини інтерференційних ліній спостерігають при великих брегівських кутах. Орієнтовані мікронапряження можуть також викликати зсув ліній. При наявності статичних спотворень, пов'язаних зі зміщенням атомів з ідеальних положень, зменшується інтенсивність інтерференційних ліній і зростає дифузний фон. Ефект зменшення інтенсивності особливо помітний для ліній з великими індексами.

2.3 Типи деформацій

Основними [6] типами деформацій є (рис. 2.3):

- Розтяг або стиск (а і б); приклад такої деформації є работа ланцюгів, канатів, тросів, растянутих і стиснутих стержнем у фермах, колон;
- перерізування (в) работа болтів, заклепок;
- кручення (г) робота валів ;
- згин (д) робота різних балок .

Ці чотири типи деформацій називаються простими.

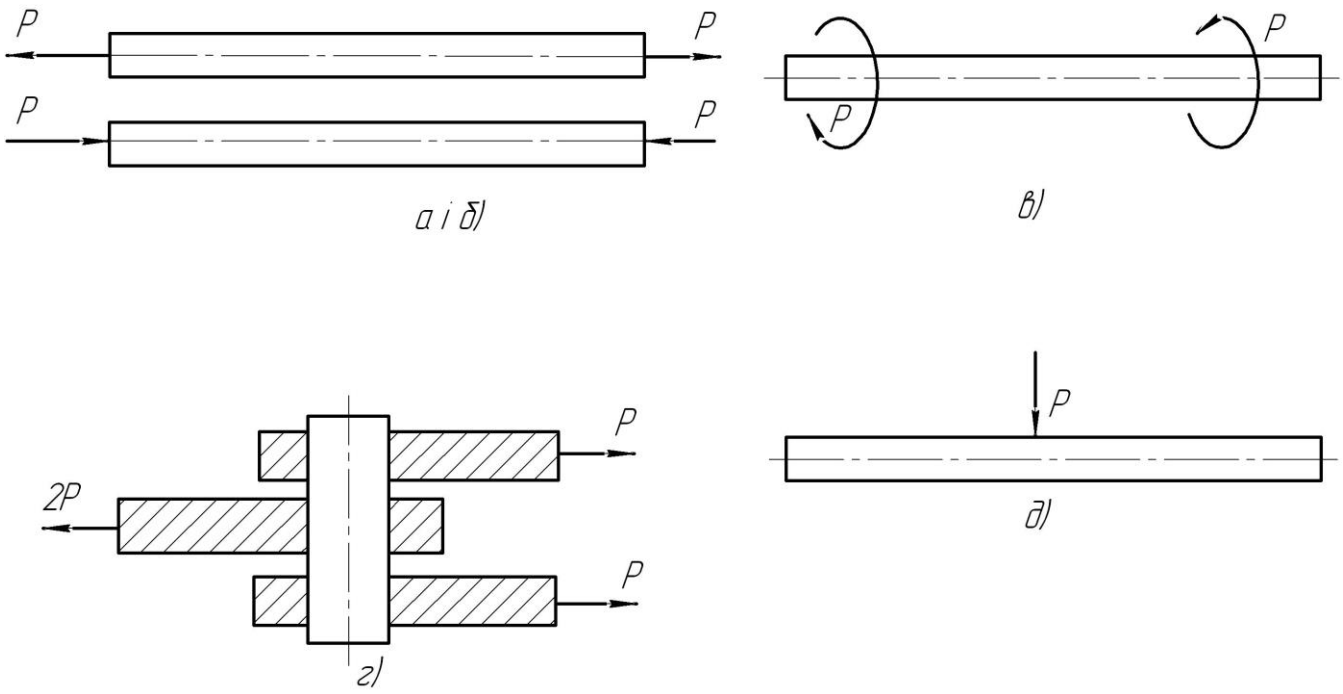


Рисунок 2.3 – Типи деформацій

У конструкціях зустрічається і складніша робота елементів, коли вони випробовують два і більш типів деформацій одночасно, наприклад, розтягування або стиснення із згином, згин з крученням і т. д.; в цих випадках ми маємо справу з так званою складною деформацією.

2.4 Деформацій при розтягуванні і стисненні

Для того, щоб мати повну картину роботи розтягнутого або стисненого елементу, необхідно мати можливість обчислити, як мінятимуться його розміри [6].

Відповідні закони можна отримати лише на підставі дослідів з розтягуванням і стисненням зразків матеріалу, що вивчається; з допомогою цих дослідів можна вивчати і міцність матеріалу, визначати його межу міцності і інші характеристики.

Для здійснення подібних дослідів в лабораторіях використовують спеціальні машини, що дозволяють деформувати зразки і доводити їх до руйнування, вимірюючи потрібну для цього величину зусиль.

Одночасно за допомогою достатніх точних вимірювальних приладів тензометрів проводять вимірювання деформацій зразків.

Досліди приводять таким чином, що поки навантаження на зразок не досягло відомої межі, видовження прямо пропорційно розтягуючій силі P, довжині зразка l і обернено пропорційно до площі поперечного перетину F. Позначаючи через Δl приріст довжини зразка від сили P, можемо написати формулу, що зв'язує між собою ці дослідні дані:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF} \ , \qquad (2.1)$$

де E— коефіцієнт пропорційності, різний для різних матеріалів.

Величина Δl називається абсолютним видовженням стержня від сили P.

Формула (2.1) носить назву закона Гука, по імені вченого, що вперше відкрив цей закон пропорційності в 1660 р.

Залежність (2.1) можна представити в іншому вигляді. Розділимо обидві частини цієї формули на первинну довжину стрижня :

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{P}{E \cdot F} \ , \qquad (2.2)$$

відношення $\frac{\Delta l}{l}$ абсолютного видовження до первинної довжини — називається відносним видовженням і позначається буквою ε .

Відносне видовження є безрозмірною величиною, як відношення двох довжин Δl і l, і по свому числовому значенню рівно видовженню кожної одиниці довжини стержня. Підставивши в попередню формулу замість $\frac{\Delta l}{l}$ величину ε , а замість *P/F* — величину нормального напруження, отримуємо інший вираз закона Гука:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} , \qquad (2.3)$$

або

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \ . \qquad (2.4)$$

Таким чином, нормальне напруження при розтягу прямо пропорціоне

відносному видовженню або скороченню стержня.

Коефіцієнт пропорційності Е, що зв'язує нормальне напруження і відносне видовження, називається модулем пружності при розтягуванні (стисненні) матеріалу. Чим більша ця величина, тим менше розтягується (стискається) стержень за інших рівних умов (довжині, площі, силі Р). Таким чином, фізично модуль Е характеризує опір матеріалу пружній деформації при розтягуванні (стисненні).

Оскільки ε — відносне видовження — є безрозмірною величиною, то з формули (1.4) виходить, що модуль виражається в тих же одиницях, що і напруження σ, тобто в одиницях сили, що діляться на одиницю площі.

Треба відмітити, що величина модуля пружності матеріалу Е навіть для одного і того ж матеріалу не є постійною, а трохи коливається. Для деяких матеріалів величина модуля виявляється однаковою як при розтягуванні, так і при стиску (сталь, мідь), в інших випадках — різною для кожної з цих деформацій. У звичайних розрахунках цією різницею нехтують і приймають для більшості матеріалів одне і те ж значення Е як при розтягуванні, так і при стисненні.

Треба мати на увазі, що закон Гука представлений формулою, яка тільки приблизно відображає результати дослідів, схематизувавши їх; тому він не є абсолютно точною залежністю.

Всі матеріали при розтягуванні або стисненні дають величини деформацій, що більш менш відхиляються від цього закону. Для деяких матеріалів (більшість металів) ці відхилення настільки малі, і можна вважати, що здійснюється повна пропорційність між деформацією і навантаженням; для інших (чавун, камінь, бетон) — відхилення значно більше.

2.5 Діаграма напруження

Для отримання графіка, що характеризує безпосередньо матеріал, що досліджується, діаграму розтягів трохи змінюють ординати кривої, які

зображають навантаження, ділять на початкову (до початку досліджень) площу перерізу зразка F_0, а абсциси Δl — на розрахункову довжину l. Таким чином, в новій діаграмі по вертикалі відкладують напруження [6]

$$\sigma = \frac{P}{F_0}, \qquad (2.5)$$

а по горизонталі — відносні видовження

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} . \qquad (2.6)$$

Така діаграма зображена на рисунку 2.4; вона має назву – діаграма напружень при розтягу для данного матеріала.

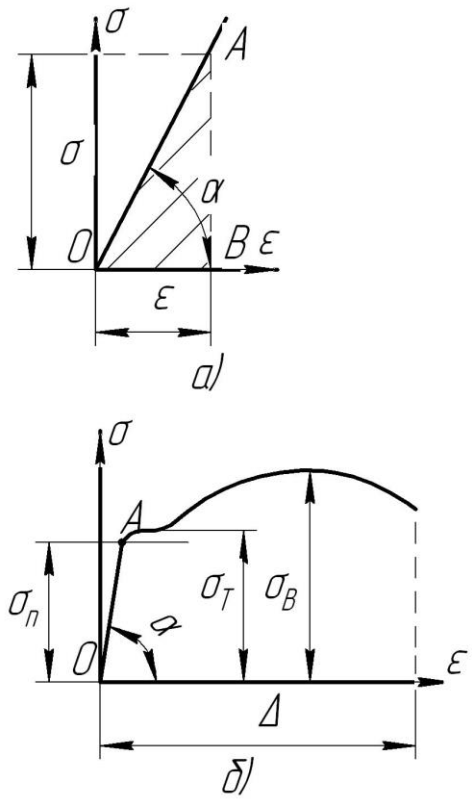


Рисунок 2.4 – Діаграма напружень

Якщо ми розглядатимемо частину цієї діаграми ОА до межі пропорційності, то при деякому напруженню σ і відповідному йому відносним видовженням ε площа трикутника ОАВ (рис. 2.4), рівна $\frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2}$, виражатиме питому роботу деформації при розтягуванні матеріалу до напруження σ.

Насправді

$$\frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} = \frac{P \cdot \Delta l}{2 \cdot F \cdot l} = a \quad , \qquad (2.7)$$

знаючи, що $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$ можна представити вираз для питомої роботи деформації в межах пружності у такому вигляді:

$$a = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} \quad . \qquad (2.8)$$

Аналогічно вся площа діаграми (рис. 2.4) є питомою роботою деформації a_b при розриві зразка матеріалу, що досліджується. Цю величину можна представити собі як похідну довжини діаграми δ на найбільшу ординату $\sigma_в$ і на деякий коефіцієнт η, що характеризує відношення площі діаграми до площі прямокутника із сторонами δ і $\sigma_в$:

$$a_B = \eta \cdot \sigma_B \cdot \delta \quad . \qquad (2.9)$$

Таким чином, питома робота при розриві до певної міри характеризуется похідною межі міцності на відносне видовження після розриву. Тому часто оцінюють здатність матеріалу чинити опір ударам по величині виразу $\sigma_B \cdot \delta$.

З діаграми (рис. 2.4) видно, що

$$tg\alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad , \qquad (2.10)$$

Таким чином, модуль Е графічно зображається тангенсом кута нахилу до осі абсцис прямолінійної частини діаграми розтягу.

2.6 Хвильова взаємодія іонізуючого випромінювання із кристалічною граткою

При [2] рентгенографічному дослідженні кристалічних структур доводиться аналізувати інтерференційні картини, що виходять в результаті розсіювання рентгенівських променів електронами, що належать атомам

кристалічної решітки . Розглянемо умови інтерференції хвиль, розсіяних електронами атомів кристалічної решітки; при цьому зробимо наступні припущення:

а) атоми кристалічної решетки нерухомі (тобто тепловими коливаннями атомів нехтуємо);

б) всі електрони, які належать одному атому, зосереджені в геометричній точці – у вузлі кристалічної гратки, так що можна говорити про розсіяння рентгенівських променів атомами кристалічної решітки.

Ці свідомо невірні припущення, як буде показано нижче, не змінюють правильності виведеного нами закону інтерференції.

Розглянемо інтерференцію променів, розсіяних атомами, расположеними вздовж прямої лінії. Нехай на атоми 1, 2, 3 і т.д. (рис. 2.5) під кутом, косинус якого дорівнює α_0, падає плоска хвиля монохроматичног рентгенівського випромінювання.

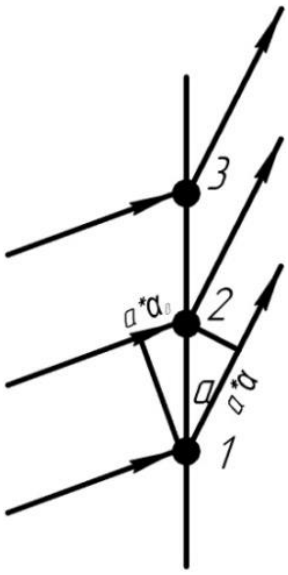


Рисунок 2.5 – Дифракції рентгенівських променів від атомної площини.

Очевидно [7], умови інтерференції розсіяних цими атомами променів ті ж, що й у випадку звичайної дифракційної решітки. Для того щоб на великій відстані від атомного ряду амплітуди всіх коливань складалися, необхідно і достатньо, щоб різниця ходу променів, що йдуть від кожної пари сусідніх

атомів, містила ціле число довжин хвиль. Із рисунка видно, що ця умова приводить до рівняння

$$a \cdot (\alpha - \alpha_0) = \left[\bar{a} \cdot (\bar{s}` - \bar{s}_0)\right] = \bar{a} \cdot \bar{s} = H \cdot \lambda, \qquad (2.11)$$

де α_0 і α – косинуси кутів між атомним рядом і падаючими, і відхиленими променями; Н – ціле число; $\bar{s}_0$ і $\bar{s}`$ – одиничні вектори в напрямку падаючих і відхилених променів; $\bar{s}$ – їх різниця, що дорівнює $\bar{s}` - \bar{s}_0$.

Якщо позначити амплітуду променів, розсіяних одиничним атомом, через *f*, то амплітуда променів, розсіяних в напрямку, який задовільняє рівнянню (2.11), буде дорівнює *n*f*, де *n* - число атомів у ряді, а інтенсивність $n^2 \cdot f^2$.

У всіх напрямках, скільки-небудь помітно не задовольняють рівняння (2.11), промені при досить великій кількості атомів у ряду не поширюються.

Дійсно, виберемо напрямок, в якому різниця ходу двох сусідніх променів не кратна довжині хвилі, тобто:

$$(\bar{a} \cdot \bar{s}) = (H + \varepsilon) \cdot \lambda, \qquad (2.12)$$

де 1> ε > 0.

Тоді різниця фаз коливань, що викликані цими хвилями, визначається так:

$$\varphi_{1-2} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (H + \varepsilon) \cdot \lambda = 2 \cdot \pi \cdot H + 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon. \qquad (2.13)$$

Для променів від атомів 1 і 3 різниця ходу в два рази більше; в два рази більше і різниця фаз:

$$\varphi_{1-3} = 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (H + \varepsilon) = 4 \cdot \pi \cdot H + 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon, \qquad (2.14)$$

взагалі для першого і *n*-го променів різниця фаз складає:

$$\varphi_{1-n} = 2 \cdot (n-1) \cdot \pi \cdot \varepsilon. \qquad (2.15)$$

Векторна діаграма для цього випадку наведена на рис. 2.6.

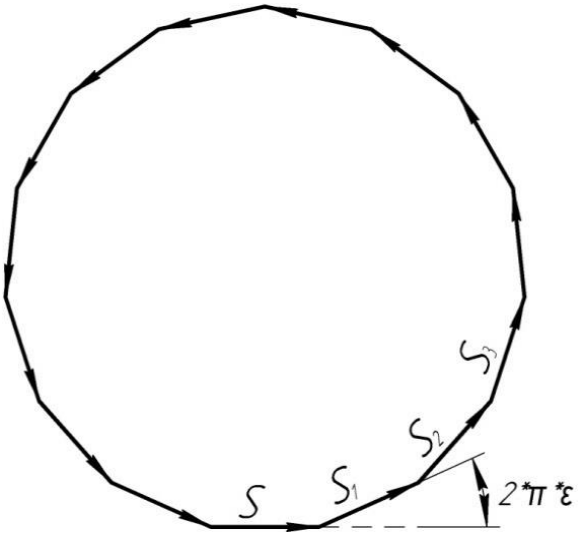


Рисунок 2.6 – Векторна діаграма для визначення амплітуди променів, розсіяних атомною площиною.

Абсолютно ясно, що при дуже великій кількості атомів (наприклад, при 1000) геометрична сума векторів, навіть при малому значенні ε, хоча і не буде точно дорівнює нулю, то все ж таки буде величиною того ж порядку, що і кожен вектор окремо, а так як амплітуда коливань для променя, що задовольняє рівняння (2.11), у цьому випадку дорівнює тисячі амплітуд коливань, що йдуть від кожного атома, то можна вважати, що промені практично будуть відхилятися лише в тих напрямах, які відповідають рівнянню (2.11).

Якщо атомний ряд короткий, то промені зможуть відхилятися і під кутами, які помітно відрізняються від відповідних умов, даного рівняння (2.11), так як амплітуди результуючих коливань не є при цьому не прямують до нуля.

Припустимо, що кількість атомів досить велике, і рівняння (2.11) повинно дотримуватися точно.

Вирішимо рівняння щодо α:

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{H \cdot \lambda}{a} . \qquad (2.16)$$

Отже, випромінювання, яке падає на атомний ряд під кутом, косинус якого дорівнює α_0, розсіюється у всіх напрямках, для яких косинус напрямного

кута дорівнює одному з можливих значень α .Розсіяні промені утворюють, систему коаксіальних конусів, загальною віссю яких є напрямок атомного ряду (рис. 2.7).

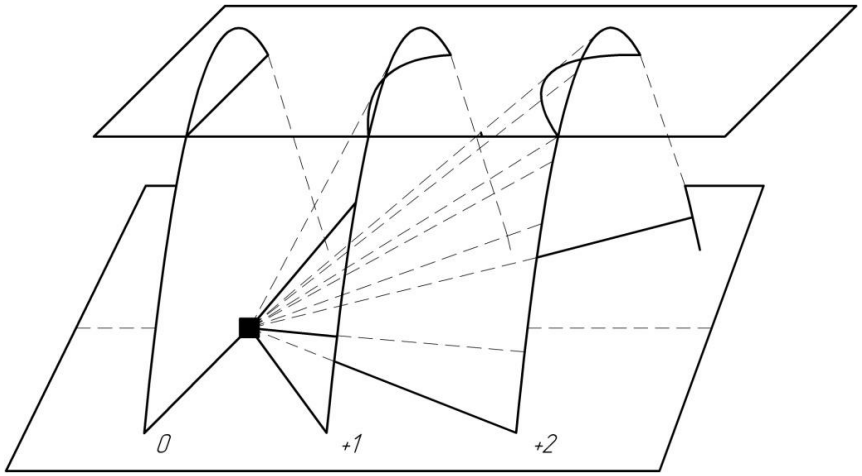


Рисунок 2.7 – Одержання дифракційних конусів

Кожний конус відповідає певному (позитивного або негативного) значенню *H*. Конус, для якого *H*=0, називається нульовим. Як видно з рис. 2.7, продовження падаючого променя є утворення кульового конуса. Слідами конусів на площині, паралельній атомному ряду, є гіперболи – 1, 0, 1 і т. д., а на площині, перпендикулярній ряду, – кола. Так як довжина рентгенівських променів – величина того ж порядку, що і міжатомні відстані в кристалах, кожен атомний ряд кристалу повинен задовільняти рівнянням (2.1).

Необхідно мати на увазі, що навіть при розсіюванні атомним рядом скінченно тонкого пучка променів інтерференційні конуси мають деяку кінцеву «товщину», мають кінцеву товщину і їхні сліди на площині – кола і гіперболи.

Дійсно, як показано вище, при заданому значенні *H* розсіяні промені мають кінцеву інтенсивність не тільки в напрямку, який строго відповідає рівнянню (2.1), але і при незначних відхиленнях від цього напрямку. До нуля амплітуда і інтенсивність розсіювання падають при такому відхиленні від напрямку, який строго відповідає рівнянню (2.11), яке відповідає замикання векторного многокутника рисунку 2.6, тобто коли $\varphi_{1-n} = n \cdot \varphi_{1-2} = 2 \cdot \pi$ або

$\varphi_{1-2} = \frac{2 \cdot \pi}{n}$ Якщо побудувати графік залежності інтенсивності розсіяних променів від кута χ між атомним рядом і напрямом розсіяння, то кожному значенню *H* для нескінченно тонкого пучка променів відповідає на кривій I(χ) дзвіноподібний пік – дифракційний максимум (рис. 2.8).

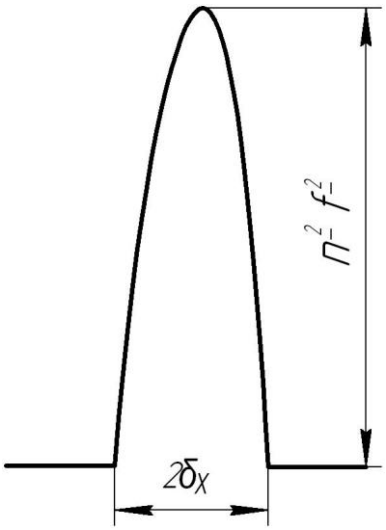


Рисунок 2.8 – Дифракційий максимум на кривій залежності інтенсивності променів розсіяних атомною площиною від кута χ.

Максимальна ордината піку дорівнює $n^2 \cdot f^2$, а ширина піку $2 \cdot \delta \cdot \chi$ (для досить довгого ряду – дуже мала) пропорційна величині

$$\varepsilon_0 = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \varphi_{0,1-2} = \frac{\lambda}{n}. \qquad (2.17)$$

Отже, повна потужність розсіяних атомним рядом променів (її називають «інтегральною інтенсивністю» дифракційного максимуму) пропорційна добутку $\lambda \cdot n$. Один і той самий атомний ряд тим сильніше відхиляє промені від їх первісного напрямку, чим більше їх довжина хвилі. Відповідно віддаляються від нульової гіперболи і все гіперболи-сліди конусів на площині. Пучок «білих» променів розкладається після розсіювання атомним рядом у спектр. Таким чином, атомний ряд є спектральним апаратом для рентгенівських променівПерейдемо тепер до дифракції, що відбувається при

розсіюванні

рентгенівських променів двомірною кристалічною граткою – атомною площиною, яка паралельна двом кристалографічних осям (так звана «двомірна дифракція»). Атомну площину можна представити як систему атомних рядів, паралельних перших осі і віддалених один від одного на відстані b. Промені, які розсіяні кожним з цих рядів, йдуть по конусах, що задовольняють умові: $a \cdot (\alpha - \alpha_0) = H \cdot \lambda$. Однак не всі промені, що утворюють ці конуси в даному випадку еквівалентні, необхідно враховувати взаємодію променів, що йдуть від атомів не тільки одного ряду, але і різних рядів. Розглянемо взаємодію променів, що йдуть від довільних атомов $A^{!}$ і B (рис.2.9).

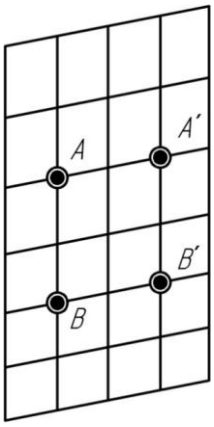


Рисунок 2.9 – Графічне пояснення до дифракція від атомної площини

Відповідні цим променів коливання співпдають по фазі, якщо ту саму фазу має коливання, що виходить від атомів A або B', що лежать на перетині атомних рядів, проведених через A' і B паралельно осям. Ця умова дотримується для пари атомів A і B, якщо відхилений промінь йде в напрямку, який визначається співвідношенням (2.11), а для пари B і B' – у напрямку, для якого є справедливим нове співвідношення:

$$b \cdot (\beta - \beta_0) = \bar{b} \cdot (\bar{s}` - \bar{s}_0) = (\bar{b} \cdot \bar{s}) = K \cdot \lambda, \qquad (2.18)$$

де b — постійна решітки в напряму другої осі; $\beta - \beta_0$ – конуси кутів, які

утворюються падаючим і відхиленимми променями з тією віссю; K – ціле число.

Лише при одночасному дотриманні умов (2.11) і (2.18) промені, що йдуть від будь-якої пари атомів, що лежать у цій площині, збігаються по фазі і амплітуді всіх коливань складаються.

Необхідність одночасного дотримання рівнянь (2.11) і (2.18) можна дати наступне геометричне тлумачення. Кожному з рівнянь (2.11) і (2.18) відповідає система коаксіальних конусів. На рис. 2.10 показані сліди обох систем конусів на площині, – дві системи гіпербол.

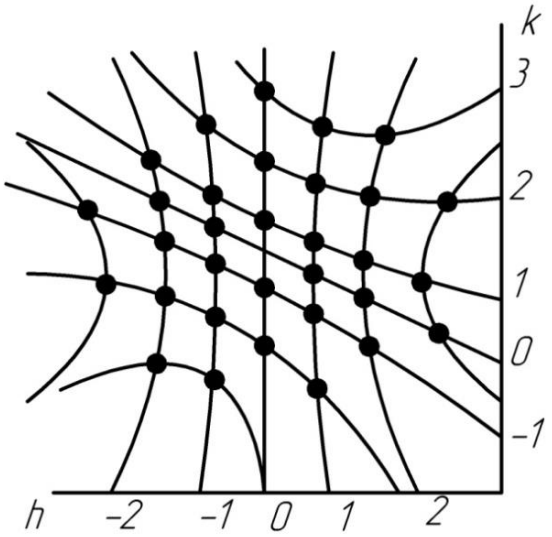


Рисунок 2.10 – Дифракційна картина при розсіюванні рентгенівських променів атомною площиною.

Точки перетину гіпербол – сліди прямих перетину конусів, що належать різним системам. Кожна з цих прямих задовольняє одночасно рівняньням (2.11) і (2.18) для якої-небудь пари значень h і k Уздовж цих прямих і підуть промені, відхилені атомною площиною. Очевидно, що вздовж решти утворених конусів інтенсивність розсіювання буде прямувати до нуля.

Якщо, наприклад, задовольняється умова (2.11), а умова (2.18) не дотримується, то в цьому випадку сумарна амплітуда практично дорівнює

нулю, тому що, хоча промені від всіх атомів, що лежать уздовж будь-якого з рядів, паралельних осі X, один одного підсилюють, втой же час промені від атомів, які належать двом сусіднім рядам, не співпадають по фазі.

Атомна площину, як і атомний ряд, є спектральним апаратом для рентгенівських променів. Розсіювання рентгенівських променів електронами атомів, що утворюють атомну площину, дає картину двомірної дифракції.

Очевидно, що при проходженні рентгенівських променів через просторову гратку розсіювання буде відбуватися лише у трьох напрямках, для яких одночасно будуть задовольнятися три рівняння:

$$a \cdot (\alpha - \alpha_0) = \bar{a} \cdot \bar{s} = H \cdot \lambda \quad ; \tag{2.19}$$

$$b \cdot (\beta - \beta_0) = (\bar{b} \cdot \bar{s}) = K \cdot \lambda \quad ; \tag{2.20}$$

$$c \cdot (\gamma - \gamma_0) = (\bar{c} \cdot \bar{s}) = L \cdot \lambda \quad ; \tag{2.21}$$

де c - період решітки у напрямку третьої кристалографічної осі; γ і γ_0 – косинуси кутів між цією віссю і падаючим та відхиленим променями.

Співвідношення (2.19), (2.20) і (2.21) називаються рівняннями Лауе, який вивів їх іншим, більш складним шляхом. Перехід від атомної площини до просторової решітки вносить принципову зміну в умови інтерференції.

При проходженні монохроматичних рентгенівських променів через нерухомий кристал направляючі косинуси α_0, β_0 і γ_0 будуть постійними величинами, постійна буде і довжина хвилі λ. В системі рівнянь (2.19)…(2.21) є три змінні α, β і γ, які певним чином пов'язані між собою. У простому випадку, коли осі кристала взаємно перпендикулярні, величини ці звідповідають співвідношенню

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1, \tag{2.22}$$

Таким чином, до трьох рівнянь Лауе приєднується четверте; та чотири рівняння з трьома невідомими не завжди розв'язуються, і для виявлення ефекту розсіювання рентгенівських променів кристалом необхідно, щоб ще одна з величин, що входять до рівняння (2.22), була змінною.

Для того, щоб охарактеризувати основні методи структурного аналізу, об'єднаємо рівняння Лауе в одне. Легко показати, що формула

$$\bar{r}^*_{HKL} = H \cdot \bar{a}^* + K \cdot \bar{b}^* + L \cdot \bar{c}^* = \frac{\bar{s}}{\lambda}, \qquad (2.23)$$

еквівалентна трьом рівнянь Лауе.

Дійсно, помножимо скалярному ліву та праву частини рівняння (2.23) на $\bar{a}$. Тоді $H(\bar{a}^* \cdot \bar{a} = \frac{\bar{s} \cdot \bar{a}}{\lambda})$, звідки отримуємо перше рівняння Лауе:

$$(\bar{s} \cdot \bar{a}) = H \cdot \lambda. \qquad (2.24)$$

Відповідно помноживши рівняння (2.23) на $\bar{b}$ і $\bar{c}$, отримаємо друге і третє рівняння Лауе.

Приведемо рівняння (2.23) до скалярної форми.

Проведемо площину, що розділяє навпіл кут між падаючим і відхиленим променями (рис. 2.11).

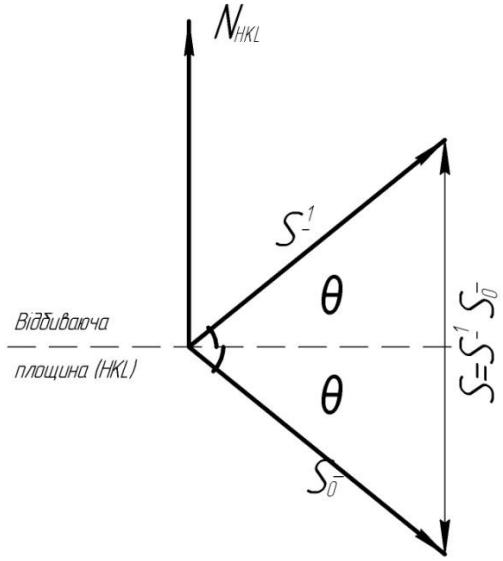


Рисунок 2.11 – До виводу формули Вульфа–Брегга

Ця площина перпендикулярна вектору $\bar{s}$ і, оскільки напрямок

останнього збігається з напрямком вектора $\bar{r}^*_{HKL}$, вона є кристалографічної площиною (*HKL*) або (*hkl*). Якщо рівні між собою вектори $\bar{r}^*_{HKL}$ і $\frac{\bar{s}}{\lambda}$, то рівні і їх модулі $\left|\bar{r}^*_{HKL}\right| = \left|\frac{\bar{s}}{\lambda}\right|$ Однак з рис. 2.11 видно, що

$$\left|\bar{s}\right| = 2 \cdot \sin(\vartheta), \qquad (2.25)$$

де ϑ - кут між падаючим (або відхиленим) променем і площиною (*hkl*). Разом з тим

$$\left|\bar{r}^*_{HKL}\right| = \frac{1}{d_{HKL}} = \frac{n}{d_{HKL}} \qquad (2.26)$$

.

Відповідно

$$2 \cdot d_{HKL} \cdot \sin(\vartheta) = n \cdot \lambda \qquad (2.27)$$

.

Ця формула показує взаємозв'язок між такими величинами як:

- міжатомна віддаль *d;*
- довжиною хвилі іонізуючого випромінювання λ;
- та кутом падіння іонізуючого випромінювання ϑ.

Як вже вказувалося, на використанні формули Вульфа – Брегга грунтуються розрахунки в спектроскопії рентгенівських променів. Ця ж формула є основою для всіх тих рентгеноструктурних розрахунків, які пов'язані з необхідністю визначення міжплощинних відстаней в кристалах.

2.7 Одержання рентгенограми

По [2], [8] відношенню до осі променя іонізуючого випромінювання в твердому тілі буде сукупність підмножин кристаликів з однаковим кутом нахилу атомних площин до осі променя іонізуючого випромінювання, але розташованих по відношенню до променя по колу, тому і дифракційну картину дадуть у вигляді конуса відхилених променів (рис. 2.12)

Кут [13] при вершині конуса буде рівний 4φ (рис. 2.13).

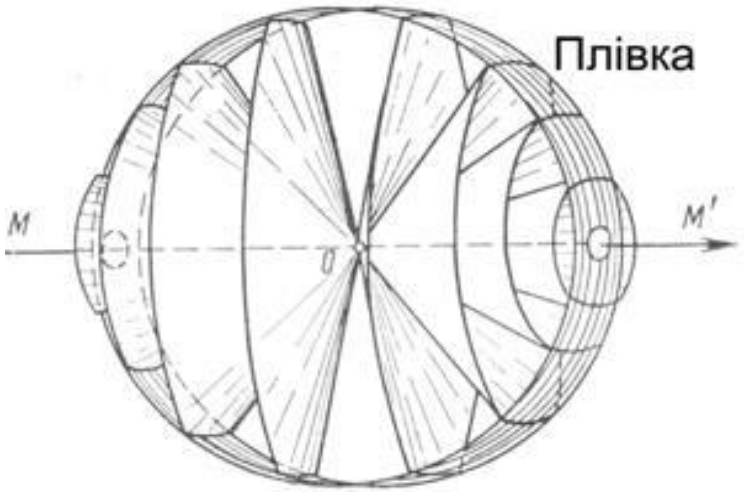


Рисунок 2.12 – Дебаєграма на циліндричній плівці

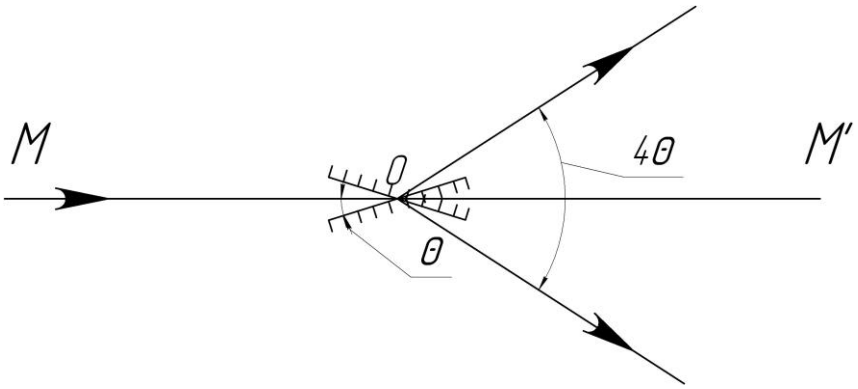


Рисунок 2.13 – Дифракція на полікристалі

При перетині цього конуса дифрагованих променів з радіографічною плівкою на ній зафіксується почорніння у вигляді кола певного радіуса.

Кристалики з атомними площинами, орієнтованими до осі променя іонізуючого випромінювання під іншим кутом, дадуть на плівці зображення кола іншого радіуса.

Причому слід враховувати, що конус дифрагованих променів має кут при вершині 4φ, тому пучок іонізуючого випромінювання слід пускати до поверхні виробів під малим кутом φ. Пучок іонізуючого випромінювання для доброї чіткості картини слід пропускати через вузький коліматор. Для

отримання монохроматичного випромінювання варто використовувати радіоізотопні джерела і пропускати випромінювання через підібрані фільтри.

Внаслідок зміни міжатомних віддалей *d* при деформації будуть змінюватись радіуси кілець інтерференційної картини. Оскільки змінених міжатомних віддалей внаслідок деформації буде менше ніж недеформованих і ці зміни будуть в певному околі *Δd,* то це приведе до розширення (розмитості) кільцевих ліній на інтерферограмі. Величина розмитості буде пропорційною величині відносної деформації $\frac{\Delta d}{d}$. Тобто ступінь розширення кільцевих ліній на інтерферограмі буде служити показником відносної деформації, а значить і напруженого стану виробу.

2.8 Визначення механічних напружень по рентгенограмі.

Макронапруження [6], [12] виникають при неоднорідному нагріві або охолоджуванннаприклад, при зварюванні різанні), в процесі холодного прокату або правки готових виробів, в результаті структурних перетворень, при хімічній і механічній обробці поверхні (точінні, шліфуванні поліруванні), а також при нанесенні електролітичних покриттів. Контроль макронапружень має важливе значення на практиці, оскільки дозволяє значно підвищувати надійність виробів в експлуатації.

Основою рентгеноструктурного методу визначення зональних спотворень є те, що вся атомна площина у всіх кристалітах полікристала, однаково орієнтовані по відношенню до прикладених пружніх сил, однорідно міняють свої міжплощинні відстані (для них $\frac{\Delta d}{d} = const$).

Напруження на поверхні зразка (рис.2.14) можна розкласти на головні (σ_1, σ_2 і σ_3), які є нормальними і тангенціальними (до поверхні зразка).

Нормальна складова напрження σ_3 на поверхні дорівнює нулю.

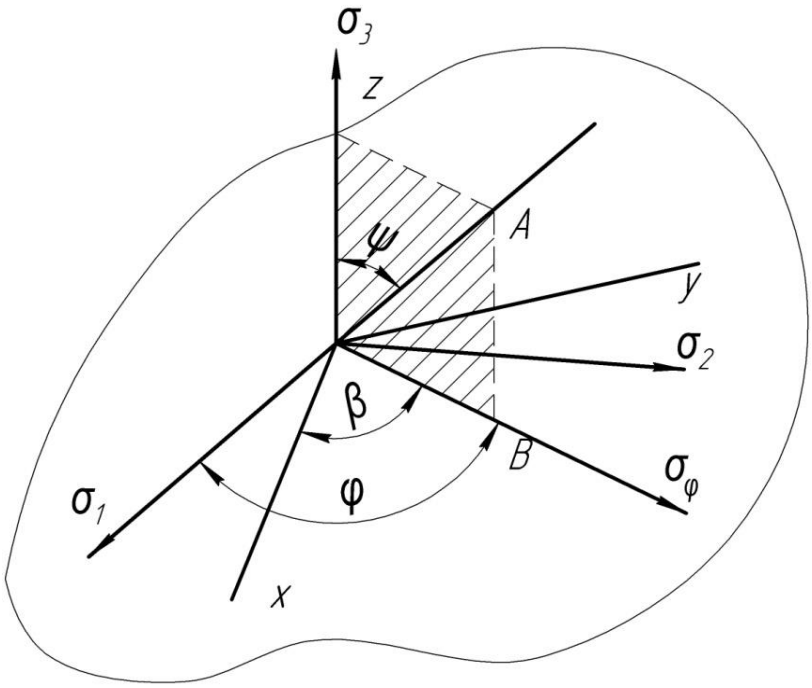


Рисунок 2.14 – Кутові співвідношення між головним напруженням σ_1; σ_2; σ_3, вимірюваною напруженністю σ_φ і координатними осями x, y, z

Строго кажучи, $\sigma_3=0$ тільки при плосконапруженому стані, але в більшості випадків величиною σ3 можна нехтувати.

Пружна деформація в поверхневих шарах зразка в напрямі, перпендикулярному поверхні зразка, буде

$$\varepsilon = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2), \qquad (2.28)$$

де *E*- модуль пружності (для сталі він рівний 210ГПа); μ — коефіцієнт Пуассона.

Якщо [14] напруження σ_1 і σ_2 - розтягуючі, то ε буде деформацією стискування і навпаки. Щоб визначити ε, необхідно знайти величину зміни міжплощинних відстаней *d* в атомній площині, паралельній поверхні зразка, оскільки $\varepsilon = \frac{\Delta d}{d}$.

В цьому випадку

$$\frac{\Delta d}{d} = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2), \qquad (2.29)$$

або

$$(\sigma_1 + \sigma_2) = -\frac{E}{\mu} \cdot \frac{\Delta d}{d} \quad . \qquad (2.30)$$

Визначення $\frac{\Delta d}{d}$ може бути проведене зйомкою рентгенограм з поверхні ненапруженого і напруженого зразків При цьому мають бути дотримані наступні умови:

– Випромінювання і відбиваючі площини мають бути підібрані так, щоб кут віддзеркалення був максимально близький до 83-85°(практично він рівний 75-85°).

– Лінії рентгенограми мають бути гострими і чіткими. Для цього слід користуватися малими діафрагмами і добре підготовлювати поверхні зразків.

Помилка в знаходженні d = ± 0,0001 може привести при зйомці сталевих зразків до помилки у визначенні $\sigma_1 + \sigma_2$ = 1,7 кг/мм2.

Складнішим є завдання визначення величини напруження, що діє на поверхні в даному конкретному напрямі (напрження σ_φ, див. рис. 2.14).

Експериментально завдання аналізу макронапружень зводиться до точного визначення міжплощинних відстаней. Існує ряд методик визначення напруження I- роду при зйомці дебаеграмм і рентгенограм, суть деяких приведена нижче [1]:

1. При визначенні суми головного напруженя використовують співвідношення:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{E}{\mu} \cdot \frac{d_\perp - d_0}{d_0} \quad , \qquad (2.31)$$

де d_0 – міжплощинна відстань для ненапруженого матеріалу; $d_\perp$ –середня міжплощинна відстань для напруженого матеріалу в напрямі, перпендикулярному до поверхні зразка.

2. Вимірювання складового напруження в заданому напрямі методом

двох зйомок проводять по співвідношенню:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{d_{\psi} - d_{\perp}}{d_{\perp}} \cdot \frac{E}{1+\mu}, \qquad (2.32)$$

де $d_{\perp}$–вимірюється по рентгенограмі, знятій при напрямі променя перпендикулярно до поверхні зразка, а d_{ψ}–при напрямі променя під кутом ψ до нормалі.

3. Для збільшення точності вимірювання напруженності *I*-роду застосовують метод п'яти похилих зйомок з ψ=0; ±30 і ± 45^0. Розрахунок проводиться шляхом екстраполяції по співвідношенню:

$$\cos ec\,\theta = \left\{\left[\sigma \cdot (1+\mu) \cdot \sin(2 \cdot \psi)\right] \cdot E \cdot \sin(z \cdot \theta_z)\right\} + \frac{1}{\sin(z \cdot \theta_z)}, \qquad (2.33)$$

де θ_z - визначається для перпендикулярної зйомки, θ - для похилої.

4. Роздільне визначення головного напруження проводиться шляхом зйомки трьох рентгенограм: одній з напруженого зразка під постійним кутом ψ до нормалі і два з ненапруженого при нахилах площини зразка φ і φ+ 90*0*. Розрахунок проводиться по формулах:

$$\sigma_1 = K + L \;, \quad \sigma_1 = K - L, \qquad (2.34)$$

де $K = \frac{1}{2} \cdot \frac{d_{\psi} + d_{\psi}^{`} - 2 \cdot d_0}{d_0} \cdot \frac{E}{(1+\mu) \cdot \sin^2(\psi) - 2 \cdot \nu}$; $L = \frac{d_{\psi} - d_{\psi}^{`}}{d_0} \cdot \frac{E}{(1+\mu) \cdot \sin^2(\psi)}$;

d_{ψ}– міжплощинна відстань для кутів зйомки ψ до нормалі і нахилу зразка φ,

$d_{\psi}^{'}$ – відповідно для ψ і φ+90^0.

5. При невідомих величинах і напрямах головного напруження в поверхневому шарі проводиться зйомка під кутами φ, φ+60^0 і φ-60^0. Розрахунок напруження проводять по співвідношеннях:

$$\sigma_1 = \frac{1}{3} \cdot (M + N), \qquad (2.35)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{3} \cdot (M - N), \qquad (2.36)$$

де $M=\sigma_{\varphi}+\sigma_{\varphi+60}+\sigma_{\varphi-60\sigma}$; $N=\sqrt{(3\cdot\sigma_{\varphi}-M)^2+3\cdot(\sigma_{\varphi-60}-\sigma_{\varphi+60})}$

2.9 Визначення величини мікронапружень методом апроксимації

Під [6] мікронапруженнями зазвичай розуміють напруження, які врівноважуються в обємі окремих кристалів чи частин кристалів (мазаїчних блоків). Розрахунок їх заснований на уявленні про те, що вони пов'язані з неоднорідною пружною деформацією кристалів і, як наслідок цього, із закономірною неоднорідною зміною межплощинних віддалей.

При [14] наявності мікронапряжень (напруження I роду) кожна система атомних площин з однаковими індексами (hkl) має замість строгої її міжплощинної відстані d (рис. 2.15, а) міжплощинні відстані, що лежать в межах $d \pm \Delta d$, як це схематично показано на рисунку 2.15, б.

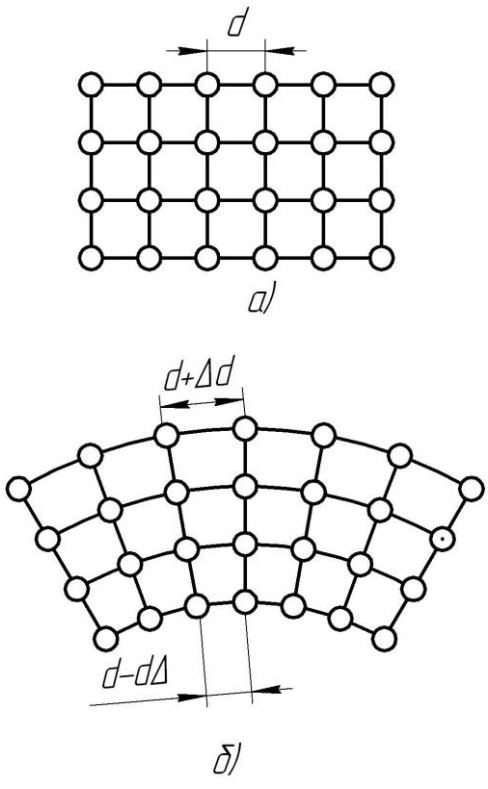


Рисунок 2.15 – Нанапружена кристалічна гратка(а), напружена кристалічна гратка(б)

Величину мікронапружень оцінюють за величиною відносної

деформації (мікродеформації):

$$\frac{\Delta d_{\max}}{d}. \qquad (2.37)$$

Для кубічної сингонії:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta a}{a} \quad . \qquad (2.38)$$

Відповідно значенням $d \pm \Delta d$, кути ϑ для кожної із систем атомних площин будуть лежати в інтервалах значень $\vartheta \pm \Delta\vartheta_{\max}$, що призводить до розширення ліній на рентгенограмі і тим більше, чим більше будуть максимальні значення Δd та $\Delta\vartheta$.

Ефект розмиття ліній на рентгенограмі викликає також зменшення блоків мозаїки до розмірів D $<10^{-5}$ см. На ширину інтерференційного максимуму, крім цього, впливає розбіжність первинного променя, поглинання в досліджуваному зразку, розташування й розміри діафрагм (геометричні фактори), накладення або неповне розщеплення $\alpha_1 - \alpha_2$ дублета.

Приймемо позначення:

B'-експериментальна загальна ширина лінії робочого зразка;

b' – те ж саме, для еталона;

B- – справжня загальна ширина лінії робочого зразка;

b – те ж саме, для еталона (дійсне геометричне розширення);

β – дійсне фізичне розширення лінії робочого зразка;

n – частина дійсного фізичного розширення лінії, викликана мікронапруженнями;

m – частина дійсного фізичного розширення лінії, викликана дисперсністю блоків мозаїки;

$\frac{\Delta a}{a}$ – відносна мікродеформація решітки;

D_{HKL} – величина блоків мозаїки.

Якщо з умов експерименту можна свідомо зробити висновок, проте, що справжнє фізичне розширення лінії (*HKL*) викликано або виключно

мікронапруженнями, або тільки подрібненням блоків мозаїки до величини, яка менша, ніж 0,1 мкм (1000 Å), то величина спотворення решітки в напрямку, перпендикулярному площині відображення (*HKL*), так само, як і розмір блоку в напрямку, нормальному до (*HKL*), може бути обчислена за простими формулами:

для мікронапружень:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\beta}{4 \cdot tg\,\vartheta_{HKL}}. \qquad (2.39)$$

Для величини блоків:

$$D_{HKL} = \frac{0{,}94 \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos\vartheta_{HKL}}. \qquad (2.40)$$

Якщо у досліджуваному металі розширення ліній викликано, крім геометричних факторів, наявністю мікронапружень, а також подрібненням блоків, то елементарний розрахунок стає непридатним,так як, перш ніж вдатися до обчислень формул (2.39) та (3.40), слід встановити, яка частка обох факторів *m* і *n* у фізичному розширенні кожної лінії.

Але перш ніж приступити до визначення величини блоків і мікронапружень, необхідно перш за все знайти дійсне фізичне розширення лінії робочого зразка. аналізуючи розподіл інтенсивності в інтерференційному максимумі, можна встановити, що величина B – дійсного розширення лінії (вільного від розмиття внаслідок накладення дублет $\alpha_1 - \alpha_2$) пов'язане з β – істинним фізичним розширенням лінії і b – дійсним геометричним розширенням лінії (вільним від накладення дублет $\alpha_1 - \alpha_2$) виразом

$$B = \frac{\beta \cdot b}{\int g(x) \cdot f(x) dx}. \qquad (2.41)$$

Функції *g(x)* і *f(x)* описують кутовий розподіл інтенсивності за рахунок відповідно геометрії зйомки і одночасної дії спотворень і дисперсності блоків. Ці функції для металів з кубічною структурою апроксимуються з достатнім ступенем наближення $\frac{1}{(1+\chi \cdot x^2)^2}$. Значення коефіцієнту χ можуть бути

одержані із кутів нахилу відповідних прямих.

Якщо для досліджуваного об'єкта апроксимуючі функції відомі, то справжнє фізичне розширення визначають наступним чином.

Від досліджуваного об'єкта знімають рентгенограму, дві лінії якої (одна – з малим значенням суми квадратів індексів інтерференції, а інша – з великим) фотометрують для отримання кривих розподілу інтенсивності по ширині лінії.

Інтерференційні максимуми можна також фіксувати іонізаційним методом, що дає криві розподілу інтенсивності. Подібні фотометричні або іонізаційні криві отримують від повністю рекристалізованого досліджуваного матеріалу. Послідні криві, що відображають розподіл інтенсивності в грубозернистому матеріалі, позбавленому спотворень, використовують в якості еталону для знаходження геометричного розширення. Щоб уникнути помилок, викликаних несуосністю блоків, обидві лінії рентгенограми повинні належати до однієї відбиваючої площини в різних порядках відбивання.

Визначивши площі під кривими та їх висоти відповідно в квадратних і лінійних одиницях і поділивши площі на відповідні висоти, отримують експериментальні загальні розширення ліній робочого зразка B' і еталона b'. Розширення виражають у радіанах з урахуванням збільшення фотометра або в відповідності зі швидкістю руху діаграмної стрічки потенціометра іонізаційної установки. Експериментальні загальні розширення B' і b', отримані при зйомці в характеристичних променях, спотворені впливом дублетності α – випромінювання, оскільки, окрім великих брегівських кутів, кожен видимий інтерференційний α – максимум є продукт часткового накладення двох незалежних α_1 та α_2 – максимумів; експериментальне загальне $\alpha_{\text{ср}}$ – розширення є функцією зростаючого зі зростанням ϑ – міждублетної відстані:

$$\delta = \vartheta_{\alpha_2} - \vartheta_{\alpha_1}, \qquad (2.42)$$

або в радіанах:

$$\delta = \frac{\lambda_{\alpha_2} - \lambda_{\alpha_1}}{\lambda_{\alpha_1}} \cdot tg\vartheta . \qquad (2.43)$$

Для отримання величин дійсних загальних розширень b еталона і B робочого зразка слід скористатися поправочних графіком, на якому $\frac{B}{B`}$ дається у функції $\frac{\delta}{B`}$ (рис. 1, див. додаток А). Вид функції може бути оцінений фотометрируванням лінії при великому значенні ϑ, при якому дублет чітко розділяється і апроксимується підходящою функцією – експонентою, квадратичним або біквадратичним одиничним дробом. Для кубічних металів використовують біквадратичний одиничний дріб. Часто розрахунок проводять по лініях, утворених K_β-випромінюванням. Тоді поправка експериментальних розширень на дублетність, не проводять.

За дійсними загальними розширенням знаходять справжнє фізичне розширення β. Апроксимація виразу (2.41) через:

$$g(x) = \frac{1}{(1+\chi_1 \cdot x^2)^2} \quad \text{і} \quad f(x) = \frac{1}{(1+\chi_2 \cdot x^2)^2}$$

Звідси випливає вираз

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot (B - b + \sqrt{B \cdot (B-b)}), \qquad (2.44)$$

яке графічно зручніше представити у вигляді (рис.2, див.додаток Б)

$$\frac{\beta}{B} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \frac{b}{B} + \sqrt{1 + \frac{b}{B}}) . \qquad (2.45)$$

На графіку $\frac{\beta}{B}$ знаходять в залежності від $\frac{b}{B}$. Далі визначають β.

Знаючи справжні фізичні розширення двох ліній одного і того ж матеріалу, корисно провести якісну оцінку частки впливу факторів блочності і мікронапружень.

Насправді, якщо блоки мозаїки не дисперсні (більші за 0,1 мкм), то розширення викликане тільки мікронапруженнями, і тоді з формули (2.39)

випливає, що:

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{tg\vartheta_2}{tg\vartheta_1}, \qquad (2.46)$$

тобто розширення пропорційні $tg\vartheta$.

Якщо ж у зразку немає спотворень, але блоки малі (менше 0,1 мкм), то всі розширення викликані тільки дисперсністю блоків, і тоді з формули (2.40)

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\cos\vartheta_1}{\cos\vartheta_2}, \qquad (2.47)$$

тобто розширення обернено пропорційне $\cos\vartheta$.

Якщо ж, як це буває в більшості випадків у реальному металі, розширення викликано як наявністю мікронапружень, так і подрібненням блоків, то відношення дійсних фізичних розширень $\frac{\beta_2}{\beta_1}$ знаходиться між відношенням косинусів і тангенсів:

$$\frac{\cos\vartheta_1}{\cos\vartheta_2} < \frac{\beta_2}{\beta_1} < \frac{tg\vartheta_2}{tg\vartheta_1}. \qquad (2.48)$$

Залежно від величини подальший розрахунок слід проводити за формулами (2.39) або (2.40) або, якщо це необхідно, приступити до розподілу ефектів блочності і мікронапружень.

2.10 Розділення отриманої кривої інтенсивності на $\alpha_1 - \alpha_2$ дублети.

Метод [13] полягає в тому, що відношення інтенсивностей і відносне положення $\alpha_1 - \alpha_2$ компонент дублета визначені $I_{\alpha_1} = 2 \cdot I_{\alpha_2}$, відстань між максимумами інтенсивності компонент $\Delta 2\theta = 2 \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot tg\theta$ являється рівнянням α_1 лінії з вдвічі меншою інтенсивностю, зміщення на $\Delta 2\theta$ відносно α_1 (рис. 2.16).

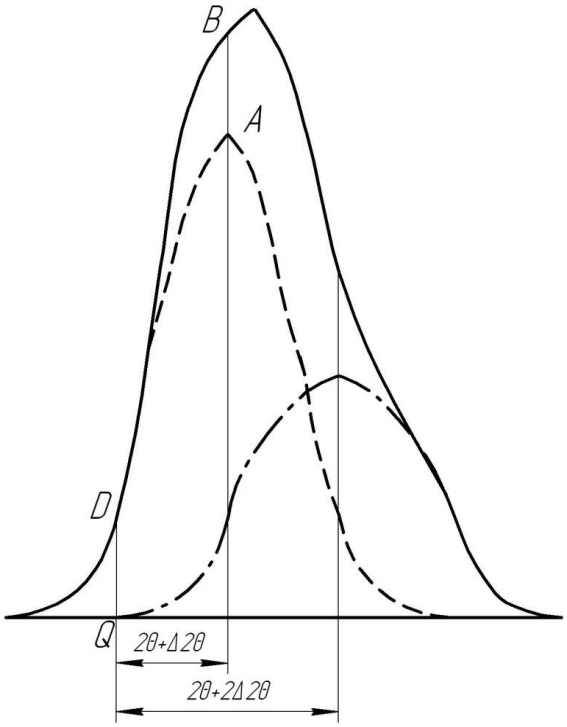


Рисунок 2.16 – Графічне зображення розділення K_α –дублета.

Якщо $i(2\theta)$ описує профіль α_1 лінії, то спостережуваний профіль в любій точці $I(2\theta)$ може бути представлений так:

$$I(2\theta) = i(2\theta) + \frac{1}{2} \cdot i(2\theta + \Delta 2\theta) \quad (2.49)$$

.

Це рівняння розв'язується з допомогою зміни інтенсивності з допомогою вимірювання інтенсивності вздовж профіля лінії:
вибирається точка $2\theta_1$ поблизу края лінії, де α_1 і α_2-компоненти не перекриваються.

Тут $I(2\theta_1) = i(2\theta_1)$ в любій іншій точці,віддаленої від першої на $\Delta 2\theta$,

$$I(2\theta_1 + \Delta 2\theta) = i(2\theta_1 + \Delta 2\theta) + \frac{1}{2} \cdot i(2\theta_1) \quad (2.50)$$

,

$$I(2\theta_1 + 2\Delta 2\theta) = i(2\theta_1 + 2\Delta 2\theta) + \frac{1}{2} \cdot i(2\theta_1 + \Delta 2\theta) \quad (2.51)$$

.

З використанням цих рівнянь послідовно знаходять точки профіля лінії α_1. Щоб знайти проміжні точки, необхідно провести аналогічні побудови для

других значень кутів $2\theta_1$.

Провірити правильність розділення дублета можна по відстані між максимумами інтенсивності отриманих профілів α_1 і α_2-компонент і по формі $\alpha_1 - \alpha_2$ – ліній.

3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИЛАДУ ТА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ

3.1 Розроблення функціональної схеми установки контролю напруженого стану обєктів.

В даному розділі буде зроблено розробку функціональної схеми (рис. 3.1) установки для визначення напружень в об’єкті, а також опис призначення кожного вузла.

Розроблена установка для вимірювання напружень в металевих об’єктах кристалічної будови повинна виконувати такі функції, як:

– робоче γ – випромінювання повинно бути фіксованої довжини хвилі;

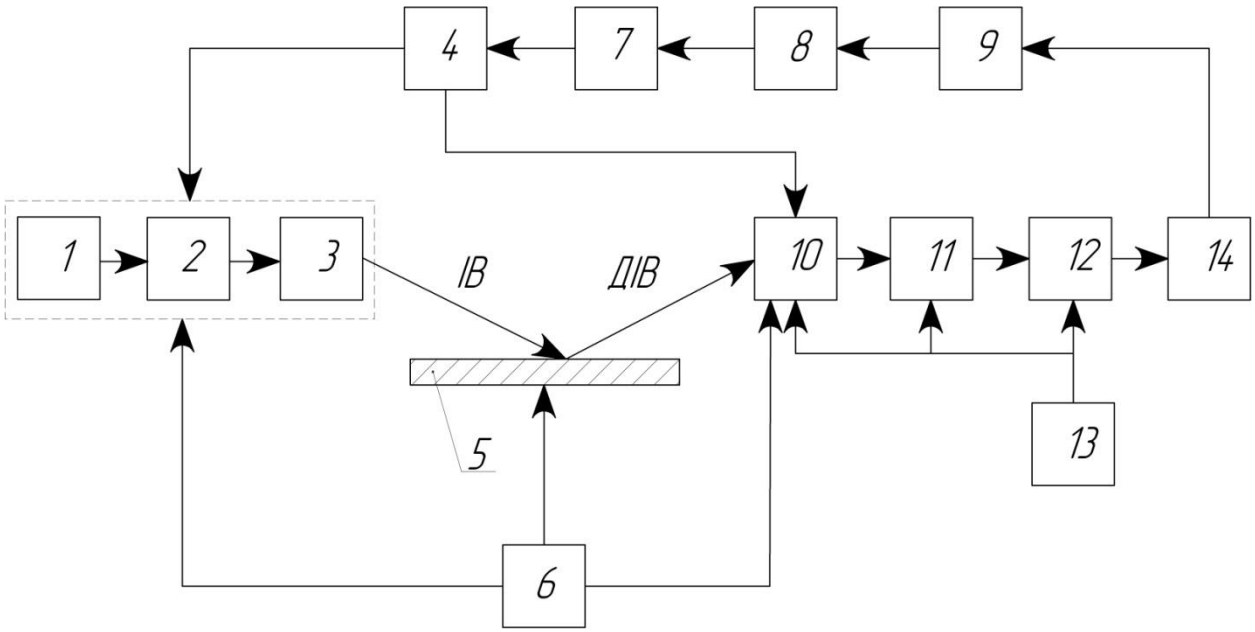
– скануюча система повинна забезпечити точні сканування з кроком 1`в діапазоні від 0 до 90^0;

– здійснення вимірювання напружень, як на овальних об’єктах так і на плоских та ін.

Джерело іонізаційного випромінювання 1 повинно забезпечувати монохроматичність γ – випромінювання (рис. 3.2). Це пояснюється наявність фільтруючої пластинки 2, яка виготовлена із берилію і забезпечує пропускання тієї довжини хвилі, яка має найбільшу енергію, та коліматора 3 який повинен пропускати випромінювання крізь щілину, тобто робити його паралельним осі поширення.

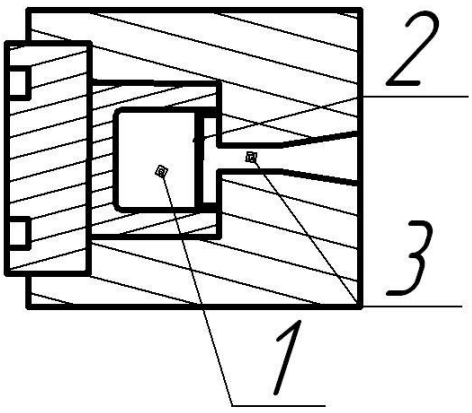
Конструкція даного джерела зображеного на рис. 3.2. В якості джерела іонізуючого випромінювання можна вибрати радіоізотоп ^{192}Ir (ГИД-И-2).

Характеристичний спектр зазвичай складається з $К_\beta$ – лінії й $К_{\alpha1}$ і $К_{\alpha2}$ – ліній (дуже тісний дублет). Інтенсивність лінії $К_\alpha$ (сумарної) приблизно в 7.5 рази вище інтенсивності $К_\beta$ – ліній [13].



1-ДІВ; 2-фільтр; 3-коліматор; 4-блок сканування; 5-ОК; 6-механізм фіксуючий; 7-редуктор; 8-двигун кроковий; 9-блок приводу; 10-давач; 11-блок обробки інформації; 12-аналого-цифровий перетворювач; 13 блок живлення; 14-персональний комп’ютер.

Рисунок 3.1 – Функціональна схема розробленої установки ВНС-1 для контролю напруженого стану об’єктів.



1 – радіоізотопне джерело ^{192}Ir, 2 – берилієвий фільтр, 3 – коліматор.

Рисунок 3.2 – Конструкція джерела іонізуючого випромінювання

Для рентгеноструктурних досліджень у переважній більшості випадків використовується $К_\alpha$ – лінія. $К_\beta$ – лінія, даючи свою систему відображень, ускладнює розшифровку рентгенограм, особливо при аналізі багатофазних систем. Але від $К_\beta$ – лінії можна позбавитися. Для цієї мети перед зразком на шляху падаючого променя ставиться селективний поглинальний фільтр 2.

Наступним елементом структурної схеми має бути скануюча система (4), яка повинна забезпечити сканування простору по півкругу в діапазоні від 0 до 90^0 з дискретним кроком в 1`, що забезпечить хорошу відтворюваність інтерференційної картини.

В даній установці при контролі об’єктів контролю у вигляді овалів і кіл передбачена механічна фіксація 6, яка конструктивно виконана у вигляді двох магнітів, і кріпильних деталей.

Виходячи із того, що необхідно забезпечити точність сканування з кутовим кроком в 1` в якості редуктора 7 доцільно вибрати червячну передачу, яка забезпечить необхідний коефіцієнт передачі в 50 раз.

Черв'ячна передача , механічний пристрій для передачі обертання між мимобіжними (зазвичай під прямим кутом) валами допомогою черв'яка (гвинта) і пов'язаного з ним черв'ячного колеса. Черв'як являє собою гвинт із трапецеїдальної або близькою до неї різьбленням, а черв'ячним колесом є зубчасте колесо, зуби якого мають особливу дугоподібну форму. Черв'ячне колесо охоплює черв'як на деякій дузі (зазвичай до 100). Черв'ячна передача використовує циліндричні черв'яки; черв'яки з витками на тороїдальній поверхні застосовуються в глобоїдних передачах. Залежно від числа заходів різьблення (ниток нарізки) розрізняють одно-, дво-і четирьох західні черв'яки; за формою профілю витка - Архімеда, з увігнутим профілем. Витки Архімедових черв'яків в осьовому перерізі окреслені трапецією і легко виготовляються точінням. Передаточне число черв'ячної передачі рівне:

$$i = \frac{z_2}{z_1}, \qquad (3.1)$$

де z_1 - число заходів різьблення черв'яка; z_2 - число зубів черв'ячного колеса.

В нашому випадку необхідно вибрати однозахідну черв'ячну передачу із яка має число зубів рівним:

$$z_2 = i \cdot z_1 = 50 \cdot 1 = 50 (\text{зубців}).$$

Кроковий двигун 8 – електричний двигун, в якому імпульсне живлення електричним струмом призводить до того, що його ротор не обертається неперервно, а виконує кожного разу обертальний рух на заданий кут [16]. Завдяки цьому, кут повороту ротора залежить від числа поданих імпульсів струму, а кутова швидкість ротора точно рівна частоті імпульсів помноженою на кут повороту ротора за один цикл роботи двигуна.

Кут повороту двигуна під впливом одного імпульсу може мати різні значення, залежні від конструкції двигуна, - як правило це значення в діапазоні від декількох градусів до декілька десятків градусів. Крокові двигуни, залежно від призначення пристосовані до виконання від частки обороту в секунду до декількох тисяч оборотів в секунду.

Перевагами такого застосування є:

- кут повороту двигуна пропорційний кількості вхідних імпульсів;
- двигун працює з повним моментом в стані спокою (якщо обмотки підключені до живлення);
- прецизійне позиціонування і повторюваність кроку – хороші крокові двигуни мають точність близько 3 % кроку і ці помилки не накопичується від кроку до кроку;
- можливість швидкого розгону, гальмування і зміни напряму руху;
- безвідмовність - у зв'язку з відсутністю щіток (довговічність двигуна залежить тільки від довговічності підшипників);
- залежність оборотів двигуна від дискретних імпульсів дозволяє керувати двигуном без зворотного зв'язку, завдяки чому кроковий двигун простіший і дешевший в керуванні;

– можливість досягнення дуже низьких швидкостей обертання з навантаженням закріпленим безпосередньо на осі двигуна;

– широкий діапазон швидкостей обертання отримуваний завдяки тому, що швидкість пропорційна частоті вхідних імпульсів.

Недоліки:

- механічний резонанс з'являється при неправильному керуванні;
- складнощі при роботі з дуже високими швидкостями.

Із вищенаведеного вибираємо двигун типу FL110ST192-6008MA із наступними технічними характеристиками:

– напруга живлення (80 – 200В);

– кількість фаз – 4;

– номінальний струм ивлення – 6А;

– кутовий крок повороту ротора при одному імпульсі – $0{,}9^0$.

Для керування роботою вибраного крокового двигуна необхідно розробити блок приводу 9, опис електричної принципової схеми якого знаходиться в розділі 3.2.

Детектор рентгенівського випромінювання 10 призначений для перетворення енергії рентгенівського випромінювання в енергію електричних імпульсів.

На сьогоднішній день сучасною промисловість розроблено і випущено велика кількість детекторів рентгенівського випромінювання серед яких є:

– детектор позиційно-чутливий лінійний відпаянний ЛКДО-1;

– детектор позиційно-чутливий вигнутий відпаянний ІКДО-1.

Позиційно-чутливі детектори застосовуються, в основному, в апаратурі рентгеноструктурного аналізу для експресного визначення фазового складу речовин при високих тисках і температурі, для прискорення зйомки слабких малокутових дифрактограм, в простих безгоніометрічних давачах фазового складу речовин. Зокрема, лінійний детектор блоку "КОМБИ" використовувався для оцінки фазового складу цементів у технологічному процесі, ЛКДО-1,

ЛКДО-2 застосовуються в приладах для оцінки напруженого стану матеріалів ИКДО-1 використовується в простому безгоніометрічному дифрактометрі Ефа. На основі ИКД-1 побудований мінідифрактометр МЗС-3. Завдяки використанню ЛКДО при вивченні тонкої структури спектрів поглинання та емісії час вимірювання скорочується в сотні разів у порівнянні з фотометричним методом і використанням нуль мірного детектора.

Отже, із вищенаведеного можна прийти до вибору в якості детектора іонізуючого випромінювання детектор позиційно-чутливий лінійний відпаяний ЛКДО-1.

Після детектора рентгенівського випромінювання ми маємо інформацію закодовану в електричний сигнал, який необхідно обробити, щоб пізніше представити отриману інформацію в візуальному виді на моніторі комп'ютера чи на паперовому носію. Саме для цього передбачений в даній конструкції блок обробки інформації 11.

Аналого-цифровий перетворювач 12 - пристрій, що перетворює вхідний аналоговий сигнал у дискретний код (цифровий сигнал) [15]. Зворотне перетворення здійснюється за допомогою ЦАП (цифро-аналогового перетворювача, DAC).

Як правило, АЦП - електронний пристрій, що перетворює напругу в двійковий цифровий код. Тим не менш, деякі неелектронні пристрої з цифровим виходом, слід також відносити до АЦП, наприклад, деякі типи перетворювачів кут-код. Найпростішим однорозрядної двійкового АЦП є компаратор.

Як правило, випускаються у вигляді мікросхем. Для більшості АЦП розрядність складає від 6 до 24 біт, частота дискретизації до 1 Мгц Один з факторів збільшують вартість мікросхем - це кількість виводів, оскільки вони змушують робити корпус мікросхеми більше, і кожен вивід повинен бути приєднаний до кристалу. Для зменшення кількості виводів часто АЦП, що працюють на низьких частотах дискретизації, мають послідовний інтерфейс.

Застосування АЦП з послідовним інтерфейсом часто дозволяє збільшити щільність монтажу і створити плату з меншою площею. Часто мікросхеми АЦП мають декілька аналогових входів, підключених усередині мікросхеми до єдиного АЦП через аналоговий мультиплексор. Різні моделі АЦП можуть включати в себе пристрої вибірки-зберігання, інструментальні підсилювачі або високовольтний диференціальний вхід і інші подібні ланцюги.

Для реалізації надійної роботи розробленої установки вибираємо 8 біт аналого-цифровий перетворювач.

Для забезпечення електричною енергією розроблені вузли і блоки необхідна наявність блоку живлення 13, який повинен забезпечити живлення крокового двигуна напругою живлення 80 В та струмом 6 А, та електронних блоків напругою 5..15 В.

Для керування роботою всієї установки в цілому і представленням отриманих даних у вигляді зручному для оцінки користувачем в нашому випадку служить персональний комп’ютер 14 із спеціально розробленим програмним забезпеченням.

3.2 Розроблення електрично-принципової схеми блоку приводу.

Блок приводу призначений для здійснення керування кроковим двигуном типу FL110ST192-6008MA

Дана електрично принципова схема МР.ММт-48.01.01.000Е3 складається із таких функціональних блоків, як:

– генератор тактових імпульсів зібраний на елементах *R1, R2, R3, C1, VT1* та *DD4*;

– чотирифазний генератор зібраний на елементах *DD9, DD10* та *DD5.2;*

– силові транзисторні ключі зібрані на елементах *R6 – R9* та *VT2 – VT9;*

– вузол задання кількості обертів крокового двигуна зібраного на елементах *DD – DD3*, *SA1 – SA3* та схеми порівняння *DD5.1;*

– лінія затримки зібрана на елементах *DD6, C2, C3, R4, R5;*

– стабілізуючий блок живлення зібраний на елементах *DD11, C4, C5;*

– кроковий двигун FL110ST192-6008MA.

Дана електрична принципова схема працює наступним чином:

Вмикаємо дану установку в мережу живлення за допомогою ключа *SA5*. Після цього починаю працювати тактовий генератор і подається живлення на всі елементи даної схеми.

При подачі імпульсу «Запуск» з персонального компютера на вхід елемента *DD7.2* і відповідно на *DD7.3,* на виході тригера *DD8* появляється активний сигнал, який поступає на вхід логічного елемента *DD4.4*, який запускає чотирифазний генератор.

Генератор керування кроковим двигуном збраний по схемі кільцевого регістра, таким чином на виході утворюються чотири прямокутні імпульси зсунуті по фазі в часі. Коли на всіх входах елемента *DD5.2* буде активний сигнал то він перезапустить генератор.

Утворені прямокутні сигнали будуть почергово поступати на силові транзисторні ключі, які в свою чергу будуть подавати високовольтні імпульси розділені в часі на обмотки крокового двигуна, який при цьому почне обертатися рівно стільки раз скільки ми виставимо за допомогою переключателів *SA1 – SA3*.

При подачі на всі входи логічного елемента *DD5.1* активного сигналу він зупинить роботу тригера *DD8* (на виході якого неактивний сигнал), і зупинить роботу чотирифазного генератора та відповідно крокового двигуна.

Для запуску схеми щераз необхідно подати активний сигнал «Запуск » з персонального компютера на вхід елемента *DD7.2*.

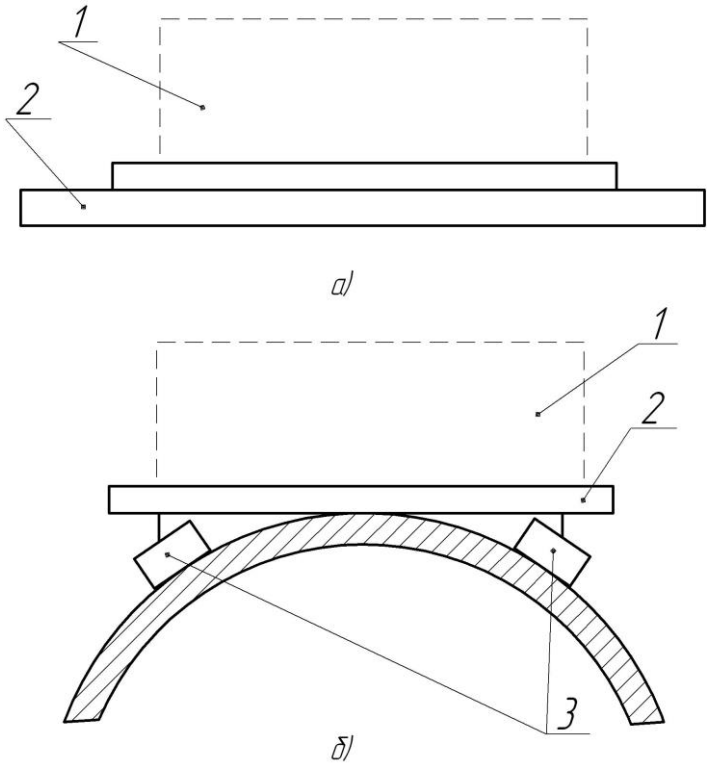
3.3 Розроблення методики проведення вимірювання напруженості у виробах

Вимірювання напруженості у виробах повинно проводитись в такій послідовності.

1. Підготувати об’єкт контролю до вимірювань:

– Очистити від корозії (наждачний папір, дрель зі спеціальною насадкою).

2. Встановити вимірювальну установку на об’єкт контролю (рис. 4.1):



а) для обєктів контролю овальної форми, б) для об’єктів контролю прямокутної форми.

1 вимірювальна установка; 2 обєкт контролю; 3 кріпильний механізм.

Рисунок 4.1 Встановлення вимірювальної установки на об’єкт контролю

– Якщо об’єкт контролю овальної форми (наприклад нафто-газопровід, резервуар та ін.) вимірювальну установку встановлюють згідно рис. 4.1, а.

– Якщо об’єкт контролю прямокутної форми (наприклад прокатний лист та ін.) вимірювальну установку встановлюють згідно рис. 4.1, б. При цьому необхідно попередньо відєднати кріпильний механізм (фіксуючі магніти) 3.

3. Підготовка вимірювальної установки до роботи:

– необхідно задати відповідний кут дослідження;

– ввімкнути вимірювальну установку в мережу живлення 220 В;

– провести запуск даної вимірювальної установки (за допомогою персонального комп’ютера з встановленим на ньому відповідним програмним забезпеченням);

4. Послідовність проведення контролю (коли відомі для досліджуваного об’єкта апроксимуючі функції):

– знімають рентгенограму для досліджуваного об'єкту і еталону (як еталон для знаходження інструментального розширення використовують зразок з свідомо крупними ДКР (~3 000-5 000 А) і без порушень кристалічної будови.) в однакових умовах;

– визначивши площі під дифракційними кривими інтенсивності і їх висоти і поділивши площі на відповідні висоти, одержують експериментальні загальні розширення ліній робочого зразка В і еталону *b*;

– розширення виражають в долях градусів $2\cdot\theta$ або в радіанах;

– вводиться поправка на немонохроматичність випромінювання для ширини ліній робочого зразка і еталону і знаходиться значення дійсного фізичного розширення (якщо це необхідно);

– далі, за формулою потрібно проаналізувати, чим обумовлено розширення ліній (дисперсністю або мікронапруженнями).

Потрібно враховувати, що одержані методом – апроксимації, абсолютні

величини ДКР можуть бути визначені з точністю до функції апроксимації, тобто залежать від виду апроксимуючої функції і можуть розрізнятися в 1,5-2 рази. Відносні вимірювання ДКР залежно від якого-небудь чинника і зміряні однаковим способом можуть бути оцінені достатньо точно з похибкою не більше 5-10 % від визначуваних величин. Точніші дані про розміри ДКР, про їх розподіл за розмірами і про мікронапруження можуть бути одержані методом гармонійного аналізу дифракційних ліній або при уточненні реальної структури за повним профілем рентгенограми.

Після одержання даних і розрахованих напруженнях з допомогою таблиць допустимих напружень робимо висновок про придатність об’єкта контролю до експлуатації

3.4 Розрахунок напружень за допомогою дифрактограм з використанням методу апроксимації

Під мікронапруженнями зазвичай розуміють напруження, які врівноважуються в об’ємі окремих кристалів чи частин кристалів (мазаїчних блоків) [13]. Розрахунок їх заснований на уявленні про те, що вони пов'язані з неоднорідною пружною деформацією кристалів і, як наслідок цього, із закономірною неоднорідною зміною міжплощинних віддалей.

Для того, щоб визначити напруження нам необхідно отримати інтерференційний максимум за допомогою розробленої установки (рис. 3.3)

– Експериментально отримані дані апроксимуємо функцією $f(y)=\frac{1}{(1+x^2)^2}$, в результаті чого отримуємо апроксимований інтерференційний максимум (рис. 3.4);

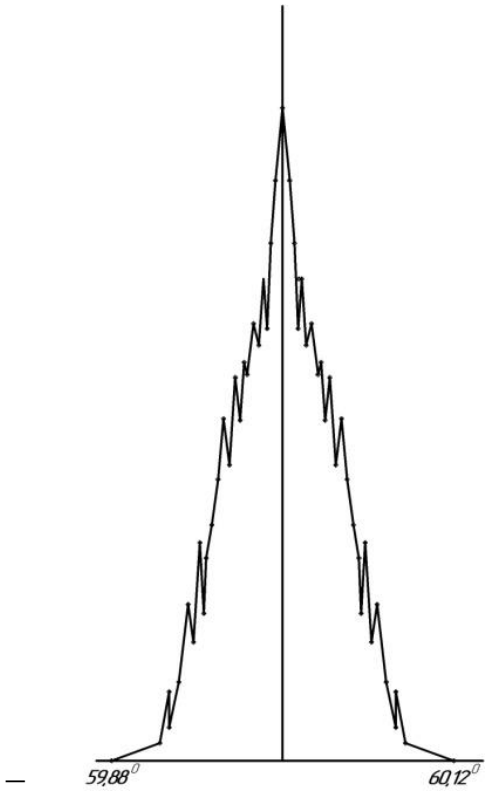


Рисунок 3.3 – Інтерференційний максимум.

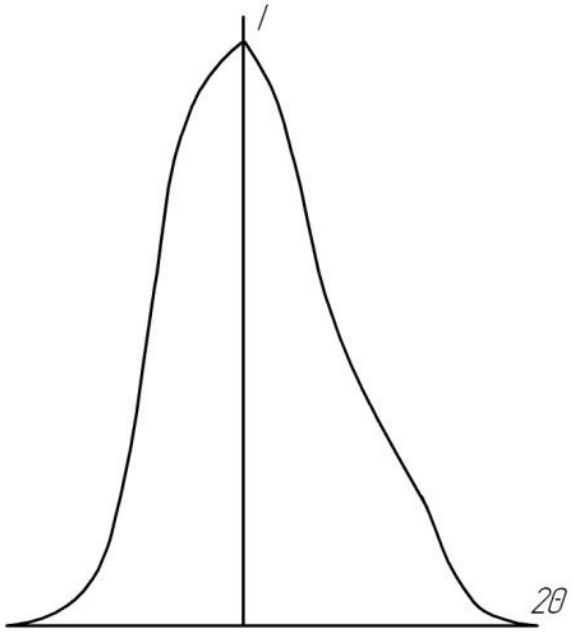


Рисунок 3.4 – Апроксимований інтерференційний максимум.

– Для визначення мікронапружень слід скористатися наступною формулою:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\beta}{4 \cdot tg(\theta_{HKL})}, \qquad (3.2)$$

де, β – дійсне фізичне розширення інтерференційної лінії; θ_{HKL} – кут між падаючим рентгенівським променем і обєктом контролю.

Визначимо від чого відбулося розширення інтерференційного максимума. Для цього скористаємося алгоритмом, який описаний в другому розділі.

1. Здійснимо розділ апроксимованого інтерференційного максимуму на $K\alpha$ –дублети. Для цього виберемо початкову точку $\Delta 2\theta$ (рис. 3.5).

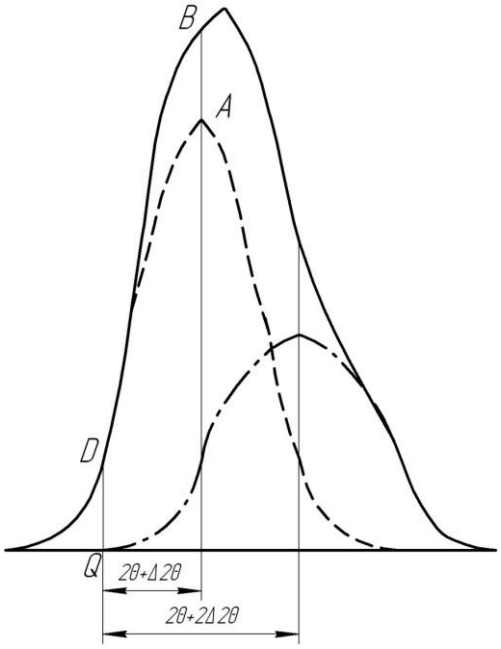


Рисунок 3.5 – Графічний розподіл K_α –дублета за методом Решингера.

Далі за відомим алгоритмом (див. розділ 2) виконаємо розділ:

$$i(2\theta_1) = I(2\theta_1) = 17{,}45.$$

З рис. 3.5 отримаємо

$$I(2\theta_1 + \Delta 2\theta_1) = 110,$$

звідси

$$i(2\theta_1 + \Delta 2\theta_1) = I(2\theta_1 + \Delta 2\theta_1) - \frac{1}{2} \cdot i(2\theta_1) = 110 - \frac{1}{2} \cdot 17{,}45 = 101{,}28.$$

З рис. 3.5 отримаємо

$$I(2\theta_1 + 2\Delta 2\theta_1) = 64{,}45,$$

звідси

$$i(2\theta_1 + 2\Delta 2\theta_1) = I(2\theta_1 + 2\Delta 2\theta_1) - \frac{1}{2} \cdot i(2\theta_1) = 64{,}45 - \frac{1}{2} \cdot 101{,}28 = 13{,}81.$$

За отриманими точками будуємо перший профіль компоненти α_1.

Аналогічні операції слід зробити для отримання лінії другого профіля компоненти α_2.

2. Визначаємо геометричні розширення $B`$ для кожного профілю:

$$B`_1 = \frac{\int_{59{,}88}^{60{,}07} \frac{1}{(1+x^2)^2}}{I(\theta_1 + \Delta 2\theta)} = 0{,}55 \text{ìì}$$

$$B`_2 = \frac{\int_{60{,}12}^{59{,}93} \frac{1}{(1+x^2)^2}}{I(\theta_1 + \Delta 2\theta)} = \frac{1550{,}14}{45{,}155} = 0{,}60 \text{мм}$$

3. Визначаємо між дублетні відстані δ для кожного профілю:

$$\delta_1 = 60{,}07^0 - 59{,}88^0 = 0{,}19^0,$$

$$\delta_1 = 60{,}12^0 - 59{,}93^0 = 0{,}19^0.$$

4. Робимо поправки на дублетність (рис.1, додаток А):

$$\frac{\delta_1}{B`_1} = \frac{0{,}19}{0{,}55} = 0{,}35,$$

$$\frac{\delta_1}{B`_1} = \frac{0{,}19}{0{,}60} = 0{,}32,$$

$$B_1 = B`_1 \cdot 0{,}72 = 0{,}55 \cdot 0{,}72 = 0{,}396 \text{ìì} \quad ,$$

$$B_2 = B`_2 \cdot 0{,}71 = 0{,}60 \cdot 0{,}71 = 0{,}426 \text{ìì} \quad .$$

5. Визначаємо β для кожного профіля компоненти:

$$\beta`_1 = \frac{1}{2} \cdot (B_1 - b + \sqrt{B_1 \cdot (B_1 - b)}) = \frac{1}{2} \cdot (0{,}396 - 0{,}22 + \sqrt{0{,}396 \cdot (0{,}396 - 0{,}22)}) =$$
$$= 0{,}22\text{ìì} \ ,$$

$$\beta`_2 = \frac{1}{2} \cdot (B_2 - b + \sqrt{B_2 \cdot (B_2 - b)}) = \frac{1}{2} \cdot (0{,}426 - 0{,}22 + \sqrt{0{,}426 \cdot (0{,}426 - 0{,}22)}) =$$
$$= 0{,}25\text{ìì} \ .$$

6. Робимо поправки на геометричне розширення (рис. 2, додаток Б):

$$\frac{b}{B_1} = \frac{0{,}22}{0{,}396} = 0{,}55,$$

$$\frac{b}{B_2} = \frac{0{,}22}{0{,}426} = 0{,}52,$$

$$\beta_1 = B_1 \cdot 0{,}73 = 0{,}396 \cdot 0{,}73 = 0{,}29\text{ìì} \ ,$$

$$\beta_2 = B_2 \cdot 0{,}72 = 0{,}426 \cdot 0{,}72 = 0{,}31\text{ìì} \ .$$

7. Знаходимо від чого виникло розширення згідно нерівності:

$$\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} < \frac{\beta_2}{\beta_1} < \frac{tg\theta_2}{tg\theta_1} \Rightarrow \frac{\cos 59{,}88}{\cos 60{,}12} < \frac{0{,}31}{0{,}29} < \frac{tg\,60{,}12}{tg\,59{,}88} \Rightarrow 1{,}007 < 1{,}06 < 1{,}07$$

Отже, можна зробити висновок, що розширення виникло через мікронапруження тому що $\frac{\beta_1}{\beta_2} < \frac{tg\,\theta_2}{tg\,\theta_1}$ Далі проведемо розрахунок цього мікронапруження.

8. Визначаємо геометричні розширення інтерференційних максимумів еталона (b) і досліджуваного об'єкта (B), згідно вищенаведеної формули:

$$B = \frac{\int_{\theta_0 - \Delta\theta_0}^{\theta_0 + \Delta\theta_0} f(x)dx}{I_{\max} dx}, \qquad (3.3)$$

де, $f(x)$ – крива розподілу інтенсивності; θ_0 – кут положення максимуму; $I_{\max}$ – максимальна висота пика при θ_0.

9. Розрахуємо геометричне розширення для досліджуваного об'єкта контролю:

$$B = \frac{\int_{\theta_0-\Delta\theta_0}^{\theta_0+\Delta\theta_0} f(x)dx}{I_{\max}dx} = \frac{\int_{60-0,12}^{60+0,12} \frac{1}{(1+x^2)^2}}{55} = 0,65\text{ìì} \quad .$$

10. Розрахуємо геометричне розширення для еталону:

$$b = \frac{\int_{\theta_0-\Delta\theta_0}^{\theta_0+\Delta\theta_0} f(x)dx}{I_{\max}dx} = \frac{\int_{60-0,02}^{60+0,02} \frac{1}{(1+x^2)^2}}{60} = 0,22\text{ìì} \quad .$$

11. Розрахуємо міжбублетну відстань для об’єкта контролю:

$$\delta = \theta_2 - \theta_1 = 60,12 - 59,88 = 0,24^0.$$

12. Розрахуємо міжбублетну відстань для еталону:

$$\delta = \theta_2 - \theta_1 = 60,02 - 59,98 = 0,04^0.$$

13. Внесемо поравку на дублетність для геометричного розширення інтерференційного максимума об’єкта контролю, для цього нам необхідно визначити величини $\frac{\delta}{B}$ та $\frac{\delta}{b}$:

$$\frac{\delta}{B} = \frac{0,24}{0,65} \approx 0,37,$$

$$\frac{\delta}{b} = \frac{0,04}{0,22} \approx 0,18.$$

14. Згідно (рис. 3.1, додаток А) поправки на дублетність для об’єкта контролю і еталону відповідно будуть рівні:

$$\frac{B`}{B} = 0,86 \Rightarrow B` = B \cdot 0,86 = 0,65 \cdot 0,86 = 0,559 \approx 0,56\text{ìì} \quad ,$$

$$\frac{b`}{b} = 0,87 \Rightarrow b` = b \cdot 0,87 = 0,22 \cdot 0,87 = 0,19\text{ìì} \quad .$$

15. Знаючи апроксимуючу функцію визначаємо значення фізичного розширення β згідно формули:

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot (B - b + \sqrt{B \cdot (B - b)}) = \frac{1}{2} \cdot (0,56 - 0,19 + \sqrt{0,56 \cdot (0,56 - 0,19)}) = 0,41\text{ìì}$$

16. Внесемо поправку на геометричне розширення (рис. 3.2, додаток Б).

$$\frac{b}{B} = \frac{0,19}{0,56} = 0,34.$$

Згідно (графіка 3.2 додатку):

$$\frac{\beta}{B} = 0{,}8 \Rightarrow \beta = B \cdot 0{,}8 = 0{,}56 \cdot 0{,}8 = 0{,}45\text{ìì} \quad .$$

17. Визначаємо відносну деформацію досліджуваного об’єкта:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\beta}{4 \cdot tg(\theta_{HKL})} = \frac{0{,}45}{4 \cdot tg(60)} = 0{,}06\text{ìì} \quad .$$

18. Визначаємо числове значення напруження:

$$\sigma = \frac{\Delta d}{d} \cdot E = 0{,}06 \cdot 10^{-3} \cdot 210 \cdot 10^{9} = 12{,}6\text{ÌÏà} \quad .$$

Для даного типу металу (Ст. 20) $\sigma_{äîï} = 120\text{ÌÏà} \quad > \sigma = 12{,}6\text{ÌÏà}$.

Отже, можна зробити висновок, що дане напруження є безпечним для експлуатації.

4 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ

В даному розділі подано класифікацію основних видів похибок, проведено аналіз основних факторів впливу на точність та чутливість контролю, що дало можливість розробити схему нагромадження похибок та розрахувати значення складових і сумарної похибки.

4.1 Класифікація основних видів похибок

На практиці використовується поділ похибок на різновидності (кількість яких є біля 30), за кожною із яких є визначена певна назва [19].

- похибка засобу вимірювань і похибка результату вимірювання. Похибка результату вимірювання — це число, яке вміщує можливі границі невизначеності отриманого значення вимірюваної величини. Похибка засобу вимірювань - це певна його властивість, для визначення якої необхідно використовувати певні правила. Похибки засобів вимірювань і похибки результатів вимірювань - це поняття не ідентичні.

Частина назв різновидностей похибок пов'язана з похибками засобів вимірювань, інша частина — з похибками результатів вимірювань, а деякі різновидності похибок використовуються як по відношенню до засобів, так і до результатів вимірювань.

- інструментальні і методичні похибки. Інструментальними похибками засобів вимірювань називаються такі, які належать конкретному засобу вимірювань, можуть бути визначеними при його випробуваннях і бути занесеними в паспорт на цей засіб вимірювань.

Крім інструментальних похибок при вимірюваннях ще є і такі похибки, які не можуть бути віднесеними до інструментальних даного засобу вимірювань, а є пов'язані з методикою проведення вимірювань. Такі похибки

називаються методичними. Дуже часто причиною виникнення методичної похибки є те, що, організовуючи вимірювання, часто вимірюють або вимушені вимірювати не ту величину, яка в принципі повинна бути виміряна, а деяку іншу, близьку, але не рівну першій величині.

Відносно терміну «методична похибка» необхідно відмітити, що останнім часом, особливо в теорії цифрових приладів, його почали використовувати цілком в іншому розумінні, а саме для позначення похибки квантування, яка викликана закладеним в прилад принципом роботи і не залежить ні від розробника, ні від виробника приладу. Похибка квантування цифрового представлення інформації немов би є обов'язковою. Тому розробник із задоволенням називає таку похибку методичною і тим самим підкреслює, що її розмір не залежить від його зусиль.

Таким чином, відмінною особливістю методичних похибок є те, що вони можуть бути визначеними лише шляхом створення математичної моделі, або імітаційним моделюванням досліджуваного об'єкта і не можуть бути знайденими навіть найбільш глибокими дослідженнями лише самого засобу вимірювань.

Так як методичні похибки не можуть бути вказаними в паспорті і на засіб вимірювань, а повинні оцінюватися експериментатором, то пін повинен при виконанні вимірювань чітко відрізняти фактичну виміряну ним величину від величини, яка підлягає вимірюванню. Така оцінка є досить складною. Вона вимагає додаткового експериментального дослідження прийнятого метода вимірювань. Якщо це вже встановлений і незмінний на протязі довгого часу метод вимірювання конкретних об'єктів вимірювання, то в результаті вказаного вище дослідження його похибки можуть бути наперед визначеними і внесені в паспорт на метод вимірювання. Розробка таких експериментальних паспортів похибок стандартних методів вимірювань - це одна із важливих задач сучасної галузевої метрології. Основна і додаткова похибки засобу вимірювань. Будь-який первинний перетворювач, вимірювальний прилад працюють в умовах, які

можуть змінюватися в часі. Це перш за все обумовлено тим, що процес вимірювання характеризується впливом на засіб вимірювань (як з боку об'єкта вимірювань, так і зовнішнього середовища, джерела живлення тощо) окремих факторів. Кожний із факторів може бути виміряним окремо, але в реальних умовах ці фактори впливають на засіб вимірювання разом з іншими факторами. Одним із таких факторів є вимірювана величина. Тому від засобу вимірювань вимагають, щоб він виділив із множини діючих на нього факторів саме вимірювану величину.

Природно, що засіб вимірювань разом із чутливістю до вимірюваної величини має і деяку чутливість до інших невимірюваних, величин, а саме: напруги живлення засобу вимірювань і об'єкту вимірювання, температури зовнішнього середовища, вібрації тощо. При атестації чи градуюванні засобу вимірювань в лабораторних умовах значення всіх впливаючих величин можуть підтримуватися у вузьких границях їх зміни (наприклад, температура в діапазон 20±5°С, напруга живлення ~220±5В). Такі обумовлені в технічній документації умови вивіряння чи градування прийнято називати нормальними, а похибка засобу вимірювань, яка виникає при таких умовах, називається основною похибкою.

Похибки, які виникають у засобі вимірювань в результаті зміни його показів внаслідок відхилення умов експлуатації від нормальних умов, називаються додатковими похибками і нормуються так званими коефіцієнтами впливу зміни окремих сторонніх факторів на покази засобу вимірювань у вигляді ψ_θ,% /(10 *K); ψ_u,% / ($\Delta U/U$)* тощо. Хоча фактично функції впливу температури θ і напруги живлення засобу вимірювань *U, як* правило, є нелінійними, для простоти розрахунків їх вважають приблизно лінійними і виникаючі додаткові похибки від їх впливу на засіб вимірювання визначають таким чином:

$$\gamma_{доп}=\psi_\theta \cdot \Delta\theta, \qquad (4.1)$$

де ψ_θ - коефіцієнт впливу температури, $\Delta\theta$ - відхилення температури від

нормальних умов.

Похибка засобу вимірювань в реальних умовах його експлуатації називається експлуатаційною і складається із його основної похибки і всіх додаткових похибок і може бути значно більшою від його основної похибки.

Поділ похибок засобу вимірювань на основну і додаткові є чисто умовним і обумовлюється в технічній документації на кожний вид засобів вимірювань.

Статичні і динамічні похибки властиві як засобам вимірювань, так і результатом вимірювань. Їх розрізняють за їх залежністю від швидкості зміни вимірюваної величини в часі. Похибки, які не залежать від вказаної швидкості називаються статичними. Похибки, які є відсутніми, коли вказана швидкість практично дорівнює нулю, і збільшуються при збільшенні швидкості зміни вимірюваної величини, називаються динамічними похибками. Таким чином динамічні похибки є однією із різновидностей додаткових похибок, які викликаються швидкістю зміни в часі вимірюваної величини.

Систематичні, прогресуючі і випадкові похибки. Систематичними називаються похибки, які змінюються з часом і є певними функціями визначених параметрів. Основна відмінна ознака систематичних похибок полягає в тому, що вони можуть бути передбаченими і завдяки цьому майже повністю виключеним шляхом введення відповідних поправок.

Значна небезпека постійних систематичних похибок полягає в тому, що їх наявність досить важко виявити. На відміну від випадкових, прогресуючих похибок, чи похибок, які є певними функціями визначених параметрів, постійні систематичні похибки зовнішньо себе ніяк не проявляють і можуть довгий час залишатися невиявленими. Одним із способів їх виявлення є проведення вивіряння засобу вимірювань шляхом повторної атестації за допомогою взірцевих мір, або сигналів.

Прикладом систематичних похибок, які є певними і постійними в часі функціями визначених параметрів, є похибки від зміни таких величин як

температури навколишнього середовища, частоти і напруги живлення. Ці похибки задані постійними функціями в часі, можуть бути передбаченими і скоригованими шляхом введення у засіб вимірювань додаткових коректуючих перетворювачів, які сприймають ці параметри і вводять, відповідні поправки в результат вимірювання.

Прогресуючими (або дрейфуючими) називаються такі непередбачені похибки, які повільно змінюються в часі. Ці похибки, як правило, виникають в результаті процесів старіння різних деталей засобів вимірювань (резисторів, конденепюрів, механічних деталей тощо). Особливістю прогресуючих похибок є те, що вони можуть бути скориговані шляхом введення поправки лише в даний момент часу, а пізніше вони знову непередбачено змінюються. Тому на відміну від систематичних похибок, які можуть бути скориговані за допомогою поправок, визначених один раз на весь термін служби засобу вимірювань, прогресуючі похибки вимагають повторних корекцій, причому тим частіших, чим більшим є термін фактичної експлуатації засобу вимірювань. Інша особливість прогресуючих похибок полягає в тому, що їх зміна в часі - це нестандартний випадковий процес, теорія якого, на відмінно від стаціонарного випадкового процесу, є більш складною. Тому вони можуть бути описані лише наближено.

Випадковими називаються похибки, які не є передбаченими ні по знаку, ні по розміру. Вони визначаються сукупністю причин, що важко піддаються аналізу. Випадкові похибки, на відмінну від систематичних, легко виявляються при повторних вимірюваннях у вигляді деякого розкиду отриманих результатів. Таким чином, головною відмінною рисою випадкових похибок є їх непередбаченість від одного відліку до іншого. Тому опис випадкових похибок може бути здійснений тільки на основі теорії ймовірностей і математичної статистики.

Однак необхідно відмітити такі дві особливості. По-перше, використання методів математичної статистики з метою обробки результатів

вимірювань правомірно лише при умові незалежності між собою окремих отриманих відліків.

По-друге, більшість формул теорії ймовірності правомірні тільки для безперервних розподілів, в той час як розподіл похибок внаслідок необхідності квантування відліків завжди є дискретним. Таким чином, умови безперервності і незалежності для випадкових похибок виконуються лише наближено, а деколи можуть і не виконуватися. В математиці під терміном «неперервна випадкова величина» розуміють більш вузьке, обмежене рядом умов поняття, ніж під терміном «випадкова похибка» у вимірювальній техніці.

Тим не менше, так як більшість похибок засобів вимірювань і результатів вимірювань є випадковими похибками, то одним із найбільш можливих розроблених способів їх опису є використання положень теорії ймовірності і її подальшого розвитку стосовно процесів передачі інформації у вигляді теорії інформації, а для обробки отриманих експериментальних даних, які містять випадкові похибки - методів математичної статистики. Тому ця група фундаментальних розділів математики є основою для розвитку сучасної теорії оцінок похибок засобів вимірювань, процесів і результатів вимірювань.

З урахуванням вказаних обмежень процес виявлення випадкових похибок засобів вимірювань і результатів вимірювань після виключення систематичних і прогресуючих похибок може розглядатися як центрований стаціонарний випадковий процес з використанням для його опису добре розроблено в математиці теорії статично незалежних випадкових величин і стаціонарних випадкових процесів.

Похибки адекватності і градуювання засобів вимірювань. Наявність цих похибок приводить до того, що характеристики засобів вимірювань (первинних перетворювачів, приладів, каналів інформаційно-вимірювальних схем) виявляються неоднозначними. При експериментальному їх визначенні, тобто при градуюванні засобів вимірювань, отримують лише ряд точок. По цій полосі точок проводять на графіку деяку плавну середню криву, яку і приймають за

характеристику засобу вимірювань, хоча деякі експериментальні точки не співпадають з нею. Для назви цих відхилень використовується ряд нижченаведених термінів. Систематичне відхилення експериментальних даних від вибраної характеристики плавної кривої в загальному випадку називається похибкою адекватності вибраної функціональної залежності (прямої лінії, експоненти тощо) фактичній характеристиці засобу вимірювань. Якщо такою характеристикою є пряма лінія, то похибка її адекватності називається похибкою лінійності засобу вимірювань. Якщо похибка адекватності змінює свій знак залежно від напрямку попереднього відліку зміни вхідної величини, то така похибка засобу вимірювань називається похибкою від гістерезису або варіацією засобу вимірювань.

Похибки засобів вимірювань можуть бути також обумовлені недостатньою точністю взірцевих засобів, що використовуються при градуюванні. Законодавча метрологія вимагає, щоб похибка взірцевих засобів вимірювань була не більшою 1/3 похибки засобу вимірювань, який підлягає градуюванню чи вивірянню. Взірцеві засоби вимірювань можуть містити систематичну похибку, а в процесі градуювання чи вивіряння мають місце лише випадкові похибки. Всі ці похибки об'єднуються під однією спільною назвою - похибка градуювання.

Похибка даного засобу вимірювань - це різниця між реальною і номінальною його характеристиками, тобто не число, а функція вимірюваної величини.

Абсолютна, відносна і приведена похибки засобу вимірювання. Різниця між реальною і номінальною характеристиками при заданому значенні x, тобто $\Delta y = y_р - y_д$, або при заданому значенні y, тобто $\Delta x = x_н - x_р$ є абсолютними похибками, так як вони виражаються відповідно в одиницях величин x і y. Знак абсолютної похибки приймається додатнім, якщо реальна характеристика знаходиться вище номінальної.

Абсолютна похибка, не може сама по собі бути показником точності

вимірювань, так як одне і те ж її значення, наприклад, Δx = 0,05 мм при x =100 мм, відповідає достатньо високій точності, а при x = 1 мм - низькій. Тому для характеристики точності результатів вимірювань ввели поняття відносної похибки $\gamma = \Delta x / x \approx \Delta y / y$, яке виражається у відносних одиницях, або у відсотках (*x і y* текучі значення вхідної і вихідної величин засобу вимірювань).

Однак вказана відносна похибка не завжди підходить для нормування похибки засобу вимірювань, так як при різних значеннях *x* буде приймати різні значення, в тому числі $\gamma = \infty$ при x = 0. Тому для нормування похибки засобу вимірювань, використовують так звану приведену похибку $\gamma_{пр}$, яка визначається як відношення абсолютної похибки, вираженої в одиницях вхідної Δx чи вихідної Δy величин, до діапазону зміни відповідно вхідної $x_к$ чи вихідної $y_к$ величин засобу вимірювань і виражається у відносних одиницях або у відсотках, тобто

$$\gamma_{ïð} = \frac{\Delta õ}{x_{\hat{E}}} = \frac{\Delta y}{y_{.\hat{E}}} \ . \qquad (4.2)$$

Її основна відмінність від відносної похибки полягає в тому, що Δx чи Δy відноситься не до змінної текучої величини *x* чи *y,* а до постійної величини (діапазону зміни вхідної чи вихідної величини засобу вимірювання). Приведена похибка зручна тим, що для багатодіапазонних засобів вимірювань вона має одне і те ж значення як для всіх точок кожного підціапазону, так і для всіх його піддіапазонів, тобто є досить зручною для нормування засобів вимірювань.

Поняття абсолютної, відносної і приведеної похибок існуючими стандартами встановлені тільки для засобів вимірювань, але їх зручно використовувати і для характеристики результатів вимірювань.

Адитивні і мультиплікативні похибки. Ці терміни використовуються для опису форми границь смуги похибок засобів вимірювань. При повірці чи градуюванні засобу вимірювання отримують ряд значень вхідної величини x_i, і ряд відповідних їм значень вихідної величини y_i. Якщо ці дані нанести на графік з координатами *x* і *y,* то отримані точки розмістяться в межах деякої

смуги (рис. 4.1.).

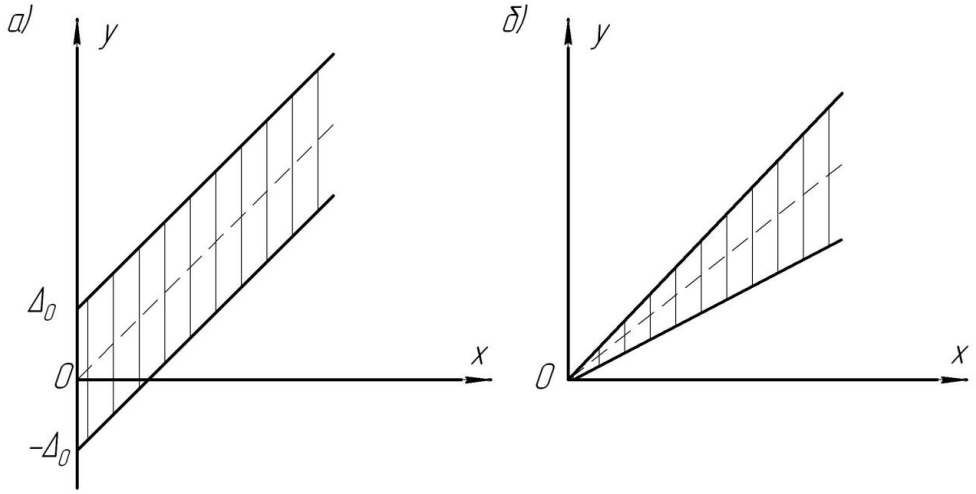


Рис. 4.1. Адитивні (а) і мультиплікативні (б) похибки засобу вимірювань

У випадку, коли точки лежать в межах ліній, які паралельні одна одній, як це показано на (рис. 4.1 *а)*, тобто абсолютна похибка засобу вимірювання на всьому діапазоні зміни вхідної величини обмежена є постійною і незалежною від миттєвого значення вхідної величини *x* (крива 1 на рис. 4.1 *б*), то така похибка називається адитивною або похибкою нуля. Це поняття однаково застосовується як до випадкових, так і до систематичних похибок.

Прикладами систематичних адитивних похибок є похибка від наявності стороннього предмета на терезах ваги, від неточного встановлення стрілки засобу вимірювань на початкову відмітку шкали перед проведенням вимірювань, від термоЕРС в схемах постійного струму. Для усунення таких похибок в багатьох засобах вимірювань передбачено механічний, або електричний пристрій для встановлення нуля (коректор нуля).

Прикладами випадкових адитивних похибок є похибка від наведення змінної ЕРС на вході приладу, похибка від теплових шумів, від тертя в опорах в рухомій частині вимірювального механізму, від ненадійного контакту при вимірюванні опору тощо.

Якщо смуга похибок має вигляд, який показано на рис. 3.1 *б*, тобто ширина смуги збільшується пропорційно зростанню вхідної величини *x,* а при *x*

= 0 ця ширина смуги дорівнює нулю, то така похибка називається мультиплікативною або похибкою чутливості. Вона також може бути як систематичною, так і випадковою. Причинами виникнення мультиплікатив-них похибок можуть бути: зміна коефіцієнта підсилення підсилювача засобу вимірювання, зміна жорсткості мембрани перетворювача тиску чи пружини перетворювача, зміна опорної напруги в цифровому вольтметрі тощо.

Похибка квантування - це специфічна різновидність похибки, яка виникає в цифрових приладах і дискретних перетворювачах. При плавній зміні вхідної величини *x,* наприклад, напруги в межах від 0 до 5 мВ, цифровий вольтметр з верхньою границею вимірювання 1000 мВ не може мати інших показів, крім дискретних значень 0-1-2-3-4-5 мВ. Тому при зростанні *x* від 0 до $x \leq 0{,}5$ мВ прилад, якщо він добре відлагоджений, буде продовжувати показувати 0 мВ. При збільшенні вхідної напруги більше 0,5 мВ прилад на виході буде показувати 1 мВ і буде такий показ зберігати до $x \leq 1{,}5$ мВ.

Внаслідок того, що вимірювана величина *x* може приймати будь-яке випадкове значення, похибка квантування також може приймати будь-яке проміжне значення в інтервалі від $+\Delta_0$ до $-\Delta_0$. Тому похибка квантування є інструментальною випадковою адитивною статичною похибкою, так як не залежить ні від миттєвого значення вхідної величини *x,* ні від швидкості зміни величини *x* в часі.

4.2 Аналіз сумарної похибки приладу для визначення напруженого стану виробів

Схема накопичення сумарної похибки розробленого приладу для контролю напруженого стану виробів приведена на рис. 4.1 і містить похибки від неточного вимірювання чи попереднього визначення значень геометричного розширення β інтерференційного максимуму, відносної деформації ε, а також результатів вимірювання напруження σ.

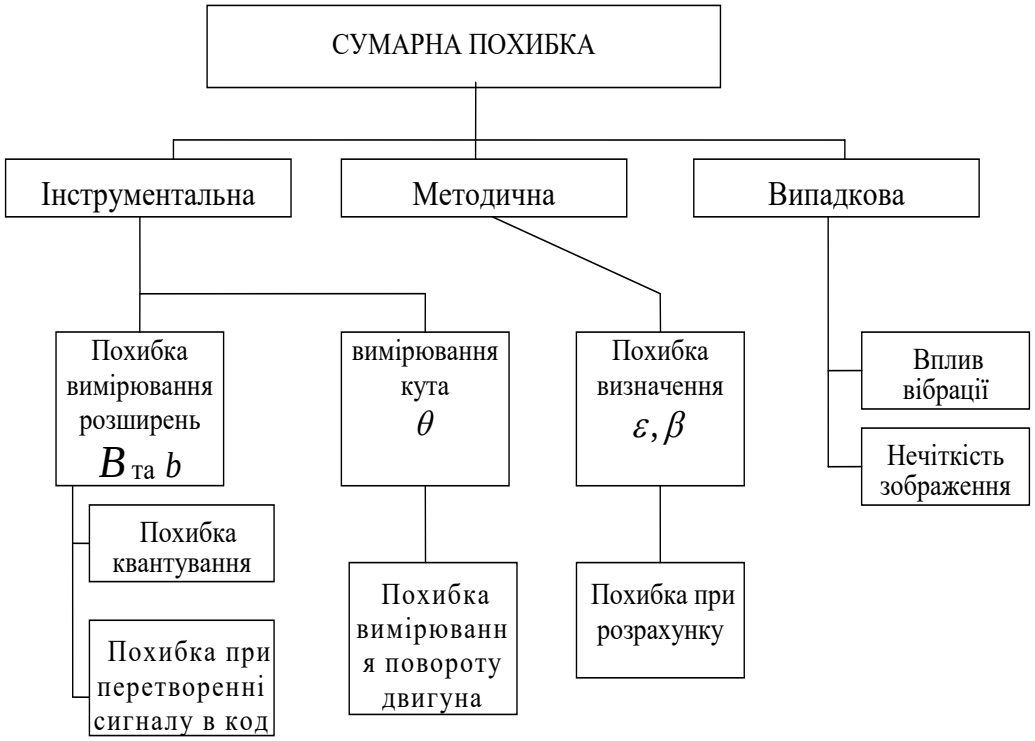


Рисунок 4.1 – Схема накопичення сумарної похибки установки ВНС-1

Вимірювання значення геометричного розширення β відбувається згідно представленого алгоритму в розділі 2.

Похибка вимірювання напруження залежить насамперед від точності апроксимуючої функції, визначення геометричного розширення, а також від визначення розширень інтерференційних максимумів, які отримані від еталона і досліджуваного зразка і від точності табличних даних коефіцієнта пружності.

Вимірювання геометричних розширень здійснюється за допомого спеціального програмного забезпечення, яке встановлено на персональний комп'ютер. Дана програма проводить розрахунок геометричних розширень з похибкою $B = 0{,}001 мм$ та $b = 0{,}001 мм$.

На точність вимірювання геометричних розширень еталона і досліджуваного об'єкту впливає похибка квантування та похибка, що виникає при перетворення сигналу в АЦП в двійковий код, а також неточність визначення кута скандувальною системою, який складає 0,5`.

Визначення β відбувається за допомогою наперед відомої формули, яка

встановлюється у розділі 2.

Аналітично значення окремих складових $\Delta\sigma_{l_i}$ сумарної похибки $\Delta\sigma$ приладу для визначення міжфазного натягу диференціальним методом можуть бути розраховані таким чином:

$$\Delta\varepsilon_{li} = \frac{\partial\varepsilon}{\partial l_i}\cdot\Delta l_i, \qquad (4.3)$$

де l_i – i-й аргумент залежності який відповідає певному параметру її правої частини; Δl_i – значення абсолютної похибки вимірювання i-го параметра.

З врахуванням цього, а також виразів (2.29) і (4.3) отримаємо такі залежності для розрахунку $\Delta\varepsilon_{li}$:

$$\Delta\varepsilon_{\beta} = \frac{1}{4\cdot tg(\theta)}\cdot\Delta\beta, \qquad (4.4)$$

$$\Delta\varepsilon_{\theta} = -\frac{1}{4}\cdot\frac{\beta}{tg(\theta)^2}\cdot(1+tg(\theta)^2)\cdot\Delta\theta. \qquad (4.5)$$

де $\Delta\beta$ і $\Delta\theta$ – абсолютні похибки визначення значень геометричного розширення β та кута повороту θ.

Сумарну абсолютну похибку приладу для конкретних значень аргументів правих частин залежностей (4.4) (4.7) можна визначити так:

$$\Delta\varepsilon = \sum_{i=1}^{n}\frac{\partial\varepsilon}{\partial l_i}\Delta l_i. \qquad (4.6)$$

Визначити похибку $\Delta\beta$ можна диференційним методом. Нехай приймаємо значення геометричного розширення інтерференційного максимуму знятого для досліджуваного об’єкта $B = 0{,}56$, геометричного розширення інтерференційного максимуму знятого для еталону $b = 0{,}22$ та абсолютні похибки $\Delta B = 0{,}001$; $\Delta b = 0.001$.

Вважаючи, що:

$$\beta = \frac{1}{2}\cdot(B - b + \sqrt{B\cdot(B-b)}), \qquad (4.7)$$

та використовуючи вираз (4.3) отримаємо:

$$\Delta\beta_B = \frac{1}{2} + \frac{1}{4\cdot(B\cdot(B-b))^{\frac{1}{2}}}\cdot(2\cdot B - b)\cdot\Delta B =$$

$$= \frac{1}{2} + \frac{1}{4\cdot(0{,}56\cdot(0{,}56-0{,}22))^{\frac{1}{2}}}\cdot(2\cdot 0{,}56 - 0{,}22)\cdot 0{,}001 = 0{,}00102\text{ìì}\ ,$$

$$\Delta\beta_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{4\cdot(B\cdot(B-b))^{\frac{1}{2}}}\cdot B = -\frac{1}{2} - \frac{1}{4\cdot(0{,}56\cdot(0{,}56-0{,}22))^{\frac{1}{2}}}\cdot 0{,}56\cdot 0{,}001 = 0{,}00051\text{ìì}\ .$$

Згідно формули (4.11) $\Delta\beta = 0{,}00102 + 0{,}00051 = 0{,}00153мм$.

Приймаючи $\beta = 0{,}45$; $\theta = 60^0$; що є усередненими значеннями параметрів і є реальними при дослідженні напружень цією розробленою методикою, та враховуючи отримані значення абсолютних похибок $\Delta\beta = 0{,}00153мм$; $\Delta B = 0{,}001$; $\Delta b = 0.001$ згідно (4.4) (4.5) буде рівне:

$$\Delta\varepsilon_\beta = \frac{1}{4\cdot tg(60^0)}\cdot 0{,}00153 = 0{,}00007мм,$$

$$\Delta\varepsilon_\theta = \frac{1}{4}\cdot\frac{0{,}22}{tg(60^0)}\cdot(1+tg(60^0)^2)\cdot 0{,}0083 = 0{,}001\text{ìì}\ .$$

Сумарна похибка згідно формули (4.11) буде рівна:

$$\Delta\varepsilon = 0{,}00007 + 0{,}00107 = 0{,}00114мм.$$

Розрахуємо приведену похибку до діапазону вимірювання згідно формули (4.3):

$$\delta = \frac{0.00114}{0.5}\cdot 100\% = 0{,}228\%.$$

Отже, приведена похибка до діапазону вимірювання приблизно складає 0,228%. Так як, щоб визначити напруження необхідно помножити відносну деформацію на стале число то можна вважати, що приведена похибка для деформації буде тою самою і для напруження.

.

ВИСНОВКИ

В даній роботі наведено один із методів застосування рентгенівського випромінювання в різних галузях народного господарства. Зокрема його застосуваннння в рентгеноструктурному та рентгеноспектральному методах контролю складу та внутрішньої будови металевих тіл, що мають кристалічну будову.

Розглянуто основні поняття деформацій і напружень, що виникають в досліджуваних обєктах контролю і розглянуто основні причини, що спричиняють їх виникнення.

Проведено огляд основних методів неруйнівного контролю, що застосовуються для визначення напруженого стану обєктів. Розглянуто переваги та недоліки кожного із розглянутих методів проведенння контролю.

На основі наведених аргументів було прийнято рішеннння застосувати радіаційний метод контролю напруженого стану. Це було аргументовано тим, що по-перше результати контролю надійно задокументовуються і це дає змогу повторно провести розшифрування і зробити висновок про придатність до експлуатації досліджуваного обєкта контролю. По-друге, цим методом ми досліджуємо зміни в об’єкті контролю на атомному рівні, що призводить до більш точного визначення наруженого стану.

На основі математичної моделі було запропоновано конструкцію установки для контролю напруженого стану, в якій було використано останнні досягнення науки, які були поєднані в цій установці.

На основі отриманої інформації було розроблено методику для контролю напруженого стану об’єктів з використанням даної установки, а такоє було проведено теоретичний розрахунок напруженння, яке в нашому випадку склало 12,6 МПа, і на основі результату можна зробити висновок, що дане напруження перебуває в межах норми, адже гранично допустиме значеннння для обєкту

виготовленого із матеріалу Ст.20 складає 120МПа.

Здійснено метрологічний аналіз. Було проведено розрахунок приведеної похибки до діапазону вимірювань, значення якої склало 0,228%, що дає зробити висновок, що розроблена установка і методика контролю дозволяють з високою точність визначати механічні напруженння, які виникають в об’єкті контролю в процесі його експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Білокур І.П.Основи дефектоскопії. /І.П. Білокур — К.:Азимут-Україна, 2004.—496 с.

2. Казіміров В. П. Рентгенографія кристалічних матеріалів : навч. посіб. / В. П. Казіміров, Е. Б. Русанов. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2016. – 287 с.

3. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: підручник: у 3 т. / ред. І.М.Кучерук. - 2-ге вид., випр. Т.3: Оптика. Квантова фізика. Київ: Техніка, 2006. 518 с.

4. Фізичні методи вивчення властивостей матеріалів : підручник / Е.К. Посвятенко, Р.В. Будяк, О.В. Мельник, В.Г. Нікітін. – К. : НТУ, 2019. – 184 с., мова українська.

5. Афанасьєва О.В. Курський Ю.С., Одаренко Є.М. Оптичні вимірювання: навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2021. Ч.1 – 180 с.

6. Опір матеріалів. Підручник / Г.С.Писаренко, О.Л.Квітка, Е.С.Уманський. За ред. Г.С.Писаренка.– 2-ге вид., доповн. І переробл.– К.: Вища шк.., 2004.–655 с.: іл..

7. Рентгенографія кристалів: Загальний практикум з фізики твердого тіла, (Навчальний посібник) / Н.Г. Євтушенко, С.А. Стукалов.- Одеса, 2013.- 187 с.

8. П.В. Петренко. Дифракційні методи структурного аналізу. Кінематичне наближення. ВПЦ Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2005. 249с.

9. Білокур І.П., Коваленко В.А. Дефектоскопія матеріалів та виробів. – Київ: Техніка, 1989. – 192 с.

10. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. - 192 с.

11. Акустичні прилади та системи-1: навчальний наочний посібник [Електронний ресурс]: навч. наоч. посіб. / О.І. Дрозденко, К.С. Дрозденко, С.О.

Козерук; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,68 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 154 с.

12. Дутчак Я.Й. Рентгенівський практикум: навч.-метод. посібн. / Я.Й. Дутчак– Львів : Видавниче об'єднання "Вища школа", 1975. – 92 с.

13. Сидоренко С.І., Барабаш Р.І. Сучасний рентгеноструктурний аналіз реальних кристалів. Київ, Наукова думка, 1997, 389с.

14. А.П. Шпак, В.Л.Карбівський, Ю.А.Куницький, О.М. Пошелюжний. Сучасні методи дослідження структури матеріалів. Київ. Академперіодика. 2001, 142с.

15. Основи електроніки : навч. посіб. / А. С. Васюра, Г. Д. Дорощенков, В. П. Кожем'яко, Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 197 с.

16. Крокові двигуни [електронний ресурс] — режим доступу: http://refit.com.ua/files/u1/stepper/fl110mm.pdf — Назва з екрану.

17. Рентгеноструктурний аналіз у матеріалознавстві: навч.-метод. посіб.: [для вищ. навч. закл.] / С. І. Мудрий, Ю. О. Кулик, А.С. Якимович. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2017.

18. Адаменко А.А. Сучасні методи радіаційної дефектоскопії. – Київ: Наук. думка, 1984. – 215 с.

19. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювання: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів./ І.С. Кісіль — Івано-Франківськ: Видавництво "Факел". 2002. – 400 с.

Додатки

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол	Приме-чание
				Документация		
A1			МР.ПНК-18.01.00.000 СК	Складальне креслення	1	
A1			МР.ПНК-18.01.00.000 Е3	Схема електрична принципова	1	
				Складальні одиниці		
		1	МР.ПНК-18.01.01.000	Блок електронний	1	
		2	МР.ПНК-18.01.02.000	Блок сканування	1	
		3	МР.ПНК-18.01.03.000	Вузол фіксації ДІВ	1	
		4	МР.ПНК-18.01.04.000	Вузол фіксації установки	2	
		5	МР.ПНК-18.01.05.000	Джгут	1	
		6	МР.ПНК-27.01.06.000	Муфта	1	
				Деталі		
		9	МР.ПНК-18.01.00.001	Кришка ДІВ	1	
		10	МР.ПНК-18.01.00.003	Кронштейн	1	
		11	МР.ПНК-18.01.00.004	Кронштейн	1	
		12	МР.ПНК-18.01.00.005	Кронштейн	1	

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Курочкін		
Пров.		Боднар		
Н.контр.				
Утв.		Середюк		

МР.МТТм-48.01.00.000

Установка ВНС-1

Лит.	Лист	Листов
Н	1	2

ІФНТУНГ

Копировал

Формат А4

Формат	Зона	Поз	Обозначение	Наименование	Кол	Приме-чание
				Стандартні вироби		
		15		Болт М8х25 ГОСТ 15589-70	14	
		16		Болт М10х14 ГОСТ 15589-70	4	
		17		Болт М8х50 ГОСТ 15589-70	2	
		18		Болт М8х30 ГОСТ 15589-70	4	
		19		Гайка М8 ГОСТ-15526-70	22	
		20		Гайка М30 ГОСТ 2526-70	1	
				Інші вироби		
		23		Двигун крокавий	1	
				FL110ST192-6008MA		
		24		Джерело ГИД-И-2	1	
		25		Редуктор червячний Ч-100	1	

Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	МР.МТТм-48.01.00.000	Лист 2

Копировал Формат А4

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
	Конденсатори		
	К15-5 ОЖО.460.084 ТУ		
	К50-16 ОЖО.464.111 ТУ		
C1,C2,C3,C4	К15-5-25В×0,01мкФ±10%	4	
C5,C6	К50-16-25В×100мкФ$\pm^{80\%}_{20\%}$	2	
DD1,DD2,DD3	Мікросхема К176ИЕ8 БКО.348.047 ТУ	3	
DD4,DD7	Мікросхема К155ЛА3 БКО.348.006 ТУ	2	
DD5	Мікросхема К155ЛА6 БКО.348.006 ТУ	1	
DD6	Мікросхема К555ЛЕ1 БКО.349.007 ТУ	1	
DD8	Мікросхема К561ТР2 БКО.348.457 ТУ	1	
DD9	Мікросхема К555ТМ8 БКО.348.289 ТУ	1	
DD10	Мікросхема К555ЛН1 БКО.348.289 ТУ	1	
DD11	Мікросхема К174ЕН3 БКО.347.175 ТУ	1	
FU1	Вставка плавка ВП1-1.0	1	
M1	Двигун крокавий FL110ST192-6008MA	1	
	Резистори МЛТ ОЖО.467.180 ТУ		
R1	МЛТ-0.25Вт-10 кОм ± 10%	1	
R2	МЛТ-0.25Вт-51 кОм ± 10%	1	
R3	СП3-10-0.25Вт-470 кОм ± 10%	1	
R4,R5	МЛТ-0.25Вт-4,7 кОм ± 10%	2	
R6,R7,R8,R9	МЛТ-0.25Вт-560 Ом ± 10%	4	
R10,R11	МЛТ-10Вт-5,1 Ом± 10%	2	

Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Курочкін		
Пров.		Баднар		
Н.контр.				
Утв.		Середюк		

МР.МТТм-48.01.01.000 ПЕ3

Блок приводу

Перелік елементів

Лит.	Лист	Листов
Н	1	2

ІФНТУНГ

Копировал

Формат А4

Поз. обозна-чение	Наименование	Кол.	Примечание
VD1-VD8	Діод КД503 ТТ3.362.045 ТУ	8	
TV1	Трансформатор ТН-19 0100.470.001 ТУ	1	
	Транзистори		
VT1	КТ315А АА0.336.200 ТУ	1	
VT2-VT5	КТ814А АА0.336.184 ТУ	4	
VT6-VT9	КТ816А АА0.336.186 ТУ	4	
XP1,XP2	З'єднувач ОНЦ-РГ-09 4/14-Р	2	
SA1-SA3	Переключатель П2Г-3-12П-14	3	
SA4	Переключатель П2Г-1-12П-14	1	

Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	МР.МТТм-48.01.01.000 ПЕЗ	Лист 2

Копировал Формат А4