

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ
З РОЗДІЛУ “РЕНТГЕНОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ”
З ДИСЦИПЛІНИ “АНАЛІЗ ТА КОНТРОЛЬ МАТЕРІАЛІВ”
ДЛЯ СТУДЕНТІВ II–IV КУРСІВ МЕХАНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Затверджено на засіданні
кафедри матеріалознавства
Протокол № 12 від 13.06.2014

Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму з дисципліни “Аналіз та контроль матеріалів” з розділу “Рентгеноструктурний аналіз матеріалів” для студентів II–IV курсів механічних спеціальностей / Укл.: Гірін О.Б., Колесник Є.В., Овчаренко В.І. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 31 с.

Укладачі: О.Б. Гірін, д-р техн. наук
Є.В. Колесник, канд. техн. наук
В.І. Овчаренко, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск О.Б. Гірін, д-р техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму з дисципліни “Аналіз та контроль матеріалів” з розділу “Рентгеноструктурний аналіз матеріалів” для студентів II–IV курсів механічних спеціальностей

Укладачі: ГІРІН Олег Борисович
КОЛЕСНИК Євген Валерійович
ОВЧАРЕНКО Володимир Іванович

Редактор Л.М. Тонкошкур
Коректор В.П. Синицька

Підписано до друку 30.06.15. Формат 60×84 1/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов. друк. арк. 1,41. Обл.-вид. арк. 1,47. Тираж 100 прим. Зам. № 143.
Свідоцтво ДК № 303 від 27.12.2000.

ДВНЗ УДХТУ, 49005, м. Дніпропетровськ, 5, просп. Гагаріна, 8

Видавничо-поліграфічний комплекс ІнКомЦентру

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

РЕНТГЕНІВСЬКИЙ ФАЗОВИЙ АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: засвоїти методику рентгенівського фазового аналізу, визначити фазовий склад матеріалу.

Матеріальне забезпечення: рентгенівські дифрактометри ДРОН-2, ДРОН-3, зразки матеріалів, дифрактограми.

1.1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Рентгенівський фазовий аналіз – один з основних методів ідентифікації фазового складу матеріалів на всіх стадіях виробництва. Метод є необхідною складовою частиною контролю технології обробки металів і сплавів. В основу методу покладене явище дифракції та інтерференції рентгенівських променів на кристалічній решітці матеріалів.

Дифракція рентгенівських променів – розсіювання рентгенівських променів кристалічними об'єктами, при якому у певних напрямках з'являються дифраговані пучки – результат інтерференції вторинного рентгенівського випромінювання, що виникає при взаємодії первинного випромінювання з електронними оболонками атомів (рис. 1.1, 1.2).

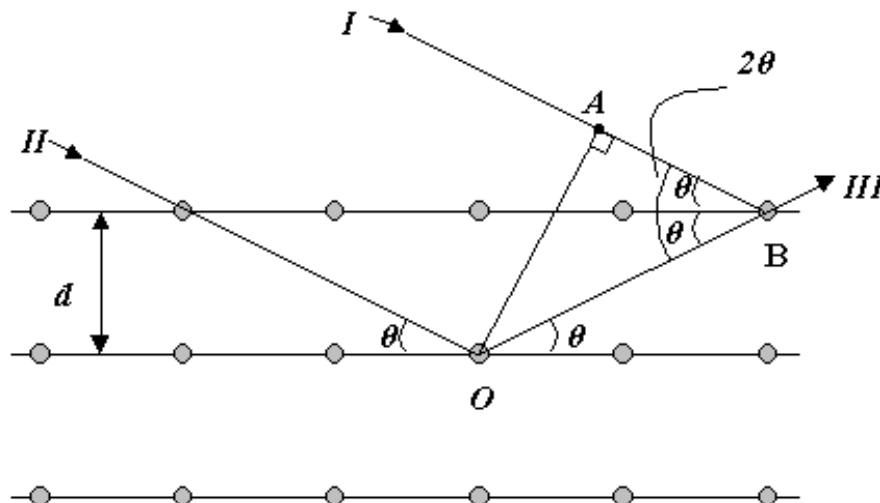


Рис. 1.1. Схема утворення вторинного рентгенівського випромінювання на кристалічній решітці досліджуваного зразка:

I і II – первинні промені; III – інтерференційний промінь

θ – кут Вульфа-Бреггів; d – міжплощинна відстань

Рентгенівський фазовий аналіз базується на тому, що кожна фаза має свою кристалічну решітку з певними параметрами і, отже, характеризується індивідуальним набором міжплощинних відстаней $d_1, d_2, d_3, \dots$. Відповідно до закону Вульфа-Бреггів (1.1), на дифрактограмі кожній системі площин (hkl) з певною міжплощинною відстанню d відповідає дифракційний максимум з певним кутом θ (рис. 1.3).

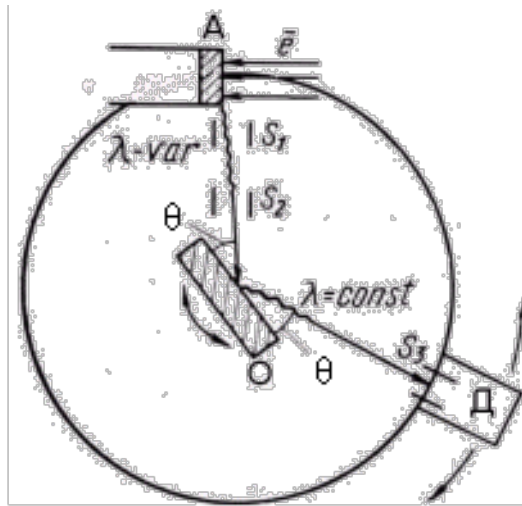


Рис. 1.2. Схема ходу променів в рентгенівському дифрактометрі типу ДРОН (вид зверху):

О – досліджуваний зразок; А – анод рентгенівської трубки;
Д – детектор рентгенівського випромінювання;
S₁, S₂, S₃ – вертикальні та горизонтальні щілини

Для ідентифікації фази, присутньої у зразку, необхідно за значеннями кутів дифракційних максимумів визначити значення міжплощинних відстаней d_i/n (1.1):

$$\frac{d_i}{n} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_i}, \quad (1.1)$$

де λ – довжина хвилі характеристичного рентгенівського випромінювання, в якому проведено зйомку;

θ_i – кут i -го максимуму на дифрактограмі.

Отриманий набір експериментальних значень d/n порівнюють з табличними (довідковими) значеннями d/n передбачуваних фаз. Порівняння починають з найбільш інтенсивних максимумів. Якщо експериментальні значення d/n збігаються зі значеннями d/n , наведеними в довіднику, для чотирьох найбільш інтенсивних максимумів передбачуваної фази, то її присутність у досліджуваному зразку можна вважати доведеною.

Якщо досліджується порошкова проба, що складається з однієї фази, то в межах похибки експерименту (0,002 нм) з табличними значеннями d/n мають збігатися значення d/n усіх максимумів дифрактограми. Крім того, мають збігатися експериментальні і довідкові значення відносної інтенсивності (I) порівнюваних максимумів з однаковими індексами hkl . При дослідженні монолітних зразків можливі відхилення $I_{\text{експ}}$ від $I_{\text{табл}}$ через наявність текстури (переважної орієнтації кристалічних решіток зерен матеріалу) та інших факторів.

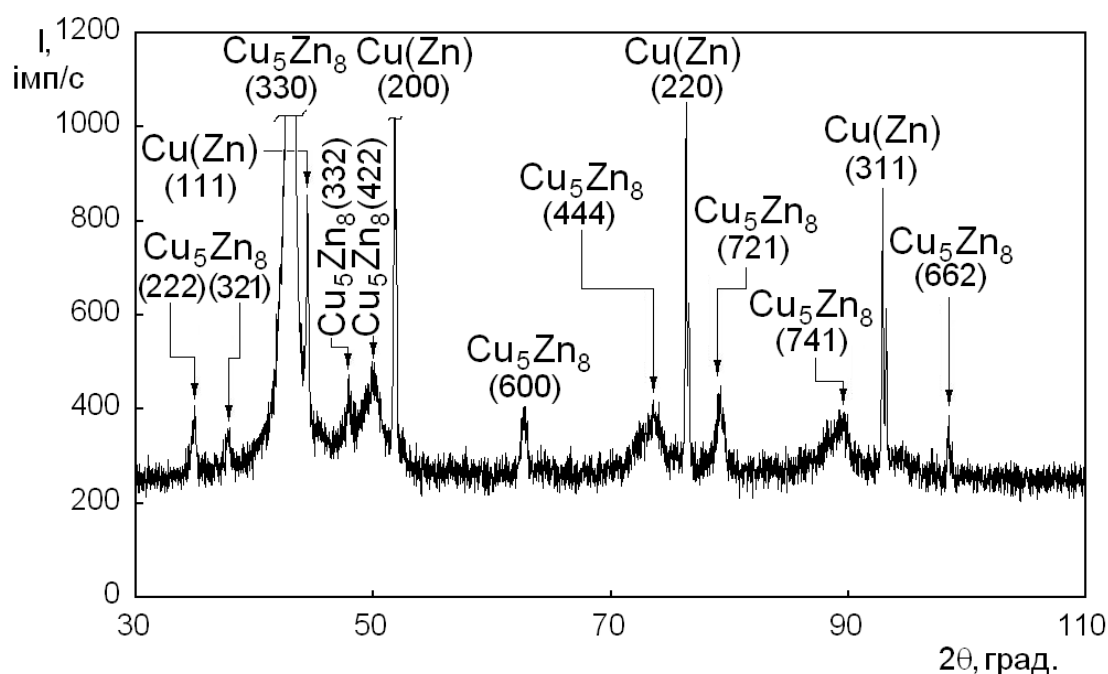


Рис. 1.3 Дифрактограма сплаву Cu–Zn, яка демонструє утворення інтерметаліду Cu_5Zn_8 при сумісній електрокристалізації міді та цинку, $\text{Cu-K}\alpha$

На дифрактограмах твердих розчинів, на відмінність від чистих елементів, усі максимуми зміщуються у напрямку більших або менших кутів θ (рис. 1.4). Напрямок зсуву обумовлюється не тільки типом твердого розчину, але і співвідношенням розмірів атомів матриці і розчиненої речовини у твердих розчинах заміщення. Тому всі експериментальні значення d/n твердих розчинів також будуть відрізнятися на деяку постійну величину від табличних, бо в довідниках наведені значення d/n для чистих речовин.

Якщо в досліджуваному зразку присутні кілька фаз, то дифрактограма є результатом накладення дифракційних картин від кожної фази (рис. 1.4). Причому інтенсивність максимумів кожної фази залежить від її об'ємної частки (у випадку порошкових зразків). У разі дослідження монолітних зразків на інтенсивність дифракційних максимумів можуть впливати додатково текстура, анізотропія субструктури та інші фактори.

Чутливість фазового аналізу, тобто мінімальна кількість фази, яку можна визначити в багатофазних композиціях залежить від ряду факторів:

1. Від співвідношення коефіцієнтів поглинання фази, що досліджується, і всієї суміші.
2. Від симетрії решітки досліджуваної фази: чим вища симетрія, тим при меншому вмісті фаза може бути виявленою.
3. Від відбивної здатності атомних площин: чим вища відбивна здатність, тим вища чутливість.
4. Від наявності напружень і дефектів кристалічної будови: чутливість методу помітно знижується при наявності в досліджуваному зразку залишкових мікронапружень.
5. Від величини кристалітів: чутливість методу знижується у випадку малих розмірів кристалітів (менш ніж 0,01 мкм).

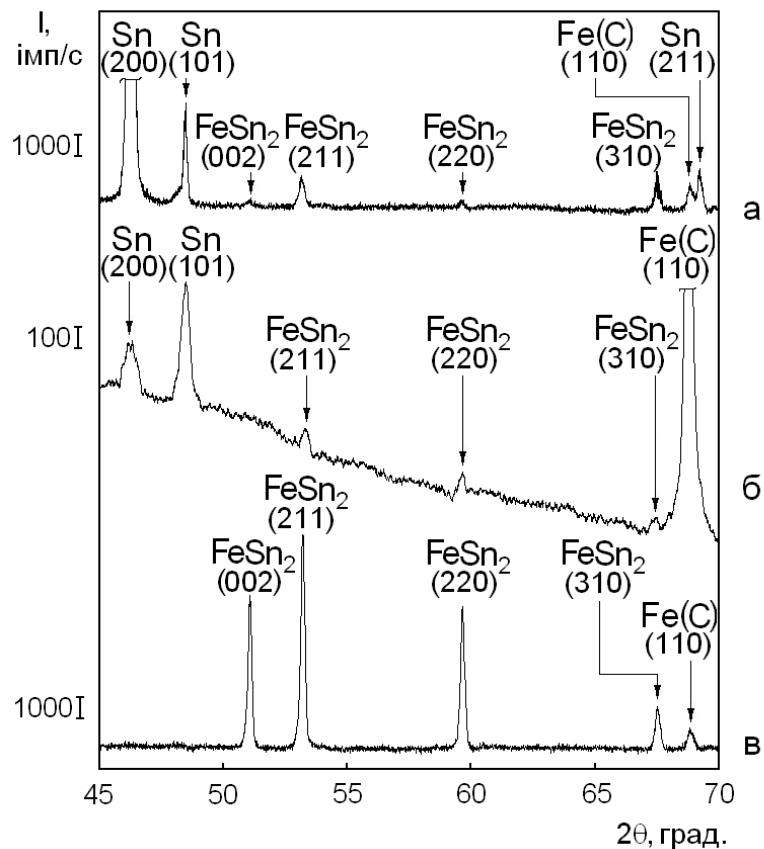


Рис. 1.4. Дифрактограми, що демонструють наявність хімічної сполуки FeSn_2 на межі розділу між електроосадженим оловом і сталеву основою:
а – промисловий зразок лудженої оплавленої жерсті; б – експериментальний зразок лудженої неоплавленої жерсті; в – еталон фази FeSn_2

Чутливість фазового аналізу може бути підвищена шляхом зменшення загального фону на дифрактограмі в результаті застосування монохроматорів, підбором рентгенівської трубки й ретельним приготуванням зразка. При зйомці багатофазових систем бажано використовувати більш м'яке випромінювання, що дозволяє збільшити кутову відстань між максимумами на дифрактограмі. Чутливість методу складає близько 5%.

1.2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Провести зйомку дифрактограми досліджуваного порошкового зразка на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 або ДРОН-3 у залізному випромінюванні або за вказівкою викладача використати одну з готових дифрактограм полікристалічних матеріалів (Додаток Б).

2. Використовуючи відмітки кутів на дифрактограмі визначити значення кутів θ (град), що відповідають дифракційним максимумам.

3. Оцінити інтенсивність I дифракційних максимумів у відсотках або у відносних одиницях. При цьому висота найбільшого з них приймається за 100% або за 1,0. Інтенсивність інших максимумів визначається шляхом співвідношення висоти даного максимуму й висоти найбільш інтенсивного.

4. Визначити $\sin \theta$ для всіх максимумів (табл. А.1).

5. Провести розподіл дифракційних максимумів на α та β .

Для цього слід скористатися наступними положеннями:

а) максимуми β розташовані на менших кутах θ , ніж відповідні їм максимуми α ;

б) максимуми α у 4–5 разів більш інтенсивні ніж відповідні їм максимуми β ;

в) для відповідних α та β максимумів виконується співвідношення (1.2):

$$\frac{\sin \theta_{\alpha}}{\sin \theta_{\beta}} \approx 1,1. \quad (1.2)$$

6. За формулою (1.1) визначити d/n тільки для α -максимумів. Для розрахунку використовувати значення довжини хвилі K_{α} -серії рентгенівського випромінювання заліза $\lambda = 0,1937$ нм.

7. Порівняти експериментальні значення d/n та I з табличними (табл. А.2) для фаз, наявність яких передбачається в досліджуваному зразку. Ідентифікувати фази.

1.3 ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Надати визначення рентгенівському фазовому аналізу, описати яке явище покладене в основу цього методу дослідження.

2. Надати визначення явищу дифракції рентгенівських променів.

3. Навести формулу визначення значення міжплощинних відстаней d_i/n .

4. Описати відмінність дифрактограм чистих елементів, твердих розчинів і багатофазних систем.

5. Описати від яких факторів залежить чутливість фазового аналізу та як її можна підвищити.

6. За представленою дифрактограмою визначити фазовий склад матеріалу та записати одержані результати аналізу у вигляді таблиці 1.1.

7. Зробити висновки з роботи.

Таблиця 1.1

Дані для визначення фазового складу матеріалу

№ з/п	Експериментальні дані					Довідкові дані					
	I	θ	$\sin \theta$	α або β	d/n , нм						
						d/n , нм	I	d/n , нм	I	d/n , нм	I

1.4 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Опишіть дифракцію та інтерференцію рентгенівських променів на кристалічній решітці матеріалів.

2. Яке явище покладене в основу рентгенівського фазового аналізу?

3. Яким є порядок проведення рентгенівського фазового аналізу?

4. У чому особливість дифрактограм, одержаних від багатофазових зразків?

5. Від яких факторів залежить чутливість фазового аналізу та як її можна підвищити?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

РЕНТГЕНОГРАФІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ БЛОКІВ

Мета роботи: засвоїти методику визначення розмірів блоків, визначити розмір блоків в металевому матеріалі.

Матеріальне забезпечення: рентгенівські дифрактометри ДРОН-2, ДРОН-3, зразки металевих матеріалів, еталони матеріалів, дифрактограми.

2.1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Металеві матеріали мають, як правило, полікристалічну будову, тобто складаються з великої кількості кристалітів, що називаються зернами. Окремі зерна відрізняються орієнтацією кристалічних решіток. Зерно не є монолітним кристалітом, побудованим із строго паралельних атомних шарів. Насправді воно складається ніби то з мозаїки окремих блоків малих розмірів, кристалографічні площини в яких розорієнтовані на невеликий кут – близько декількох хвилин. Складові такої структури називаються блоками або блоками мозаїки. Блок – це область зерна з ідеальною кристалічною решіткою. Численні властивості матеріалів (наприклад, твердість) значною мірою залежать від розмірів блоків.

Рентгеноструктурний аналіз дозволяє визначати розміри блоків у зернах у діапазоні від 5 до 200 нм (або 500 нм), аналізуючи зміну інтенсивності (або ширини відповідно) дифракційних максимумів двох порядків відбиття від визначеної площини.

Відповідно до теорії розсіювання рентгенівських променів, інтегральна інтенсивність інтерференційних максимумів дифрактограми від великих кристалів послаблюється через взаємодію первинного пучка рентгенівських променів із променями, відбитими від атомних площин кристала відповідно до рівняння Вульфа-Бреггів (1.1). Однак при більш точних розрахунках варто враховувати, що в реальних матеріалах відбувається ослаблення інтерференційних променів через взаємодію променів, відбитих від сусідніх блоків. Цей ефект еквівалентний збільшенню коефіцієнта поглинання рентгенівських променів і проявляється тим сильніше, чим меншим є кут відбиття θ . Для дифракційних максимумів з великими кутами θ (великими індексами hkl) ефектом можна зневажати (рис. 2.1).

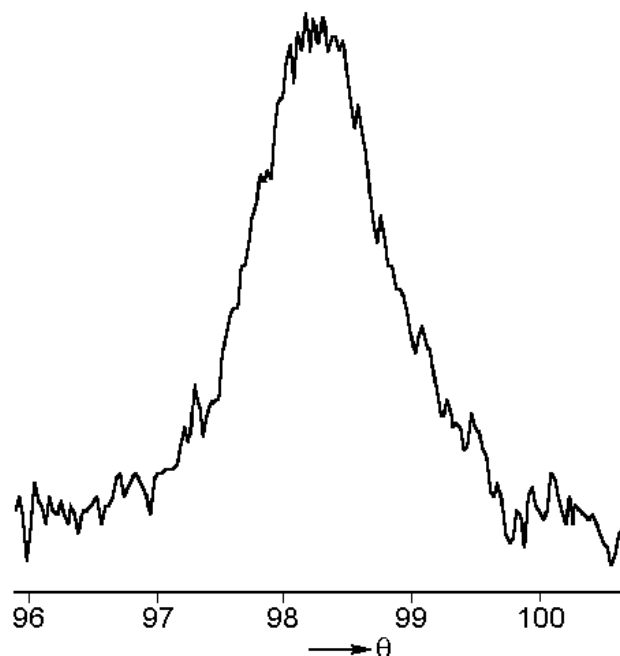


Рис. 2.1. Крива запису інтерференції {220} електроосаджених хромових покриттів

Зі зменшенням розмірів блоків цей ефект послаблюється і для кристалів із блоками меншими, ніж 200 нм, що називаються ідеально мозаїчними, цілком зникає. Порівнюючи інтенсивності дифракційних максимумів досліджуваного зразка і спеціально приготованого з того ж матеріалу ідеально мозаїчного еталону з малим розміром блоків, можна визначити розміри блоків в досліджуваному зразку.

Підготовка ідеально мозаїчного еталона може викликати деякі труднощі. Якщо досліджуваний зразок є монолітним полікристалом (шліф), то еталон можна одержати поверхневим обдиранням на наждаковому папері чи шліфувальному крузі (поперемінно в різних напрямках чи при обертанні) зразка такого ж складу. Якщо досліджуваний зразок є порошком, то еталон можна одержати інтенсивним тривалим нагартуванням порошку в ступці чи розмелюванням у кульовому млині.

Перед використанням необхідно перевірити якість еталона. Для цього необхідно виміряти і порівняти з теоретичними (табличними) значеннями відношення інтенсивностей відбиттів різних порядків від однієї системи кристалографічних площин (наприклад {110} і {220} для α -Fe). Зразок може служити еталоном тільки в тому випадку, якщо експериментально знайдені відношення відрізняються від теоретичних на величину, що не перевищує похибку вимірювання інтенсивностей дифракційних максимумів.

Для визначення розмірів кристалічних блоків можна скористатися наступною методикою. Якщо заздалегідь відомо, що зразок не має текстури, то для кутів $\theta \leq 35^\circ$ з точністю не гірше ніж 15% виконується наступне рівняння (2.1):

$$\frac{I_{зр}}{I_{ет}} \cong \varphi(nq), \quad (2.1)$$

де $I_{зр}$ – інтегральна інтенсивність одного з перших дифракційного максимумів hkl на дифрактограмі досліджуваного зразка;

$I_{ет}$ – інтегральна інтенсивність дифракційного максимуму з тим самим індексом hkl на дифрактограмі еталона;

n – кількість паралельних площин hkl у межах одного блоку;

q – відбивна здатність однієї атомної площини;

φ – функція, характер якої представлений на рис. 4.2.

Визначивши за даними дифрактограм зразка та еталону відношення в лівій частині формули (2.1), визначають значення nq за графіком на рис. 2.2 або за даними табл. 2.1.

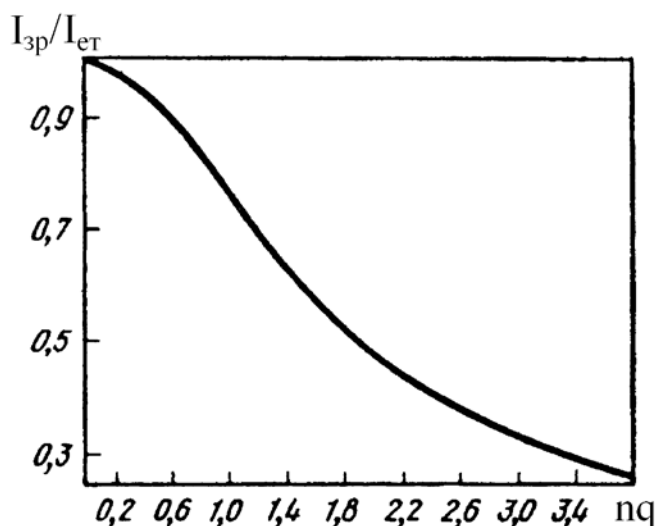


Рис. 2.2. Функція $I_{зр}/I_{ет} = \varphi(nq)$

Таблиця 2.1

Значення $I_{зр}/I_{ет}$ залежно від nq

nq	$I_{зр}/I_{ет}$	nq	$I_{зр}/I_{ет}$	nq	$I_{зр}/I_{ет}$
0,1	0,997	0,8	0,830	2,0	0,480
0,2	0,987	0,9	0,800	2,2	0,440
0,3	0,971	1,0	0,760	2,4	0,410
0,4	0,950	1,2	0,700	2,6	0,380
0,5	0,924	1,4	0,630	2,8	0,360
0,6	0,895	1,6	0,580	3,0	0,330
0,7	0,863	1,8	0,530		

Величину q визначають за формулою (2.2)

$$q = \frac{r_0 \cdot d \cdot \lambda \cdot F}{V_{ком} \cdot \sin \theta}, \quad (2.2)$$

де $r_0 = 2,8 \cdot 10^{-4}$ нм – радіус електрона;
 $V_{\text{ком}}$ – об’єм елементарної комірки (табл. А.4);
 d – міжплощинна відстань для площин з індексом hkl (табл. А.2);
 λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання (табл. А.3);
 θ – кут дифракційного максимуму з індексом hkl ;
 F – структурна амплітуда (табл. А.5).

Знаючи величину q , можна визначити n за вже відомим значенням nq . Розмір кристалічних блоків в досліджуваному зразку визначається за формулою (2.3)

$$D = nd . \quad (2.3)$$

2.2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Для запропонованого матеріалу зразка за довідковими даними (табл. А.2) вибрати одну з перших ліній hkl . Виходячи з табличного значення d за формулою Вульфа-Бреггів розрахувати відповідний кут дифракційного максимуму θ (2.4):

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda}{2d} . \quad (2.4)$$

Для розрахунку слід використовувати значення довжини хвилі K_{α} -серії рентгенівського випромінювання заліза $\lambda = 0,1937$ нм.

2. Провести зйомку дифракційного максимуму hkl на розрахованому куті θ для досліджуваного зразка і для еталона на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 або ДРОН-3 у залізному випромінюванні або за вказівкою викладача використати одну з готових дифрактограм максимуму (110) сталевого зразка (Додаток В).

3. Визначити інтегральні інтенсивності зразка $I_{\text{зр}}$ й еталона $I_{\text{ет}}$, вимірюючи площі під відповідними дифракційними максимумами hkl на дифрактограмах. Обчислити їх відношення $I_{\text{зр}}/I_{\text{ет}}$.

4. Визначити значення nq за даними рис. 2.2 або табл. 2.1.
5. Обчислити значення q за формулою (2.2).
6. Обчислити значення n за значенням nq .
7. Розрахувати розмір блоків D за формулою (2.3).

2.3 ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Дати визначення блокам мозаїки.
2. Описати методику підготовки ідеально мозаїчного еталона.
3. Описати методику визначення розмірів кристалічних блоків.
4. За представленою дифрактограмою визначити розміри блоків матеріалу та записати одержані результати аналізу у вигляді таблиці 2.2.
5. Зробити висновки з роботи.

Таблиця 2.2

Визначення розмірів блоків

Матеріал	hkl	d, нм	λ , Å	θ , °	$I_{зр}$, мм ²	$I_{ет}$, мм ²	$I_{зр} / I_{ет}$	nq	q	n	D, нм

2.4 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що є блоками, і які їх розміри?
2. Який порядок визначення розмірів блоків?
3. Назвіть порядок рентгенографічного визначення розмірів блоків.
4. З яких операцій складається приготування ідеально мозаїчного еталона?
5. Як оцінити якість ідеально мозаїчного еталону?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ [Текст] : учеб. пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : МИСИС, 2002. – 360 с.
2. Уманский, Я. С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия [Текст] / Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, А. Н. Иванов, Л. Н. Расторгуев. – М. : Металлургия, 1982. – 632 с.
3. Учебно-методическое пособие по дисциплине “Рентгенография и электронная микроскопия” (лабораторный практикум раздела “Рентгенография”) для студентов специальности 11.07 / Сост. : Т. П. Шмырева, Л. С. Кривуша, Т. А. Зайцева. – Днепропетровск: ДМетИ, 1992. – 54 с.
4. Миркин, Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов [Текст] / Л. И. Миркин. – М. : Машиностроение, 1979. – 134 с.

Довідкові дані

Таблиця А.1

Синуси кутів

Град	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,0000	0,0017	0,0035	0,0052	0,0070	0,0087	0,0105	0,0122	0,0140	0,0157
1	0,0175	0,0192	0,0209	0,0227	0,0244	0,0262	0,0279	0,0297	0,0314	0,0332
2	0,0349	0,0366	0,0384	0,0401	0,0419	0,0436	0,0454	0,0471	0,0488	0,0506
3	0,0523	0,0541	0,0558	0,0576	0,0593	0,0610	0,0628	0,0645	0,0663	0,0680
4	0,0698	0,0715	0,0732	0,0750	0,0767	0,0785	0,0802	0,0819	0,0837	0,0854
5	0,0872	0,0889	0,0906	0,0924	0,0941	0,0958	0,0976	0,0993	0,1011	0,1028
6	0,1045	0,1063	0,1080	0,1097	0,1115	0,1132	0,1149	0,1167	0,1184	0,1201
7	0,1219	0,1236	0,1253	0,1271	0,1288	0,1305	0,1323	0,1340	0,1357	0,1374
8	0,1392	0,1409	0,1426	0,1444	0,1461	0,1478	0,1495	0,1513	0,1530	0,1547
9	0,1564	0,1582	0,1599	0,1616	0,1633	0,1650	0,1668	0,1685	0,1702	0,1719
10	0,1736	0,1754	0,1771	0,1788	0,1805	0,1822	0,1840	0,1857	0,1874	0,1891
11	0,1908	0,1925	0,1942	0,1959	0,1977	0,1994	0,2011	0,2028	0,2045	0,2062
12	0,2079	0,2096	0,2113	0,2130	0,2147	0,2164	0,2181	0,2198	0,2215	0,2233
13	0,2250	0,2267	0,2284	0,2300	0,2317	0,2334	0,2351	0,2368	0,2385	0,2402
14	0,2419	0,2436	0,2453	0,2470	0,2487	0,2504	0,2521	0,2538	0,2554	0,2571
15	0,2588	0,2605	0,2622	0,2639	0,2656	0,2672	0,2689	0,2706	0,2723	0,2740
16	0,2756	0,2773	0,2790	0,2807	0,2823	0,2840	0,2857	0,2874	0,2890	0,2907
17	0,2924	0,2940	0,2957	0,2974	0,2990	0,3007	0,3024	0,3040	0,3057	0,3074
18	0,3090	0,3107	0,3123	0,3140	0,3156	0,3173	0,3190	0,3206	0,3223	0,3239
19	0,3256	0,3272	0,3289	0,3305	0,3322	0,3338	0,3355	0,3371	0,3387	0,3404
20	0,3420	0,3437	0,3453	0,3469	0,3486	0,3502	0,3518	0,3535	0,3551	0,3567
21	0,3584	0,3600	0,3616	0,3633	0,3649	0,3665	0,3681	0,3697	0,3714	0,3730
22	0,3746	0,3762	0,3778	0,3795	0,3811	0,3827	0,3843	0,3859	0,3875	0,3891
23	0,3907	0,3923	0,3939	0,3955	0,3971	0,3987	0,4003	0,4019	0,4035	0,4051
24	0,4067	0,4083	0,4099	0,4115	0,4131	0,4147	0,4163	0,4179	0,4195	0,4210
25	0,4226	0,4242	0,4258	0,4274	0,4289	0,4305	0,4321	0,4337	0,4352	0,4368
26	0,4384	0,4399	0,4415	0,4431	0,4446	0,4462	0,4478	0,4493	0,4509	0,4524
27	0,4540	0,4555	0,4571	0,4586	0,4602	0,4617	0,4633	0,4648	0,4664	0,4679
28	0,4695	0,4710	0,4726	0,4741	0,4756	0,4772	0,4787	0,4802	0,4818	0,4833
29	0,4848	0,4863	0,4879	0,4894	0,4909	0,4924	0,4939	0,4955	0,4970	0,4985
30	0,5000	0,5015	0,5030	0,5045	0,5060	0,5075	0,5090	0,5105	0,5120	0,5135
31	0,5150	0,5165	0,5180	0,5195	0,5210	0,5225	0,5240	0,5255	0,5270	0,5284
32	0,5299	0,5314	0,5329	0,5344	0,5358	0,5373	0,5388	0,5402	0,5417	0,5432
33	0,5446	0,5461	0,5476	0,5490	0,5505	0,5519	0,5534	0,5548	0,5563	0,5577
34	0,5592	0,5606	0,5621	0,5635	0,5650	0,5664	0,5678	0,5693	0,5707	0,5721
35	0,5736	0,5750	0,5764	0,5779	0,5793	0,5807	0,5821	0,5835	0,5850	0,5864
36	0,5878	0,5892	0,5906	0,5920	0,5934	0,5948	0,5962	0,5976	0,5990	0,6004
37	0,6018	0,6032	0,6046	0,6060	0,6074	0,6088	0,6101	0,6115	0,6129	0,6143
38	0,6157	0,6170	0,6184	0,6198	0,6211	0,6225	0,6239	0,6252	0,6266	0,6280
39	0,6293	0,6307	0,6320	0,6334	0,6347	0,6361	0,6374	0,6388	0,6401	0,6414
40	0,6428	0,6441	0,6455	0,6468	0,6481	0,6494	0,6508	0,6521	0,6534	0,6547
41	0,6561	0,6574	0,6587	0,6600	0,6613	0,6626	0,6639	0,6652	0,6665	0,6678
42	0,6691	0,6704	0,6717	0,6730	0,6743	0,6756	0,6769	0,6782	0,6794	0,6807
43	0,6820	0,6833	0,6845	0,6858	0,6871	0,6884	0,6896	0,6909	0,6921	0,6934
44	0,6947	0,6959	0,6972	0,6984	0,6997	0,7009	0,7022	0,7034	0,7046	0,7059
45	0,7071	0,7083	0,7096	0,7108	0,7120	0,7133	0,7145	0,7157	0,7169	0,7181
46	0,7193	0,7206	0,7218	0,7230	0,7242	0,7254	0,7266	0,7278	0,7290	0,7302
47	0,7314	0,7325	0,7337	0,7349	0,7361	0,7373	0,7385	0,7396	0,7408	0,7420
48	0,7431	0,7443	0,7455	0,7466	0,7478	0,7490	0,7501	0,7513	0,7524	0,7536
49	0,7547	0,7559	0,7570	0,7581	0,7593	0,7604	0,7615	0,7627	0,7638	0,7649

Продовження таблиці А.1

Град	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
50	0,7660	0,7672	0,7683	0,7694	0,7705	0,7716	0,7727	0,7738	0,7749	0,7760
51	0,7771	0,7782	0,7793	0,7804	0,7815	0,7826	0,7837	0,7848	0,7859	0,7869
52	0,7880	0,7891	0,7902	0,7912	0,7923	0,7934	0,7944	0,7955	0,7965	0,7976
53	0,7986	0,7997	0,8007	0,8018	0,8028	0,8039	0,8049	0,8059	0,8070	0,8080
54	0,8090	0,8100	0,8111	0,8121	0,8131	0,8141	0,8151	0,8161	0,8171	0,8181
55	0,8192	0,8202	0,8211	0,8221	0,8231	0,8241	0,8251	0,8261	0,8271	0,8281
56	0,8290	0,8300	0,8310	0,8320	0,8329	0,8339	0,8348	0,8358	0,8368	0,8377
57	0,8387	0,8396	0,8406	0,8415	0,8425	0,8434	0,8443	0,8453	0,8462	0,8471
58	0,8480	0,8490	0,8499	0,8508	0,8517	0,8526	0,8536	0,8545	0,8554	0,8563
59	0,8572	0,8581	0,8590	0,8599	0,8607	0,8616	0,8625	0,8634	0,8643	0,8652
60	0,8660	0,8669	0,8678	0,8686	0,8695	0,8704	0,8712	0,8721	0,8729	0,8738
61	0,8746	0,8755	0,8763	0,8771	0,8780	0,8788	0,8796	0,8805	0,8813	0,8821
62	0,8829	0,8838	0,8846	0,8854	0,8862	0,8870	0,8878	0,8886	0,8894	0,8902
63	0,8910	0,8918	0,8926	0,8934	0,8942	0,8949	0,8957	0,8965	0,8973	0,8980
64	0,8988	0,8996	0,9003	0,9011	0,9018	0,9026	0,9033	0,9041	0,9048	0,9056
65	0,9063	0,9070	0,9078	0,9085	0,9092	0,9100	0,9107	0,9114	0,9121	0,9128
66	0,9135	0,9143	0,9150	0,9157	0,9164	0,9171	0,9178	0,9184	0,9191	0,9198
67	0,9205	0,9212	0,9219	0,9225	0,9232	0,9239	0,9245	0,9252	0,9259	0,9265
68	0,9272	0,9278	0,9285	0,9291	0,9298	0,9304	0,9311	0,9317	0,9323	0,9330
69	0,9336	0,9342	0,9348	0,9354	0,9361	0,9367	0,9373	0,9379	0,9385	0,9391
70	0,9397	0,9403	0,9409	0,9415	0,9421	0,9426	0,9432	0,9438	0,9444	0,9449
71	0,9455	0,9461	0,9466	0,9472	0,9478	0,9483	0,9489	0,9494	0,9500	0,9505
72	0,9511	0,9516	0,9521	0,9527	0,9532	0,9537	0,9542	0,9548	0,9553	0,9558
73	0,9563	0,9568	0,9573	0,9578	0,9583	0,9588	0,9593	0,9598	0,9603	0,9608
74	0,9613	0,9617	0,9622	0,9627	0,9632	0,9636	0,9641	0,9646	0,9650	0,9655
75	0,9659	0,9664	0,9668	0,9673	0,9677	0,9681	0,9686	0,9690	0,9694	0,9699
76	0,9703	0,9707	0,9711	0,9715	0,9720	0,9724	0,9728	0,9732	0,9736	0,9740
77	0,9744	0,9748	0,9751	0,9755	0,9759	0,9763	0,9767	0,9770	0,9774	0,9778
78	0,9781	0,9785	0,9789	0,9792	0,9796	0,9799	0,9803	0,9806	0,9810	0,9813
79	0,9816	0,9820	0,9823	0,9826	0,9829	0,9833	0,9836	0,9839	0,9842	0,9845
80	0,9848	0,9851	0,9854	0,9857	0,9860	0,9863	0,9866	0,9869	0,9871	0,9874
81	0,9877	0,9880	0,9882	0,9885	0,9888	0,9890	0,9893	0,9895	0,9898	0,9900
82	0,9903	0,9905	0,9907	0,9910	0,9912	0,9914	0,9917	0,9919	0,9921	0,9923
83	0,9925	0,9928	0,9930	0,9932	0,9934	0,9936	0,9938	0,9940	0,9942	0,9943
84	0,9945	0,9947	0,9949	0,9951	0,9952	0,9954	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960
85	0,9962	0,9963	0,9965	0,9966	0,9968	0,9969	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
86	0,9976	0,9977	0,9978	0,9979	0,9980	0,9981	0,9982	0,9983	0,9984	0,9985
87	0,9986	0,9987	0,9988	0,9989	0,9990	0,9990	0,9991	0,9992	0,9993	0,9993
88	0,9994	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998	0,9998
89	0,9998	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Таблиця А.2

Міжплощинні відстані деяких речовин

hkl	d/n, нм	I, відн.од.	hkl	d/n, нм	I, відн.од.
Al			Fe₂O₃		
111	0,233	1,00	101	0,368	0,18
200	0,202	0,40	112	0,269	1,00
220	0,143	0,30	101	0,251	0,75
311	0,1219	0,30	102	0,22	0,18
222	0,1168	0,07	202	0,184	0,63
400	0,1011	0,02	123	0,169	0,63
331	0,0928	0,04	233	0,16	0,13
420	0,0905	0,04	103	0,1485	0,50
422	0,0826	0,01	112	0,1452	0,50
511	0,0778	0,01	224	0,1351	0,03
Cr₇C₃			234	0,1308	0,18
420	0,23	0,40	202	0,1259	0,13
202	0,212	0,60	204	0,123	0,03
421	0,204	1,00	134	0,119	0,08
402	0,181	0,60	244	0,1163	0,05
440	0,174	0,60	231	0,114	0,13
800	0,146	0,20	204	0,1104	0,10
811	0,135	0,20	235	0,1056	0,08
α-Fe			115	0,0962	0,10
110	0,201	1,00	255	0,09	0,03
200	0,1428	0,15	105	0,0881	0,05
211	0,1166	0,38	303	0,0843	0,05
220	0,101	0,10	Mo		
310	0,0904	0,08	110	0,222	1,00
222	0,0825	0,03	200	0,157	0,36
321	0,0764	0,10	211	0,1281	0,57
330	0,0673	0,03	220	0,1114	0,17
420	0,0638	0,03	310	0,0995	0,23
FeO			222	0,0908	0,07
111	0,247	0,50	321	0,0841	0,23
200	0,214	1,00	400	0,0787	0,03
220	0,151	0,63	411	0,0742	0,14
311	0,1293	0,15	420	0,0704	0,11
222	0,1238	0,08	332	0,0672	0,09
400	0,1072	0,03	422	0,0643	0,06
331	0,0984	0,03	510	0,0617	0,14
420	0,0959	0,05	Nb		
Pb			110	0,233	1,00
111	0,285	1,00	200	0,165	0,20
200	0,247	0,50	211	0,134	0,32
220	0,174	0,50	220	0,116	0,06
311	0,149	0,50	310	0,1041	0,10
222	0,1428	0,17	222	0,095	0,01
331	0,1134	0,17	321	0,0879	0,06
420	0,1105	0,17	411	0,0775	0,02

Продовження таблиці А.2

hkl	d/n, нм	I, відн.од.	hkl	d/n, нм	I, відн.од.
Ni			SiO₂		
111	0,2038	1,00	100	0,425	0,25
200	0,1766	0,50	101	0,335	1,00
220	0,125	0,40	110	0,245	0,15
311	0,1067	0,60	102	0,229	0,10
222	0,1022	0,10	111	0,223	0,06
400	0,0884	0,02	200	0,212	0,09
331	0,0812	0,20	201	0,197	0,08
420	0,0791	0,16	112	0,182	0,25
422	0,0723	0,10	202	0,166	0,08
511	0,0681	0,10	211	0,154	0,20
440	0,0625	0,02	113	0,145	0,02
531	0,0598	0,08	203	0,1375	0,25
442	0,059	0,07	104	0,1299	0,04
Pt			302	0,1256	0,03
111	0,225	1,00	220	0,1228	0,03
200	0,195	0,30	213	0,12	0,06
220	0,1382	0,16	312	0,108	0,04
311	0,1178	0,16	β-Sn		
222	0,1128	0,03	200	0,291	1,00
400	0,0978	0,01	101	0,279	0,80
331	0,0897	0,03	220	0,205	0,32
420	0,0874	0,02	211	0,201	0,80
TiN			301	0,165	0,24
111	0,244	0,77	112	0,148	0,24
200	0,212	1,00	231	0,145	0,20
220	0,1496	0,56	420	0,1298	0,16
311	0,1277	0,26	312	0,12	0,20
222	0,1223	0,16	431	0,1092	0,11
400	0,1059	0,07	103	0,1042	0,08
311	0,0972	0,11	440	0,1022	0,06
420	0,0948	0,22	441	0,098	0,03
422	0,0865	0,21	512	0,0927	0,06
V			323	0,0885	0,02
110	0,214	1,00	413	0,0847	0,03
200	0,151	0,07	640	0,0805	0,02
211	0,1236	0,20	TiC		
220	0,1072	0,03	111	0,249	0,76
310	0,0958	0,03	200	0,215	1,00
222	0,0875	0,01	220	0,152	0,50
321	0,081	0,03	311	0,13	0,25
400	0,0759	0,01	222	0,1245	0,10
411	0,0714	0,01	400	0,1079	0,03
			331	0,099	0,05
			420	0,0965	0,09
			422	0,0881	0,05
			511	0,0831	0,02

Продовження таблиці А.2

hkl	d/n, нм	I, відн.од.	hkl	d/n, нм	I, відн.од.
WC			W ₂ C		
001	0,283	0,70	100	0,259	0,50
100	0,251	0,80	002	0,236	0,40
101	0,187	1,00	101	0,227	1,00
100	0,1452	0,60	102	0,174	0,40
002	0,1421	0,50	110	0,149	0,60
111	0,1293	0,70	103	0,134	0,50
200	0,1258	0,60	200	0,129	0,40
102	0,1233	0,70	112	0,126	0,50
201	0,1149	0,70	201	0,125	0,50
112	0,1017	0,70	004	0,118	0,20
120	0,0953	0,80	202	0,113	0,20
003	0,0947	0,40	104	0,109	0,20
202	0,0943	0,80			
121	0,0905	0,80			

Таблиця А.3

Довжина хвилі характеристичного рентгенівського випромінювання λ , нм

Випромінювання	K _α	K _β
Хром	0,229092	0,208480
Залізо	0,193728	0,175653
Кобальт	0,179020	0,162075
Мідь	0,154178	0,139217
Молібден	0,071069	0,063225

Таблиця А.4

Параметри структури деяких металів

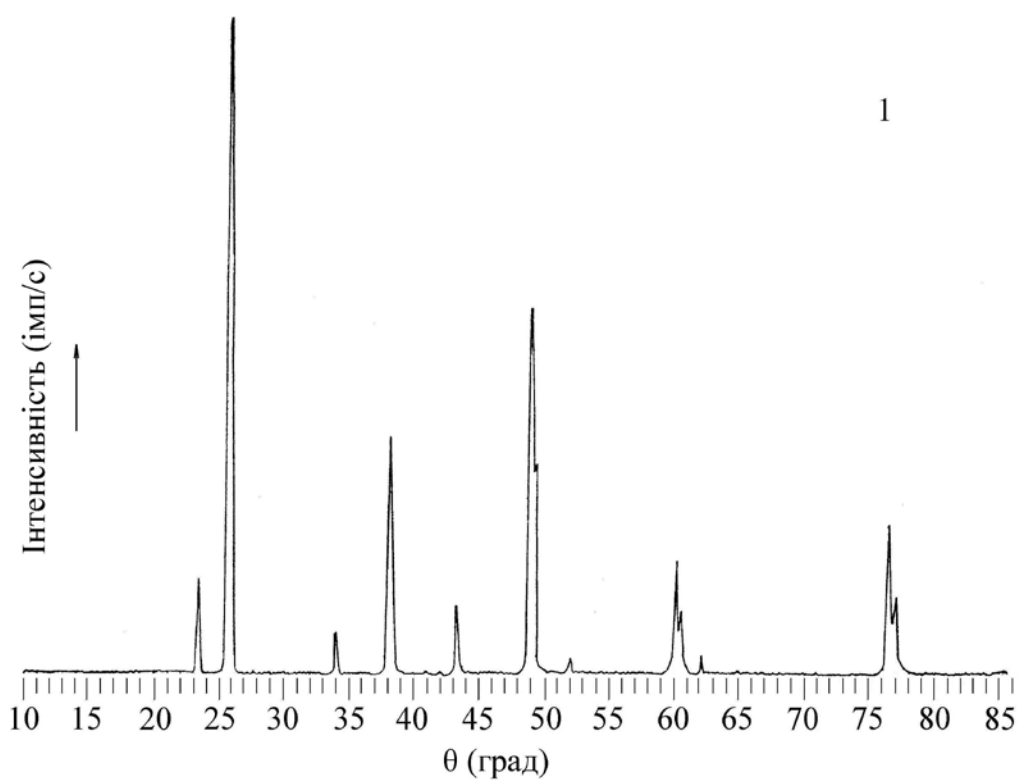
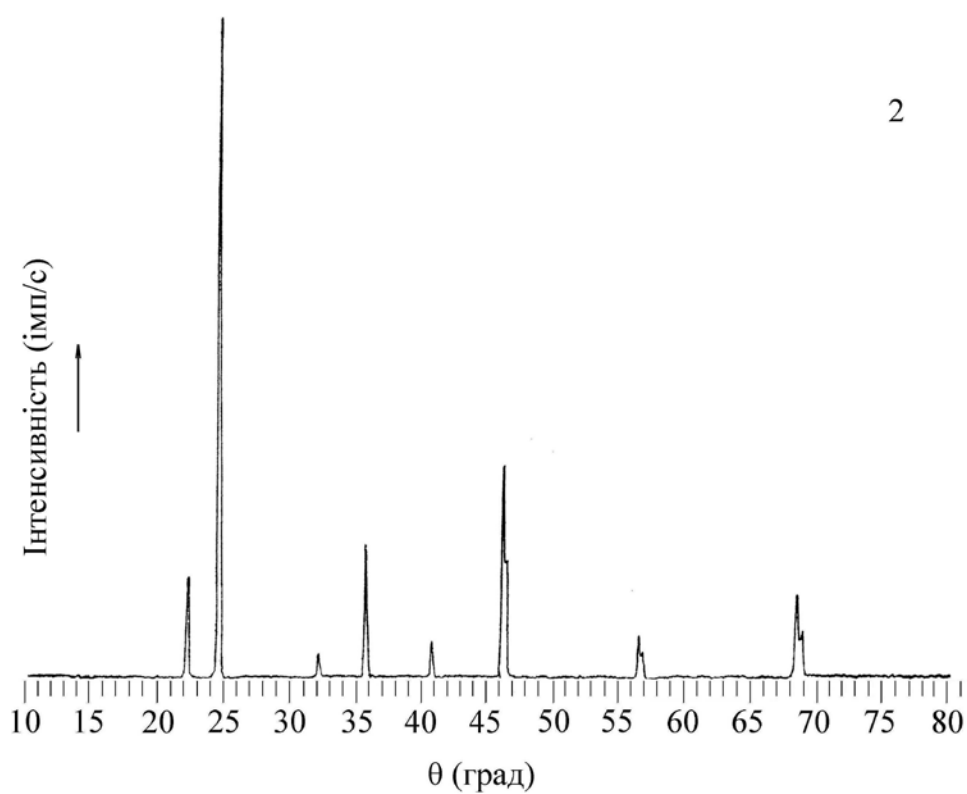
Метал	Період решітки, нм	Об'єм елементарної комірки, нм ³
Al	0,40494	0,06640
α-Fe	0,28664	0,02355
Mo	0,31472	0,03117
Nb	0,3300	0,03594
Ni	0,35238	0,04376
Pb	0,49505	0,12132
Pt	0,39231	0,06038
V	0,30399	0,02809

Таблиця А.5

Структурна амплітуда F залежно від міжплощинної відстані d для деяких металів

Структурна амплітуда F										
Метал	Міжплощинна відстань d, нм									
	0,5000	0,2500	0,1667	0,1250	0,1000	0,0834	0,0715	0,0625	0,0566	0,0500
Al	44	35,8	31	26,4	22	18	14,8	12,4	10,6	9,2
Fe	47,42	39,42	33,12	28,1	24,22	21,08	18,58	16,5	14,78	13,34
Mo	77,72	66,5	57,14	49,38	43,2	38,08	33,9	30,4	27,46	24,92
Nb	75,82	64,8	55,62	48,02	41,96	36,98	32,9	29,48	26,62	24,16
Ni	102,4	85,48	72,12	61,36	53	46,24	40,8	36,32	32,56	29,4
Pb	306	270	238,4	207,6	182,8	166,4	151,6	138,4	126	115,2
Pt	293,52	259,48	228,84	202,28	180,16	161,36	145,56	132,04	120,44	110,36
V	38,38	31,62	25,8	21,58	18,38	16,18	14,82	13,54	12,56	11,64

Дифрактограми полікристалічних матеріалів

Рис. Б.1 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} , K_{β} (Варіант 1)Рис. Б.2 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} , K_{β} (Варіант 2)

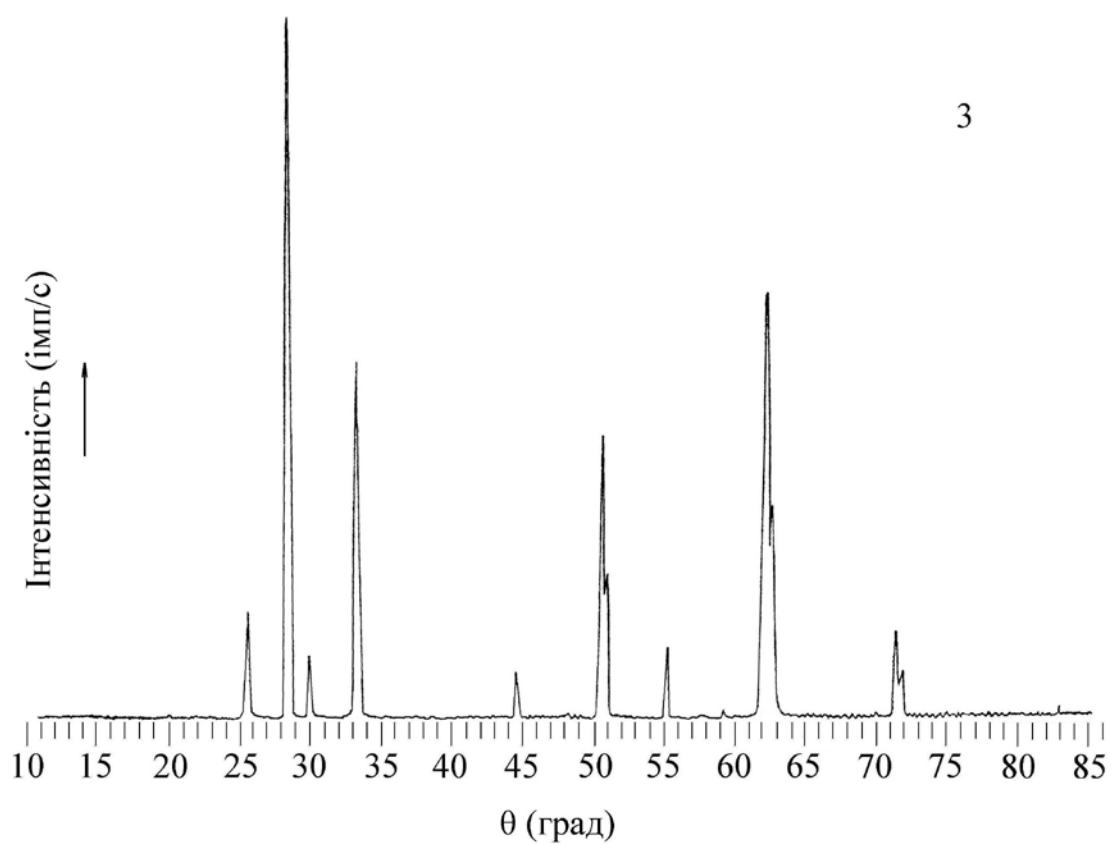


Рис. Б.3 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} , K_{β} (Варіант 3)

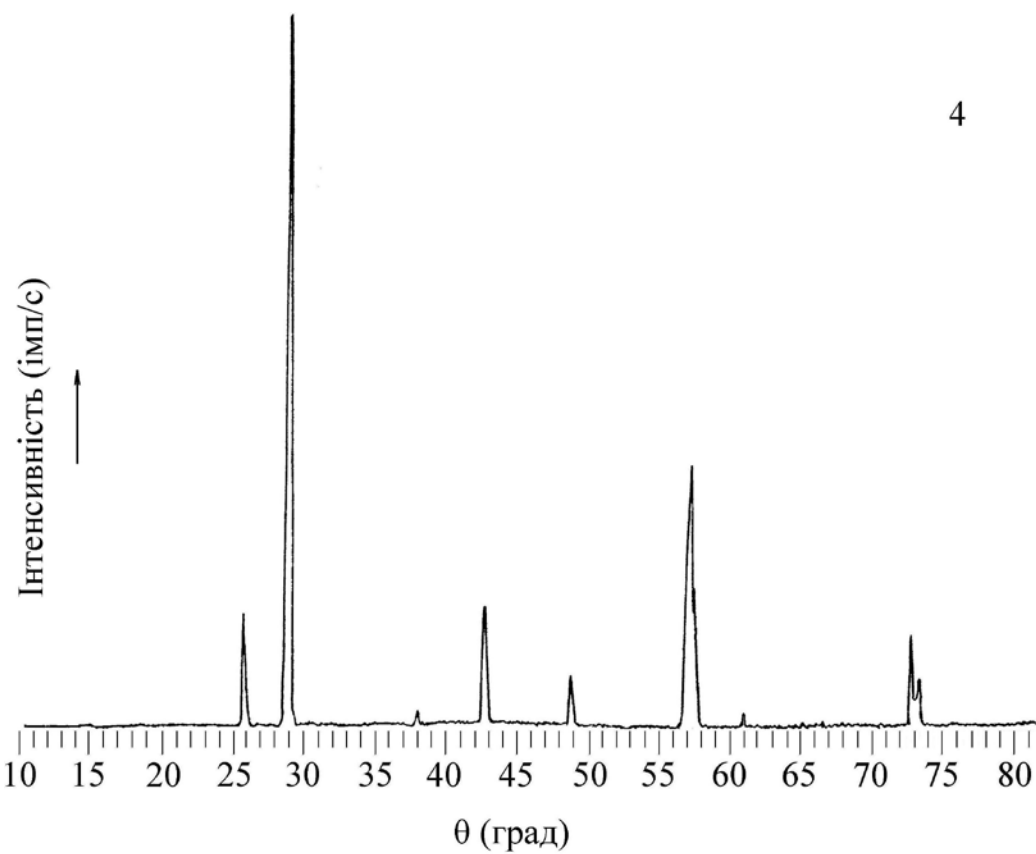


Рис. Б.4 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} , K_{β} (Варіант 4)

5

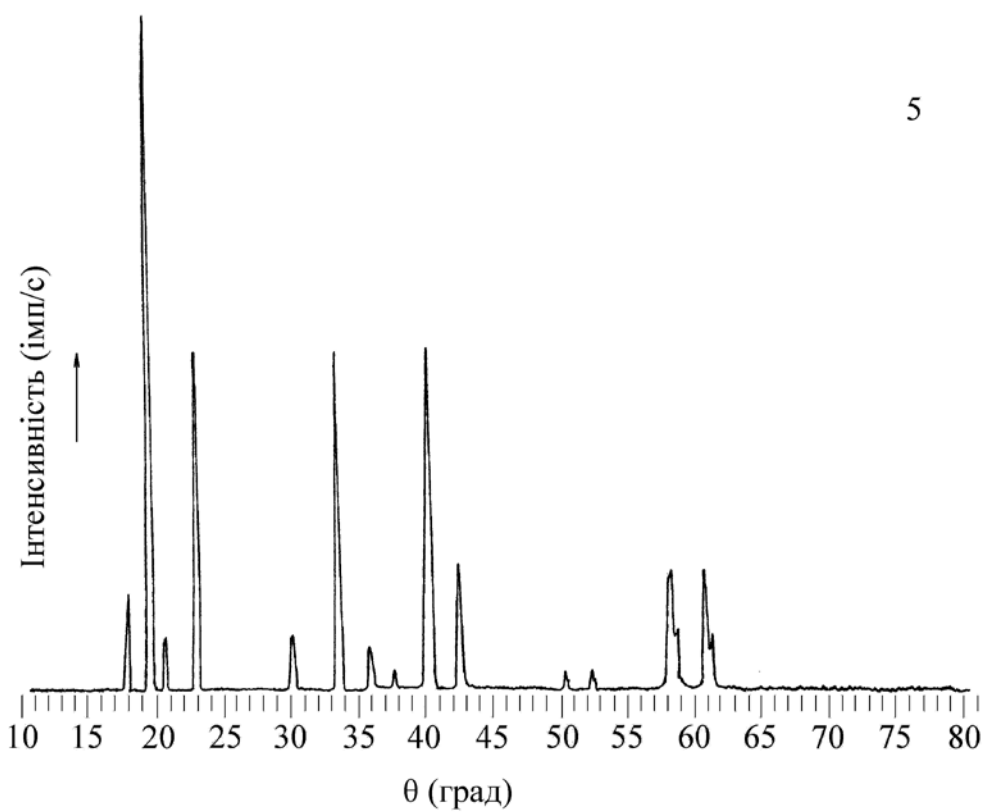


Рис. Б.5 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe-K α , K β (Варіант 5)

6

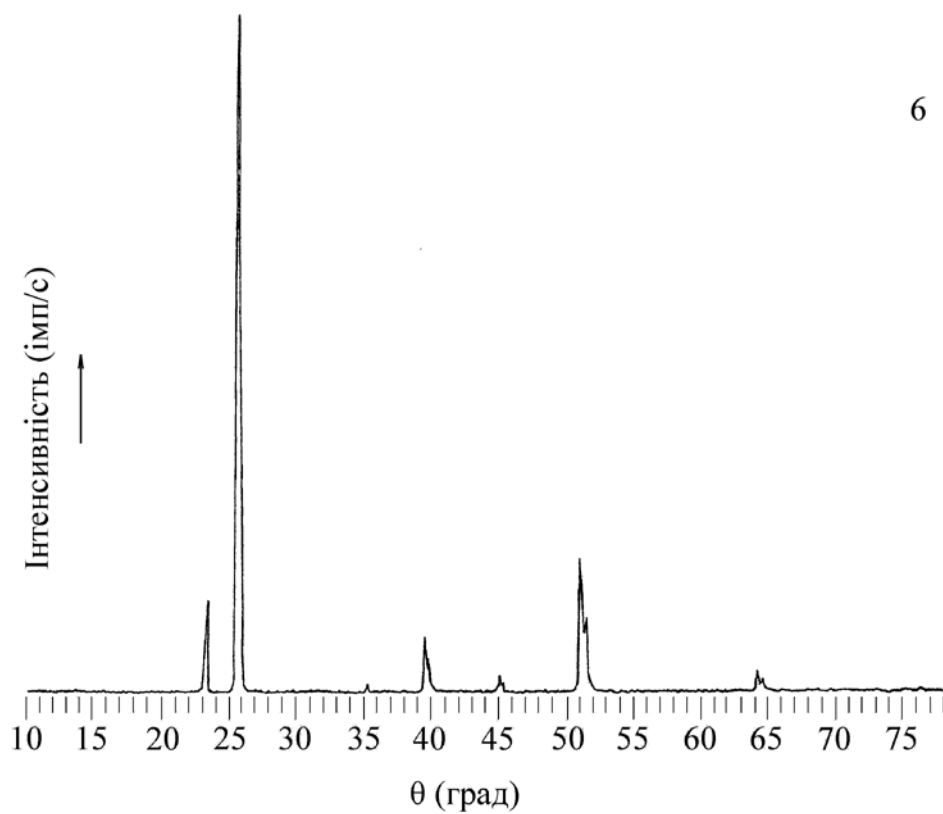


Рис. Б.6 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe-K α , K β (Варіант 6)

7

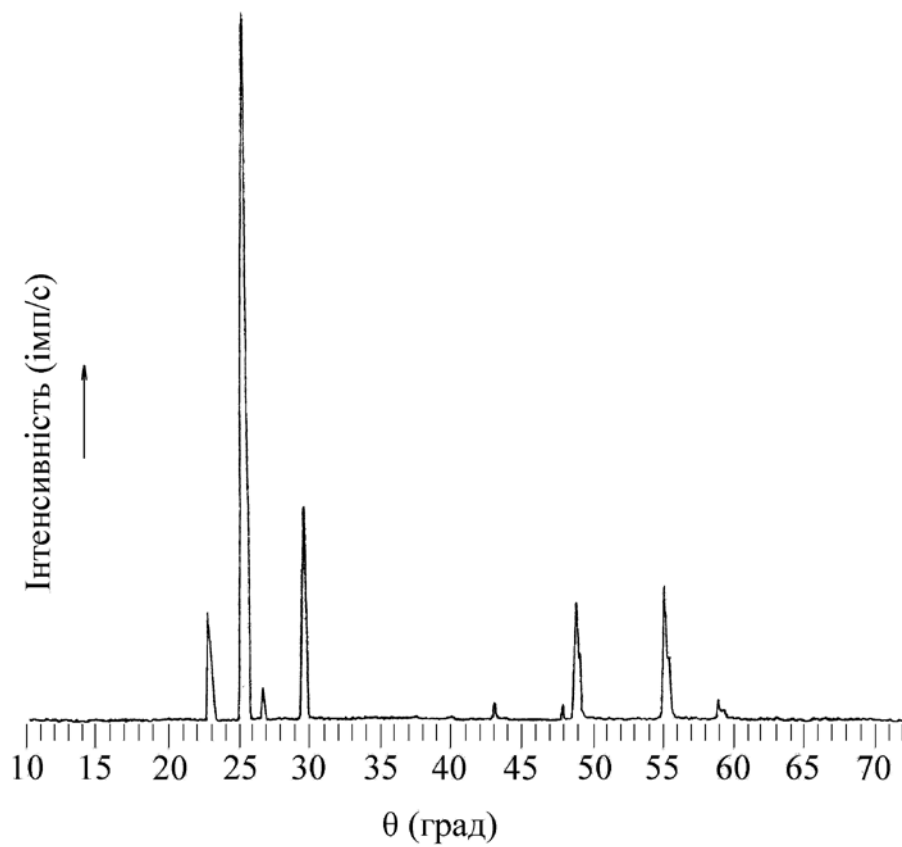


Рис. Б.7 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} , K_{β} (Варіант 7)

8

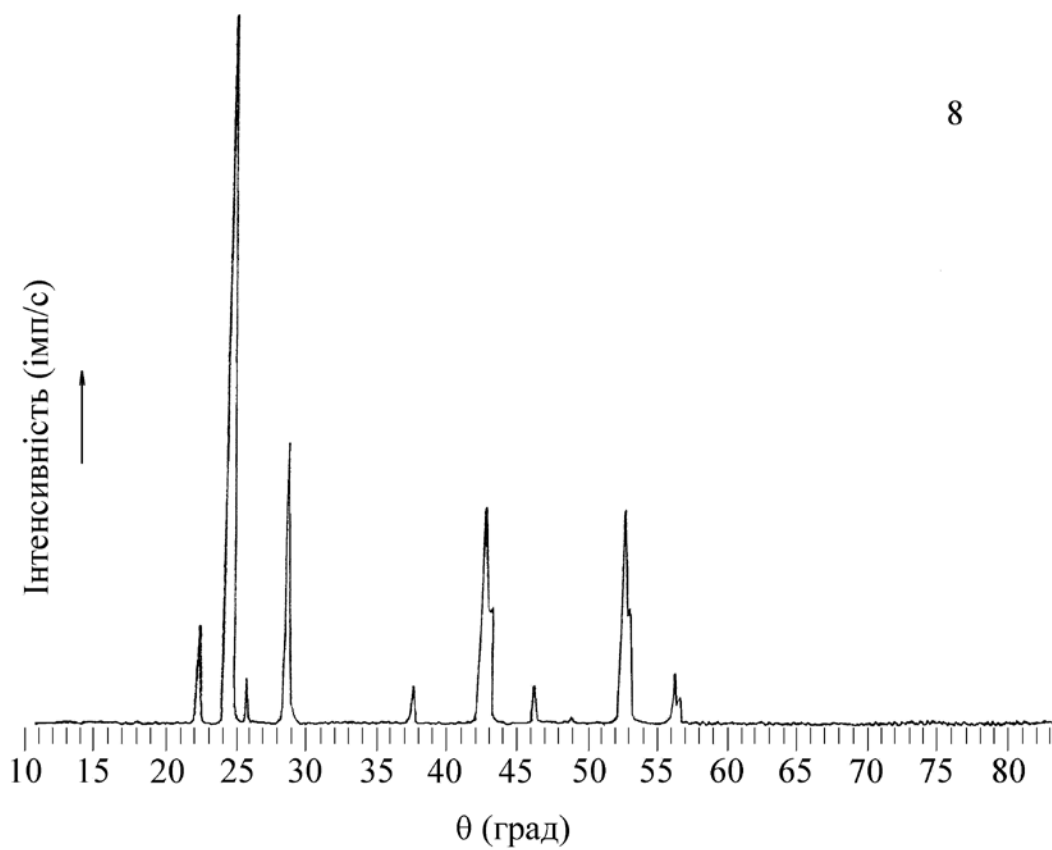


Рис. Б.8 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} , K_{β} (Варіант 8)

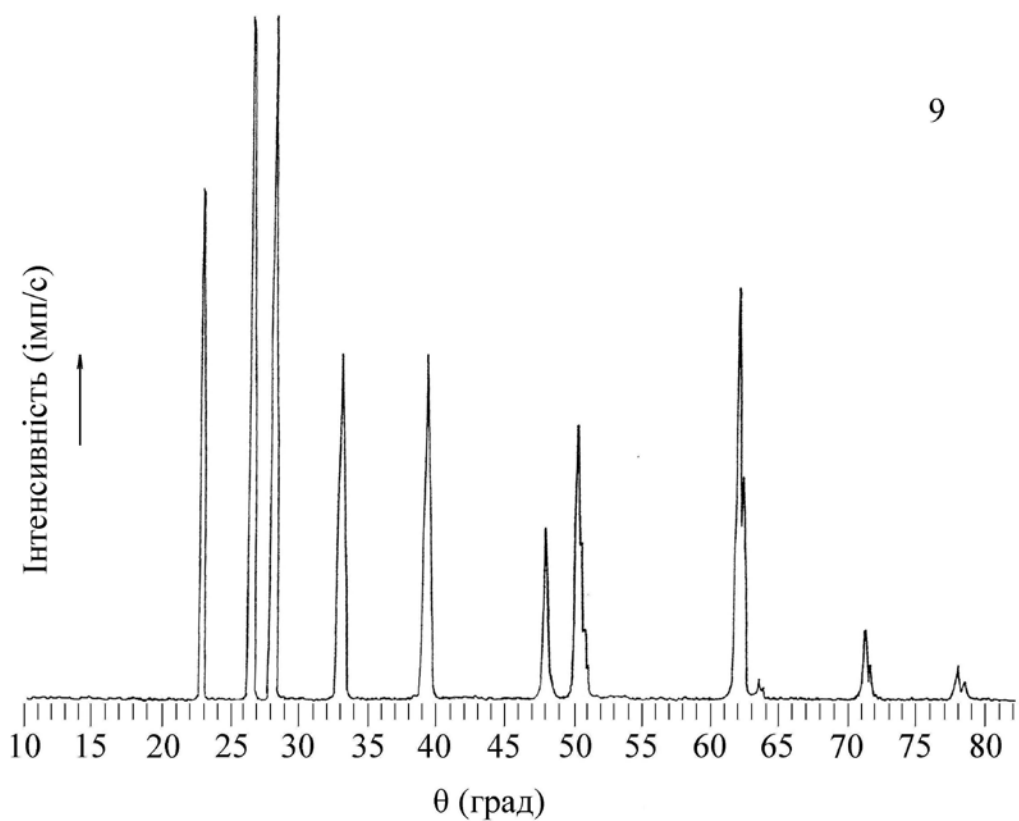


Рис. Б.9 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe-K α (Варіант 9)

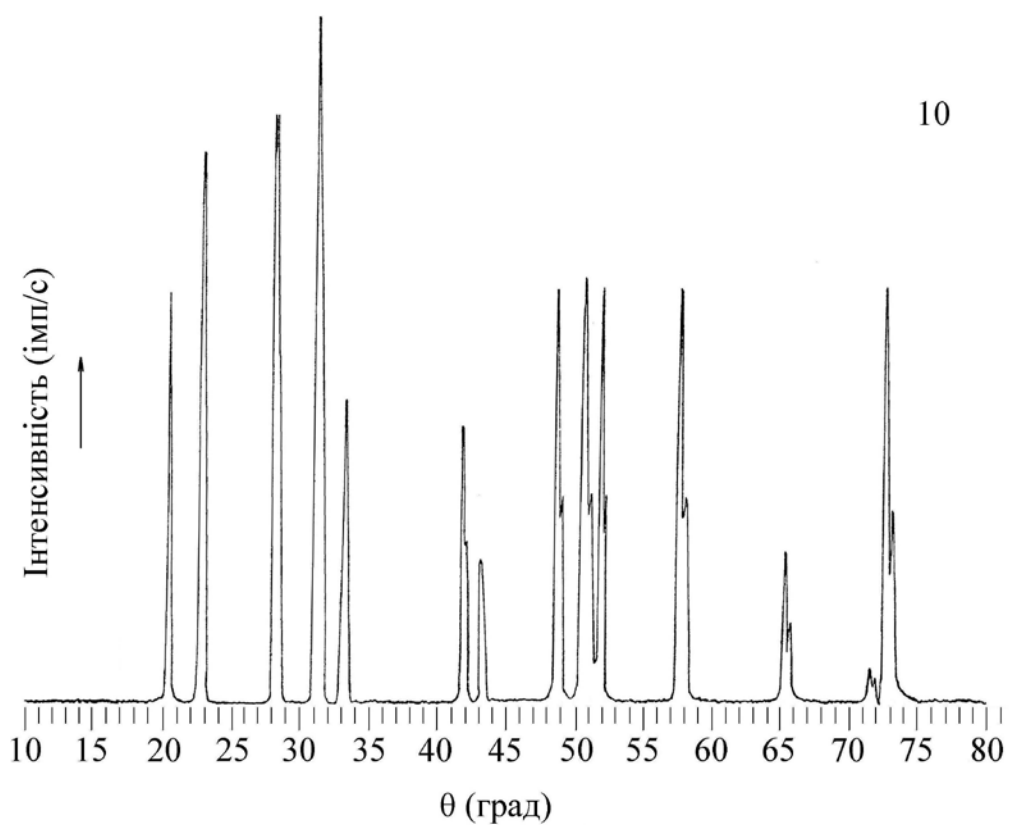


Рис. Б.10 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe-K α (Варіант 10)

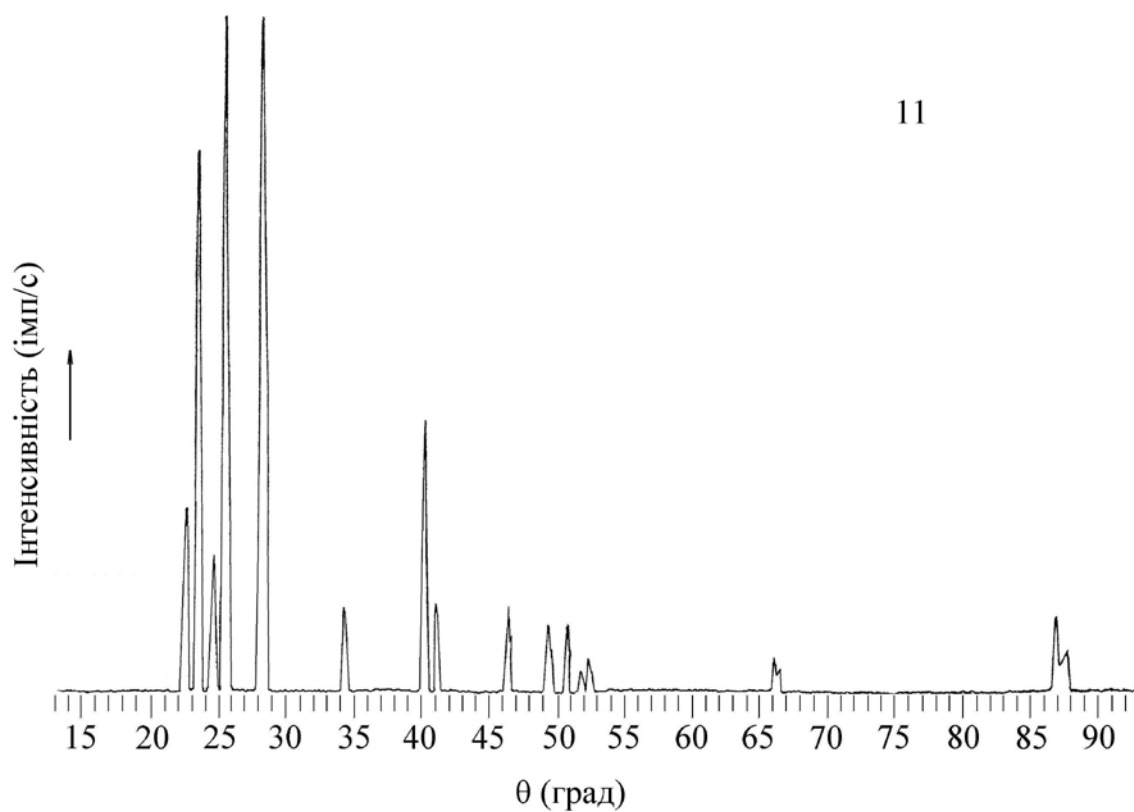


Рис. Б.11 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe-K $_{\alpha}$ (Варіант 11)

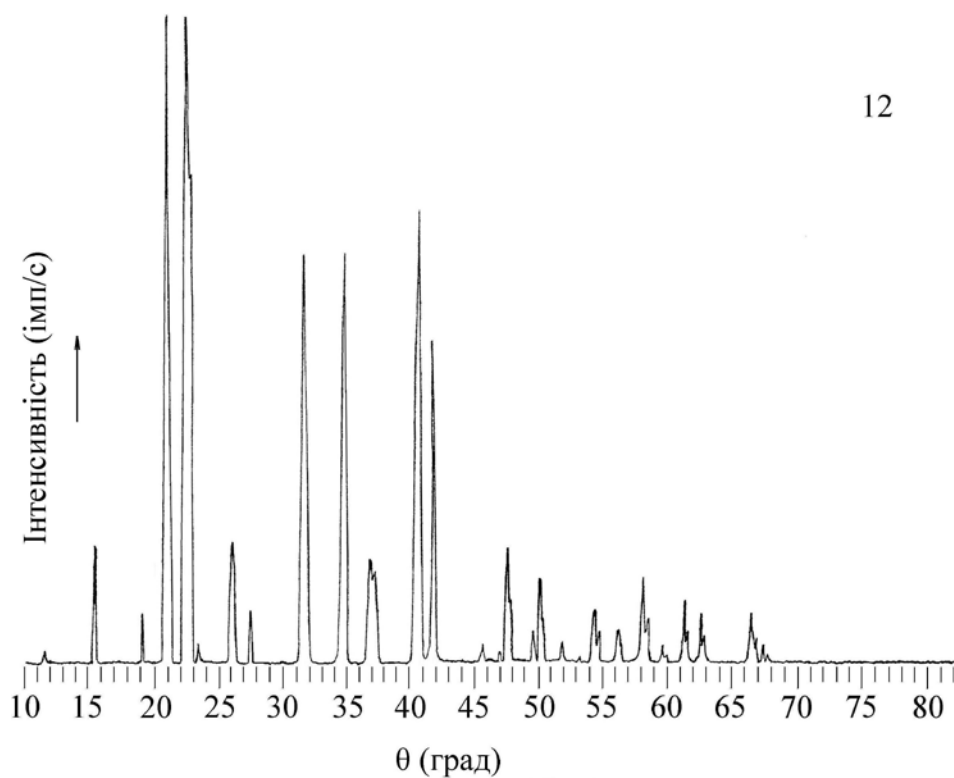


Рис. Б.12 Дифрактограма полікристалічного матеріалу, випромінювання Fe-K $_{\alpha}$ (Варіант 12)

Дифракційний максимум (110) сталевих зразків

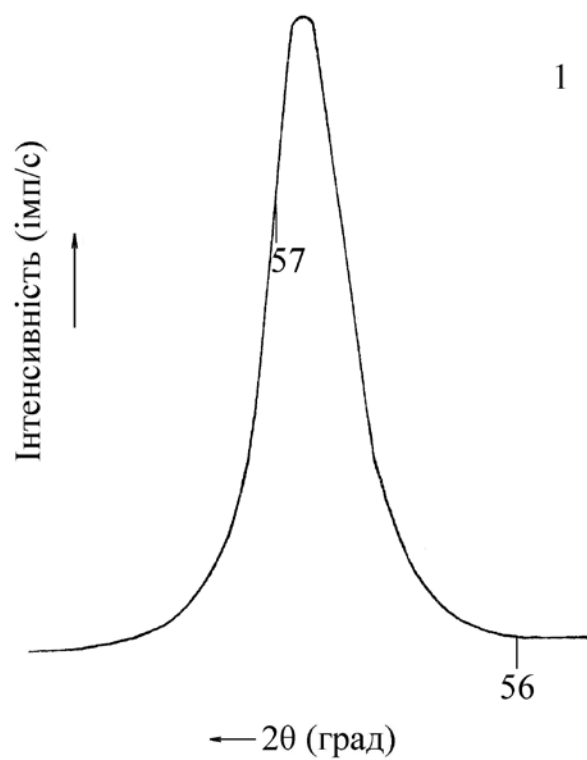


Рис. В.1 Дифракційний максимум (110) сталевих зразка матеріалу, випромінювання Fe-K_α (Варіант 1)

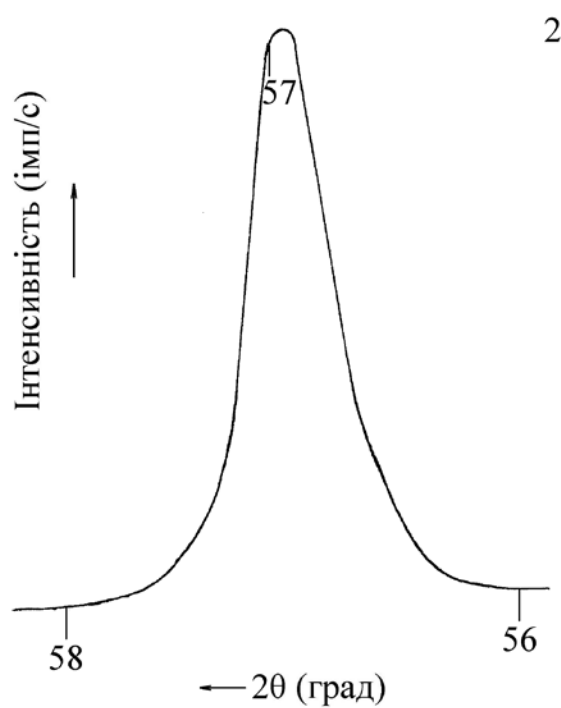


Рис. В.2 Дифракційний максимум (110) сталевих зразка матеріалу, випромінювання Fe-K_α (Варіант 2)

3

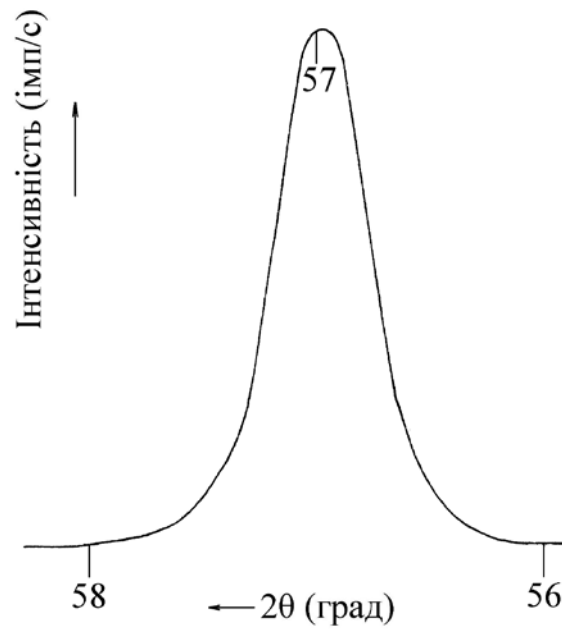


Рис. В.3 Дифракційний максимум (110) сталевго зразка матеріалу, випромінювання Fe-K $_{\alpha}$ (Варіант 3)

4

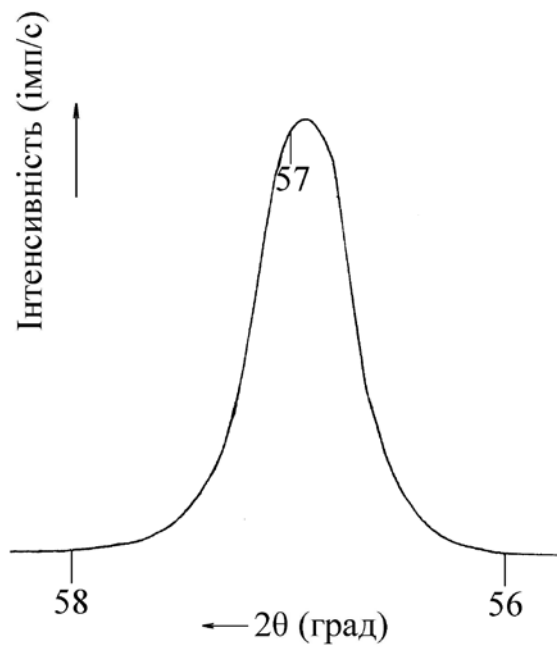


Рис. В.4 Дифракційний максимум (110) сталевго зразка матеріалу, випромінювання Fe-K $_{\alpha}$ (Варіант 4)

5

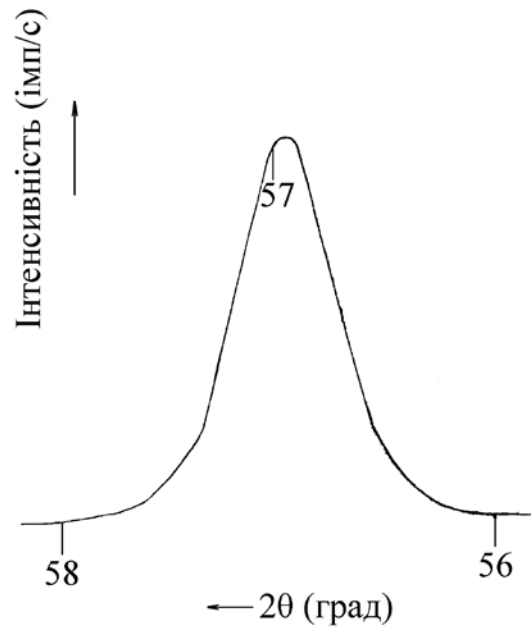


Рис. В.5 Дифракційний максимум (110) сталевого зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} (Варіант 5)

6

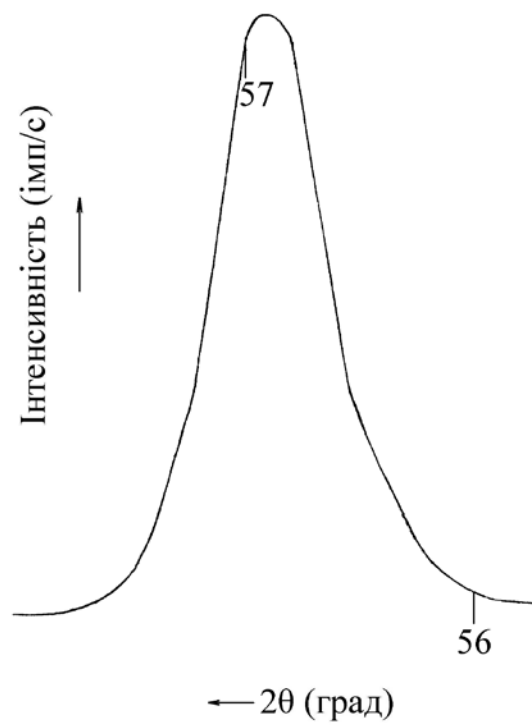


Рис. В.6 Дифракційний максимум (110) сталевого зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} (Варіант 6)

7

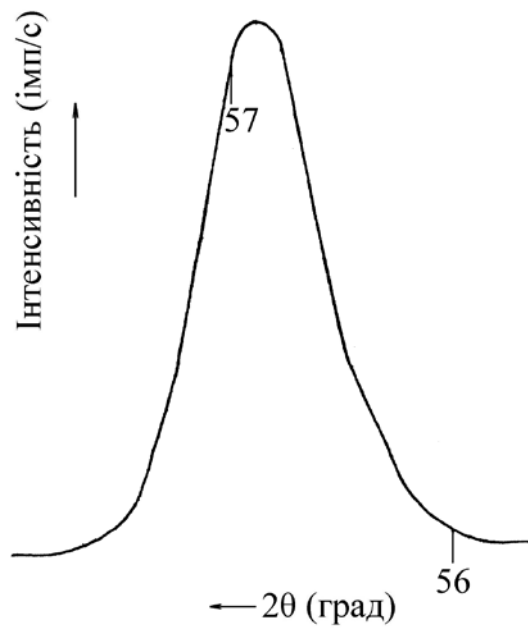


Рис. В.7 Дифракційний максимум (110) сталевого зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} (Варіант 7)

8

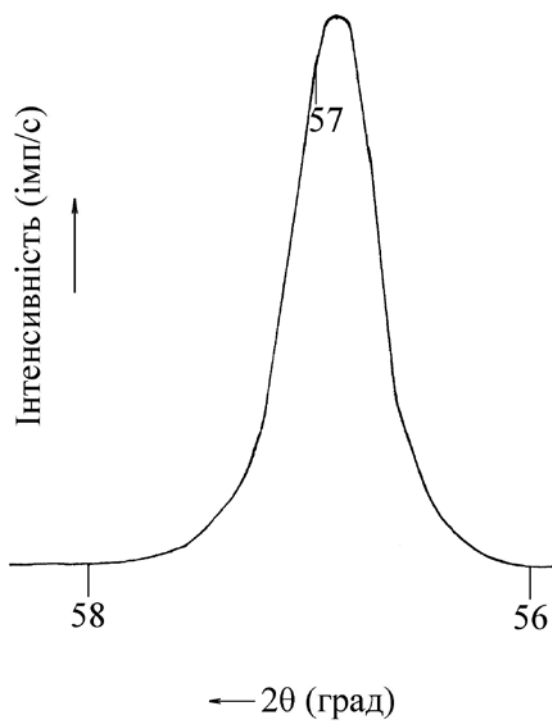


Рис. В.8 Дифракційний максимум (110) сталевого зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} (Варіант 8)

9

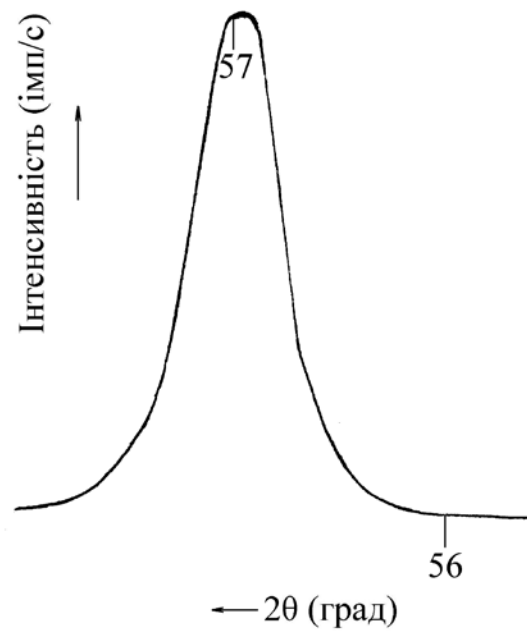


Рис. В.9 Дифракційний максимум (110) сталевого зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_α (Варіант 9)

10

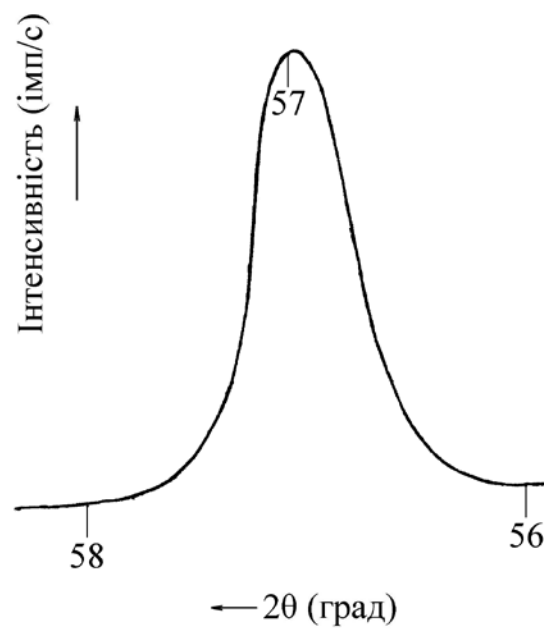


Рис. В.10 Дифракційний максимум (110) сталевого зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_α (Варіант 10)

11

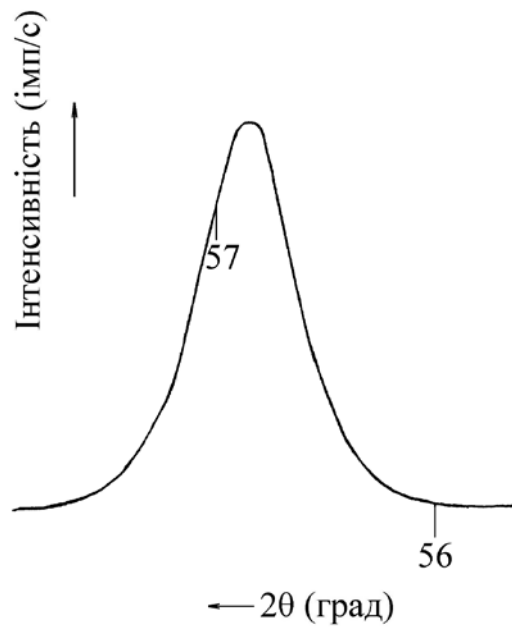


Рис. В.11 Дифракційний максимум (110) сталевго зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} (Варіант 11)

12

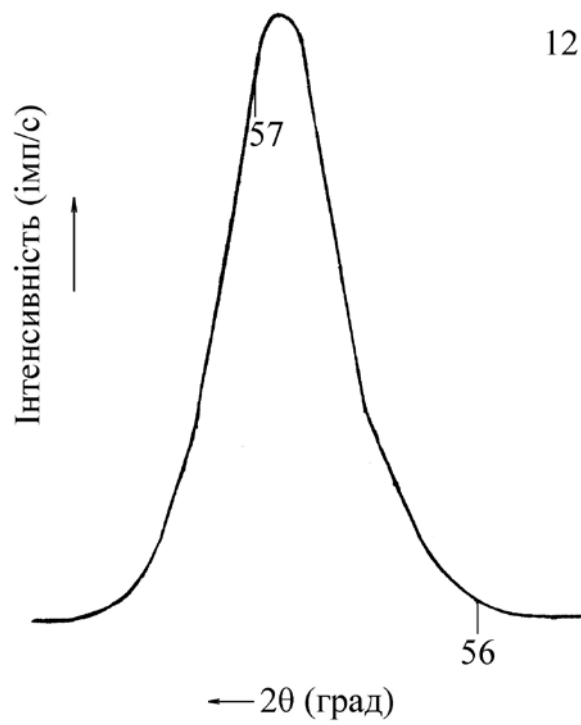


Рис. В.12 Дифракційний максимум (110) сталевго зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} (Варіант 12)

13

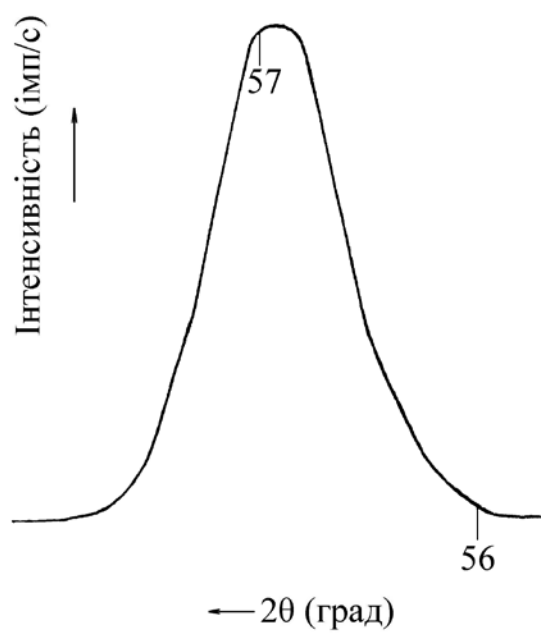


Рис. В.13 Дифракційний максимум (110) сталевго зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} (Варіант 13)

14

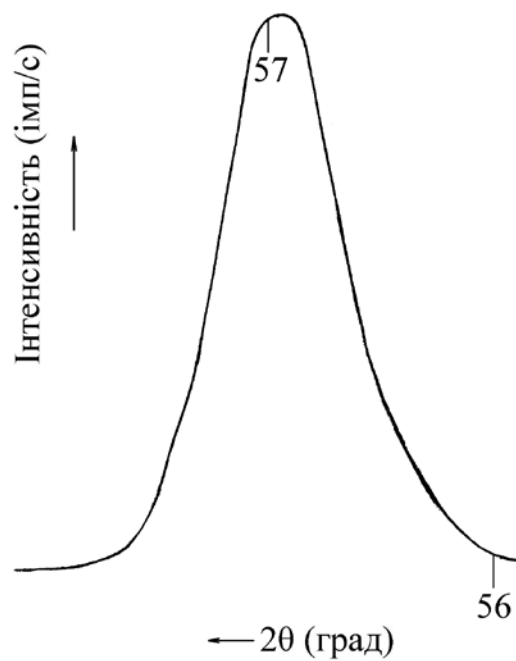


Рис. В.14 Дифракційний максимум (110) сталевго зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} (Варіант 14)

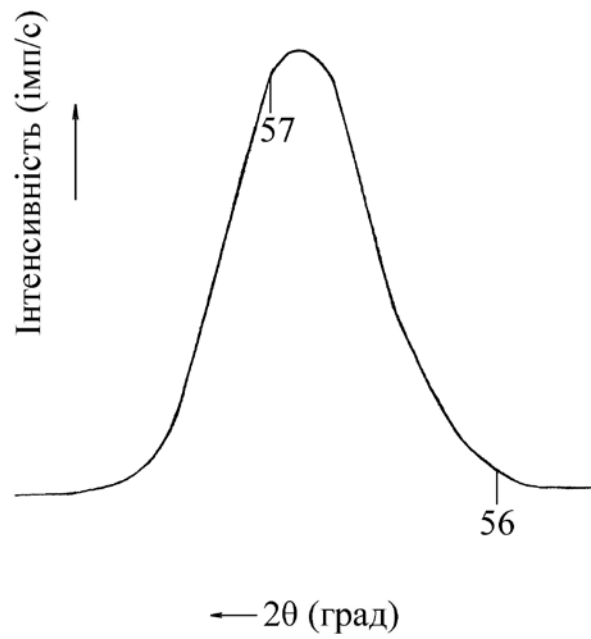


Рис. В.15 Дифракційний максимум (110) сталевго зразка матеріалу, випромінювання Fe- K_{α} (Варіант 15)