

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА**  
**ЗВАРЮВАННЯ імені Є.О. Патона**  
**КАФЕДРА ФІЗИЧНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ТЕРМІЧНОЇ**  
**ОБРОБКИ**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено:  
В.о. завідувача кафедри  
\_\_\_\_\_ Мирослав КАРПЕЦЬ  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**  
**за освітньо-професійною програмою «Металофізичні процеси та їх**  
**комп'ютерне моделювання»**  
**зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»**  
**на тему: «Структурно-фазові перетворення і магнітні властивості**  
**нанорозмірних плівкових композицій Pt/Co»**

Виконав:  
студент II курсу, групи ФМ-01мп

Педань Р.В. \_\_\_\_\_

Науковий керівник:

к.т.н., доцент, Бурмак А.П. \_\_\_\_\_

Консультант з ОП та безпека в НС:

д.т.н., професор, Левченко О.Г. \_\_\_\_\_

Консультант з Розробка стартап-проекту:

к.е.н., доцент., Нарасвський С.В. \_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю:

ас., Шаповалова Н.А. \_\_\_\_\_

Рецензент:

д.т.н., доцент, Мініцький А.В. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені**  
**Є.О. Патона**

**Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Мирослав КАРПЕЦЬ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Педаню Роману Васильовичу**

1. Тема дисертації «Структурно-фазові перетворення і магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій Pt/Co», науковий керівник дисертації Бурмак А.П., к.т.н., ст. виклад., затверджені наказом по університету від «15» листопада 2021 р. №3740-с
2. Термін подання студентом дисертації 15 грудня 2021 р.
3. Об'єкт дослідження: нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм), осаджені методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені підкладки монокристалічного кремнію SiO<sub>2</sub>(100 нм)/Si(001).
4. Вихідні дані: літературні дані, результати особистих експериментів.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: ознайомитись з літературними даними за темою дослідження і методикою проведення експериментів – магнетронним осадженням, структурним і пошаровим хімічним аналізом, магнітометрією. Провести опис, розрахунки та аналіз даних експерименту, сформулювати висновки.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: застосування тонких феромагнітних плівок, мета та об'єкт дослідження, методи дослідження, результати пошарового хімічного аналізу, просвічуюча

електронна мікроскопія, результати рентгеноструктурного фазового аналізу, магнітні характеристики, висновки

### 7. Орієнтовний перелік публікацій

### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ОП та безпека в НС	Левченко О.Г.		
Розробка стартап-проекту	Нараєвський С.В.		

### 9. Дата видачі завдання: 1 вересня 2021 р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Пошук літератури, написання літературного огляду	05.09.2021	
	Освоєння методики досліджень	12.09.2021	
	Проведення термічної обробки	26.09.2021	
	Рентгеноструктурні дослідження	03.10.2021	
	Пошаровий хімічний аналіз	10.10.2021	
	Просвічуюча електронна мікроскопія	15.10.2021	
	Магнітометрія	17.10.2021	
	Підготовка магістерської дисертації	24.10.2021	
	Попередній захист	15.12.2021	
	Захист на засіданні ЕК	22.12.2021	

Студент

Роман ПЕДАНЬ

Науковий керівник

Андрій БУРМАК

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 86 сторінок, 15 таблиць, 33 рисунка, 2 формули  
49 літературних джерел.

ВІДПАЛ, ДИФУЗИЯ, СТРУКТУРА, ТОНКОПЛІВКОВІ КОМПОЗИЦІЇ,  
ФАЗА.

**Об'єкт досліджень:** нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм), осаджені методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені підкладки монокристалічного кремнію SiO<sub>2</sub>(100 нм)/Si(001).

**Предмет дослідження:** термічно-індуковані процеси дифузії, впорядкування та структурно-фазових перетворень у нанорозмірних плівкових композиціях Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм).

**Мета роботи:** дослідження закономірностей розвитку термічно-індукованих дифузійних процесів та структурно-фазових перетворень, а також їхнього впливу на магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) в процесі термічної обробки у вакуумі.

**Методи дослідження:** мас-спектрометрія вторинних іонів, рентгеноструктурний фазовий аналіз, вібраційна магнітометрія.

**Результати досліджень та їх новизна:** виявлено, що термічна обробка тонкоплівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) в інтервалі температур 200 °C - 550 °C приводить до ініціалізації процесів взаємної дифузії між компонентами, наслідком якої є формування неупорядкованої фази Al-CoPt. В процесі відпалу за температури 450 °C протягом 30 хвилин також відбувається дифузійне формування фази L1<sub>2</sub>-Co<sub>3</sub>Pt. Збільшення температури відпалу призводить до збільшення коерцитивної сили та набуття кубічної магнітної анізотропії.

**Сфера застосування:** наноелектроніка, матеріали функціональних шарів приладів спінтроніки, матеріали для магнітних носіїв інформації з підвищеною щільністю запису.

## ABSTRACT

Master dissertation: 86 pages, 15 table, 33 figures, 2 formulas, 49 references.

ANNEALING, DIFFUSION, STRUCTURE, THIN FILM STACKS, PHASE.

**The object of research:** Pt(15 nm)/Co(15 nm)/Ta(3 nm) film stacks deposited on a SiO<sub>2</sub>(100 nm)/Si(001) singlecrystalline substrates.

**The subject of research:** thermally-induced processes of diffusion, ordering, structural and phase transformations in Pt(15 nm)/Co(15 nm)/Ta(3 nm) thin film stacks.

**The purpose of research:** investigation of thermally-induced diffusion processes and structural-phase transformations in thin film stacks Pt(15 nm)/Co(15 nm)/Ta(3 nm) during heat treatment in vacuum.

**Research methods:** secondary ion mass spectrometry, x-ray diffraction analysis, vibrating sample magnetometry.

**Research results and novelty:** it was revealed that heat treatment of thin film stacks Pt(15 nm)/Co(15 nm)/Ta(3 nm) in the temperature range of 200 °C - 550 °C leads to the formation of a disordered phase of Al-CoPt and the  $L1_2$ -Co<sub>3</sub>Pt phase after annealing at 450 °C for 30 minutes. An increase in the annealing temperature leads to an increase in the coercive force and the formation of cubic magnetic anisotropy.

**Field of application:** nanoelectronics, materials for functional layers of spintronics devices, materials for magnetic data devices with high recording density.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	10
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....	12
1.1 Сплави системи CoPt .....	12
1.2 Властивості впорядкованих плівок CoPt .....	13
1.3 Властивості неупорядкованих плівок CoPt .....	19
2 МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ .....	25
2.1 Плівкові об'єкти дослідження .....	25
2.2 Методика магнетронного розпорощення тонких плівок .....	25
2.3 Параметри термічної обробки .....	26
2.4 Пошаровий хімічний аналіз методом мас-спектрометрії вторинних іонів .....	26
2.5 Просвічуюча електронна мікроскопія .....	27
2.6 Рентгеноструктурний фазовий аналіз .....	28
2.7 Магнітометрія .....	29
2.8 Висновки до розділу 2 .....	30
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ .....	31
3.1 Закономірності перерозподілу компонентів за товщиною плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) .....	31
3.2 Дослідження плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) методом просвічуючої електронної мікроскопії .....	35
3.3 Термічно-індуковані структурно-фазові перетворення в плівкових композиціях Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) .....	40
3.4 Магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) .....	48
3.5 Висновки до розділу 3 .....	52
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	53

4.1	Параметри приміщення лабораторії термічної обробки.....	54
4.2	Мікроклімат приміщення лабораторії термічної обробки.....	55
4.3	Освітлення в приміщенні лабораторії термічної обробки.....	57
4.3.1	Характеристика природнього освітлення лабораторії термічної обробки.....	58
4.3.2	Характеристика штучного освітлення лабораторії термічної обробки.....	59
4.4	Небезпечні чинники в приміщенні лабораторії термічної обробки .....	60
4.4.1	Вплив шуму та вібрацій .....	61
4.4.2	Небезпечні чинники при роботі з установкою ВУП-5М.....	62
4.4.3	Безпека при роботі з електричними приладами .....	64
4.5	Організація робочого місця .....	65
4.6	Безпека в надзвичайних ситуаціях .....	66
4.6.1	Пожежна безпека .....	66
4.7	Висновки до розділу 4 .....	67
5	РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	69
5.1	Опис ідеї проекту .....	69
5.2	Технологічний аудит ідеї проекту.....	71
5.3	Ринкові можливості запуску проекту .....	72
5.4	Розрахунок витрат на проведення досліджень .....	75
5.4.1	Витрати на оплату праці .....	76
5.4.2	Відрахування до єдиного соціального внеску .....	77
5.4.3	Витрати на матеріали для досліджень .....	77
5.4.4	Розрахунок інших прямих неврахованих витрат.....	77
5.4.5	Визначення накладних витрат .....	77
5.4.6	Визначення кошторису науково-дослідної роботи .....	77
5.5	Висновки до розділу 5 .....	78

ВИСНОВКИ.....	79
CONCLUSIONS.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	81

## ВСТУП

Стрімкий розвиток сучасних високих технологій електроніки та обчислювальної техніки обумовлює суттєве збільшення кількості інформації, яку створюють, обробляють та зберігають сучасні електронні пристрої. Тому основними тенденціями сьогодення є зменшення розмірів пристроїв та їх складових частин, разом зі збільшенням щільності зберігання даних і швидкодії функціональних елементів, а також покращення їхньої енергоефективності.

Потреба у мініатюризації пристроїв сприяє підвищенню уваги науковців до вивчення нанорозмірних матеріалів, зокрема багат шарових металевих плівкових композицій. Варто відзначити, що нанорозмірні магнітні металеві шари набули широкого застосування в багатьох сучасних технологіях: наприклад, при створенні постійних магнітів, функціональних елементів та пристроїв спінтроники, магнітних носіїв інформації тощо.

Перспективними матеріалами для застосування у цих сферах є подвійні та потрійні системи на основі FePt, CoPt, FePd, MnAl та MnGa. Серед цих сплавів CoPt забезпечує кращу стійкість до окиснення та інших видів корозії, а також демонструє формування ближнього порядку при осадженні чи відпалі, що дозволяє отримувати перспективні магнітні властивості навіть у неупорядкованому стані.

Перспективним методом формування магнітно-твердих фаз у тонких плівках є термічно-індуковане дифузійне переміщення у багат шарових плівкових композиціях. У цьому випадку механічні напруження, що виникають внаслідок невідповідності параметрів ґраток та коефіцієнтів теплового лінійного розширення металевих шарів, можуть виступати в якості додаткової рушійної сили для розвитку дифузійних процесів та контрольованих ними структурно-фазових перетворень.

Актуальною задачею сучасного фізичного матеріалознавства є дослідження процесів дифузії, формування фазового складу та впорядкування в плівкових композиціях з нанорозмірними шарами Co/Pt.

**Метою** даної роботи є дослідження закономірностей розвитку термічно-індукованих дифузійних процесів та структурно-фазових перетворень, а також їхнього впливу на магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій Co/Pt.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні задачі дослідження:

- отримати нанорозмірні плівкові композиції Pt/Co методом магнетронного осадження на термічно-окиснені монокристалічні підкладки;

- провести термічну обробку нанорозмірних плівкових композицій Pt/Co у вакуумі за різних фізико-технологічних режимів;

- виявити закономірності перерозподілу компонентів за товщиною плівкових зразків після різних етапів термічного впливу;

- дослідити зміну фазового складу та параметрів структури на різних етапах відпалу;

- визначити вплив структурно-фазових характеристик плівкового матеріалу на його магнітні властивості.

**Предметом** дослідження даної роботи є термічно-індуковані процеси дифузії, впорядкування та структурно-фазових перетворень у нанорозмірних плівкових композиціях Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм).

**Об'єктом** дослідження даної роботи є нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм), осаджені методом магнетронного розпорощення на термічно-окиснені підкладки монокристалічного кремнію SiO<sub>2</sub>(100 нм)/Si(001).

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1 Сплави системи CoPt

Діаграма стану термодинамічної рівноваги системи Co-Pt, характерна для масивного стану, наведена на рис. 1.1. Діаграма стану передбачає формування в системі Co-Pt неупорядкованої фази  $L1$ -CoPt та трьох впорядкованих фаз –  $L1_2$ -Co<sub>3</sub>Pt,  $L1_0$ -CoPt та  $L1_2$ -CoPt<sub>3</sub>, для яких притаманними є феромагнітні властивості. Однак найбільш перспективною для застосування є впорядкована фаза  $L1_0$ -CoPt, що проявляє магнітно-тверді феромагнітні властивості [1, 2]. Впорядкована фаза  $L1_0$ -CoPt не є стехіометричною сполукою та має певну область однорідності в діапазоні від 42 ат.% до 57,5 ат.% Pt [3].

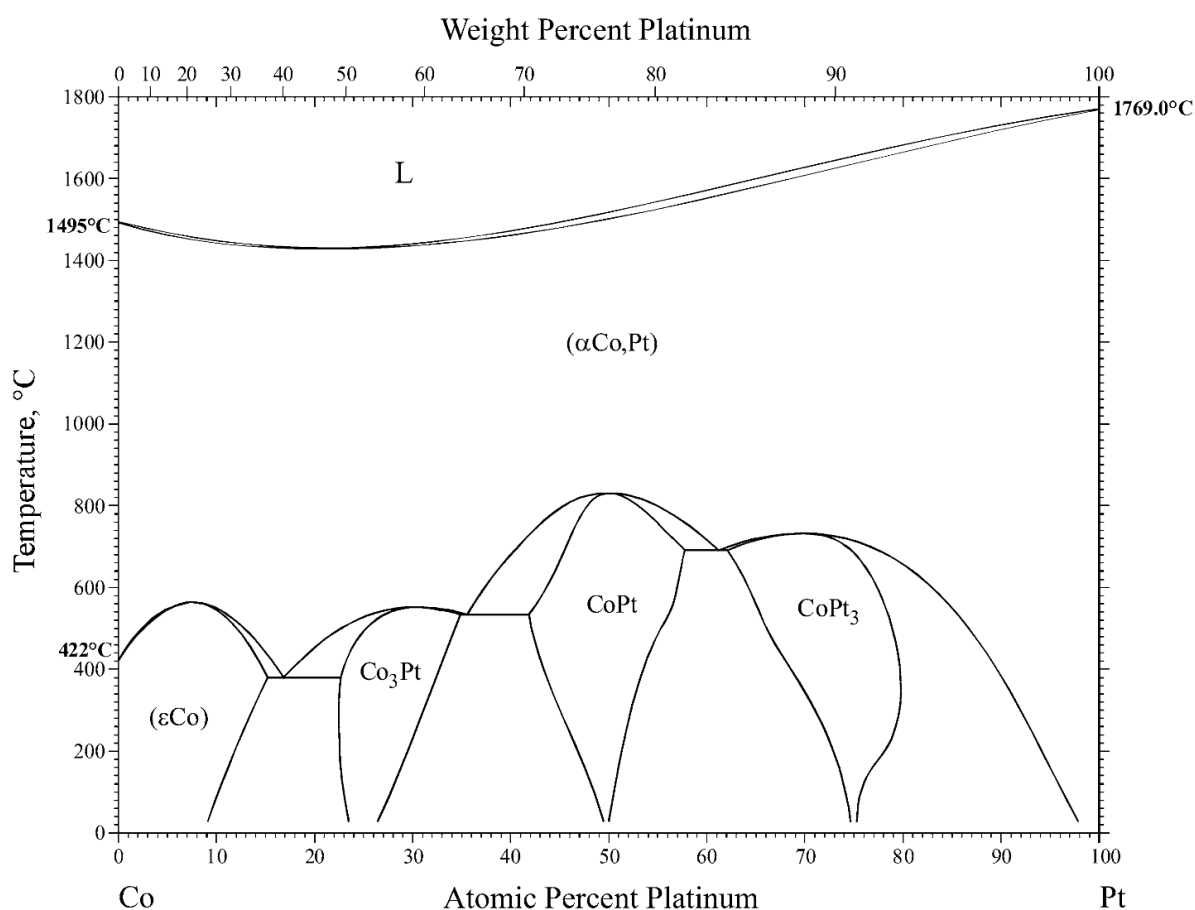


Рисунок 1.1 – Фазова діаграма системи Co-Pt [3]

## 1.2 Властивості впорядкованих плівок CoPt

Одним з основних напрямків дослідження закономірностей індукованих різними чинниками фазових перетворень в нанорозмірних плівках на основі сплаву CoPt є формування впорядкованої фази  $L1_0$ -CoPt з комплексом магнітних властивостей, перспективних для використання у сучасних високих технологіях наноелектроніки та спінтроніки. Оптимізація параметрів кристалічної структури та досягнення більш високих фізичних властивостей даного класу матеріалів необхідні для їхнього практичного використання.

Магнітотверда впорядкована фаза  $L1_0$ -CoPt може бути сформована шляхом осадження сплаву CoPt на нагріті монокристалічні підкладки [4-7] або шляхом осадження цього сплаву на аморфні підкладки за кімнатної температури з подальшою термічною обробкою [8-13].

Після осадження структура даних нанорозмірних матеріалів представляє собою невпорядковану фазу  $A1$ -CoPt, що проявляє ізотропні магнітно-м'які властивості. Подальший відпал або осадження на нагріту підкладку активує процес фазового перетворення  $A1$ -CoPt  $\rightarrow$   $L1_0$ -CoPt. Поява магнітно-кристалічної анізотропії пов'язана з кристалічними змінами у структурі матеріалу. Фаза  $L1_0$ -CoPt має тетрагональну кристалічну ґратку, що зумовлює появу анізотропії.

Для оптимізації процесу фазового перетворення  $A1$ -CoPt  $\rightarrow$   $L1_0$ -CoPt досліджується вплив різноманітних чинників, таких як стехіометричний склад, вплив легуючих елементів, товщини тонкої плівки, тощо.

У роботі [14] вплив стехіометрії фази CoPt на процеси впорядкування досліджено на прикладі нанорозмірних плівок сплаву CoPt, осаджених на монокристалічну підкладку. Хімічний склад плівкового матеріалу варіювався в діапазоні 40 ат.% - 60 ат.% Co. Зазначається, що найбільший ступень впорядкування досягається поблизу еквіатомного співвідношення концентрацій (рис. 1.2). Проте незначне підвищення вмісту Co дозволяє отримати більш високе значення постійної магнітно-кристалічної анізотропії.

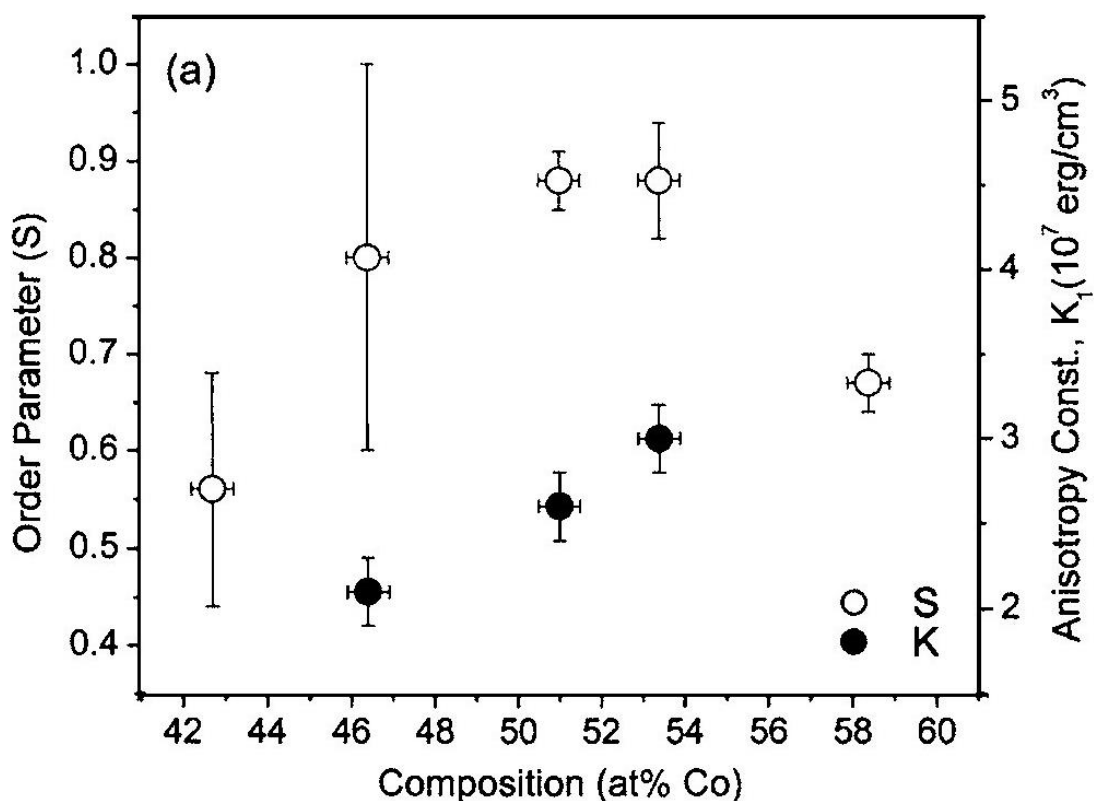


Рисунок 1.2 – Залежність ступеню впорядкування ( $S$ ) та константи магнітно-кристалічної анізотропії ( $K$ ) від концентрації Co [14]

Також відоме, що варіювання хімічного складу тонких плівок можливо досягти за допомогою внесення додаткових шарів легуючих елементів.

В роботі [10] проаналізовано вплив шару Cu на формування впорядкованої фази  $L1_0$ -CoPt. Сплав CoPt осаджувався на підкладинку монокристалічного кремнію Si(001) за наявності та відсутності додаткового шару Cu. Отримані тонкі плівки піддано відпалу у вакуумі за температури 500 °C протягом 30 хвилин. Показано, що додавання шару Cu між плівкою CoPt та підкладинкою дозволяє знизити температуру фазового переходу  $A1$ -CoPt  $\rightarrow$   $L1_0$ -CoPt. Також повідомляється, що найбільший ступень впорядкування досягається для плівок товщиною до 50 нм.

Втім, у вищезазначених роботах дослідження сфокусовано на формуванні впорядкованої фази  $L1_0$ -CoPt у нанорозмірних плівках сплаву CoPt. Водночас утворення магнітно-твердих фаз, викликане термічно-

індукованим дифузійним перемішуванням у багат шарових металевих композиціях, є перспективним методом синтезу новітніх тонкоплівкових матеріалів [15]. Зокрема, такий підхід дозволяє отримувати плівкові матеріали з заданим стехіометричним концентраційним співвідношенням компонентів шляхом варіюванню товщини осаджених шарів Co та Pt.

В роботі [8] повідомляється про утворення впорядкованих плівок  $L1_0$ -CoPt шляхом ініціалізації взаємної дифузії у двошарових композиціях Co/Pt, осаджених електронно-променевим методом. Активація дифузійних процесів здійснена за допомогою швидкісного термічного відпалу. Визначено температури гомогенізації хімічного складу ( $300\text{ }^\circ\text{C}$ ), впорядкування кристалічної будови ( $700\text{ }^\circ\text{C}$ ) та її подальшого розупорядкування ( $900\text{ }^\circ\text{C}$ ) (рис.1.3).

Незважаючи на успішне отримання впорядкованої фази  $L1_0$ -CoPt шляхом термічно-індукованої взаємної дифузії у двошаровій плівковій композиції Pt/Co, автори роботи [8] не приділили уваги вивченню дифузійних механізмів, що домінують в різних температурних інтервалах.

Найімовірніше, що саме об'ємна дифузія має найбільш суттєвий внесок в загальний дифузійний потік за температури  $700\text{ }^\circ\text{C}$  – температури початку впорядкування кристалічної структури з формуванням впорядкованої фази  $L1_0$ -CoPt. Об'ємний механізм дифузії обумовлює рух плоского фронту із зародженням і зростанням нової фази на вихідній границі поділу між металевими шарами.

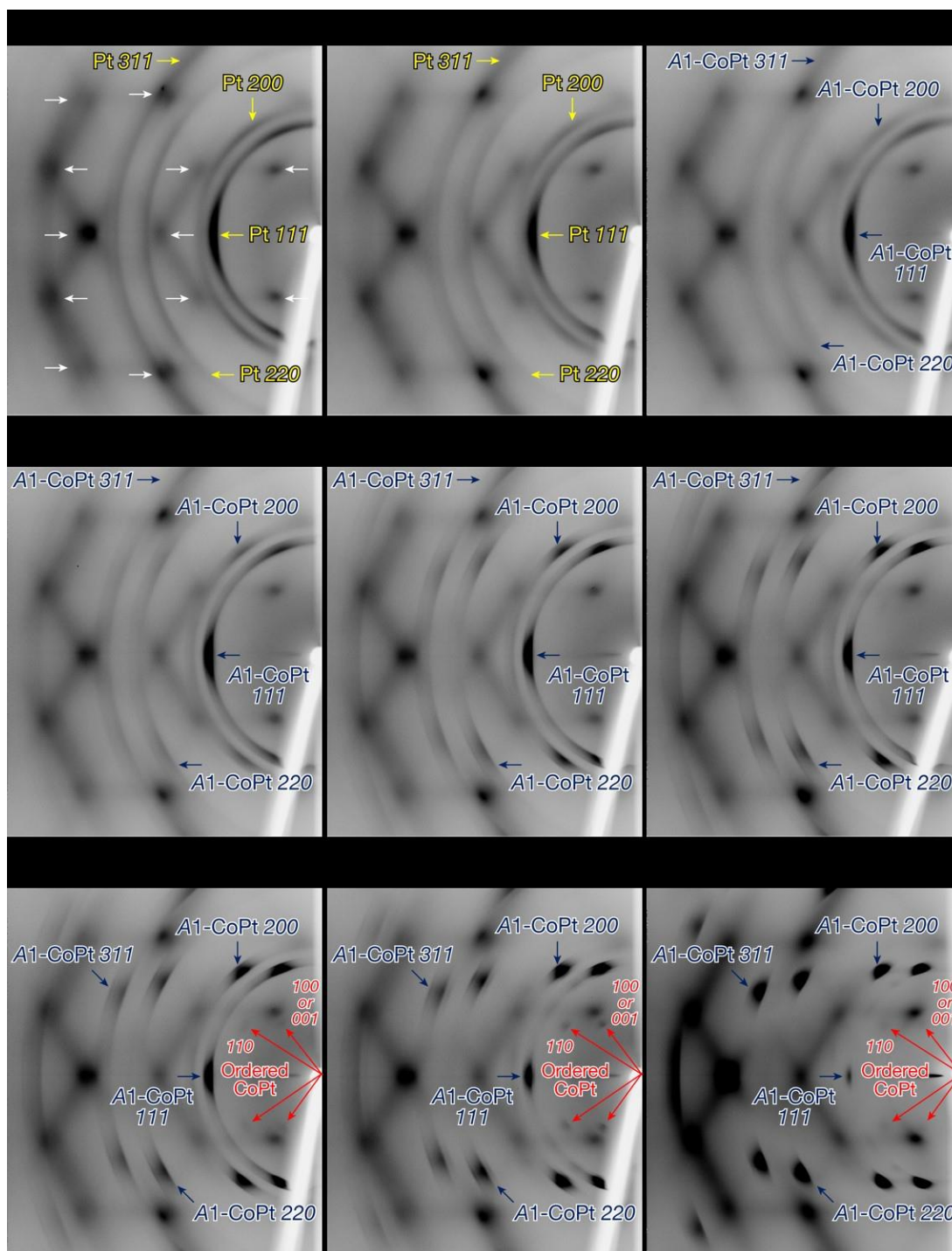


Рисунок 1.3 – Рентгенограми двохшарових плівкових композицій Pt/Co після термічної обробки за різних температур [8]

Однак окрім впорядкованої фази  $L1_0$ -CoPt також зафіксовано формування фаз  $L1_2$ -Co<sub>3</sub>Pt та  $L1_2$ -CoPt<sub>3</sub>, що свідчить про нерівномірний розподіл фазового складу після швидкісного відпалу за високих температур (рис. 1.4). Автори пов'язують цей факт з обмеженою тривалістю відпалу (30 с)

за обраного фізико-технологічного режиму термічної обробки. Крім того, високотемпературний швидкісний відпал призводить до погіршення параметрів структури, зокрема до суттєвого збільшення середньоквадратичної шорсткості поверхні та середнього розміру нанокристалічних зерен.

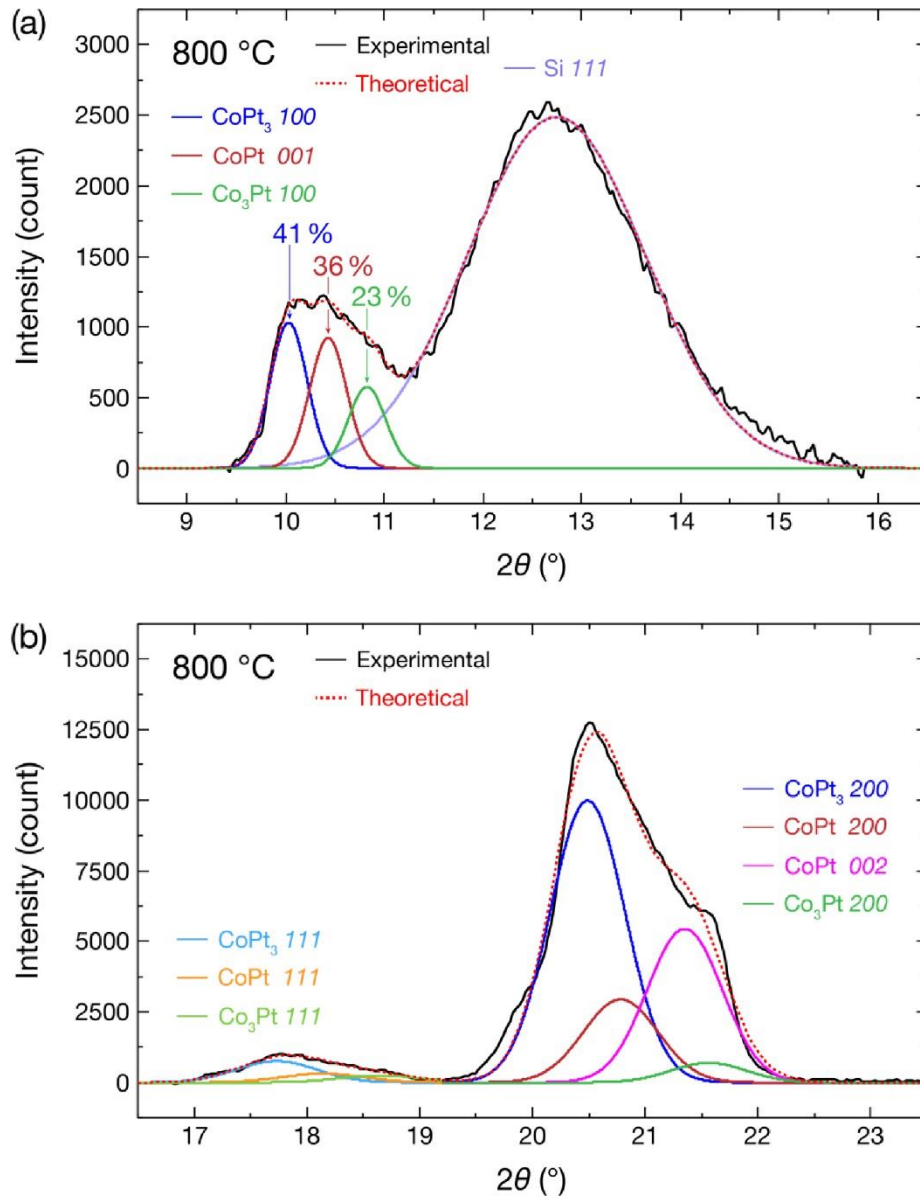


Рисунок 1.4 – Дифрактограми зразків після високотемпературного швидкісного відпалу за температури 800 °C упродовж 30 секунд у вакуумі, отримані зйомкою у ковзаючій геометрії [8]

Додавання шарів легуючих елементів також дозволяє впливати на структурно-фазові зміни в нанорозмірних плівкових композиціях Pt/Co. Так в

роботі [9] досліджувалось фазоутворення за умов високотемпературного швидкісного відпалу багат шарових композицій  $[\text{Co}/\text{Pt}]_4$  з додатковим підшаром  $\text{Ti}$ . Відпал тонкої плівки без підшару  $\text{Ti}$  сприяє формуванню фази  $L1_0\text{-CoPt}$  з шароподібною формою зерен, яка обумовлює підвищену коерцитивну силу. Отримані в цій роботі [9] результати рентгеноструктурного фазового аналізу наведено на рис. 1.5. Додавання шару  $\text{Ti}$  дозволяє отримати неупорядкований твердий розчин  $A1\text{-CoPt}$ , збагачений на  $\text{Co}$ .

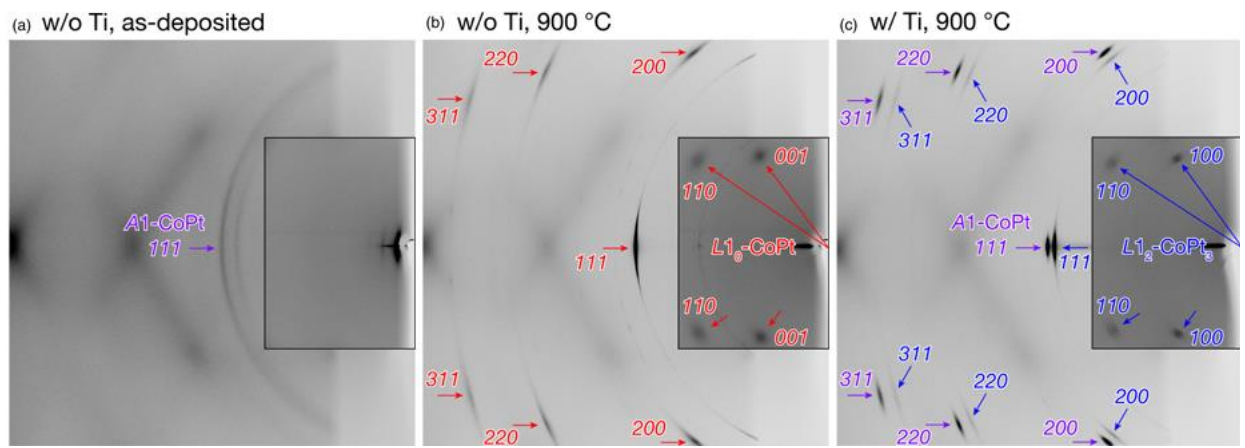


Рисунок 1.5 – Рентгенограми двох шарових плівкових композицій  $\text{Pt}/\text{Co}$  без (а, б) та з додатковим шаром  $\text{Ti}$  (с) після осадження та відпалу за температури  $900\text{ }^\circ\text{C}$  [9]

Втім, застосування високотемпературного відпалу не є доцільним з точки зору технологічних процесів виготовлення функціональних пристроїв на основі нанорозмірних плівок  $\text{CoPt}$ . Наприклад, для досягнення високої щільності магнітного запису необхідним є обмеження росту зерен в процесі обробки, що зазвичай відбувається саме за високих температур. Тому актуальним є дослідження процесів утворення інтерметалідних сполук за низьких температур, коли домінуючий внесок в загальний дифузійний потік має зерногранична складова. Також увага приділяється формуванню магнітних характеристик без досягнення впорядкування у плівках  $\text{CoPt}$ .

### 1.3 Властивості неупорядкованих плівок CoPt

Тонкі неупорядковані магнітні плівки також здатні проявляти магнітні властивості, що зумовлені формуванням магнітної анізотропії.

Утворення магнітної анізотропії в неупорядкованих плівках CoPt може забезпечуватись різними механізмами [16-18]. В роботі [16] автори повідомляють про формування магнітної анізотропії при осадженні плівок CoPt<sub>3</sub>. Перпендикулярна магнітна анізотропія зустрічається виключно у плівках, вирощених біля 400 °C, які мають високу температуру Кюрі та підвищену намагніченість, автори пояснюють формування перпендикулярної магнітної анізотропії фазовим поділом в процесі осадження (рис. 1.6).

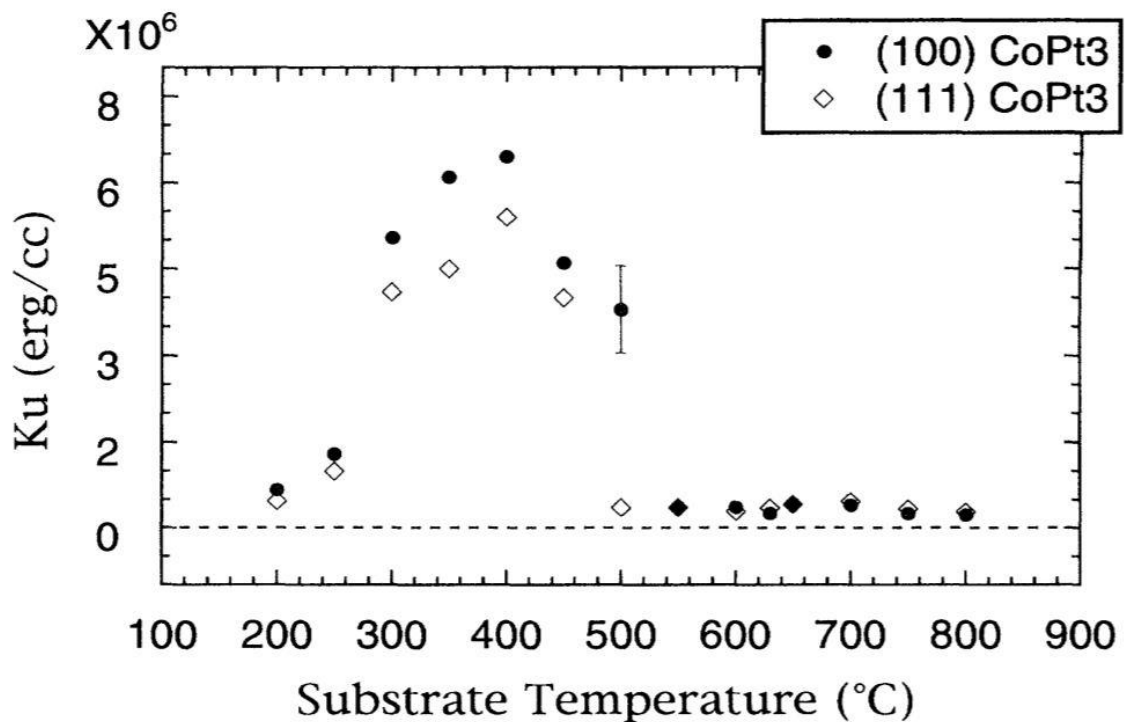


Рисунок 1.6 – Залежність константи анізотропії від температури плівок CoPt<sub>3</sub> осаджених за різних температур [16]

Автори роботи [17] повідомляють про формування перпендикулярної магнітної анізотропії внаслідок зростання гетерогенності при осадженні плівок CoPt<sub>3</sub> за температури 400 °C (рис. 1.7). Автори пов'язують це з

утворенням кластерів Со в ґратці, що переважно складається з атомів Рт. Магнітні властивості осаджених плівок не залежать від кристалографічної орієнтації, зростають із збільшенням температури росту та зникають із відпадом.

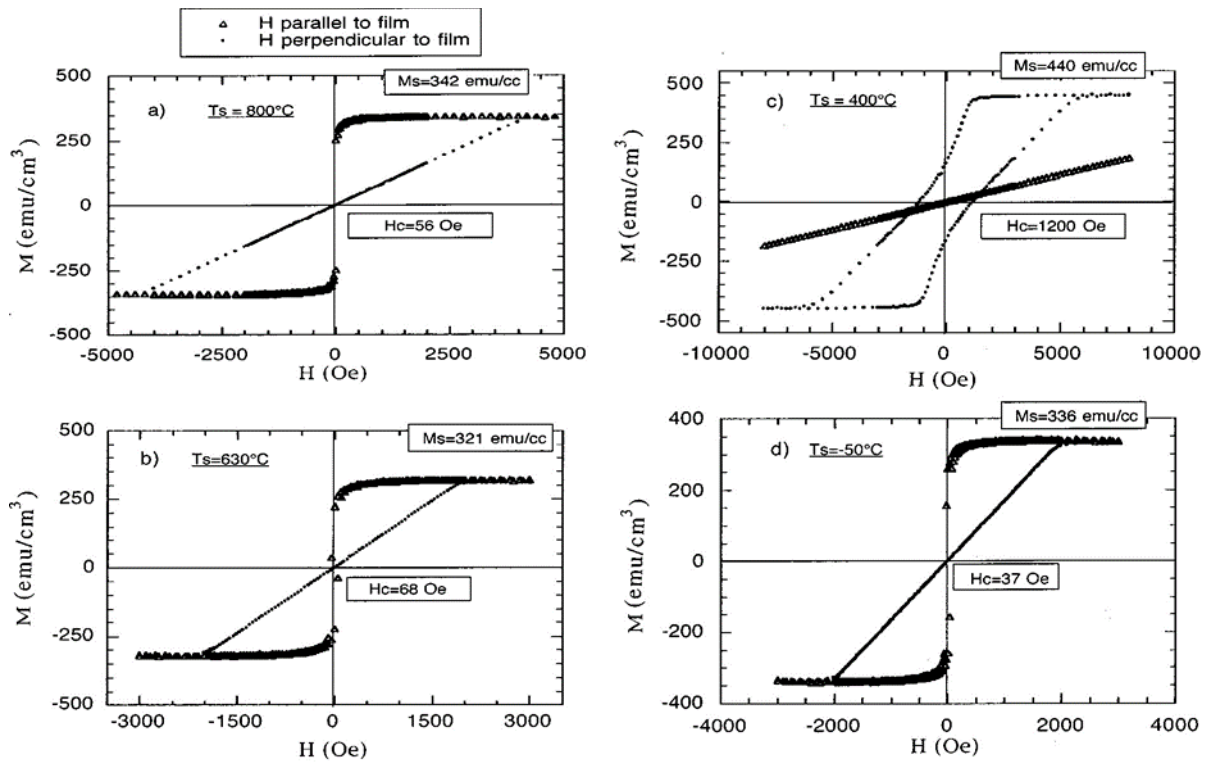


Рисунок 1.7 – Польові залежності намагніченості плівок  $\text{CoPt}_3$  товщиною 3000 Å, осаджених на підкладки за різних температур [17]

В деяких дослідження причиною появи перпендикулярної магнітної анізотропії є утворення ближнього порядку у тонких плівках  $\text{CoPt}$  [19-27]. Автори роботи [19] зазначають, що формування анізотропного ближнього порядку є причиною утворення магнітної анізотропії при осадженні  $\text{CoPt}_3$  на підкладку з буферним шаром Ru (0001) товщиною 15 нм за температури 690 К (рис. 1.8).

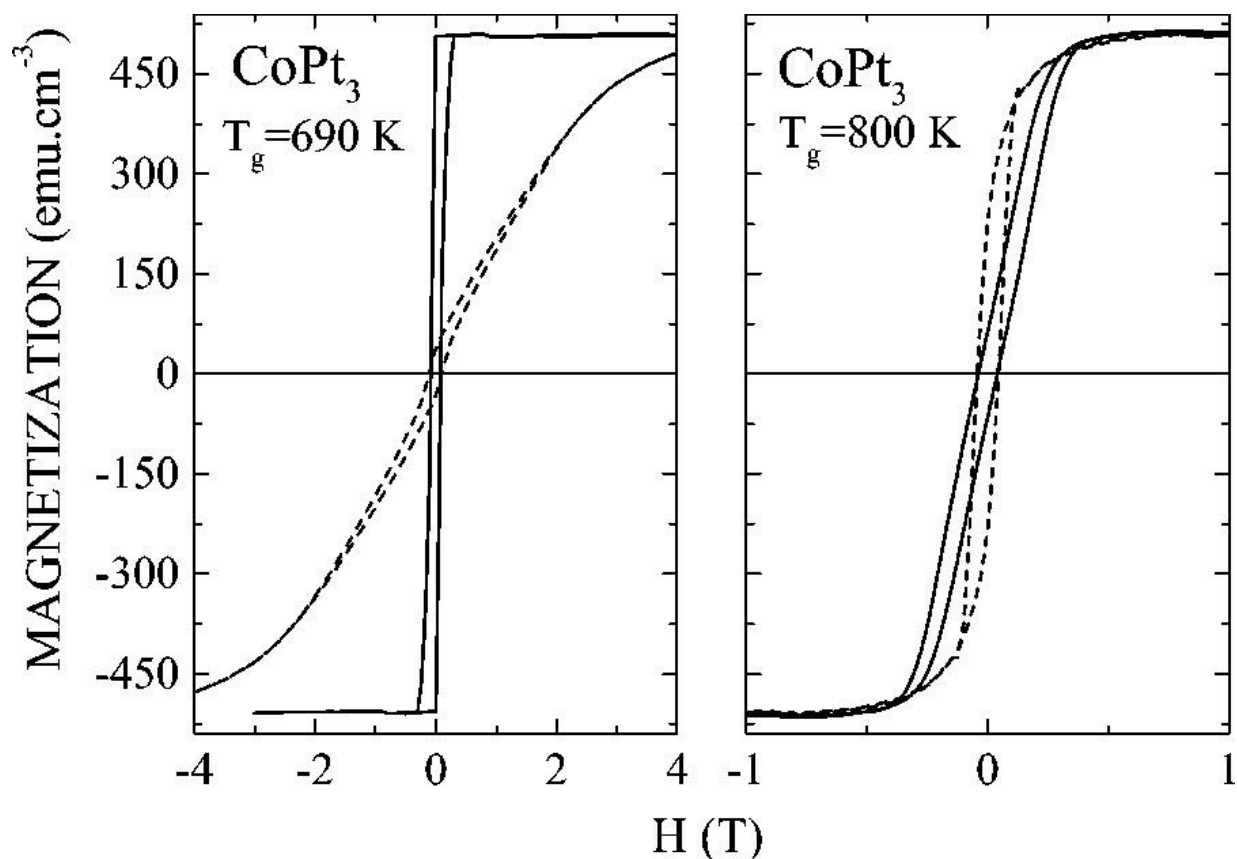


Рисунок 1.8 – Польові залежності намагніченості плівок  $\text{CoPt}_3$  осаджених на підкладки за температур 690 К і 800 К виміряні у паралельно (пунктирна лінія) та перпендикулярно (суцільна лінія) прикладеному полі [19]

Так в роботах [20, 21, 28] повідомляється про утворення перпендикулярної магнітної анізотропії в епітаксійних плівках  $\text{CoPt}_3$  з орієнтацією кристалітів в напрямку (111), осаджених методом електронно-променевого випаровування на підкладки  $\text{WSe}_2$ . Плівки осаджувалися без додаткових шарів, адгезія шару  $\text{CoPt}_3$  забезпечувалася силами Ван дер Ваальса. В роботі [28] магнітна анізотропія спостерігається в плівках товщиною 30 Å при температурах осадження до 150 °С, при підвищенні температури вісь легкого намагнічування спрямовується паралельно площині плівки. Вплив температури на магнітні властивості плівок  $\text{CoPt}$  товщиною 30 Å, отриманих за різних температур вказано на рисунку 1.9.

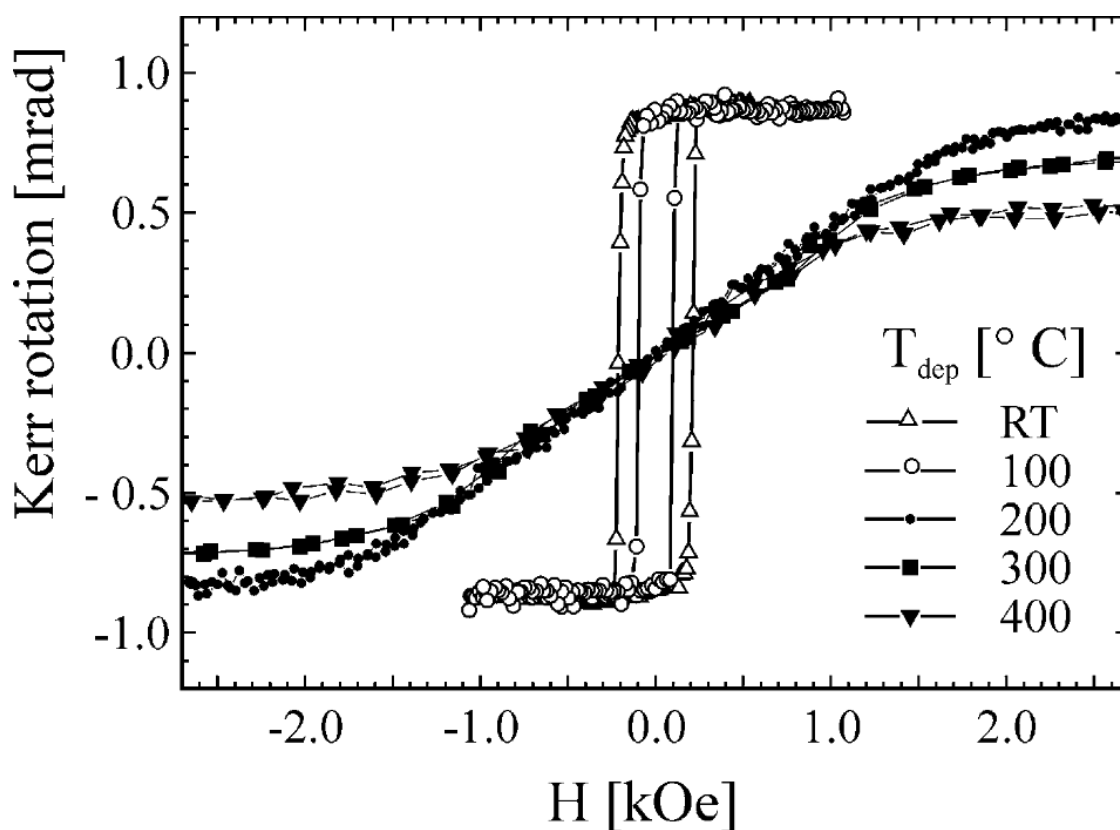


Рисунок 1.9 – Польові залежності намагніченості плівок  $\text{CoPt}_3$  товщиною  $30 \text{ \AA}$ , отриманих за різних температур [28]

Товщина плівки також впливає на утворення магнітної анізотропії, так в [20, 21] вісь легкого намагнічування є перпендикулярною площині плівки в усіх випадках осадження шару  $\text{CoPt}_3$  товщиною 3 нм та 6 нм за температури  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  на підкладку  $\text{WSe}_2$ . При збільшенні товщини плівки до 9 нм вісь легкого намагнічування є паралельною площині плівки (рис. 1.10).

Утворення перпендикулярної магнітної анізотропії зумовлено ближнім порядком у структурі плівки, що характеризується переважними зв'язками  $\text{Co-Co}$  вздовж напрямку в площині та переважні зв'язки  $\text{Co-Pt}$  вздовж напрямку поза площиною. При збільшенні температури в [28] відбувається розвиток ближнього порядку в впорядковану структуру  $L1_2$ , що приводить до зникнення перпендикулярної магнітної анізотропії. В роботах [17, 22] зазначається, що плівки  $\text{CoPt}_3$  демонструють сильну перпендикулярну магнітну анізотропію в певному діапазоні температур осадження ( $250 \text{ }^\circ\text{C} - 480 \text{ }^\circ\text{C}$ ) через анізотропний хімічний ближній порядок.

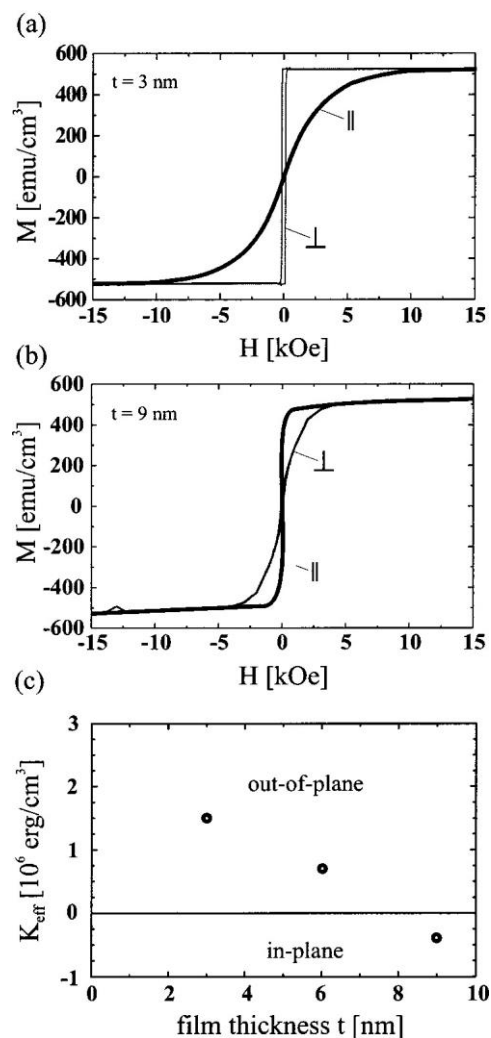


Рисунок 1.10 – Польові залежності намагніченості плівок  $\text{CoPt}_3$  товщиною 3 нм та 9 нм і залежність енергії магнітокристалічної анізотропії від товщини плівки [21]

Окрім суцільних нанорозмірних плівок близький порядок може утворюватись і в наночастинках зі сплаву Co-Pt, що утворені в процесі повільного зростання при спільному електронно-променевому осадженні Co та Pt на підкладинку  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  за кімнатної температури [25, 26] (рис. 1.11).

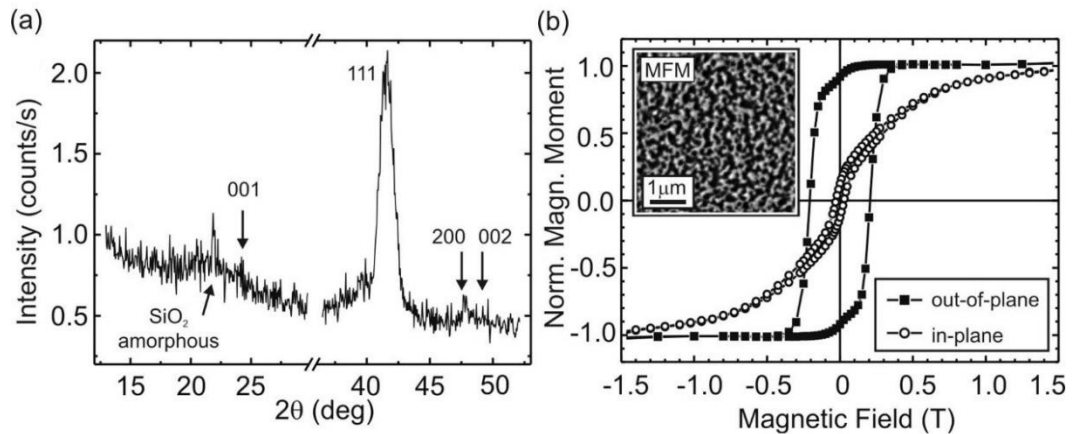


Рисунок 1.11 – Рентгенограма (a) та польові залежності намагніченості (b) нанорозмірної плівкової композиції Pt(1 нм)/CoPt(5 нм)/MgO(10 нм) [25]

Ці результати дозволяють розглядати сплави Co-Pt як потенційний матеріал для пристроїв спінтроніки та магнітних носіїв інформації навіть без формування магнітнотвердої фази  $L1_0$ -CoPt. Втім реалізація ближнього порядку та перпендикулярної магнітної анізотропії в сплавах Co-Pt за допомогою дифузійного перемішування у шарах Co/Pt та вплив механізмів дифузії на його формування не є дослідженими.

### 1.3 Висновки до розділу 1

1. Нанорозмірні плівки на основі впорядкованої фази  $L1_0$ -CoPt є перспективними матеріалами для застосування у сучасних високих технологіях наноелектроніки та спінотроніки, що обумовлено комплексом унікальних магнітних характеристик даної фази – високим енергії магнітно-кристалічної анізотропії, намагніченості насичення та коерцитивній силі.

2. Впорядкована фаза  $L1_0$ -CoPt зазвичай формується шляхом термічного впливу на тонкі плівки з вихідною структурою неупорядкованого сплаву  $A1$ -CoPt; можливість утворення впорядкованої фази шляхом термічно-індукованого дифузійного перемішування в нанорозмірних гетерогенних системах з шарами окремих металів Pt і Co є практично недослідженою, що і обумовлює актуальність даної роботи.

## 2 МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Плівкові об'єкти дослідження

В даній роботі досліджено нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм), отримані методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені підкладинки монокристалічного кремнію SiO<sub>2</sub>(100 нм)/Si(001). Товщина металевих шарів контролювалась в процесі осадження, зважаючи на відому швидкість розпорошення кожної мішені. Додатковий шар Ta осаджено з метою покращення адгезії між плівкою та підкладинкою.

### 2.2 Методика магнетронного розпорошення тонких плівок

Магнетронне розпорошення – це спосіб нанесення тонких покриттів у вакуумі за допомогою розпорошення мішені під дією плазмового розряду та осадження розпорошеного матеріалу на підкладинці. Відмінність магнетронного розпорошення від інших методів іонно-плазмового нанесення покриттів полягає в тому, що магнетронний розряд виникає під дією електричного та магнітного полів, що локалізовані біля поверхні катода-мішені та ортогональні одне до одного. Такий розряд дозволяє значно підвищити ефективність процесу розпорошення. Траєкторія електронів, що емітують з поверхні катода-мішені змінюється під дією магнітного поля завдяки чому електрони іонізують атоми газу біля поверхні катода. Утворений плазмовий розряд локалізується біля катода-мішені, іони бомбардують поверхню та розпорошують її. Розпорошені частинки матеріалу мішені осідають на підкладинці, утворюючи тонку плівку. Рівномірність осадженого шару додатково досягається обертанням підкладинки навколо своєї осі [29].

Магнетронне розпорошення є універсальним методом, що дозволяє одержувати плівки нанометрового масштабу з різноманітних матеріалів, зокрема діелектриків, феромагнітних та тугоплавких матеріалів. Цей метод є зручним для отримання шаруватих структур, оскільки під час магнетронного

розпорошення підкладинка не нагрівається, що виключає можливість дифузійного перемішування у шарах на етапі нанесення.

Осадження нанорозмірної композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) здійсненого за базового тиску  $1 \times 10^{-7}$  мБар, а робочий тиск газу Ar складав  $8 \times 10^{-4}$  мБар. Для осадження шарів Ta та Pt використовувався режим радіочастотного розпорошення, тоді як Co розпорошували в режимі постійного струму. Швидкість осадження була встановлена на рівні 1,5 Å/с, 0,8 Å/с, 1,4 Å/с для Pt, Co та Ta, відповідно.

### **2.3 Параметри термічної обробки**

Термічна обробка плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) здійснена у вакуумній камері установки ВУП-5М за тиску  $10^{-4}$  Па. Тонкоплівкові зразки відпалювалися за температур в діапазоні від 200 °С до 550 °С з тривалістю 30 хвилин та при 450 °С та 550 °С упродовж 1 години – 8 годин. В процесі обробки температура контролювалася за допомогою термодари, підведеної до нагрівальної поверхні.

### **2.4 Пошаровий хімічний аналіз методом мас-спектрометрії вторинних іонів**

Мас-спектрометрія вторинних іонів – це метод пошарового хімічного аналізу поверхні за допомогою її опромінення іонним пучком. Принцип дії мас-спектрометра засновано на реєстрації вторинних іонів, що випромінюються з поверхні зразка під дією пучка первинних іонів, який генерується іонною гарматою. Пучок первинних іонів може являти собою потік іонів інертних газів (Ar, Xe), кисню, металів (Cs, In, Ga тощо) та іонізованих кластерів металів (Au, Bi). Вибиті з поверхні зразка вторинні іони реєструються за допомогою мас-аналізатора і за отриманими даними будуються залежності інтенсивності виходу іонів від тривалості розпорошення. Дані залежності характеризують розподіл іонів певного типу

за товщиною зразка, тобто надають пряму інформацію щодо його хімічного складу [30].

Для пошарового хімічного аналізу багат шарових плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після осадження та термічної обробки за різних фізико-технологічних параметрів у даній роботі використовувався часопротітний мас-спектрометр Ion Tof IV. На відміну від інших типів, часопротітний мас-аналізатор реєструє іони за їхньою швидкістю. Оскільки всі вторинні іони мають однакову кінетичну енергію, їх швидкість та час прольоту від зразка до аналізатора залежать від маси. Перевагою даного аналізатору є висока чутливість, а також, відповідно, висока точність [31]. В якості первинних іонів застосовувалися негативні іони  $\text{Cs}^-$  з енергією 2 кеВ.

## 2.5 Просвічуюча електронна мікроскопія

Просвічуюча електронна мікроскопія – це метод дослідження матеріалів, що заснований на взаємодії електронного пучка з досліджуваним зразком. ПЕМ є одним з найбільш високоінформативних методів дослідження, що використовуються у матеріалознавстві [32].

За допомогою просвічуючого електронного мікроскопа можливе дослідження різноманітних об'єктів на просвічування та відбивання. Електронний мікроскоп дозволяє отримувати зображення об'єктів з високою роздільною здатністю, робити дифракційні дослідження об'єктів на просвічування та відбивання.

Принцип дії ПЕМ в тому, що пучок електронів, який генерується електронною гарматою спрямовується на зразок за допомогою магнітних лінз конденсора. Електрони, що пройшли крізь досліджуваний об'єкт фокусуються за допомогою об'єктивної лінзи та проєктуються на екран, що реєструє отримане зображення чи дифракційну картину (рис. 2.1).

Для зразків матеріалів, що досліджуються на ПЕМ висуваються певні вимоги. Зразок повинен бути твердофазним та провідним, а також достатньо

тонким, аби електрони проходили крізь зразок, а не поглиналися. Товщина до якої потрібно стоншити зразок визначається виходячи з матеріалу, з якого він складається та значення напруги для прискорення електронів [32].

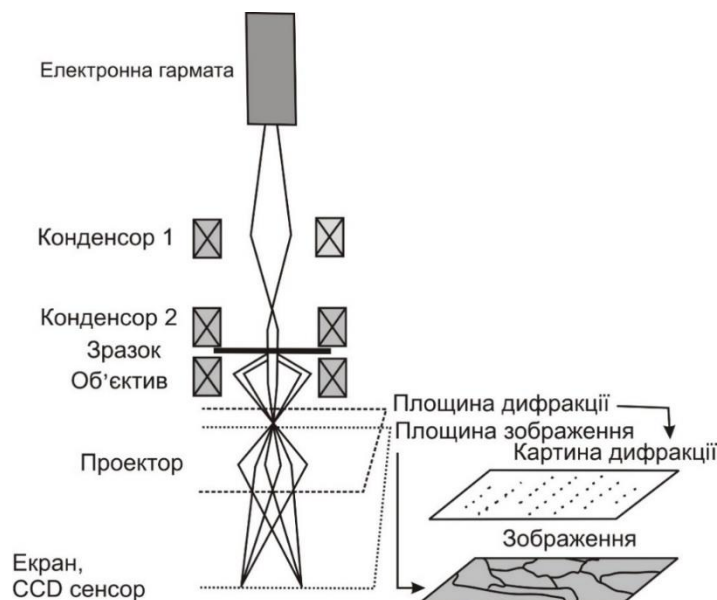


Рисунок 2.1 – Схема трансмісійного електронного мікроскопа [33]

Не менш важливим є створення вакууму у колоні електронного мікроскопа аби усунути можливість взаємодії електронів з молекулами повітря.

Електронний мікроскоп дозволяє досліджувати матеріали різними методами. Одним з них є метод енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (англ. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX). Аналіз спектру емісії рентгенівського випромінювання, що утворюється при взаємодії пучка електронів та атомів об'єкта, можливо отримати дані про його склад та розподіл атомів певного типу у зразку [34].

## 2.6 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Рентгеноструктурний фазовий аналіз – це метод дослідження фазового складу та структури матеріалів, який полягає в аналізі дифракції рентгенівського випромінювання на кристалічній ґратці зразка.

Дифракційна картина, що утворюється в результаті дослідження залежить від кристалічної будови об'єкта. Також важливою є довжина хвилі використовуваних рентгенівських променів. Для дослідження атомної структури застосовують рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі, що є близькою до міжатомних відстаней.

Дослідження фазового стану нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після осадження та різних етапів термічної обробки в даній роботі проведено за допомогою рентгенівського дифрактометра Rigaku Ultima 4 (рис. 2.2). Застосовано схему фокусування за Брегом – Брентано. Зразок в процесі структурних досліджень розміщується горизонтально та обертається в процесі зйомки навколо своєї осі.

Дослідження проведено в у випромінюванні  $\text{Cu}_{K\alpha}$  з довжиною хвилі  $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ . Умови проведення досліджень: інтервал кутів  $2\Theta = 20^\circ - 60^\circ$ , крок зйомки –  $0,04^\circ$ , час витримки в точці – 2 с; тривалість зйомки одного зразка – 90 хв.

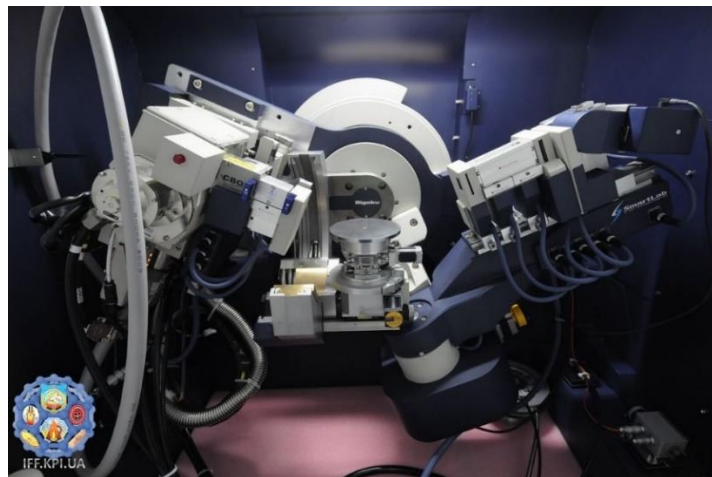


Рисунок 2.2 – Рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima 4 [35]

## 2.7 Магнітометрія

Дослідження магнітних характеристик тонких плівок Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) проведено за допомогою вібраційного магнітометра. Принцип дії вібраційного магнітометра полягає в тому, що

зразок, поміщений в магнітне поле котушок магнітометра, переміщується під дією механічних коливань. В якості джерела коливань зазвичай застосовується п'єзоелектричний випромінювач. Переміщення зразка в просторі індукує електричне поле в зчитувальних котушках магнітометра. Утворений у зчитувальних котушках струм є пропорційним до намагніченості зразка. Зареєстровані параметри намагніченості та величини зовнішнього поля використовують для побудови польової залежності намагніченості (петель гістрезису) [36].

## 2.8 Висновки до розділу 2

1. Нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) осаджено методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені підкладинки монокристалічного кремнію; застосування даного методу дозволило уникнути дифузійного перемішування між компонентами в процесі осадження, що дозволило сформувати гетерогенні системи з чіткими границями поділу між шарами.

2. Нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) піддано термічній обробці у вакуумі в температурному інтервалі 200 °C - 550 °C упродовж 30 хвилин та при 450 °C та 550 °C упродо з метою активації дифузійних процесів і контрольованих ними структурно-фазових перетворень.

3. Закономірності термічно-індукованих процесів перерозподілу компонентів за товщиною та зміни структурно-фазових станів, а також їхній вплив на магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) здійснено комплексом високороздільних методів сучасного фізичного матеріалознавства, які забезпечили високу достовірність отриманих результатів.

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 3.1 Закономірності перерозподілу компонентів за товщиною плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм)

Пошаровий хімічний аналіз досліджуваних плівкових гетерогенних систем після осадження та термічної обробки за різних фізико-технологічних параметрів проводився методом мас-спектрометрії вторинних іонів. Концентраційні профілі розподілу хімічних елементів за товщиною нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) у вихідному стані після осадження, а також після відпалу за температур 200 °С та 250 °С упродовж 30 хвилин представлено на рис. 3.1.

Як можна бачити, дифузійної взаємодії між Pt і Co у плівковому матеріалі після осадження не зафіксовано: спостерігається відносно чітка границя поділу між металевими шарами дослідженої нанорозмірної гетерогенної системи. При цьому, збільшення інтенсивності комплексного іону CoPt в області границі поділу Pt/Co обумовлено шорсткістю поверхні розділу між відповідними шарами та не вказує на виникнення дифузійного перемішування в процесі магнетронного розпорошення.

Ініціалізація дифузійної взаємодії у досліджуваних гетерогенних системах зафіксована після відпалу за температури 200 °С упродовж 30 хвилин (рис. 3.1, б).

Після відпалу за температури 250 °С спостерігається дифузія Co до шару Pt (рис. 3.1, в) з відносно рівномірним його розподілом за товщиною цього шару.

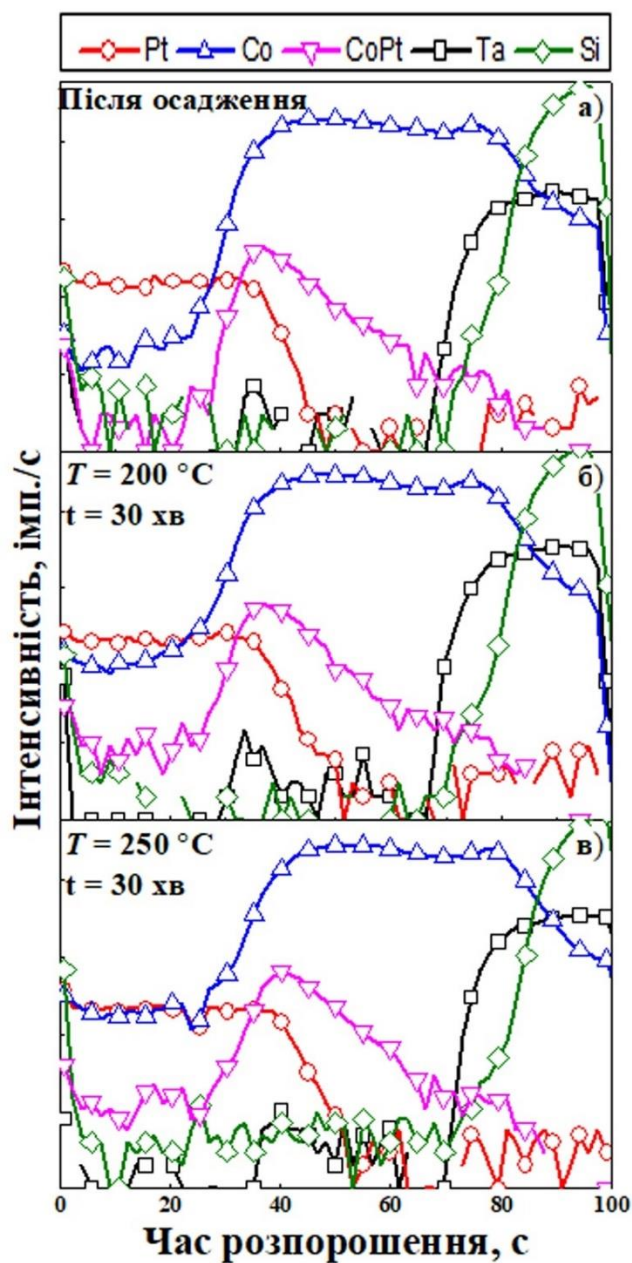


Рисунок 3.1 – Пошаровий розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після осадження та відпалу за температур 200 °С - 250 °С упродовж 30 хвилин

В результаті підвищення температури відпалу до 300 °С на вільній поверхні утворюється сегрегаційний прошарок Co (рис. 3.2, а). Також спостерігається підвищення інтенсивності комплексного іона CoPt в області вихідного шару Pt. За температури відпалу 350 °С інтенсивність комплексного

іона CoPt рівномірно розподіляється за товщиною вихідного шару Pt, а концентрація Co в цьому шарі зростає.

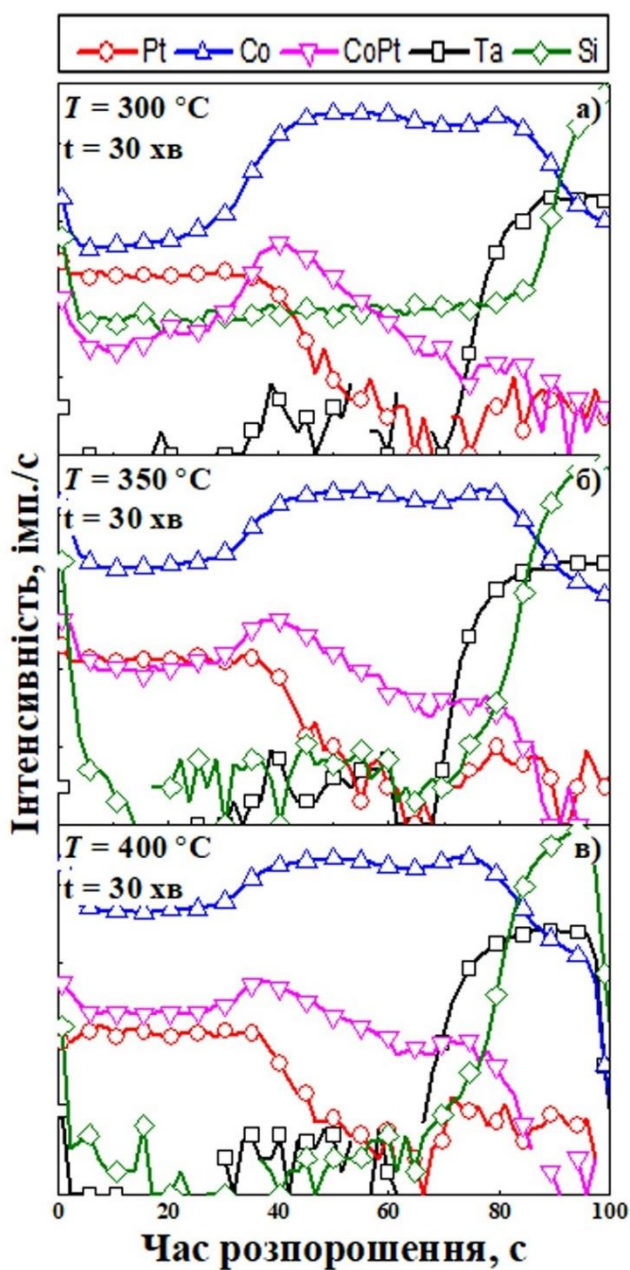


Рисунок 3.2 – Пошаровий розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температур 300 °С - 400 °С упродовж 30 хвилин

Підвищення температури відпалу до 400 °С та 450 °С призводить до більш рівномірного розподілу Co за товщиною досліджуваної плівкової

композиції (рис. 3.2, в, рис. 3.3, а). Втім інтенсивність іонів Pt і CoPt в області вихідного шару Co є нерівномірно розподіленою, спостерігається різке її зменшення зі збільшенням відстані від вихідної границі поділу Pt/Co. Це свідчить про те, що дифузія Pt є дуже обмеженою за цих температур.

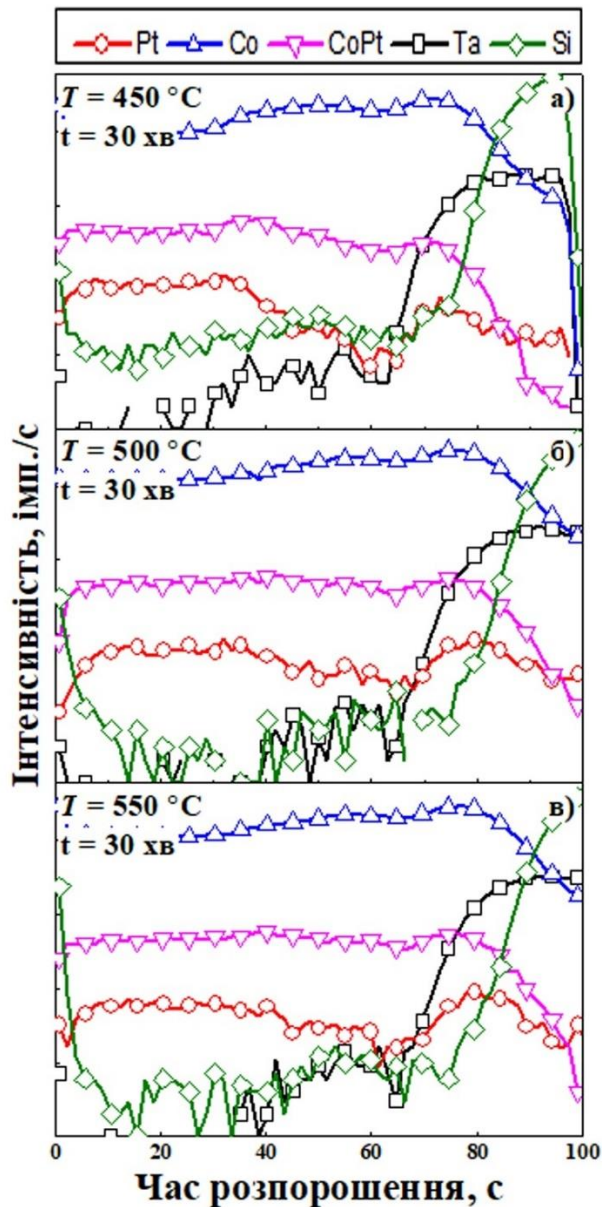


Рисунок 3.3 – Пошаровий розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температур 450 °С - 550 °С упродовж 30 хвилин

Відпал за температури 500 °C приводить до майже рівномірного розподілу Pt і Co за товщиною дослідженої плівкової композиції (рис. 3.3, б). Інтенсивність комплексного іону CoPt після цього режиму обробки також врівноважується за всією товщиною плівки. Відпал за температури 550 °C не призводить до помітних змін у розподілі елементів порівняно з тим, що досягнуто після термічної обробки за температури 500 °C (рис. 3.3, в).

Слід зазначити, що ознак дифузійної взаємодії між адгезійним шаром Ta та іншими компонентами плівкової композиції не спостерігається – розподіл іонів Ta за товщиною плівки однаковий після всіх досліджених режимів термічної обробки, положення області підвищеної інтенсивності сигналу від іонів Ta відповідає положенню шару Ta в структурі плівкової композиції у вихідному стані після осадження.

### **3.2 Дослідження плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) методом просвічуючої електронної мікроскопії**

На рисунку 3.4 наведено високороздільне ПЕМ зображення нанорозмірної плівкової композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) в вихідному стані після осадження. Спостерігаються окремі шари Ta, Co та Pt в структурі плівки. Наявні на зображенні структури, що складаються з паралельних ліній є дефектами, що виникли в результаті підготовки зразка до дослідження на електронному мікроскопі.

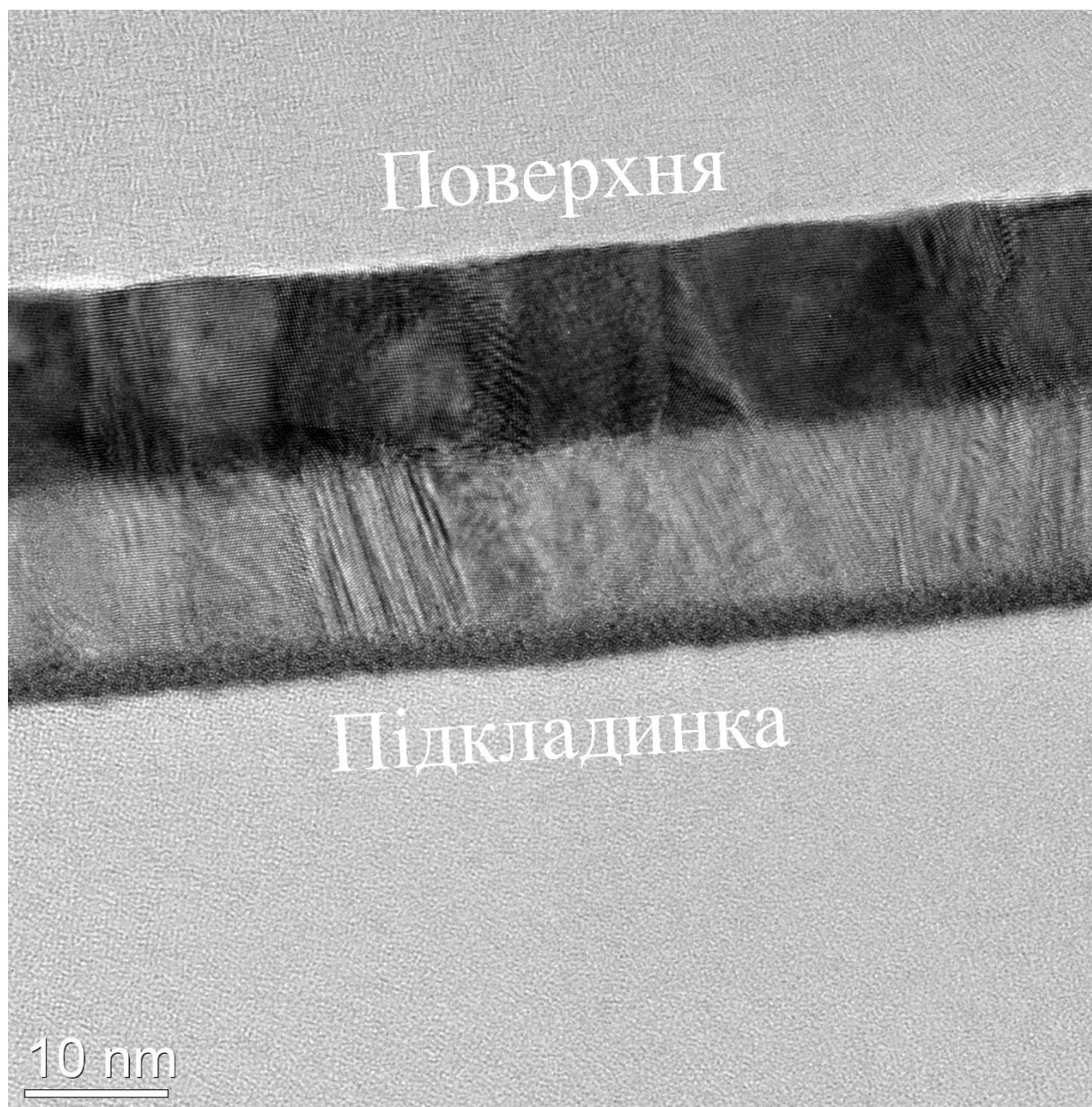
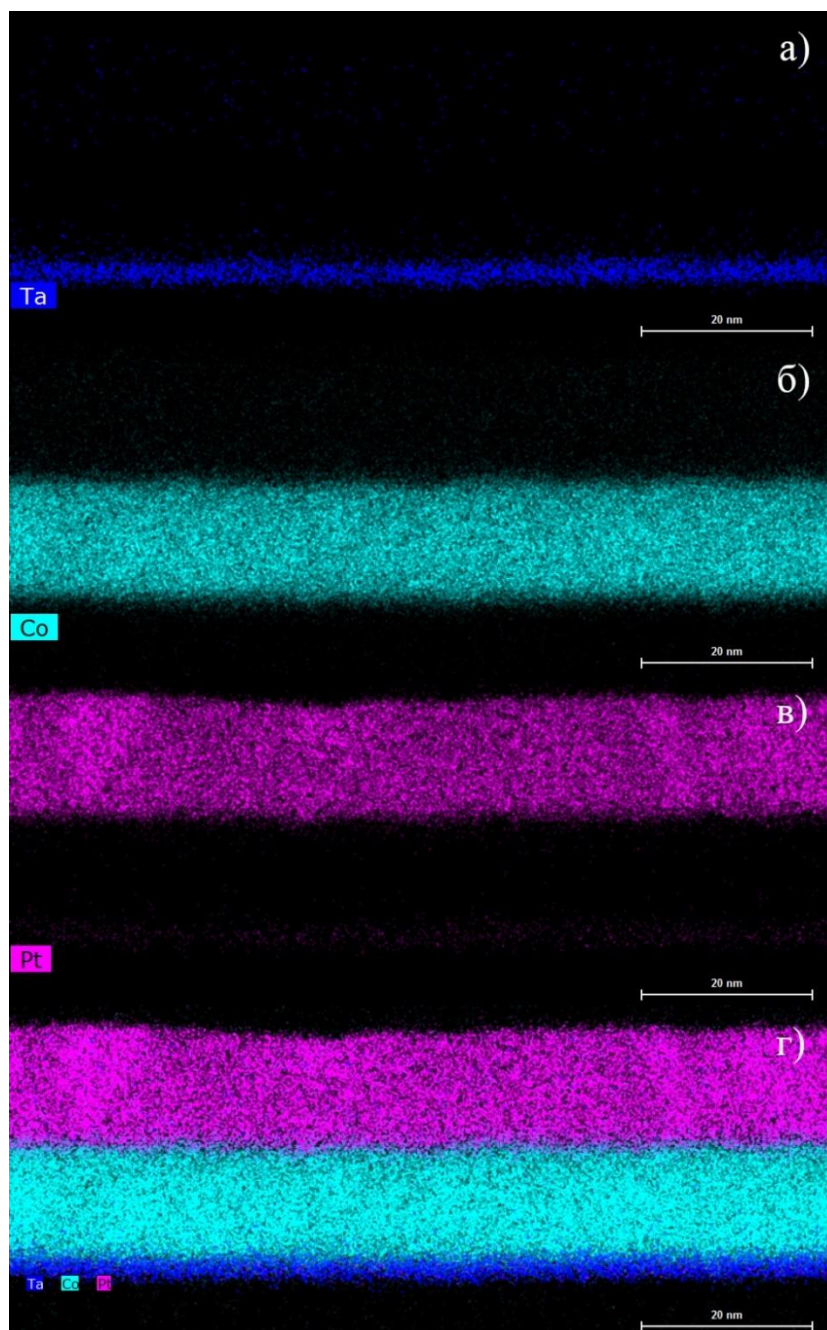


Рисунок 3.4 – Високороздільне ПЕМ зображення нанорозмірної плівкової композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) в вихідному стані

Рисунок 3.5 демонструє мапи розподілу хімічних елементів нанорозмірної плівкової композиції в вихідному стані після осадження, отримані методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії. Дифузійної взаємодії між шарами не спостерігається.



а – мапа розподілу Ta, б – мапа розподілу Co, в – мапа розподілу Pt,  
 г – загальний вигляд мапи розподілу

Рисунок 3.5 – Мапа розподілу хімічних елементів нанорозмірної плівкової композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) в вихідному стані

Внаслідок відпалу нанорозмірної плівкової композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) за температури 550 °C упродовж 30 хвилин на ПЕМ зображенні (рис. 3.6) спостерігається зникнення чіткої границі між шарами Pt та Co, що свідчить про дифузійне перемішування цих шарів.

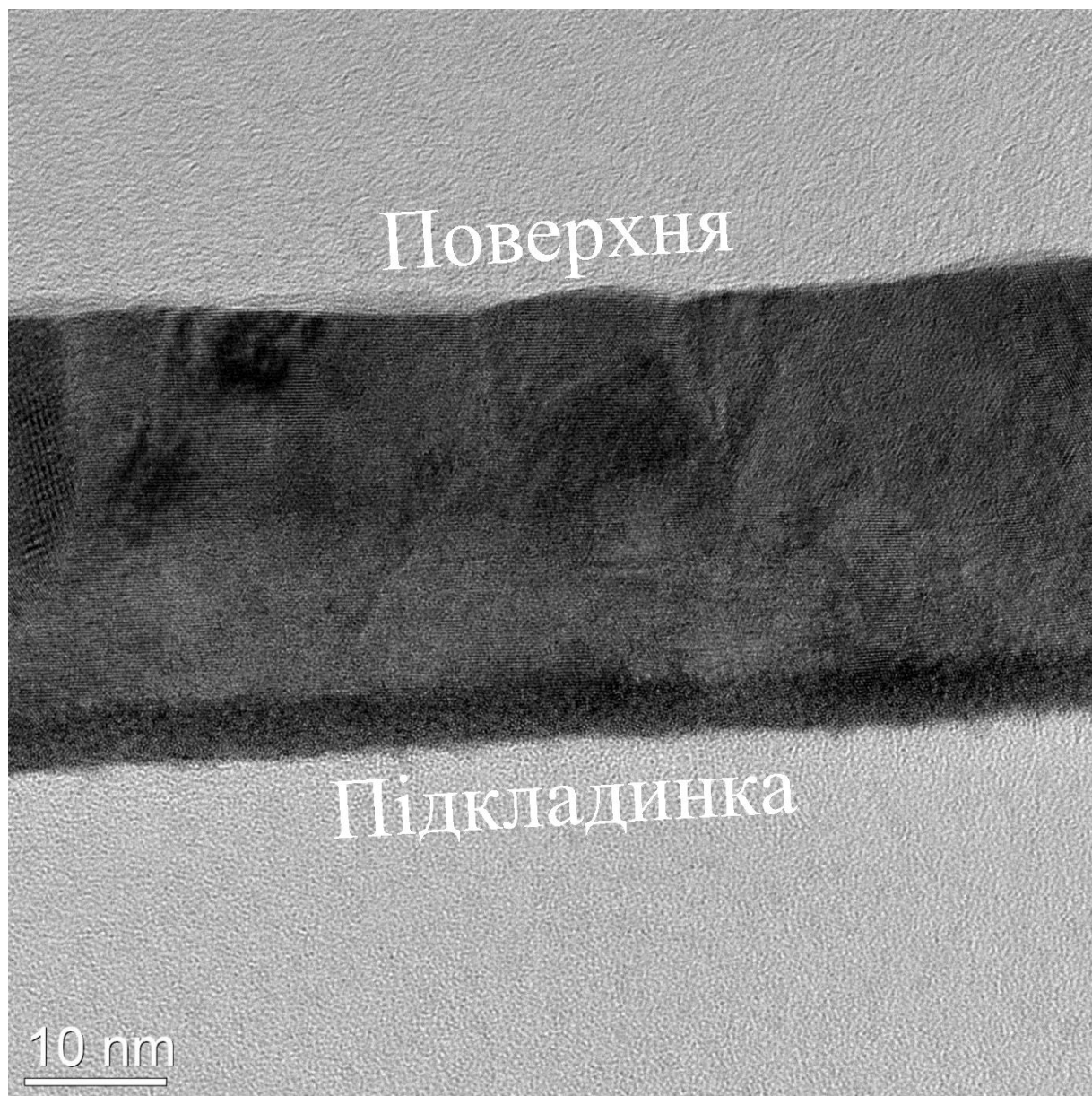
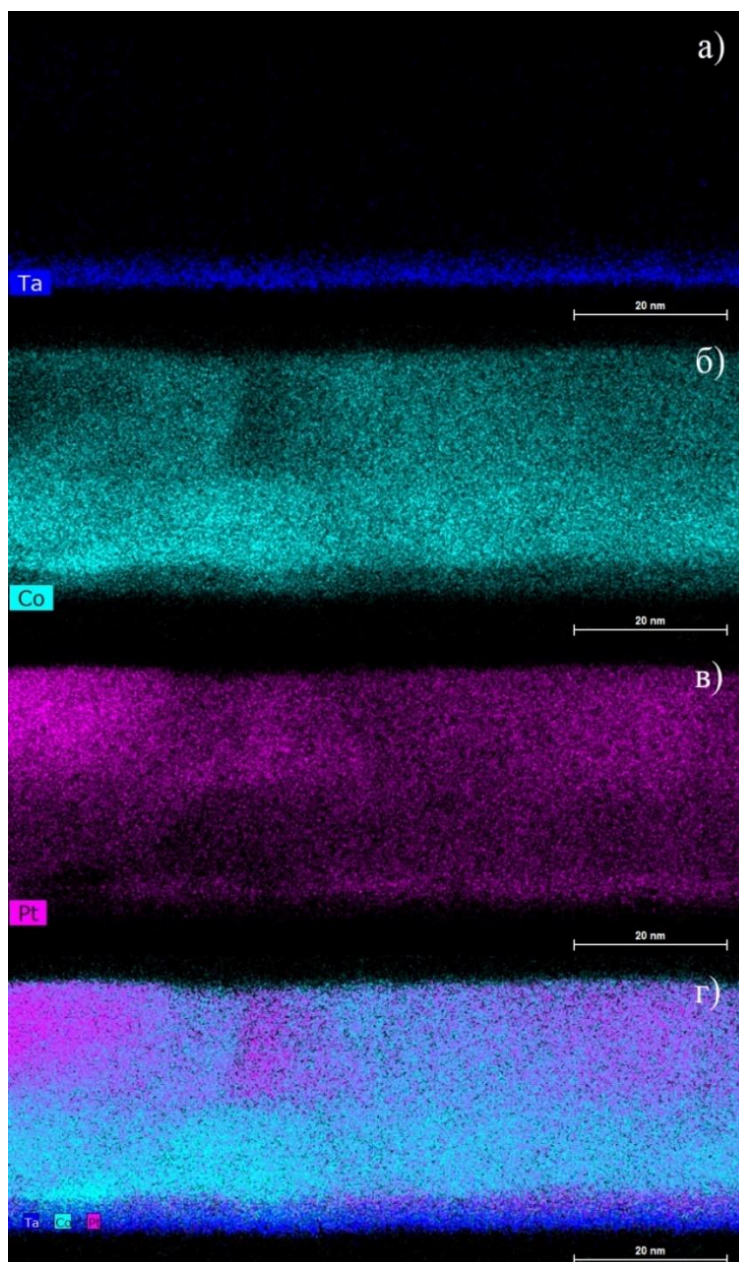


Рисунок 3.6 – Високороздільне ПЕМ зображення нанорозмірної плівкової композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температури 550 °C упродовж 30 хвилин

Мапи розподілу хімічних елементів плівкової композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температури 550 °C упродовж 30 хвилин свідчать про те, що дифузійне перемішування шарів Pt та Co не є повним (рис. 3.7).



а – мапа розподілу Ta, б – мапа розподілу Co, в – мапа розподілу Pt,  
 г – загальний вигляд мапи розподілу

Рисунок 3.7 – Мапа розподілу хімічних елементів нанорозмірної плівкової композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температури 550 °С упродовж 30 хвилин

Спостерігається зосередження найбільшої кількості сигналів від Pt та Co в областях вихідного положення відповідних шарів. Хоча пошаровий хімічний аналіз вказує на рівномірний розподіл Pt та Co по товщині плівкової композиції, повна гомогенізація не досягається.

### 3.3 Термічно-індуковані структурно-фазові перетворення в плівкових композиціях Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм)

Термічно-індуковані структурно-фазові перетворення в нанорозмірних плівкових композиціях Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) досліджено за допомогою методу рентгеноструктурного фазового аналізу.

На дифрактограмі плівкової композиції у вихідному стані після осадження, що представлена на рисунку 3.8, наявні чіткі дифракційні максимуми Ta(110), Pt(111) та Co(002), що підтверджує наявність шаруватої структури плівкового об'єкту дослідження після осадження (рис. 3.8, а).

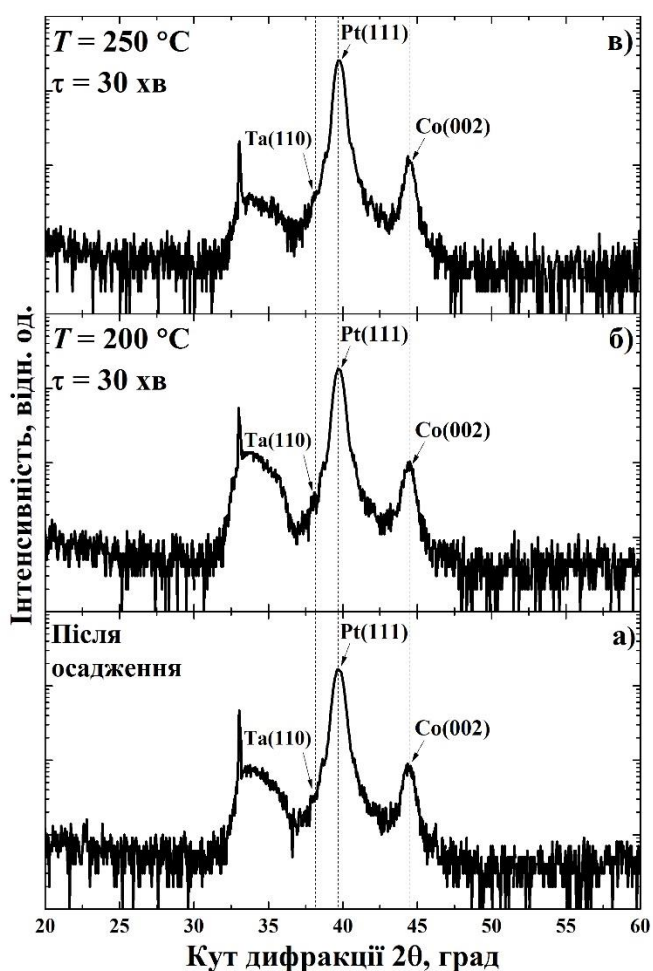


Рисунок 3.8 – Дифрактограми нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після осадження та відпалу за температур 200 °C - 250 °C упродовж 30 хвилин

Тобто результати рентгеноструктурного фазового аналізу добре узгоджуються з даними пошарового хімічного аналізу та даних просвічуючої електронної мікроскопії.

Термічна обробка призводить до ініціалізації модифікації структурно-фазового складу у досліджуваній плівковій композиції. Вже після відпалу за температури 200 °С упродовж 30 хвилин на дифрактограмі спостерігається зміщення дифракційного максимуму Pt(111) в бік більших кутів дифракції (рис. 3.8, б).

Зміщення дифракційного рефлексу Pt(111) стає ще більш поміним при збільшенні температури відпалу в інтервалі до 400 °С (рис. 3.9, а - в).

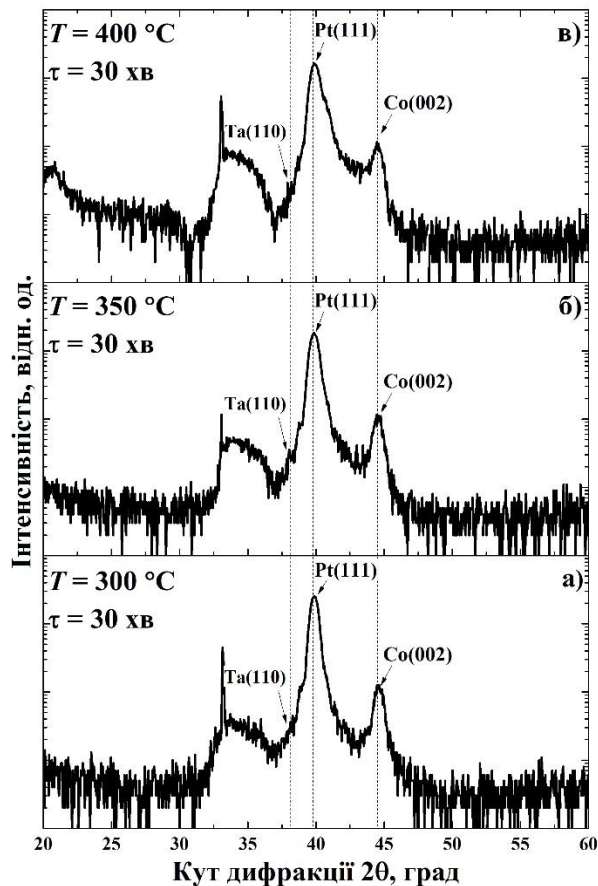


Рисунок 3.9 – Дифрактограми нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температур 300 °С - 400 °С упродовж 30 хвилин

Графік залежності кутового положення рефлексу Pt(111) від температури відпалу представлено на рисунку 3.10.

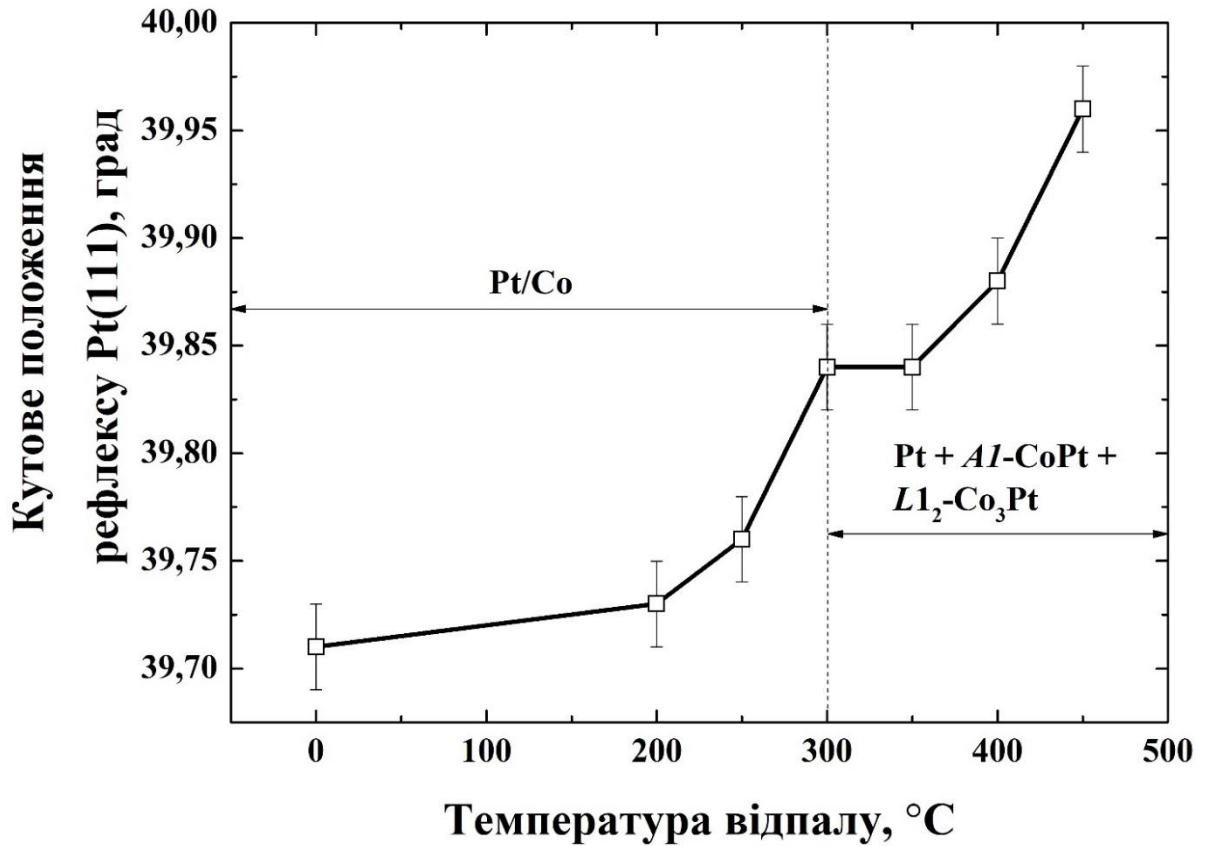


Рисунок 3.10 – Залежність кутового положення дифракційного рефлексу Pt(111) від температури відпалу

Зсув дифракційного рефлексу Pt(111) у бік більших кутів дифракції свідчить про утворення твердого розчину Co на основі Pt (рис. 3.10). Оскільки об'ємна дифузія за такої низької температури (~0,2 від температури плавлення) практично неможлива, твердий розчин у цьому випадку може утворюватися за механізмом дифузійно-індукованої міграції границь зерен (DIGM). Під час термічної обробки відбувається міграція атомів Co через так звані “швидкі” границі зерен Pt з досягненням вільної поверхні та наступним утворенням на ній сегрегаційного прошарку. В подальшому цей шар діє як додаткове джерело дифузії атомів Co у зворотному напрямку через так звані «повільні» границі зерен у шарі Pt. Результатом такого комплексного процесу

є утворення твердого розчину на основі Pt із середньою концентрацією Co, визначеною за правилом Веггарда, до 58 ат. %.

Внаслідок відпалу за температури 450 °C упродовж 30 хвилин спостерігається значна зміна фазового складу плівкової композиції (рис. 3.11, а). На дифрактограмі з'являються рефлекси, що відповідають феромагнітним фазам  $Al-CoPt$  та  $Ll_2-Co_3Pt$ . Дифракційні максимуми, що відповідають Pt та Co також все ще присутні на рентгенівському спектрі, що свідчить про значну неоднорідність у структурі плівкової композиції після цього режиму термічної обробки.

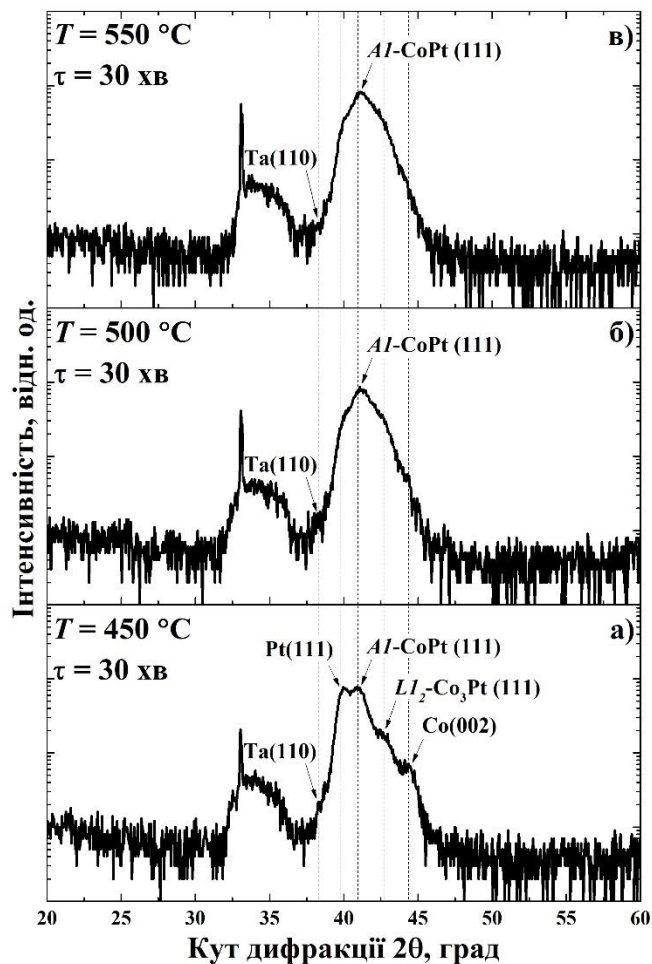


Рисунок 3.11 – Дифрактограми нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температур 450 °C - 550 °C упродовж 30 хвилин

Після відпалу за температури 500 °С протягом 30 хвилин рефлекси, що відповідають Pt і Co, а також фазі  $L1_2\text{-Co}_3\text{Pt}$ , зникають (рис. 3.11, б). При цьому інтенсивність рефлексу (111) від неупорядкованої фази  $A1\text{-CoPt}$  збільшується. В результаті підвищення температури відпалу до 550 °С значних змін у фазовому складі плівкової композиції порівняно з попереднім режимом термічної обробки не відбувається (рис. 3.11, в). Результати рентгеноструктурного фазового аналізу після відпалу за цих температур добре узгоджуються з пошаровими профілями розподілу хімічних елементів, отриманими методами мас-спектрометрії вторинних іонів, та підтверджують гомогенізацію хімічного складу за товщиною плівкової композиції.

Положення рефлексу (110) від Ta не змінюється із збільшенням температури відпалу, що підтверджує відсутність дифузійної взаємодії між шаром Ta та шарами Pt і Co, виявлену за допомогою пошарового хімічного аналізу.

Для дослідження впливу тривалості термічної обробки на структурно-фазові перетворення в плівкових композиціях Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) проведено додаткові відпали тривалістю 30 хвилин та 1 години - 8 годин. для температур за яких реєструється утворення фази  $L1_2\text{-Co}_3\text{Pt}$  (450 °С) та гомогенізація складу плівки з утворенням фази  $A1\text{-CoPt}$  (550 °С). Дифрактограми плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм), відпалених за температури 450 °С з різною тривалістю, наведено на рис. 3.12.

Збільшення тривалості відпалу за температури 450 °С не призводить до помітних змін фазового складу: на всіх рентгенограмах присутні рефлекси від Pt, Co та інтерметалідних фаз  $A1\text{-CoPt}$  і  $L1_2\text{-Co}_3\text{Pt}$  (рис. 3.12, а - д).

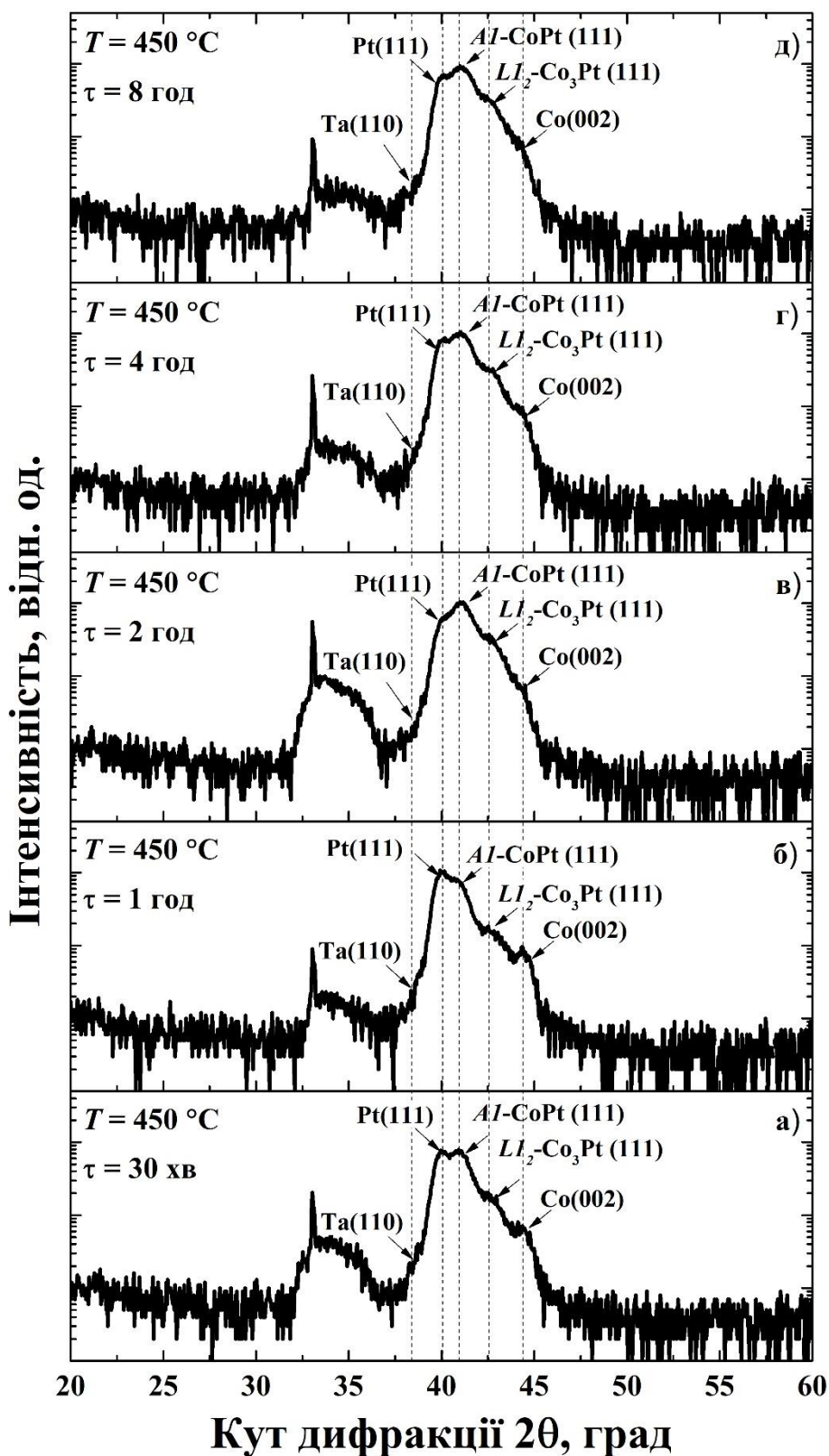


Рисунок 3.12 – Дифрактограми нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температури  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  упродовж 30 хвилин, 1 години - 8 годин

В результаті відпалу за температури 550 °С упродовж 30 хвилин, упродовж 1 години - 8 годин на дифрактограмах спостерігаються рефлекси, що відповідають виключно неупорядкованій фазі Al-CoPt (рис. 3.13).

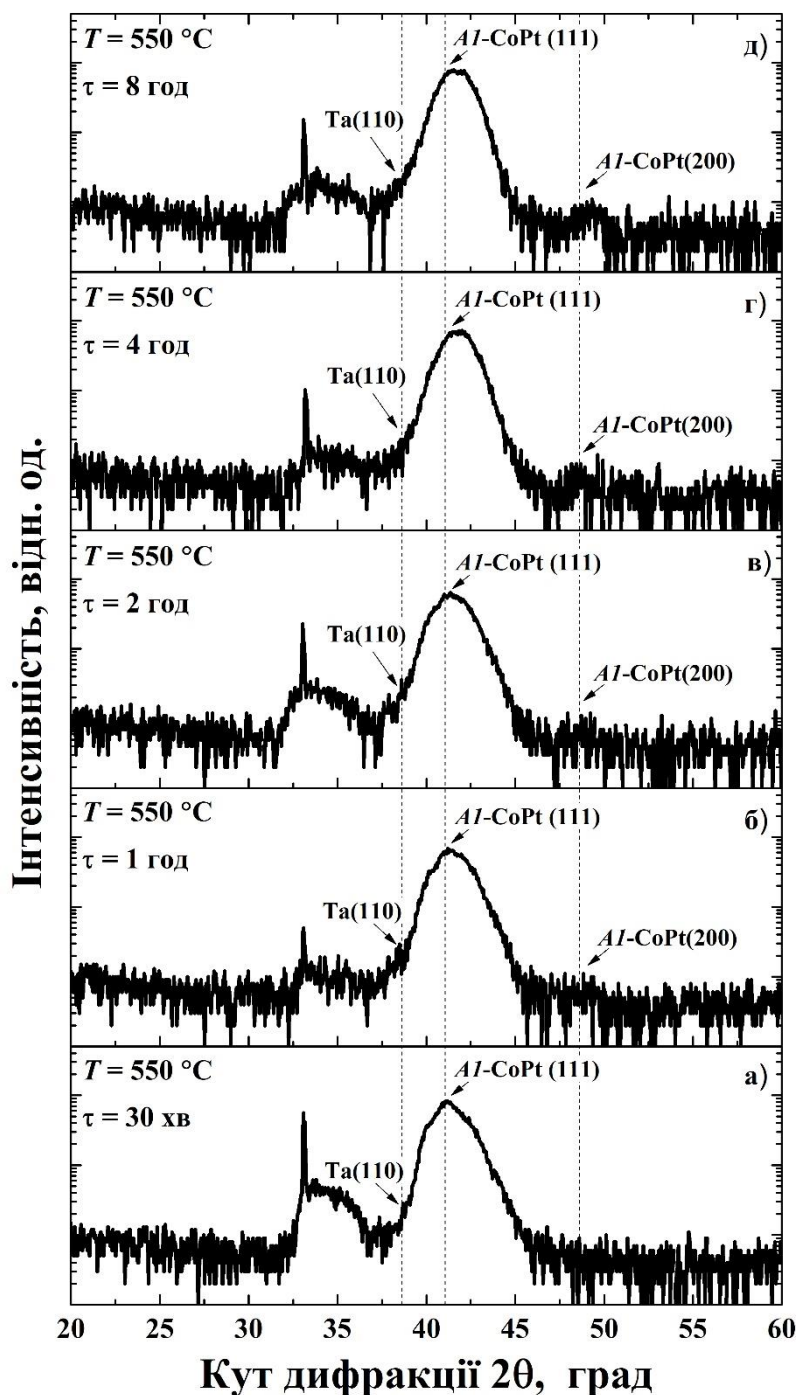


Рисунок 3.13 – Дифрактограми нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температури 550 °С упродовж 30 хвилин, 1 години - 8 годин

Відпал за температури 550 °С упродовж 1 години призводить до появи на відповідній дифрактограмі рефлексу  $Al-CoPt$  (200) (рис. 3.13, б) Після відпалу протягом 4 годин спостерігається чіткий зсув положення рефлексу  $Al-CoPt$  (111) у бік більших кутів дифракції у порівнянні з обробкою за температури 550 °С упродовж 30 хвилин (рис. 3.13, г). Залежність кутового положення дифракційного рефлексу  $Al-CoPt$  (111) від температури відпалу представлена на рисунку 3.14. Зміщення положення цього рефлексу в бік більших кутів при збільшенні тривалості відпалу може свідчити про частковий перебіг процесів впорядкування кристалічної будови.

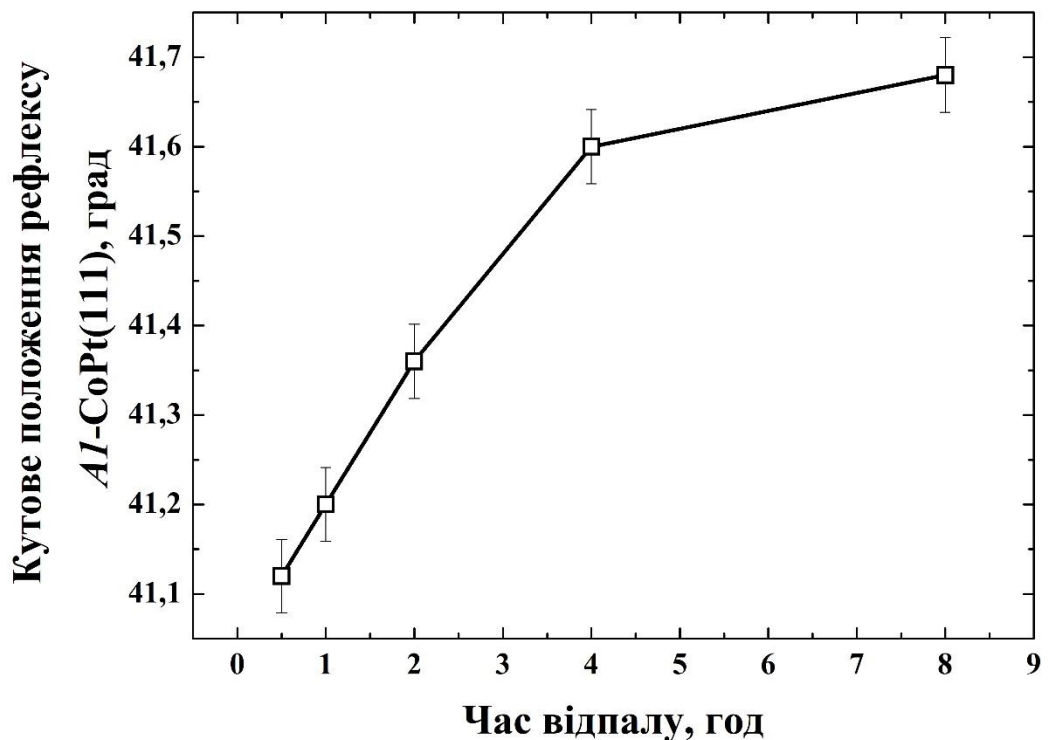


Рисунок 3.14 – Залежність кутового положення дифракційного рефлексу  $Al-CoPt$  (111) від температури відпалу

Втім збільшення часу відпалу до 8 годин не призводить до впорядкування структури плівкової композиції, що свідчить про те, що застосовані режими термічної обробки не забезпечують умови для утворення впорядкованої фази  $L1_0-CoPt$ .

### 3.4 Магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм)

Магнітні характеристики нанорозмірних гетерогенних систем Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) досліджено за допомогою вібраційного магнітометра. Отримані польові залежності намагніченості (петлі гістерезису) тонких плівок, підданих термічній обробці у вакуумі в температурному інтервалі 200 °С – 350 °С упродовж 30 хвилин, представлено на рис. 3.15.

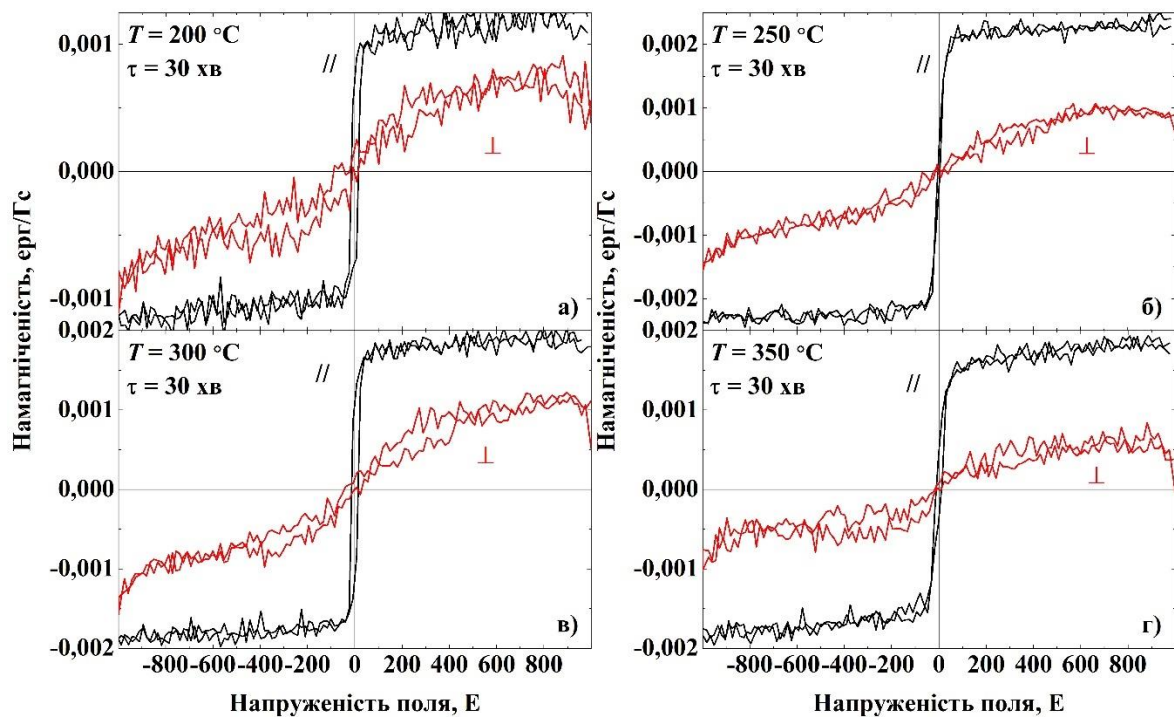


Рисунок 3.15 – Польові залежності намагніченості нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температур 200 °С - 350 °С упродовж 30 хвилин

З рисунку 3.15 видно, що при відпалі за температур 200 °С - 300 °С характер польових залежностей намагніченості майже не змінюється (рис. 3.15, а - в). Нанорозмірні плівкові композиції демонструють властивості слабокоерцитивного магнетика. Можна стверджувати, що магнітокристалічної анізотропії після відпалу за температур 200 °С - 300 °С

практично не має або вона дуже мала. Формування інтерметалідних сполук на основі  $\text{CoPt}$  за цих температур не відбувається, поява магнітно-м'яких властивостей зумовлена намагнічуванням шару  $\text{Co}$ , який окремо існує в складі багатошарової системи, що підтверджує наявність шаруватої структури плівкових композицій, зафіксовану методами пошарового хімічного, рентгеноструктурного фазового аналізу та просвічуючої електронної мікроскопії.

Однак після відпалу за температури  $350\text{ }^\circ\text{C}$  спостерігаються зміни в характері намагнічування в паралельному до поверхні плівки полі – намагніченість насичення досягається поступово, зменшується значення реманентної намагніченості. Це свідчить про перебіг дифузійних процесів, внаслідок яких на поверхні шару кобальту утворюються досить великі скупчення магнітних іонів, які у процесі намагнічування своїми дипольними полями перешкоджають швидкому намагнічуванню всієї плівки в прикладеному паралельно до її поверхні полі.

Відпал за температури  $450\text{ }^\circ\text{C}$  упродовж 30 хвилин приводить до зміни магнітних властивостей внаслідок дифузійного утворення феромагнітних фаз  $\text{Al-CoPt}$  та  $\text{Li}_2\text{-Co}_3\text{Pt}$  (рис. 3.16, б). Коерцитивна сила стрибкоподібно зростає до  $300,09\text{ E}$ , порівняно з  $21,15\text{ E}$  (рис. 3.17), що зареєстровані для плівкового матеріалу після відпалу за температури  $400\text{ }^\circ\text{C}$  протягом 30 хвилин. Збільшення температури відпалу до  $500\text{ }^\circ\text{C}$  та  $550\text{ }^\circ\text{C}$  обумовлює подальше зростання коерцитивної сили до  $410,55\text{ E}$  та  $417,65\text{ E}$ , відповідно (рис. 3.16, в, г). Фаза  $\text{Li}_2\text{-Co}_3\text{Pt}$  за температур відпалу  $500\text{ }^\circ\text{C}$  -  $550\text{ }^\circ\text{C}$  зникає, магнітні властивості плівок після термічної обробки за цих температур зумовлені наявністю у структурі неупорядкованої фази  $\text{Al-CoPt}$ , що є магнітно-твердим феромагнетиком.

Залишкова намагніченість плівкового матеріалу, підданого відпалу у вакуумі за температур  $450\text{ }^\circ\text{C}$  –  $550\text{ }^\circ\text{C}$ , несуттєво відрізняється від намагніченості насичення. Це свідчить про появу магнітно-кристалічної анізотропії, яка виникає внаслідок індукованого дифузії фазового

перетворення в процесі термічної обробки.

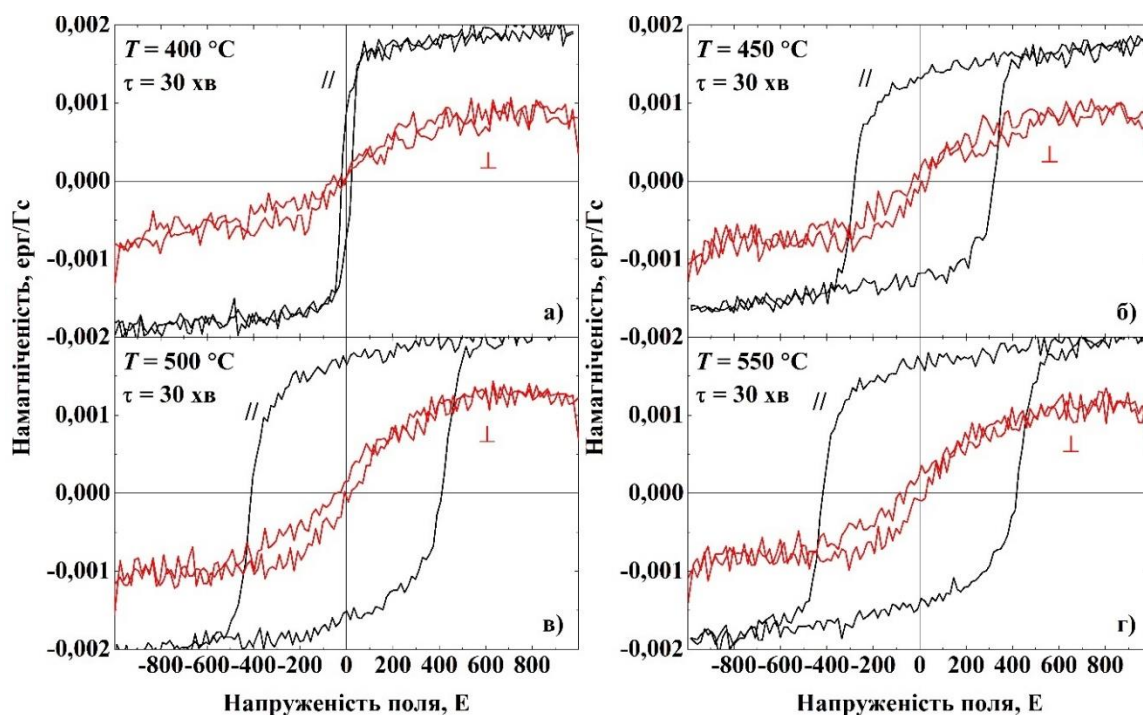


Рисунок 3.16 – Польові залежності намагніченості нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температур 400 °С – 550 °С упродовж 30 хвилин

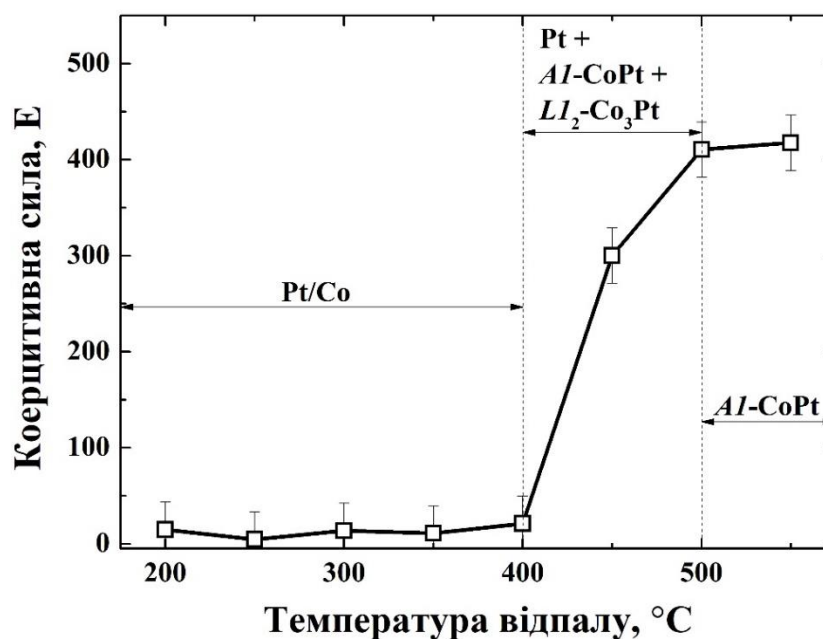


Рисунок 3.17 – Залежність коерцитивної сили нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) від температури відпалу

В табл. 3.1 наведено величини співвідношення залишкової намагніченості до намагніченості насичення плівкових матеріалів Pt/Co, підданих термічній обробці за температур 450 °С - 550 °С упродовж 30 хвилин.

Таблиця 3.1 – Співвідношення залишкової намагніченості до намагніченості насичення плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після відпалу за температур 450 °С - 550 °С упродовж 30 хвилин

$T$ (°С), $\tau$ (хв)	450 °С, 30 хв	500 °С, 30 хв	550 °С, 30 хв
$M_r/M_s$	0,79	0,8	0,8

Плівкові композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм), які були відпалені за температур 450 °С - 550 °С, мають у своєму складі переважно хаотично орієнтовані кристаліти неупорядкованої фази *A1-CoPt* з гранецентрованою кубічною ґраткою. Тому польові залежності намагніченості цих плівкових зразків є типовими для кубічних феромагнетиків [37].

Теоретично розраховане відношення реманентної намагніченості до намагніченості насичення кубічних полікристалів з осями легкого намагнічування типу [100] має становити  $M_r/M_s = 0,83$ , де  $M_s$  – намагніченість насичення [38]. Ця величина отримується за умов відсутності магнітної взаємодії між зернами. За тих самих умов для полікристала, у якого осями легкого намагнічування є осі [111], розрахункова величина відношення реманентної намагніченості до намагніченості насичення є більшою і складає  $M_r/M_s = 0,86$ .

Втім за наявності кубічної анізотропії за намагнічування в паралельно та перпендикулярно прикладеному полі нанорозмірні плівки повинні демонструвати гістерезис з однаковою коерцитивною силою. Відсутність зростання коерцитивної сили при намагнічуванні у перпендикулярно прикладеному полі вказує на наявність в площині плівки зерен, що мають дві

осі легкого намагнічування, які перпендикулярні між собою. При цьому у різних зернах ці осі спрямовані по-різному. В такому випадку відношення реманентної намагніченості до намагніченості насичення становить  $M_r/M_s = 90\%$  від намагніченості насичення [38]. Менша величина експериментально отриманого відношення реманентної намагніченості до намагніченості насичення може пояснюватися залишками у складі нанорозмірної плівкової композиції магнітомякого кобальту або формуванням слабоанізотропних суперпарамагнітних утворень. Це підтверджують дані, отримані за допомогою електронного мікроскопа, які свідчать про не повну гомогенізацію складу плівки.

### 3.5 Висновки до розділу 3

1. Визначено, що плівкові композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) після осадження методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені кремнієві підкладки мають шарувату структуру, з чіткими границями поділу між шарами гетерогенної системи.
2. Зареєстроване термічно-індуковане формування фази *A1-CoPt* внаслідок розвитку процесу взаємної дифузії між компонентами гетерогенної системи Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) в процесі термічної обробки.
3. Збільшення температури відпалу призводить до зростання коерцитивної сили. Магнітні характеристики плівкових композицій відпалених при температурах 450 °C - 550 °C свідчать про формування магнітокристалічної анізотропії, що характеризується двома перпендикулярними осями легкого намагнічування, які знаходяться в площині плівки.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці є важливою складовою будь яких робочих процесів. Оскільки людина є основним ресурсом, що приймає участь у виконанні будь-яких робіт, її здоров'я та безпека є основною цінністю. Саме тому охорона праці передбачає розробку методів і способів захисту робітників від будь-яких можливих загроз та небезпек на робочому місці, а також запобіганню аваріям та організації ліквідації їх наслідків у випадку виникнення.

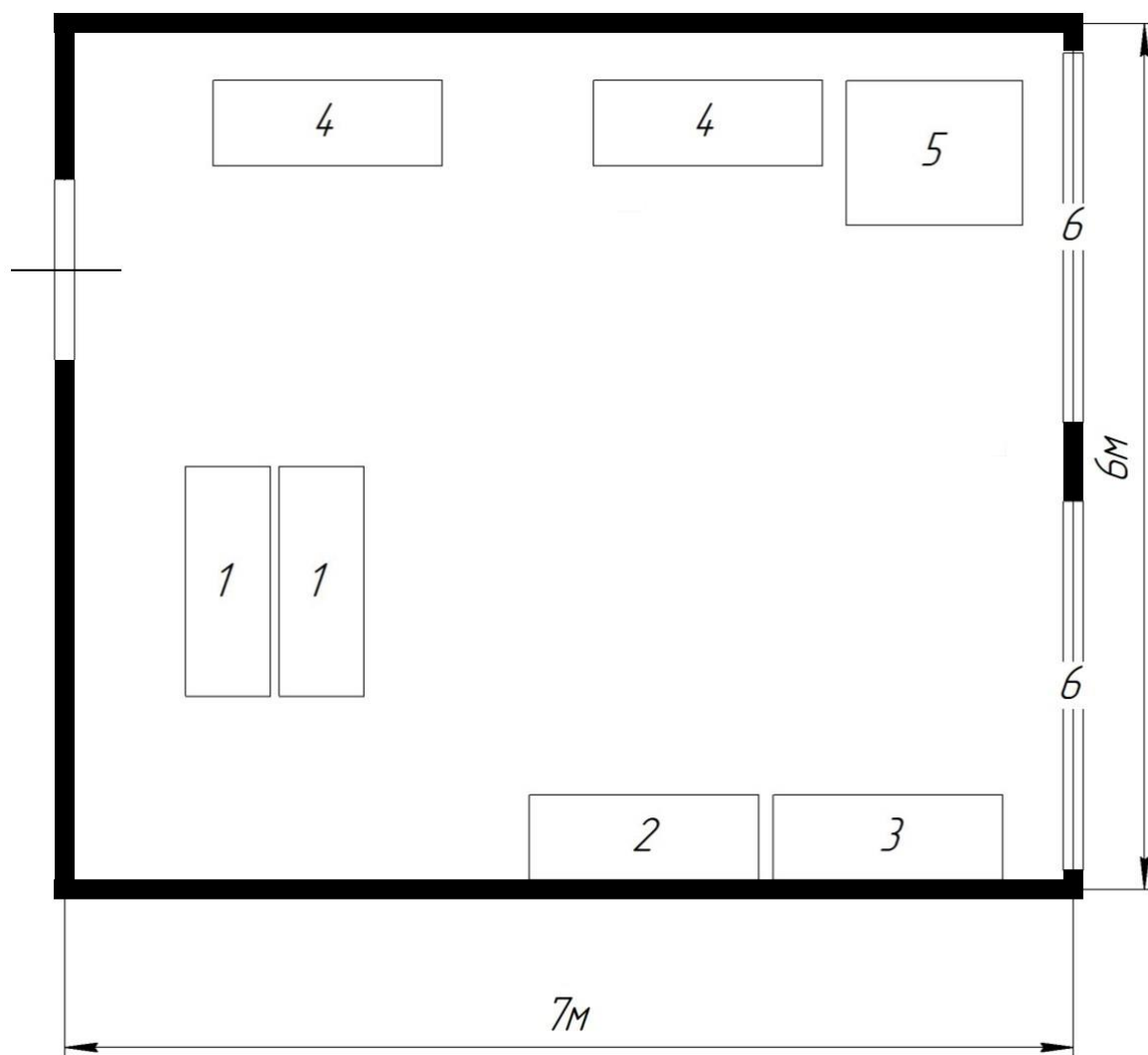
Безпечні умови праці в Україні гарантуються такими законодавчими актами, як Конституція України, Закон України «Про охорону праці», Трудовий кодекс України тощо. За дотримання норм охорони праці в Національному Технічному Університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідає відділ охорони праці. Керівником відділу охорони праці є Е.Г. Луцик. Відповідальним за охорону праці в Інституті матеріалознавства та зварювання ім Є.О. Патона є Ю.М. Сидоренко.

Метою даного розділу є аналіз умов праці при виконанні науково-дослідної роботи, визначення можливих загроз та шкідливих чинників, що виникають у процесі виконання науково-дослідної роботи, а також способів ліквідації та нейтралізації їх впливу.

Дана науково-дослідна робота передбачає дослідження впливу фізико-технічних параметрів термічної обробки на закономірності розвитку термічно-індукованих дифузійних процесів та структурно-фазових перетворень у нанорозмірних плівкових композиціях Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм). Термічна обробка нанорозмірних плівкових композицій здійснювалася у вакуумній камері установки ВУП-5М за температур 200 °С - 550 °С з тривалістю 30 хвилин та при 450 °С і 550 °С упродовж 1 години - 8 годин.

#### 4.1 Параметри приміщення лабораторії термічної обробки

Виконання науково-дослідної роботи відбувалося в приміщенні лабораторії термічної обробки, що знаходиться на 5 поверсі навчального корпусу №9 в кімнаті 508. Схема лабораторії термічної обробки вказана на рисунку 4.1.



1 – робочий стіл; 2 – стіл з атмосферою піччю; 3 – шафа для зразків; 4 – установка ВУП-5М (робоче місце); 5 – стіл з персональним комп'ютером;  
6 – вікно

Рисунок 4.1 – Схема лабораторії термічної обробки, розташованої у кімнаті 508

Параметри приміщення лабораторії термічної обробки, в якій виконувалася дана науково-дослідна робота вказані у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри приміщення лабораторії термічної обробки

Розміри приміщення, м	ширина	6
	довжина	7
	висота стелі	2,7
Площа приміщення, м <sup>2</sup>		42
Об'єм приміщення, м <sup>3</sup>		113,4
Кількість працівників		2
Площа, що припадає на 1 працівника, м <sup>2</sup>		21
Об'єм, що припадає на 1 працівника, м <sup>3</sup>		56,7

Параметри наведені у таблиці 4.1 задовольняють санітарним нормам згідно ДсанПіН 3.32-007-98 [39].

#### 4.2 Мікроклімат приміщення лабораторії термічної обробки

Стан повітря в приміщенні, де виконуються певні роботи має значний вплив на самопочуття, продуктивність праці та здоров'я людини. Для підтримання комфортних умов праці стан повітря в робочому просторі повинен постійно контролюватись та перевірятись на відповідність вимогам щодо комфортних мікрокліматичних умов та вмісту шкідливих речовин.

Сукупність певних параметрів, що є характеристикою стану повітря робочої зони називають мікрокліматичними умовами. Параметрами, що характеризують мікроклімат робочої зони є [40]:

- температура повітря (°C);

- відносна вологість повітря (%);
- швидкість руху повітря (м/с);
- інтенсивність теплового (інфрачервоного) випромінювання (Вт/м<sup>2</sup>), що випромінюється обладнанням, поверхнями та активними зонами, в яких відбувається перебіг технологічних процесів.

Роботи, що виконуються у лабораторіях чи на підприємствах поділяються за категоріями залежно від енерговитрат організму, що відбуваються при виконанні даної роботи. Кожній категорії відповідають певні допустимі мікрокліматичні вимоги згідно ДСН 3.3.6.042-99 [41].

В таблиці 4.2 наведено параметри мікроклімату приміщення лабораторії термічної обробки, у якій відбувалося виконання даної науково-дослідної роботи.

Таблиця 4.2 – Параметри мікроклімату приміщення лабораторії термічної обробки [41]

Категорія робіт середньої важкості Па			
Період року	Температура, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	18 - 20	40 - 60	0,2
Вимірне значення	18	60	0,2
Теплий	21 - 23	40 - 60	0,3
Вимірне значення	23	50	0,2
Висновок щодо відповідності вимогам	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам

Виконання науково-дослідної роботи, яка проводилася у приміщенні лабораторії термічної обробки, згідно класифікації можна віднести до робіт середньої важкості, а саме до категорії Па. Сюди відносять роботи, що

пов'язані з ходінням, переміщенням невеликих (вагою до 1 кг) предметів, виробів у положенні сидючи або стоячи, які потребують незначного рівня фізичного напруження. За такого рівня фізичних навантажень енерговитрати організму людини складають 160 ккал/год - 210 ккал/год [41].

Результати аналізу мікроклімату вказують на те, що приміщення лабораторії термічної обробки, у якому відбувалося виконання науково-дослідної роботи відповідає вимогам згідно ДСН 3.3.6.042-99 [41] та створює комфортні мікрокліматичні умови для виконання роботи.

### **4.3 Освітлення в приміщенні лабораторії термічної обробки**

Виконання певної роботи завжди пов'язане з напруженням зору, адже найбільшу кількість інформації про навколишнє середовище та процеси, що в ньому відбуваються, людина сприймає очима. Виконання зорової роботи в несприятливих умовах може призводити до втоми очей та погіршення зору. Для забезпечення комфортних умов праці та зменшення напруження зору значна увага приділяється правильній організації освітлення у робочій зоні. Правильно розміщене освітлення забезпечує продуктивність праці, сприяє концентрації та підвищенню уваги.

Згідно характеристики зорової роботи виділяються такі класи точності:

- найвищої точності;
- дуже високої точності;
- високої точності;
- середньої точності;
- малої точності;
- дуже малої точності.

Роботи, що виконуються у приміщенні лабораторії термічної обробки в ході виконання науково-дослідної роботи відносяться до класу середньої точності.

У приміщенні лабораторії застосовується суміщене освітлення, що передбачає доповнення природного освітлення штучним. Природне освітлення лабораторії забезпечується світлом, що проникає до приміщення крізь бічні віконні прорізи, розташовані на південній стороні кімнати. Штучне освітлення забезпечується рівномірно розташованими люмінесцентними лампами типу ЛБ-40.

#### **4.3.1 Характеристика природнього освітлення лабораторії термічної обробки**

Коефіцієнт природного освітлення характеризує освітлення всередині робочого приміщення в порівнянні з освітленням зовні.

Значення КПО ( $e_n$ ) розраховується за формулою:

$$e_n = e_H \cdot m_n \quad (4.1)$$

де  $e_n$  – значення КПО для робіт середньої точності;

$m_n$  – коефіцієнт світлового клімату [42].

Оскільки вікна в лабораторії термічної обробки розташовані на південній стороні приміщення множник  $m_n$  приймає значення 0,85, значення КПО для робіт середньої точності складає 1,5 %. Отже розрахункове значення КПО для приміщення лабораторії термічної обробки складає 1,27.

$$e_n = 1,5 \cdot 0,85 = 1,2$$

Отримане значення вказує, що тривала робота за такої освітленості може стати причиною зниження зору. Для створення комфортних умов праці природне освітлення у приміщенні потребує доповнення штучним.

### 4.3.2 Характеристика штучного освітлення лабораторії термічної обробки

Штучне освітлення в приміщенні лабораторії термічної обробки забезпечується люмінесцентними лампами типу ЛБ-40. Кількість ламп, що розташовані у приміщенні складає 12. Для оцінки якості штучного освітлення можна застосувати розрахунок нормованої освітленості з використанням значення коефіцієнта використання світлового потоку.

Нормована освітленість може бути розрахована за формулою [43]:

$$E = \frac{F \cdot N \cdot n \cdot \eta}{K \cdot S \cdot Z} \quad (4.2)$$

де  $F$  – світловий потік;

$E$  – нормована освітленість, лк;

$S$  – площа приміщення, що освітлюється, м<sup>2</sup>;

$K$  – коефіцієнт запасу;

$Z$  – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

$N$  – кількість світильників;

$n$  – кількість ламп у світильнику;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку.

Розрахункові параметри для визначення нормованої освітленості в приміщенні лабораторії термічної обробки наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахункові параметри для визначення нормованої освітленості

Світловий потік, F, лм	3200
Коефіцієнт запасу, K	1,5
Коефіцієнт нерівномірності, Z	1,1
Кількість світильників, N	6
Площа приміщення, м <sup>2</sup>	42
Кількість ламп у світильнику, n	2
Коефіцієнт використання світлового потоку, η	0,56

Підставляючи дані з таблиці 4.3 в формулу 4.2 отримуємо:

$$E = \frac{3200 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 0,56}{1,5 \cdot 42 \cdot 1,1} = 310 \text{ лк}$$

Отже для лабораторії термічної обробки, що знаходиться в приміщенні 508 значення нормованої освітленості складає 310 лк. Згідно ДБН В.2.5-28-2006 освітленість робочого приміщення повинна становити 300 лк. Розрахована нормована освітленість відповідає нормі, тож штучне освітлення є достатнім для даної лабораторії.

#### 4.4 Небезпечні чинники в приміщенні лабораторії термічної обробки

Виконання науково-дослідної роботи в приміщенні лабораторії термічної обробки передбачає вплив таких небезпечних чинників:

- шум;
- вібрації;
- безпека ураження електричним струмом;
- теплові ураження.

У таблиці 4.4 представлені шкідливі фактори та можливі небезпеки, які виникають при взаємодії з обладнанням в ході виконання науково-дослідної роботи в приміщенні лабораторії.

Таблиця 4.4 – Шкідливі фактори при виконанні НДР

Операція	Устаткування	Потенційні небезпеки
Підготовка зразків	Алмазний різак	Травмування
Термічна обробка зразків	Установка ВУП-5М	Ураження електричним струмом, ураження теплом, шум, вібрації
Обробка результатів	Комп'ютер	Ураження електричним струмом

Для інформування виконавця робіт щодо наявності небезпечних факторів і запобігання нещасних випадків перед початком роботи у лабораторії термічної обробки проводиться інструктаж з техніки безпеки.

#### 4.4.1 Вплив шуму та вібрацій

Шум та вібрації мають значний вплив на здоров'я робітника та комфорт у робочій зоні. Високий рівень шуму може призводити до погіршення слуху та погіршення емоційного та психологічного стану, розладів нервової системи. Тривала дія вібрацій може викликати розлади опорно-рухового апарату та м'язів.

Устаткування, що використовується при виконанні науково-дослідної роботи є джерелом шуму та вібрацій. Робота установки ВУП-5М забезпечується її електроустаткуванням та допоміжними приладами. Джерелами шуму при роботі ВУП-5М є вентилятори охолодження, що знаходяться всередині установки, а також дифузійний та механічний вакуумні насоси, що забезпечують формування вакууму у камері установки. Саме робота цих насосів створює основний шум та вібрації. Рівень шуму, що є

небезпечним для людини складає  $I = 120$  дБА, людина може отримати фізичні пошкодження та втратити слух.

При роботі устаткування в лабораторії термічної обробки рівень шуму складає 52 дБА, що відповідає допустимим нормам ДСН 3.3.6.037-99 [44].

Робота механічного форвакуумного насоса викликає механічні коливання, тобто вібрації. Для запобігання впливу вібрацій на організм людини та оточуюче обладнання насос встановлюється на віброізоляційну гумову підставку та сполучається з установкою ВУП-5М гумовим шлангом. Такі заходи знижують вібрації до рівня, що є сприятливим, згідно санітарним нормам [41].

#### **4.4.2 Небезпечні чинники при роботі з установкою ВУП-5М**

Вакуумний універсальний пост ВУП-5М є спеціалізованим вакуумним обладнанням, що потребує наявності навичок роботи з вакуумною технікою, чіткого дотримання правил роботи з вакуумним обладнанням та знання техніки безпеки. Індикація на панелі керування установкою забезпечує інформацією про відсутність води у системі охолодження, температури в камері, недостатню герметичність вакуумної камери тощо.

Живлення установки ВУП-5М відбувається від мережі 380 В, тому пошкодження кабелів живлення та електроустаткування всередині установки може привести до ураження електричним струмом. Для забезпечення електробезпеки установка підключена до лінії заземлення. Підключення живлення установки до електромережі відбувається з використанням автоматичних електровимикачів. Деякі частини установки (нагрівальний столик, дифузійний насос) нагріваються в процесі роботи установки до температур близько  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що може становити небезпеку теплового ураження. Охолодження частин установки, що нагріваються, відбувається від мережі холодного водопостачання. При пошкодженні системи охолодження або відключенні води установка ВУП-5М автоматично припиняє роботу

нагрівальних елементів предметного столика вакуумної камери та дифузійного вакуумного насосу.

Відведення повітря з камери установки ВУП-5М відбувається через гнучкий гумовий шланг, що підключений до вихідного патрубку форвакуумного механічного насосу та виведений на вулицю, щоб запобігти потраплянню потенційно шкідливих випарів та інертних газів, при їх застосуванні у вакуумній камері, всередину приміщення лабораторії.

Правильне користування установка ВУП-5М є запорукою правильного функціонування обладнання та зменшення ризику виникнення небезпечних ситуацій. Початок роботи з установкою та її вимкнення потребує дотримання чітко встановленої послідовності дій:

- зовнішній огляд установки на наявність пошкоджень обладнання;
- ввімкнення системи подачі води;
- ввімкнення живлення установки та її запуск;
- ввімкнення форвакуумного механічного насосу;
- ввімкнення дифузійного вакуумного насосу;
- відкачування повітря з вакуумної камери та створення вакууму.

Вимкнення установки відбувається в наступній послідовності:

- вимкнення живлення нагрівальних елементів предметного столика у вакуумній камері;
- вимкнення дифузійного вакуумного насосу за температури зразка 100 °С;
- вимкнення форвакуумного механічного насосу після охолодження дифузійного вакуумного насосу до температури 60 °С;
- вимкнення установки;
- вимкнення електроживлення установки;
- відключення подачі води.

Після відключення установки в вакуумній камері передбачається наявність низького вакууму, що запобігає взаємодії обладнання всередині камери з киснем повітря.

#### **4.4.3 Безпека при роботі з електричними приладами**

Електробезпекою називають сукупність технічних та організаційних заходів, що вживаються для забезпечення захисту робітників від ураження електричним струмом.

Наслідком ураження електричним струмом від неізольованих дротів, підключених до мережі чи незаземленого обладнання є електротравма. Внаслідок дії на організм людини електричного струму відбувається ураження нервової системи та м'яких тканин організму, що може мати смертельні наслідки [45].

За ризиком ураження електричним струмом приміщення класифікують на:

- приміщення без підвищеної небезпеки;
- приміщення з підвищеною небезпекою;
- особливо небезпечні приміщення.

Лабораторія термічної обробки є приміщенням підвищеної небезпеки. Небезпеку ураження електричним струмом несуть установка ВУП-5М та комп'ютери, що використовуються для обробки результатів експериментів. Електроживлення обладнання, що застосовується в лабораторії під'єднано до електромережі через автоматичні електровимикачі, що забезпечує вимкнення струму під час короткого замикання або ураження людини струмом. Електрощиток розташований біля входу в лабораторію, щоб забезпечити швидке відключення електроенергії власноруч у разі нещасного випадку.

Електричне обладнання лабораторії та установка ВУП-5М під'єднані до мережі ізольованими дротами та заземлені, що забезпечує захист від ураження

електричним струмом. Робочі місця розташовані таким чином, щоб запобігти випадкового торкання до небезпечного обладнання.

#### 4.5 Організація робочого місця

Організація праці на робочому місці – це система заходів, що забезпечують ефективне використання знарядь та предметів праці в ході трудового процесу [40].

Робоче місце являє собою певний простір, в якому відбувається трудова діяльність людини. Дотримання норм організації праці на робочому місці згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 та НПАОП 0.00-1.28-10 дозволяє значно підвищити ефективність роботи на робочому місці та зменшити вплив на здоров'я шкідливих факторів.

Згідно цих норм організація робочого простору графік праці та відпочинку працівників визначається робочою позою (вільна, стоячи або сидячи), в якій перебуває працівник.

Виконання даної науково-дослідної роботи передбачає перебування у позі сидячи, оскільки для виконання основної частини роботи використовується комп'ютер. Для виконання такої роботи оптимальне робоче місце повинно мати такі характеристики [46]:

- висота столу 800 мм – 900 мм;
- ширина столу 1000 мм – 1400 мм;
- глибина столу 800 мм – 1000 мм;
- місце для ніг: висота – 600 мм, ширина – 500 мм, глибина (на рівні колін) – 450 мм, глибина (на рівні витягнутої ноги) – 650 мм;
- відстань від екрана ПК до очей користувача – 600 мм;
- клавіатура на відстані 300 мм від краю столу;
- коефіцієнт відбиття поверхні робочого столу – 0,6.

Параметри робочих місць та їх організація у лабораторії термічної обробки, де проводилося виконання даної науково-дослідної роботи, відповідає санітарним нормам і забезпечує комфортні умови праці.

#### **4.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях**

При виконанні робіт завжди існує ризик виникнення надзвичайних ситуацій таких, як пожежа, вибух, пошкодження обладнання, витік шкідливих речовин, тощо. Тому перед початком роботи визначаються потенційно можливі надзвичайні ситуації та розробляються заходи щодо їх запобігання та ліквідації. При цьому повинні враховуватися особливості обладнання та його роботи, властивості матеріалів та речовин, що застосовуються, а також особливості робочих процесів [47].

При виконанні науково-дослідної роботи у лабораторії термічної обробки безпосередню небезпеку несе виникнення пожежі у приміщенні.

##### **4.6.1 Пожежна безпека**

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 приміщення лабораторії термічної обробки належить до категорії «Г», в лабораторії присутні негорючі речовини та матеріали в гарячому чи розжареному стані, при обробці яких виділяється теплота [48]. Джерелом пожежі в лабораторії може бути електроустаткування, що використовується для виконання науково-дослідної роботи. Пожежі, які виникають на електроустановках відносяться до класу «Е». Для гасіння пожежі на працюючій установці необхідно застосовувати порошковий або вуглекислотний вогнегасник.

У лабораторії встановлена система пожежної сигналізації, що забезпечує сповіщення про виникнення пожежі. Горючі речовини, що перебувають в лабораторії, знаходяться в герметичних ємностях з негорючих матеріалів. Небезпечні частини обладнання, що нагріваються в процесі

роботи, ізолювані від взаємодії з горючими матеріалами, а електрообладнання і дроти є ізолюваними та заземленими.

У випадку виникнення пожежі співробітники мають покинути робочі приміщення та поверх згідно плану евакуації (рис. 4.3).

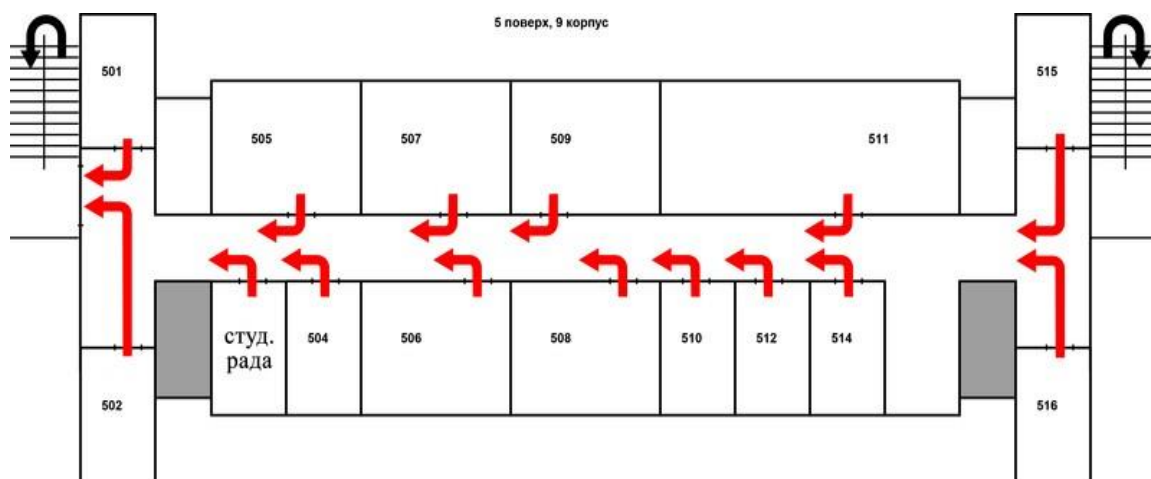


Рисунок 4.3 – План евакуації 5 поверху навчального корпусу №9, в якому знаходиться лабораторія термічної обробки

Заходи з попередження виникнення пожеж передбачають проведення регулярних перевірок засобів гасіння та системи пожежної сигналізації, справності обладнання та електричної проводки, а також проведення інструктажу співробітників про поведінку у надзвичайних ситуаціях.

#### 4.7 Висновки до розділу 4

1. Рівень природного освітлення у приміщенні не є достатнім для створення комфортних умов праці, що обґрунтовує застосування суміщеної схеми освітлення з доповненням природного освітлення штучним.

2. Мікроклімат, рівень шуму та вібрацій, організація робочого місця при дослідженні нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) відповідають санітарним нормам та створюють комфортні умови для виконання науково-дослідної роботи.

3. Проведено аналіз потенційних небезпек, що можуть виникнути в ході виконання науково-дослідної роботи в лабораторії термічної обробки. Робота з обладнанням лабораторії потребує наявності підготовки, відповідних навичок та виконання правил та рекомендацій для уникнення можливих аварійних ситуацій та усунення їх наслідків.

## 5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 5.1 Опис ідеї проекту

Розвиток сучасних технологій мікро- та наноелектроніки спрямований на зростання ефективності і швидкодії та збільшення кількості даних, що оброблюються та зберігаються. Зменшення розміру складових частин пристроїв електроніки вже не забезпечує значного зростання їх характеристик, тому доцільним є застосування принципово нових технологій та матеріалів.

Ідея проекту полягає в застосуванні нанорозмірних плівкових композицій Pt/Co в якості матеріалу для виготовлення спінових клапанів, що застосовуються як складові магнітних датчиків, зчитувальних голівках жорстких дисків та магніторезистивній пам'яті з довільним доступом (рис. 5.1).

Товаром для даного стартап проекту є тонкоплівкові композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм), які були осадженні методом магнетронного розпорощення на кремнієві підкладки SiO<sub>2</sub>(100 нм)/Si(001) та піддані відпалу у вакуумі.

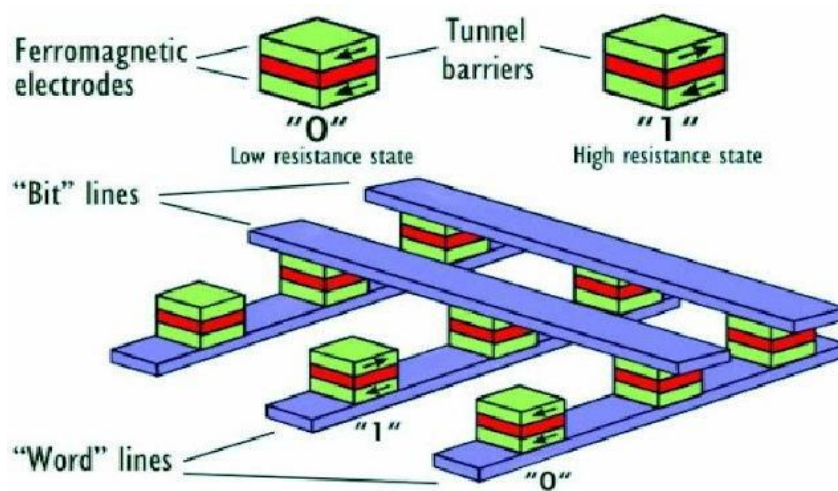


Рисунок 5.1 – Спінові клапани в складі комірок магніторезистивної пам'яті з довільним доступом [49]

Властивості та фазовий склад нанорозмірних плівкових композицій К не є дослідженими в повній мірі, тому оцінка ринкової спроможності продукту не може бути проведена в повному обсязі. Втім перспективним є використання даних плівок для виготовлення складових елементів приладів спінтроніки та мікроелектроніки (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Розробка тонкоплівкових композицій для використання у приладах мікроелектроніки та спінтроніки	1. Магнітні датчики	Надчутливі магнітні датчики нового покоління
	2. Зчитувальні голівки жорстких дисків	Покращення точності зчитування та запису інформації, збільшення швидкості роботи жорстких дисків
	3. Магніторезистивна пам'ять з довільним доступом	Створення енергонезалежної пам'яті з довільним доступом, збільшення стабільності та терміну зберігання інформації,

В таблиці 5.2 наведено сильні, слабкі та нейтральні сторони стартап-проекту з розробки нанорозмірних тонких плівок для виготовлення складових елементів приладів спінтроніки та мікроелектроніки в порівнянні з основними конкурентами. В якості основних конкурентів наведено компанії, розроблюють та виготовляють продукти спінтроніки: Everspin, Samsung, Intel.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Наш проект	Конкуренти			Оцінка проекту
			Everspin	Samsung	Intel	
1	Собівартість продукту	Дешевший	Дорожчий	Дорожчий	Дорожчий	S
2	Вартість обслуговування виробничого обладнання	Висока	Висока	Висока	Висока	N
3	Витрати на матеріали	Необхідні	Необхідні	Необхідні	Необхідні	N
4	Екологічність виробництва	Середня	Середня	Середня	Середня	N
5	Готовність продукту до виходу на ринок	Низька	Висока	Середня	Середня	W

\* *W* (слабка сторона), *N* (нейтральна сторона), *S* (сильна сторона)

## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Важливим етапом, що передує промислому виробництву продукт стартап-проекту є технологічний аудит ідеї проекту, тобто аналіз існуючих технологій, щ потрібні для реалізації виробництва та доступність цих технологій (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Аналіз технологій для реалізації проекту

Технологія	Наявність технології	Доступність технології
Магнетронне осадження плівок	Технологія існує	Доступна
Відпал у вакуумі	Технологія існує	Доступна
Структурно-фазові дослідження зразків	Технологія існує	Доступна
Фотолітографія	Технологія існує	Доступна

Результати технологічного аудиту проекту вказують на те, що технології, потрібні для його виробничої реалізації наявні та доступні. Втім об'єкт дослідження являє собою лише частину готового і функціонуючого приладу, тому для реалізації виробництва потрібні додаткові дослідження, спрямовані на розроблення та удосконалення технологічних процесів що забезпечать виготовлення повноцінного виробу.

### 5.3 Ринкові можливості запуску проекту

Щоб спланувати розвиток проекту потрібен аналіз ринкового середовища, а саме ринкових можливостей та загроз реалізації проекту. Основними компаніям-конкурентами, що розробляють рішення на базі технологій спінтроніки та виготовляють мікросхеми для магніторезистивної пам'яті з довільним доступом є компанії Everspin, Samsung, Intel.

Оцінка потенційного ринкового середовища та інформація про основні компанії-конкуренти представлена в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Оцінка потенційного ринкового середовища

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	1) Everspin 2) Samsung 3) Intel
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од, 2019 рік	9,6 млн. ум.од. (Everspin)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	В 2020 році компанія Everspin планує підвищити обсяг продажів до 9,7 млн. ум.од.
4	Наявність обмежень для входу	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарт FIPS 140-2, ISO 40001, ISO 40002, ISO 13485

Характеристика та аналіз потенційних клієнтів наведена у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів

Характеристика	Опис
Потреби, що формують ринок	Збільшення швидкості обробки даних Збільшення енергоефективності
Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Компанії, що виробляють мікросхеми пам'яті з довільним доступом: Kingstone, Adata, Evespin, Transcend, Samsung.
Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Відмінності у стандартах, специфікаціях, технічних характеристиках, обсягах закупок, умовах експлуатації
Вимоги споживачів до товару	Вартість, об'єм пам'яті, термін експлуатації, ліцензія

Крім аналізу ринкових можливостей важливо розглянути потенційні загрози та нові можливості. Результати аналізу загроз та нових можливостей

вказані у таблицях 5.6-5.7. При аналізі цих факторів одразу визначають реакцію компанії в потенційно можливій ситуації.

Таблиця 5.6 – Фактори можливих загроз проекту

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Нестабільна ситуація на ринку, наприклад, внаслідок політичних або економічних криз	Зменшення попиту та втрата фінансування	Вдосконалення технології, зменшення собівартості товару, залучення до підтримки компаній-партнерів
	Зменшення ресурсів для роботи виробництва	Перехід на альтернативні види енергії

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей проекту

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зменшення собівартості товару	Зменшення витратних матеріалів та оптимізація технології виготовлення	Збільшення обсягів продажу
2	Підвищення швидкості роботи мікросхем пам'яті	Створення та вдосконалення мікросхем пам'яті нового покоління	
3	Зменшення розміру комірки пам'яті (технічного процесу)	Створення та вдосконалення мікросхем пам'яті нового покоління	

Аналіз сильних та слабких сторін (SWOT-аналіз) є фінальним етапом розгляду ринкових можливостей (SWOT-аналіз). Перелік сильних та слабких сторін, можливостей та потенційних загроз проекту представлено у таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – SWOT-аналіз проекту

<p><b>Сильні сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– висока швидкість обробки інформації;</li> <li>– збільшення терміну зберігання інформації .</li> </ul>	<p><b>Слабкі сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– потреба у проведенні додаткових досліджень;</li> <li>– необхідність створення повноцінного прототипу.</li> </ul>
<p><b>Можливості:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– учать у наукових проектах;</li> <li>– співпраця з компаніями, які займаються виготовленням мікросхем пам'яті.</li> </ul>	<p><b>Загрози:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– стартовий капітал для початку виробництва;</li> <li>– реалізація технології в промислових масштабах.</li> </ul>

Нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) мають значні перспективи застосування у виробництві приладів спінтроники, зокрема магнітної пам'яті з довільним доступом. Втім є потреба в додаткових дослідженнях, спрямованих на вдосконалення їх магнітних властивостей.

Ціллю даної науково-дослідної роботи було дослідження перебігу структурно-фазових перетворень, що відбуваються в нанорозмірних плівкових композиціях Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) внаслідок термічної обробки. Результати роботи дозволяють розробити методи та способи покращення властивостей цих плівкових композицій і є важливими для організації технічних процесів виробництва готового продукту на їх основі.

#### 5.4 Розрахунок витрат на проведення досліджень

Витрати, що потрібні для проведення досліджень для розробки і вивчення властивостей тонкоплівкових композицій являють собою собівартість дослідження і визначаються за наступними видатковими статтями:

- витрати на оплату праці,
- відрахування на соціальні заходи,
- витрати на матеріали для проведення досліджень,

- інші прямі невраховані витрати,
- накладні витрати.

#### 5.4.1 Витрати на оплату праці

На величину витрат на оплату праці впливають такі фактори, як трудомісткість окремих робіт та посадові оклади робітників, що виконують дослідження.

Під час виконання науково-дослідної роботи було залучено три працівника: провідний науковий співробітник, старший науковий співробітник та інженер дослідник.

В таблиці 5.9 Наведено розрахунок фонду заробітної плати виконавців науково-дослідної роботи.

Таблиця 5.9 – Розрахунок фонду заробітної плати

Посада	Планова трудомісткість, днів	Заробітня плата		
		Посадовий місячний оклад, грн	Середньоденна заробітня плата, грн	Усього за виконавцями, грн
Доцент	40	19266,41	963,3205	38532,82
Провідний інженер	40	9135	456,75	18270
Інженер	40	7730	386,5	15460
Фонд заробітної плати				72262,82

Фонд заробітної плати (ФЗП) даної науково-дослідної роботи складає 72262,82 грн.

#### **5.4.2 Відрахування до єдиного соціального внеску**

Згідно законодавству України єдиний соціальний внесок (ЄСВ) складає 22 % від фонду заробітної плати:  $ЄСВ = ФЗП \cdot 0,22 = 72262,82 \cdot 0,22 = 15897,64$  грн.

#### **5.4.3 Витрати на матеріали для досліджень**

Дослідження проводилося з використанням зразків нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм). Загальна кількість зразків склала 20 штук. Витрати на матеріали та транспортно-заготівельні витрати склали разом 2382 грн.

#### **5.4.4 Розрахунок інших прямих неврахованих витрат**

Інші прямі невраховані витрати складають 10 % від витрат, що увійшли до попередніх статей, а саме – 9054,24 грн.

#### **5.4.5 Визначення накладних витрат**

Норматив відрахувань на накладні витрати у КПІ ім. Ігоря Сікорського складає 16 % від планової суми прямих витрат. Для даної НДР норматив відрахувань на накладні витрати склав 15935,43 грн.

#### **5.4.6 Визначення кошторису науково-дослідної роботи**

Детальний розрахунок вартості науково-дослідної роботи представлено у таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Розрахунок планової кошторисної вартості НДР

Назва витратної статті	Сума, грн	Відсоток від загальної суми, %
Оплата праці	72262,82	62,5
єдиний соціальний внесок	15897,64	13,8
Витрати на матеріали	2382	2,1
Інші прямі невраховані витрати	9054,24	7,8
Накладні витрати	15935,43	13,8
Всього	115532,13	100

Загальні витрати на дану науково-дослідну роботу складають 115532,13 грн.

### 5.5 Висновки до розділу 5

1. Проведено технологічний аудит запропонованої ідеї стартап-проекту, аналіз ринкових можливостей, визначено можливості і загрози реалізації проекту.

2. Нанорозмірні плівкові композиції К мають значні перспективи застосування в області мікроелектроніки та спінтроніки. Використання цих матеріалів дозволяє досягти значної енергоефективності рішень на їх основі, збільшити час та надійність зберігання інформації.

3. Створення повноцінного продукту на основі нанорозмірних плівкових композицій К наразі потребує додаткових досліджень, спрямованих на розробку та оптимізацію процесів промислового виробництва.

## ВИСНОВКИ

1. Нанорозмірні плівки на основі сплаву системи Co-Pt є перспективними матеріалами для застосування у сучасних високих технологіях наноелектроніки та спінотроніки, що обумовлено комплексом унікальних магнітних характеристик – високою енергією магнітно-кристалічної анізотропії, намагніченостю насичення та коерцитивною силою.

2. Вивчено закономірності зміни структурно-фазового стану нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм), їх хімічного складу та магнітних характеристик. Термічна обробка нанорозмірних плівкових композицій за температур 200 °C - 550 °C сприяє утворенню впорядкованої фази  $L1_2$ -Co<sub>3</sub>Pt за температури 450 °C та неупорядкованої фази  $A1$ -CoPt в діапазоні температур 450 °C - 550 °C.

3. Структурно-фазовий склад нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Co(15 нм)/Ta(3 нм) має істотний вплив на його магнітні властивості: формування феромагнітної фази  $A1$ -CoPt обумовлює збільшення коерцитивної сили до 417,65 Е і виникнення магнітної анізотропії.

4. Умови праці в лабораторії термічної обробки де відбувалося виконання даної науково-дослідної роботи відповідають державним санітарно-епідемічним нормам. Проведено аналіз потенційних небезпек, що можуть виникнути в ході виконання науково-дослідної роботи в лабораторії термічної обробки. Робота з обладнанням лабораторії потребує наявності підготовки, відповідних навичок та виконання правил та рекомендацій для уникнення можливих аварійних ситуацій та усунення їх наслідків.

5. За темою науково-дослідної роботи розроблено стартап-проект. Оцінка ринкових можливостей дозволяє стверджувати, що проект є перспективним для ринку приладів спінтроніки.

## CONCLUSIONS

1. Nanoscale films based on Co Pt alloy system are promising materials for use in modern high technologies of nanoelectronics and spintronics, due to a set of unique magnetic characteristics - high energy of magnetic crystal anisotropy, saturation magnetization and coercivity.

2. The regularities of changes in the structural-phase state of nanosized Pt (15 nm) / Co (15 nm) / Ta (3 nm) film compositions, their chemical composition and magnetic characteristics have been studied. Heat treatment of nanosized film compositions at temperatures of 200 °C - 550 °C promotes the formation of an ordered phase of  $L1_2$ -Co<sub>3</sub>Pt at a temperature of 450 °C and a disordered phase of  $A1$ -CoPt in the temperature range of 450 °C - 550 °C.

3. Structural-phase composition of Pt/Co film material has a significant effect on its magnetic properties: the formation of the ferromagnetic phase  $A1$ -CoPt causes an increase in coercive force to 417.65 E and the emergence of magnetic anisotropy.

4. Working conditions in the laboratory of heat treatment where this research work took place correspond to the state sanitary and epidemiological norms. The analysis of potential dangers which can arise during performance of research work in laboratory of thermal processing is carried out. Working with laboratory equipment requires training, appropriate skills and compliance with rules and guidelines to avoid possible emergencies and eliminate their consequences.

5. A startup project on the subject of research work has been developed. Assessment of market opportunities suggests that the project is promising for the market of spintronics devices.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hafarov A.E. Nanoscale Materials for State-of-the-Art Magnetic Memory Technologies / A.E. Hafarov, S.M. Voloshko, A. Kaidatzis, I.A. Vladymyrskiy // Progress in Physics of Metals, 2021. – V. 22. – pp. 175-203.
2. L10 ordered thin Films for spintronic and permanent magnet applications / A. Hafarov, O. Prokopenko, S. Sidorenko et al. // Modern Magnetic and Spintronic Materials. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Springer, Dordrecht, 2020. – pp. 73-94.
3. Okamoto H. Supplemental Literature Review of Binary Phase Diagrams: Au-La, Ce-Pt, Co-Pt, Cr-S, Cu-Sb, Fe-Ni, Lu-Pd, Ni-S, Pd-Ti, Si-Te, Ta-V, and V-Zn / H. Okamoto // Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2019. – V. 40. – pp. 743-756.
4. Ohtake M. L10 ordered phase formation in FePt, FePd, CoPt, and CoPd alloy thin films epitaxially grown on MgO(001) single-crystal substrates / M. Ohtake, S. Ouchi, F. Kirino, M. Futamoto // Journal of Applied Physics, 2012. – V. 111. – 07A708.
5. Sun A. Evolution of structure and magnetic properties of sputter-deposited CoPt thin films on MgO (111) substrates: Formation of the L11 phase / A. Sun, F. Yuan, J. Hsu, H.Y. Lee // Scripta Materialia, 2009. – V. 61. – pp. 713-716.
6. Sun A. Microstructure study of CoPt thin film with phase change from A1 → L11 → A1 → L10 / A. Sun, C. Huang // Journal of Applied Physics, 2013. – V. 113. – 17C110.
7. Control of c-Axis Orientation of L10 Ordered FePt, CoPt, and FePd Alloy Thin Films Deposited on MgO(001) Substrates / M. Ohtake, A. Itabashi, M. Futamoto et al. // IEEE Transactions on Magnetism, 2014. – V. 50. – I. 11. – pp. 1-4.
8. Formation of L10-ordered CoPt during interdiffusion of electron-beam-deposited Pt/Co bilayer thin films on Si/SiO<sub>2</sub> substrates by rapid thermal annealing / R. Toyama, S. Kawachi, S. Iimura et al. // Materials Research Express, 2020. – V. 7. – 066101.

9. Ti underlayer effect on the ordering of CoPt in (Co/Pt)<sub>4</sub> multilayer thin films on Si/SiO<sub>2</sub> substrates / R. Toyama, S. Kawachi, J. Yamaura et al. // *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020. – V. 59. – 075504.

10. Manios E. Ti underlayer effect on the ordering of CoPt in (Co/Pt)<sub>4</sub> multilayer thin films on Si/SiO<sub>2</sub> substrates / E. Manios, V. Alexandrakis, D. Niarchos // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007. – V. 316. – pp. 166-168.

11. Formation of L10 with (001) texture in magnetically annealed Co/Pt multilayers / A. Markou, I. Panagiotopoulos, T. Bakas et al. // *Journal of Applied Physics*, 2011. – V. 110. – 083903.

12. Sehdev N. Correlation of interlayer diffusion with the stoichiometric composition of RF sputtered Pt/Co/Pt sandwiched structures / N. Sehdev, R. Medwal, D.C. Agrawal, S. Annapoorni // *Journal of Materials Science*, 2012. – V. 48. – pp. 3192-3197.

13. Lee T. High post-annealing stability in [Pt/Co] multilayers / T. Lee, D. Su Son, S. Ho Lim, S.-R. Lee // *Journal of Applied Physics*, 2013. – V. 113. – 216102.

14. Barmak K. On the relationship of magnetocrystalline anisotropy and stoichiometry in epitaxial L10 CoPt (001) and FePt (001) thin films / K. Barmak // *Journal of Applied Physics*, 2005. – V. 98. – 033904.

15. Structural phase transformations in annealed Pt/Mn/Fe trilayers / I.O. Kruhlov, O.V. Shamis, N.Y. Schmidt et al. // *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2020. – V. 32. – 365404.

16. Rooney P.W. Evidence of a Surface-Mediated Magnetically Induced Miscibility Gap in Co-Pt Alloy Thin Films / P.W. Rooney, A.L. Shapiro, M.Q. Tran, F. Hellman // *Phys. Rev. Lett.*, 1995. – V. 75. – 1843.

17. Growth-induced magnetic anisotropy and clustering in vapor-deposited Co-Pt alloy films / A.L. Shapiro, P.W. Rooney, M.Q. Tran et al. // *Phys. Rev. B*, 1999. – V. 60. – 12826.

18. Structural order related to the magnetic anisotropy in epitaxial (111) CoPt<sub>3</sub> alloy films / A.L. Shapiro, P.W. Rooney, M.Q. Tran et al. // *J. Magn. Magn. Mater*, 1997. – V. 166. – pp. 45-52.

19. Magnetocrystalline anisotropy in (111) CoPt<sub>3</sub> thin films probed by x-ray magnetic circular dichroism / W. Grange, M. Maret, J.P. Kappler et al. // *Phys. Rev. B*, 1998. – V. 58. – 6298.

20. Effect of reduced size on perpendicular anisotropy in nanostructured CoPt<sub>3</sub>(111) films / M. Maret, A. Maier, F. Treubel et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002. – V. 242. – 420.

21. Perpendicular magnetic anisotropy in CoPt<sub>3</sub>(111) films grown on a low energy surface at room temperature / M. Albrecht, M. Maret, A. Maier et al. // *Journal of Applied Physics*, 2002. – V. 91. – 8153.

22. Enhanced perpendicular magnetic anisotropy in chemically long-range ordered (0 0 0 1)Co<sub>x</sub>Pt<sub>1-x</sub> films / M. Maret, M.C. Cadeville, A. Herr et al. // *J. Magn. Magn. Mater*, 1999. – V. 191. – pp. 61-71.

23. Structural origin of perpendicular magnetic anisotropy in epitaxial CoPt<sub>3</sub> nanostructures grown on WSe<sub>2</sub>(0001) / F. Liscio F., M. Maret, C. Meneghini et al. // *Physical Review B*, 2010. – V. 81. – 125417.

24. Morphology of epitaxial magnetic alloy nanostructures grown on WSe<sub>2</sub>(0001) studied by grazing-incidence small-angle X-ray scattering / M. Maret, F. Liscio, D. Makarov et al. // *Journal of Applied Crystallography*, 2011. – V. 44. – 1173.

25. Nanopatterned CoPt alloys with perpendicular magnetic anisotropy / D. Makarov, E. Bermúdez-Ureña, O.G. Schmidt et al. // *Applied Physics Letters*, 2008. – V. 93. – 153112.

26. Nonepitaxially grown nanopatterned Co–Pt alloys with out-of-plane magnetic anisotropy / Makarov D., Klimenta F., Fischer S. et al. // *Journal of Applied Physics*, 2009. – V. 106. – 114322.

27. CoPt alloy grown on the WSe<sub>2</sub>(0001) van der Waals surface / D. Makarov, F. Liscio, C. Brombacher et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008. – V. 320. – 1858.

28. Nanostructured CoPt<sub>3</sub>(111) films grown on WSe<sub>2</sub>(0001) / A. Maier, B. Riedlinger, F. Treubel et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002. – V. 240. – 377.

29. Кузьмичёв А.И. Магнетронные распылительные системы. Книга 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления [Электронный ресурс] / А.И. Кузьмичёв. – Электронные текстовые данные (1 файл: 7,38 Мбайт). – Киев: Аверс, 2008. – 244 с. – Заглавие с экрана.

30. Herbert C.G. Mass spectrometry basics / C.G. Herbert // R.A.W. Johnstone – CRC Press, 2003. – 474 p. – ISBN 0-84931-354-6.

31. Fearn S. An Introduction to Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (ToF-SIMS) and its Application to Materials Science / S. Fearn // Morgan & Claypool Publishers, 2015. – ISBN: 978-1-6817-4088-1

32. Синдо Д. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия / Д. Синдо, Т. Оикава // – М.: Техносфера, – 2006, – 256 с.

33. Электронный микроскоп – Режим доступа: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Трансмисійний\\_електронний\\_мікроскоп#/media/Файл:Схема\\_ТЕМ.jpg](https://uk.wikipedia.org/wiki/Трансмисійний_електронний_мікроскоп#/media/Файл:Схема_ТЕМ.jpg) – Дата доступа: 21.11.2019

34. Mishra R.K. Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy Techniques for Nanomaterial / R.K. Mishra, A.K. Zachariah, S. Thomas // Microscopy Methods in Nanomaterials Characterization, 2017. – pp. 383-405.

35. Центр рентгеноструктурного аналізу Rigaku [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <http://iff.kpi.ua/tsentr-rentgenostrukturnogo-analizu-rigaku>, вільний. – (дата звернення: 08.05.2020). – Назва з екрана.

36. A simple vibrating sample magnetometer for macroscopic samples / V. Lopez-Dominguez, A. Quesada, J.C. Guzmán-Mínguez et al. // Review of Scientific Instruments, 2018. – V. 89. – 034707.

37. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества / С. Тикадзуми. – М.: Мир, 1983. – 304 с.
38. Вонсовский С.В. Магнетизм: Учебное пособие / С.В. Вонсовский. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
39. ДСанПіН 3.3.2.007-98 – Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) електроннообчислювальних машин.
40. Левченко О.Г. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / О.Г. Левченко // КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 26,1 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 337 с.
41. ДСН 3.3.6.042-99. – Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
42. ДБН В.2.5-28 2006 – Інженерне обладнання будинків і споруд // Природне і штучне освітлення, затверджені наказом Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України від. – 2006. – Т. 15.
43. Москальова В.М. Охорона праці: Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення / В.М. Москальова //– Рівне: НУВГП , 2009.
44. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
45. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького. – Львів: Афіша, 2000. – 32 с.
46. НПАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ.
47. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій, № 424/3717 від 30.06.1999 р.

48. НАПБ Б.03.002-2007 – Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

49. Kalyani V.L. Spintronics-A Vision for Future in Electronics and Computers / V.L. Kalyani, V. Agrawal // Journal of Management Engineering and Information Technology, 2015. – V. 2. – 2394.