

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

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

“ ____ ” _____ 2025 р

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою “Інжиніринг та комп’ютерне
моделювання в матеріалознавстві”
спеціальності 132 “Матеріалознавство”
на тему: “Вплив періоду модуляції на перебіг твердотільних реакцій в
тонкоплівкових композиціях Ni/Ti”

Виконав:

здобувач ВО IV курсу, групи ФМ-11

Пальчековський Олександр Андрійович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент, Орлов Андрій Костянтинович

(підпис)

Консультант з розділу охорони праці:

зав. каф., д.т.н., професор Левченко Олег Григорович

(підпис)

Консультант з економічно-організаційного розділу:

доцент, к.е.н., доцент Нараєвський Сергій Вікторович

(підпис)

Консультант з питань нормоконтролю:

ст. викладач Шаповалова Наталія Анатоліївна

(підпис)

Рецензент: асистент, доктор філософії Тесля Сергій Юрійови

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць

інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач ВО _____

Київ – 2025 року

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 – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 “Матеріалознавство”

Освітньо-професійна програма “Інжиніринг та комп’ютерне моделювання в матеріалознавстві”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

“ ____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу здобувачу ВО

Пальчевському Олександру Андрійовичу

1. Тема роботи «Вплив періоду модуляції на перебіг твердотільних реакцій в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti», керівник роботи к.т.н. Орлов Андрій Костянтинович, затверджена наказом по університету від 26 травня 2025 р. № 1733-С.
2. Термін подання здобувачем ВО роботи 12 червня 2025 року
3. Вихідні дані до роботи: тонкоплівкові композиції Ni/Ti; результати переддипломної практики.
4. Зміст роботи: літературний огляд; матеріали та методи дослідження; результати досліджень та їх аналіз; економічна частина; охорона праці.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 76 сторінок, 12 таблиць, 25 рисунків, 1 презентація.
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно-економічна частина	Нараєвський С. В., к.е.н., доцент		
Охорона праці	Левченко О. Г., д.н.т., професор, зав. каф.		
Нормоконтроль	Шаповалова Н. А., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання 14 квітня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Видача завдання	14.04.2025	
2	Огляд літератури	14.04.2025 – 20.04.2025	
3	Освоєння методик дослідження	21.04.25 – 27.04.25	
4	Виконання експериментальних досліджень	28.04.25 – 04.05.25	
5	Отримання результатів, їх аналіз	05.05.25 – 11.05.25	
6	Оформлення дипломної роботи	12.05.25 – 02.06.25	
7	Попередній захист	03.06.2025	
8	Захист на засіданні ЕК	17.06.2025	

Здобувач ВО

Олександр ПАЛЬЧЕКОВСЬКИЙ

Керівник

Андрій ОРЛОВ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 76 сторінок, 25 рисунків, 58 літературних джерел.

АМОРФІЗАЦІЯ, ГРАНИЦІ РОЗДІЛУ, ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР, ПЕРІОД МОДУЛЯЦІЇ, ТОНКОПЛІВКОВІ КОМПОЗИЦІЇ

Об'єкт досліджень: багатошарові тонкоплівкові композиції Ni/Ti з різним періодом модуляції осаджені на підкладку Si(001) методом радіочастотного магнетронного розпорошення.

Предмет дослідження: структурні параметри, залишкові напруження та електрофізичні параметри у багатошарових тонкоплівкових композиціях Ni/Ti з різним періодом модуляції.

Мета роботи: дослідити початкові стадії аморфізації границь розділу в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti з різним періодом модуляції (60 нм, 30 нм, 20 нм) у вихідному стані та за умов низькотемпературного нагріву до 150 °C.

Методи дослідження: рентгеноструктурний фазовий аналіз, рентгенографічний аналіз залишкових напружень, *in-situ* чотирьохзондова резистометрія.

Результати досліджень та їх новизна: показано, що метод чотирьохзондової резистометрії є ефективним способом аналізу початкових стадій аморфізації границь розділу в тонких плівках Ni/Ti. Встановлено, що зменшення періоду модуляції призводить до зменшення температурного коефіцієнту опору в результаті формування аморфного прошарку.

Сфера застосування: функціональні матеріали з ефектом пам'яті форми для мікро- та наноелектромеханічних системах, нейтронна оптика.

ABSTRACT

Thesis: 76 pages, 25 figures, 58 references.

AMORPHIZATION, ELECTRICAL RESISTIVITY, INTERFACES,
MODULATION PERIOD, THIN FILM

Object of study: multilayer thin-film Ni/Ti compositions with different modulation periods deposited on Si(001) substrates by radio-frequency magnetron sputtering.

Subject of study: structural parameters, residual stresses, and electrophysical parameters of multilayer thin-film Ni/Ti compositions with different modulation periods.

Aim of the study: to investigate the initial stages of interface amorphization in thin-film Ni/Ti compositions with different modulation periods (60 nm, 30 nm, 20 nm) in the as-deposited state and under low-temperature heating up to 150 °C.

Research methods: X-ray structural phase analysis, X-ray residual stress analysis, *in-situ* four-point probe resistivity.

Results and novelty: it has been shown that the four-point probe resistivity test is an effective approach to analyze the initial stages of interface amorphization in Ni/Ti thin films. It has been demonstrated that decreasing the modulation period leads to a decrease in the temperature coefficient of resistance due to the formation of an amorphous interlayer.

Field of application: functional materials with shape memory effect for micro- and nanoelectromechanical systems, neutron optics.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	10
1.1 Тонкоплівкові композиції на основі сплаву NiTi.....	10
1.2 Синтез тонких плівок Ni-Ti фізичними методами осадження.....	13
1.3 Аморфізація границь розділу в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti.....	15
1.4 Дослідження аморфізації границь розділу в тонкоплівкових композиціях шляхом вимірювання електричного опору	17
1.5 Висновки до розділу 1	18
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	20
2.1 Вибір матеріалів дослідження.....	20
2.2 Осадження тонких плівок Ni/Ti з різним періодом модуляції методом магнетронного розпорошення.....	21
2.3 Рентгеноструктурний фазовий аналіз	24
2.4 Рентгенографічний аналіз залишкових напружень.....	27
2.5 <i>In-situ</i> чотирьохзондова резистометрія.....	30
2.6 Висновки до розділу 2	34
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ	35
3.1 Дослідження структурних параметрів в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti з різним періодом модуляції.....	35
3.2 Визначення залишкових напружень в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti з різним періодом модуляції	39
3.3 Визначення електрофізичних властивостей в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti з різним періодом модуляції	43
3.4 Висновки до розділу 3	48
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	49
4.1 Науково-технічна актуальність	49
4.2 Розрахунок собівартості науково-дослідної роботи (НДР)	49

	7
4.2.1 Витрати на оплату праці.....	50
4.2.2 Єдиний соціальний внесок	51
4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень	51
4.2.4 Енергоносії для проведення досліджень	52
4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання	52
4.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій.....	52
4.2.7 Витрати на службові відрядження	52
4.2.8 Інші прямі невраховані витрати	52
4.2.9 Накладні витрати	53
4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми.....	53
4.3 Науково-технічна ефективність НДР	54
4.4 Висновки до розділу 4	58
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	59
5.1 Характеристика приміщення.....	59
5.2 Аналіз штучного та природнього освітлення у приміщенні	61
5.3 небезпечні та шкідливі фактори.....	62
5.3.1 Мікроклімат.....	62
5.3.2 Шум та вібрації	63
5.3.3 Електробезпека.....	64
5.4 Заходи забезпечення безпеки праці	65
5.5 Пожежна безпека.....	66
5.6 Висновки до розділу 5	68
ВИСНОВКИ	69
CONCLUSIONS	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕПФ – ефект пам’яті форми

Δ – період модуляції

ρ – питомий електричний опір

ТКО – температурний коефіцієнт опору

МЕМС – мікроелектромеханічні системи

СПФ – сплави з ефектом пам’яті форми

ОЦК – об’ємноцентрована кубічна ґратка

млн.ч./°C – мільйонна частка на °C

СІ – ступінь кристалічності

ГЦП – гексагональна щільного пакування

ГЦК – гранецентрована кубічна ґратка

ОКР – область когерентного розсіювання

НДР – науково-дослідна робота

ЄСВ – єдиний соціальний внесок

ФЗП – фонд заробітної плати

ЛБ – лампа білого світла

ВСТУП

Металеві тонкі плівки з ефектом пам'яті форми (ЕПФ) представляють значний інтерес в якості функціонального матеріалу в мікро- та наноелектромеханічних системах, таких як датчики, актуатори, клапани, насоси тощо. Одним із таких перспективних матеріалів є тонкі плівки сплаву NiTi, які окрім ефекту пам'яті форми демонструють також високу стійкість до корозії, біосумісність та комплекс механічних властивостей.

Зазвичай, плівки сплаву NiTi отримують методом магнетронного розпорошення у вакуумі. Зважаючи на складність отримання плівок еквіатомного складу, пов'язану із різними коефіцієнтами розпорошення Ni та Ti, перспективним підходом формування сплаву NiTi у тонкоплівковому стані є осадження окремих шарів Ni та Ti з наступним їх перемішуванням під час відпалу. Такий підхід дозволяє більш точно контролювати склад плівки шляхом регулювання товщини окремих металевих шарів. Однак до стадії формування кристалічної інтерметалідної фази в таких плівках спостерігається явище аморфізації твердого тіла. Причому у випадку системи Ni-Ti аморфізація границь розділу може мати місце як в процесі їх відпалу, так і вже на стадії осадження. Ступінь кристалічності границь розділу можна контролювати, змінюючи період модуляції (Δ).

Досліджувати ступінь аморфізації в плівках Ni/Ti можна на основі зміни питомого електричного опору (ρ) та температурного коефіцієнту опору (ТКО). Існує багато досліджень, які стосуються розвитку аморфізації внаслідок тривалого відпалу, в той час як дослідження початкових стадій аморфізації методом чотирьохзондової резистометрії не можна вважати висвітленим в літературі достатньою мірою.

Ці результати можуть дати розуміння того, як відбуватиметься дифузія при подальшому відпалі та утворення інтерметалевих фаз залежно від ступеня аморфізації границь розділу у вихідному стані.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Тонкоплівкові композиції на основі сплаву NiTi

Стрімкий розвиток нанорозмірного матеріалознавства дав змогу розробити «розумні матеріали» («smart materials») широкого спектру застосувань завдяки своїм унікальним властивостям, які здатні реагувати на зовнішні чинники, такі як: випромінювання, напруга, магнітне поле, навантаження чи агресивне середовище. Основними галузями використання таких матеріалів є робототехніка, мікро- та нано- електроніка, біомедицина та військова та аерокосмічна промисловості.

«Розумні матеріали» є особливо привабливими при проектуванні та виготовленні передових мікроелектромеханічних систем (МЕМС). Мікроелектромеханічні системи або МЕМС – це інтеграція різних електричних та механічних компонентів на мікроскопічному рівні [1]. МЕМС виготовляються з компонентів розміром від 1 мкм до 100 мкм, що дозволяє створювати високоефективні та компактні датчики, які зазвичай мають розміри в діапазоні від 20 мкм до 1 мм [1]. Саме тому багато досліджень акцентують увагу на нанорозмірних тонкоплівкових композиціях з метою підвищення ефективності компонентів на мікро- та наномасштабі [1-5]. Сплави з ефектом пам'яті форми (СПФ) є яскравими прикладами функціональних матеріалів, які широко використовуються у МЕМС та інших галузях. Одним із найбільш поширених та перспективних «розумних» матеріалів є сплав NiTi (нітинол). Сплав NiTi використовується як СПФ вже більше трьох десятиліть як матеріал для різних приводів, муфт, кріплень і з'єднувачів у широкій галузі автомобільної та аерокосмічної промисловості та медицини. NiTi отримав велике комерційне використання завдяки своїм відмінним властивостям: ЕПФ, надпружність, біосумісність, стійкість до корозії та ін. Незважаючи на те, що СПФ мають гарні механічні властивості, вони мають повільну реакцію на зміни навколишнього середовища [6]. Спосіб подачі та відведення тепла у циклі безпосередньо впливає

на тривалість циклу, яка є важливим параметром. У порівнянні з масивними матеріалами, тонкоплівкові матеріали забезпечують вищу швидкість охолодження завдяки великому співвідношенню площі поверхні до об'єму, що підвищує швидкість теплопередачі й, відповідно, дозволяє скоротити час циклу [7].

Тонкоплівкові композиції на основі сплаву NiTi є перспективними матеріалами для MEMS завдяки низькому енергоспоживанню, високій продуктивності, великій відновній деформації, ЕПФ, тривалому терміну служби, а також відмінній корозійній стійкості та біосумісності, що сприяє створенню перспективних біомедичних виробів та системи доставки лікарських засобів тощо.

Основні властивості сплаву безпосередньо пов'язані з бездифузійним аустенітно-мартенситним перетворенням. У тонких плівках на основі NiTi існує три основні шляхи цього перетворення [7]:

- $B2$ (аустеніт) $\rightarrow B19'$ (мартенсит);
- $B2$ (аустеніт) $\rightarrow R$ -фаза (проміжна фаза) $\rightarrow B19'$ (мартенсит);
- $B2$ (аустеніт) $\rightarrow B19$ (проміжна фаза) $\rightarrow B19'$ (мартенсит).

Кожна з основних фаз відповідає певній кристалічній структурі. Високотемпературна структура $B2$ (аустеніт) у сплавах NiTi належить до типу CsCl з об'ємноцентрованою кубічною (ОЦК) ґраткою з параметром ґратки $a = 0,3014$ нм. Низькотемпературна структура $B19'$ (мартенсит) має моноклінну симетрію. Проміжна фаза R – триклінну структуру, а фаза $B19$ – ортогональну структуру [8]. На рисунку 1.1 наведені кристалічні ґратки аустеніту та мартенситу.

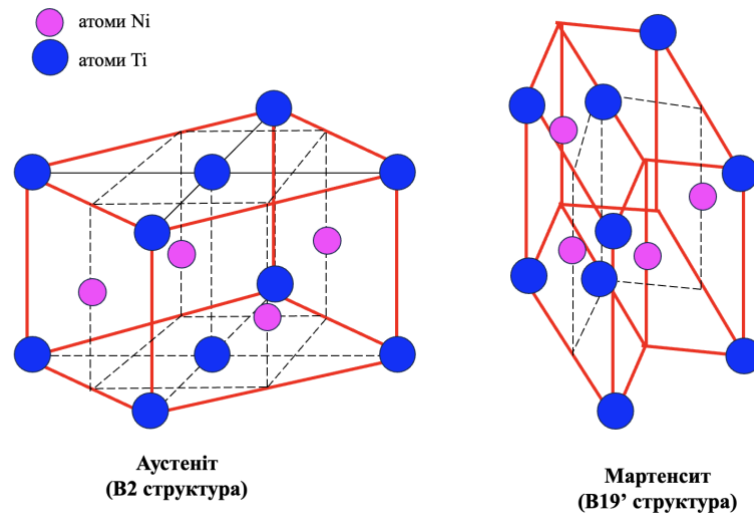


Рисунок 1.1 – Кристалічні ґратки аустеніту та мартенситу у сплавах Ni-Ti

На рисунку 1.2 наведена фазова діаграма Ni-Ti, яка демонструє зв'язок між температурою перетворення та складом. Чутливість складу для різних фазових перетворень зумовлена наявністю обмеженої інтерметалідної області на фазовій діаграмі NiTi. Склад композиції та параметри термічної обробки є факторами, які найбільше впливають на температури перетворення [9-10]. Навіть незначне відхилення у складі сплаву – всього на кілька десятих відсотка в діапазоні від 49 ат.% до 51 ат.% нікелю – призводить до істотних змін властивостей матеріалу [11].

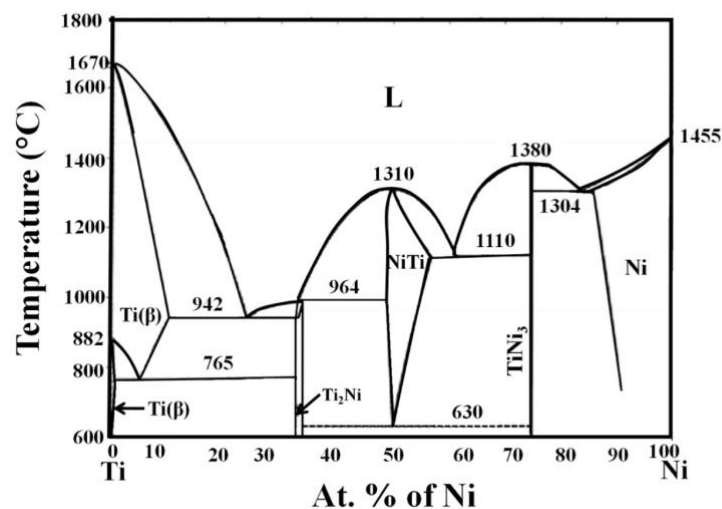


Рисунок 1.2 – Фазова діаграма сплаву Ni-Ti [7]

1.2 Синтез тонких плівок Ni-Ti фізичними методами осадження

Нанорозмірні тонкоплівкові композиції NiTi можуть бути синтезовані різними фізичними методами осадження, такими як: дугове іонне плакування, іонно- та електропроменеве осадження, імпульсне випаровування, імпульсне, лазерне осадження, плазмове розпорошення (рис. 1.3).

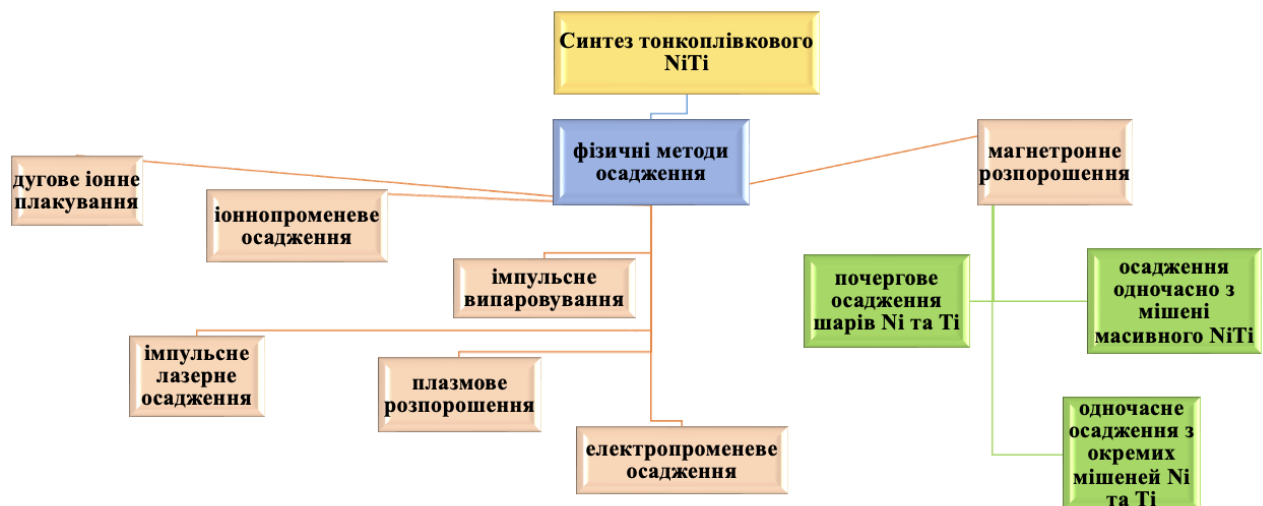


Рисунок 1.3 – Способи синтезу тонкоплівкових композицій Ni-Ti фізичними методами осадження

Однак ці методи мають низку недоліків: низька швидкість осадження, нерівномірність плівки, несумісність з MEMS та ін. Саме тому найбільш поширеним комерційно доступним методом, яким зазвичай отримують тонкоплівкові композиції, є магнетронне розпорошення, завдяки високій якості та однорідності отриманих матеріалів. Суть полягає в осадженні тонких плівок шляхом магнетронного розпорошення при кімнатній температурі з мішені масивного сплаву NiTi. Крім того, синтез тонких плівок Ni/Ti магнетронним розпорошення має високий попит у порівнянні з іншими процесами осадження, завдяки наступним перевагам [12]:

- здатність виготовлення нанорозмірних матеріалів з використанням різноманітних матеріалів, таких як: метали, сплави, оксиди та композитні матеріали;
- забезпечення щільності плівки порівняно з іншими процесами осадження;
- надзвичайно висока адгезія плівки до підкладки;
- висока швидкість осадження;
- висока чистота осадженої плівки;
- можливість осадження матеріалів на термочутливу підкладку;
- можливість осадження за низьких тисків.
- однорідність на підкладках великої площі, таких як архітектурне скло;
- мішень процесу розпорошення забезпечує стабільне, довговічне джерело іонізації;
- можливість регулювання простору між джерелом та підкладкою.

Традиційним підходом синтезу тонких плівок NiTi є розпорошення з масивної мішені зі сплаву NiTi за кімнатної температури. Синтезовані плівки мають аморфну структуру. Тому для формування кристалічної аустенітної фази *B2*, яка може надалі перетворюватися при охолодженні на мартенситну структуру *B19'*, що забезпечує поведінку з пам'яттю форми [6], необхідне або осадження на нагріту підкладку, або наступна термічна обробка. Однак, розпорошення з мішені зі сплаву NiTi зазвичай призводить до нееквіатомного складу плівки, яка збагачена Ni, оскільки коефіцієнт розпорошення Ni (3,0 атом/іон [13]) вищий, ніж Ti (0,3 атом/іон [13]). Цей фактор набув особливого значення, оскільки температури мартенситно-аустенітного переходу надзвичайно чутливі до атомного співвідношення компонентів.

Альтернативним підходом для синтезу плівок NiTi є осадження окремих шарів Ni і Ti з подальшим їх термоіндукованим дифузійним змішуванням. Цей підхід вперше був запропонований у роботі [14], а зараз широко досліджується іншими авторами [14-17]. Цей підхід пропонує легший контроль над хімічним складом кінцевого продукту шляхом регулювання товщини кожного металевого

шару. Окрім застосувань у MEMC, такі багат шарові структури Ni/Ti привернули особливу увагу як функціональні елементи пристроїв м'якої рентгенівської та нейтронної оптики [18, 19]. Однак наявність додаткових внутрішніх меж розділу між Ni і Ti в таких шаруватих структурах може призвести до розвитку твердотільної аморфізації.

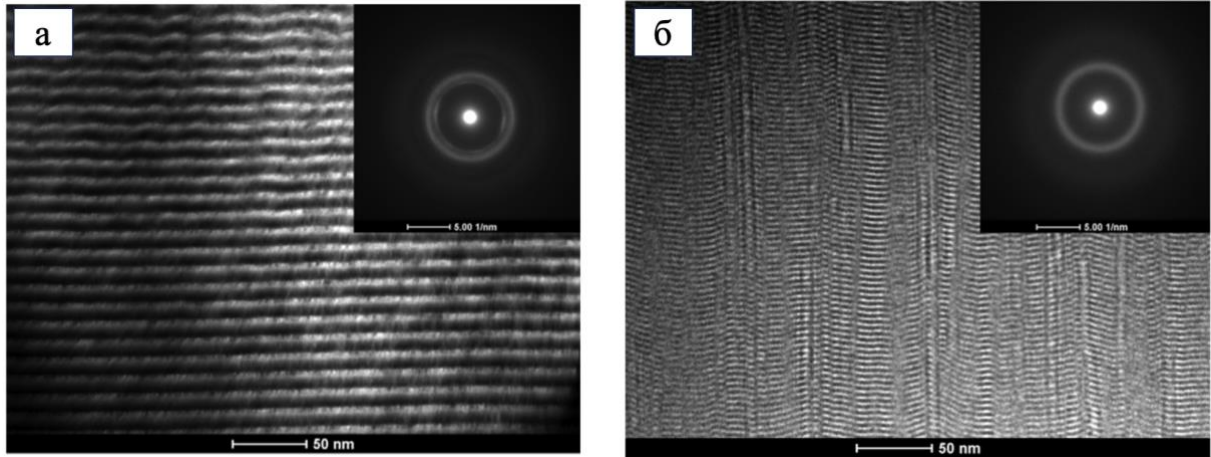
1.3 Аморфізація границь розділу в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti

Твердотільна аморфізація – це зростання аморфного шару шляхом взаємодифузії двох компонентів у двошаровій системі, що викликало інтерес до вивчення ще в 1983 році, і це явище активно вивчається в даний час. Системи, яким притаманний цей процес, повинні відповідати двом критеріям: а) велика від'ємна вільна енергія Гіббса змішування та б) аномально швидка дифузія принаймні одного з компонентів [20].

Аморфізація поверхонь розділу відбувається в мультишарах Ni/Ti на стадії осадження та під час відпалу [16, 20-22]. Кристалічність границь розділу можна контролювати, змінюючи період модуляції (товщину двошарової композиції).

У роботі [16] досліджувалася багат шарові тонкоплівкові композиції Ni/Ti з різними періодами модуляції (4 нм, 12 нм та 25 нм) у вихідному стані та після термічного відпалу з використанням синхротронного випромінювання. Загальна товщина композицій становила від 2 мкм до 2,5 мкм. Було виявлено, що при зменшенні періоду модуляції до 4 нм спостерігається гало, характерне для аморфної структури, тоді як для тонких плівок з періодом модуляції більшим за 12 нм спостерігаються рефлекси від кристалічного Ni та Ti (рис. 1.4). Окремі шари зникають під час відпалу завдяки взаємній дифузії та наступним твердотільним реакціям. Реакція між Ni та Ti з утворенням $B2$ структури відбувається з короткою затримкою в часі та у вузькому діапазоні температур. Для періодів модуляції 25 нм, 12 нм та 4 нм температура реакції близька до 320 °C, 350 °C та 385 °C відповідно. За вищих температур, окрім аустенітної фази, ідентифікується фаза $NiTi_2$. Отже, можна зробити висновок, що значне

зменшення товщини шарів з 25 нм до 4 нм призводить до змішування компонентів уздовж границі розділу та зміни структури з нанокристалічної на квазіаморфну, підвищуючи температуру інтерметалідної реакції.



а – $\Delta = 4$ нм, б – $\Delta = 12$ нм

Рисунок 1.4 – Світлопольні зображення мікроструктури багатошарових тонкоплівкових композицій Ni/Ti з різними періодами модуляції (Δ) та з відповідними електронограмами

У роботі [20] було показано, що аморфізація може відбуватися як на межі розділу металів, так і на межах зерен окремих металевих шарів. Автори продемонстрували, що коефіцієнт дифузії в аморфній фазі був у 100 разів меншим за коефіцієнт дифузії на межі зерен. Також було зазначено, що як розчинення Ti в кристалічному Ni, так і аморфізація пов'язані з розвитком профілів напружень у багатошарових нанорозмірних композиціях.

У роботі [21] було показано, що багатошарова композиція з періодом модуляції 10 нм є полікристалічною, тоді як з періодом модуляції 6 нм є аморфною у одразу після осадження. Термічний відпал зразків показує, що багатошарова композиція з періодом модуляції 10 нм зазнає твердотільної аморфізації при 300 °C, а при вищих температурах відбувається рекристалізація. У той час як композиції з періодом модуляції 6 нм структура залишається аморфною до 400 °C, проте за вищих температур (400 °C) відбувається

кристалізація. Крім того, вимірювання намагніченості, проведені на зразку з періодом модуляції 10 нм, показують неферромагнітну поведінку за температури 400 °С. Композиція з $\Delta = 6$ нм взагалі не виявляє жодної намагніченості. Хімічна природа межі розділу, досліджена за допомогою методу рентгенівської фотоелектронної спектроскопії з глибинним профілем, вказує на утворення аморфного прошарку Ti–Ni на межі розділу у випадку з $\Delta = 6$ нм, відпаленого за 400 °С. Також зазначено, що взаємна дифузія в кристалічній плівці була швидшою, ніж в аморфній плівці (енергії активації становили 0,3 еВ та 0,45 еВ для кристалічних та аморфних шарів відповідно) через різні механізми дифузії.

Отже, оскільки явище твердотільної аморфізації спостерігається в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti вже на стадіях осадження, воно буде перешкоджати наступному формуванню інтерметалевих фаз з ЕПФ, що буде зменшувати їхній потенціал в MEMS. Крім того, розвиток твердотільної аморфізації призводить до утворення аморфних границь розділу та перемішування атомів металевих шарів Ni та Ti, що є небажаним для застосування композицій у нейтронній оптиці.

1.4 Дослідження аморфізації границь розділу в тонкоплівкових композиціях шляхом вимірювання електричного опору

Процеси аморфізації твердого тіла в багатошарових нанорозмірних композиціях можна дослідити шляхом вимірювання питомого електричного опору, який чутливий до присутності аморфної фази.

Наприклад, у роботі [23] було досліджено реакцію аморфізації в багатошарових структурах Al/Pt методом *in-situ* резистометрії й повідомили, що після нагріву зразка приблизно до 120 °С опір різко зростає, що відповідає вищому електричному опору аморфної фази, яка формується з багатошарової структури Al та Pt. Аморфний стан має відтворюваний негативний температурний коефіцієнт опору, що було встановлено шляхом багаторазового нагрівання та охолодження в діапазоні від кімнатної температури до 150 °С. Тому

можна зробити висновок, що швидке збільшення питомого опору та наявність відтворюваного негативного температурного коефіцієнта опору можна спостерігати через утворення аморфної фази.

У роботі [24] досліджували багатошарові тонкі плівки Co/Ta з різною товщиною шарів Co і Ta. Виявлено, що коли товщина шару Co сягає критичного значення (1,5 нм), електричний опір досягає максимуму, а температурний коефіцієнт опору набуває від'ємного значення. Уся багатошарова композиція є аморфною за рахунок великої кількості границь розділу, що підтверджується від'ємним ТКО – явищем, яке спостерігається у багатьох випадках для аморфних матеріалів.

У роботі [25] показано, що температурний коефіцієнт опору багатошарових структур Ni-Ti з вмістом Ni₄₅Ti₅₅, які відпалювали за температури 260 °C протягом 64 год, змінює знак з додатного на від'ємний, що свідчить про аморфізацію вздовж границь розділу у підшарах нікелю та титану.

У роботі [26], негативний ТКО і підвищений питомий опір у багатошарових шарах Ni/Ti, відпалених при 185 °C протягом 27 годин, пояснюється зростанням аморфної фази на межах розділу металів.

Усі ці дослідження надають чіткі докази того, що вимірювання питомого опору є ефективним інструментом для виявлення аморфізації поверхні розділу після тривалого відпалу. Однак, беручи до уваги аномально швидку дифузію Ni в Ti та схильність системи Ni-Ti до твердотільної аморфізації в процесі осадження та впродовж термічного відпалу, дослідження та характеристика початкових стадії аморфізації є важливим та недослідженим питанням.

1.5 Висновки до розділу 1

1. Проведено детальний аналіз літератури щодо основних властивостей, актуальних сфер застосування та переваг тонкоплівкових композицій з ефектом пам'яті форми на основі сплаву NiTi.

2. Розглянуто основні фізичні методи осадження тонкоплівкових композицій Ni-Ti з парової фази, їх переваги та недоліки.

3. Проаналізовано явище аморфізації твердого тіла в багатошарових нанорозмірних композиціях Ni/Ti та вплив цього явища на подальше формування фази з ЕПФ.

4. Встановлено, що дослідження процесів аморфізації твердого тіла шляхом вимірювання питомого електричного опору та визначення температурного коефіцієнту опору в багатошарових нанорозмірних композиціях є ефективним та може бути апробовано на інших об'єктах дослідження для вивчення початкових стадій аморфізації.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір матеріалів дослідження

Об'єктами дослідження обрано багатошарові тонкоплівкові композиції Ni/Ti з різним Δ , як перспективні функціональні матеріали для нових пристроїв MEMC з ефектом пам'яті форми. Досліджувались двошарові $[\text{Ni}(30 \text{ нм})/\text{Ti}(30 \text{ нм})]_{x1}$, чотирьохшарові $[\text{Ni}(15 \text{ нм})/\text{Ti}(15 \text{ нм})]_{x2}$ ($\Delta = 30 \text{ нм}$) та шестишарові $[\text{Ni}(10 \text{ нм})/\text{Ti}(10 \text{ нм})]_{x3}$ композиції з періодами модуляції 60 нм, 30 нм та 20 нм, відповідно, та загальною товщиною 60 нм. На рисунку 2.1 схематично зображені досліджувані тонкоплівкові композиції.

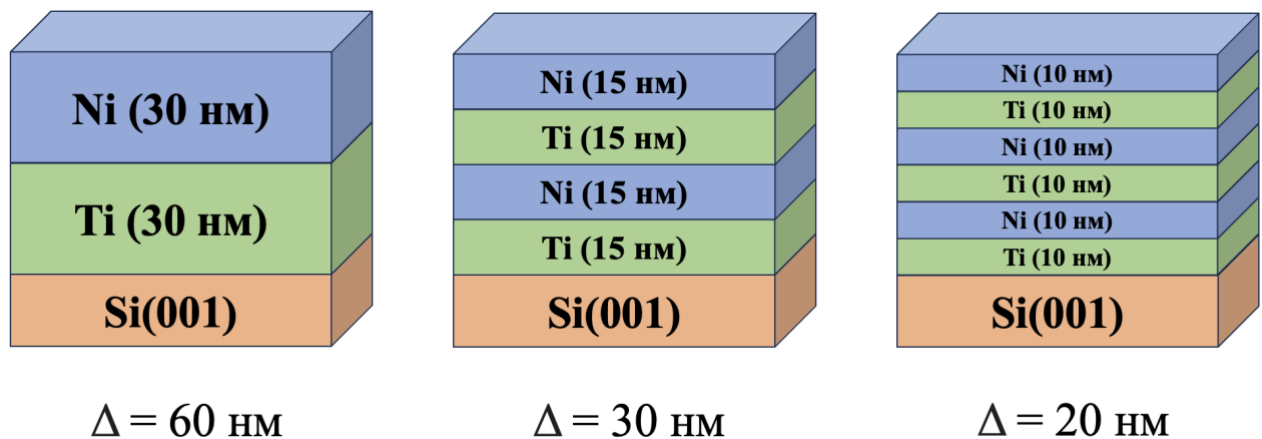


Рисунок 2.1 – Багатошарові тонкоплівкові композиції Ni/Ti з різним Δ

Послідовність осадження металевих шарів зумовлена різною хімічною активністю двох компонентів. Використання нижнього шару титану запобігає утворенню силіцидів Ni при контакті з кремнієвою підкладкою. Використання верхнього шару нікелю запобігає деградації поверхні, оскільки титан має високу хімічну активність і схильність до адсорбції домішок із навколишнього середовища. Товщини шарів визначено з урахуванням вимог до мініатюризації MEMC пристроїв і обмеженої роздільної здатності методів дослідження. Загальна товщина плівки 60 нм є близькою до мінімальної, за якої можлива

фіксація фаз з ефектом пам'яті форми, що зазвичай спостерігається при товщинах від 40 нм до 50 нм.

2.2 Осадження тонких плівок Ni/Ti з різним періодом модуляції методом магнетронного розпорошення

Магнетронне розпорошення є однією з найпоширеніших технологій синтезу тонких плівок, яка широко використовується в промисловості. Основними напрямками застосування є мікроелектроніка, декоративне оздоблення поверхонь, ювелірне виробництво та створення функціональних покриттів. Найбільш розповсюдженим промисловим застосуванням магнетронного розпорошення є формування тонких шарів у складі інтегральних схем і металевих плівкових покриттів.

Розпорошення – це фізичний процес, у якому позитивно заряджені іони плазми прискорюються до поверхні мішені під дією електричного поля, вибиваючи з неї атоми (рис. 2.2). Для великомасштабних промислових застосувань у якості іонізованих атомів зазвичай використовується Ag, завдяки його хімічній інертності та низькій вартості. Аргон також має перевагу в тому, що його атомна маса подібна до маси багатьох металів, таких як Ti, Al та Cu, які широко використовуються у виробництві інтегральних схем. Прискорююча енергія іонів Ag^+ зазвичай забезпечується перепадом потенціалів між іонізованим плазмовим газом та мішенню. Вибиті атоми конденсуються на підкладці, утворюючи тонку плівку з атомів матеріалу мішені [27].

Для реалізації процесу магнетронного розпорошення найчастіше використовують спеціальне обладнання – магнетрон. Магнетрон використовує сильні електричні та магнітні поля та відіграє домінуючу роль у спрямуванні частинок плазми до матеріалу мішені. Створюється плазма, і позитивно заряджені іони з плазми прискорюються електричним полем і вдаряються об негативний електрод (мішень) з достатньою силою для вибивання атомів.

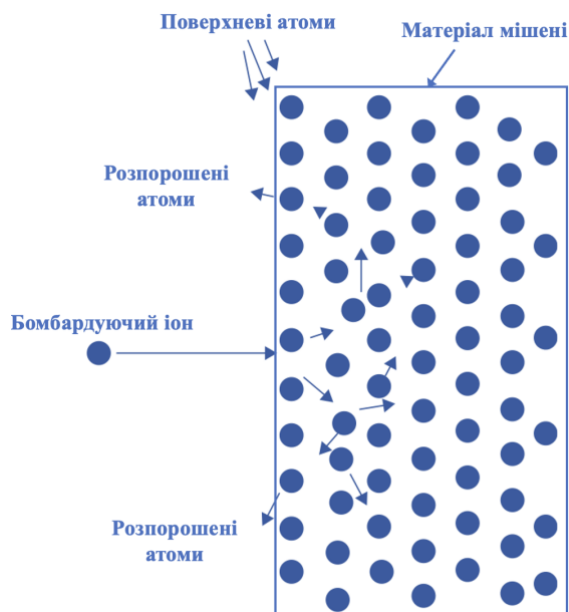


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення процесу розпорошення матеріалу мішені [27]

Шлях атома від мішені до підкладки залежить від умов вакууму, ступеня іонізації, рівня потужності, тиску газу, зміщення підкладки тощо. Комерційно джерела магнетронного розпорошення доступні в різних геометричних формах, таких як трубчасті, круглі та прямокутні. Швидкість осадження при магнетронному розпорошенні можна покращити, підтримуючи вищу щільність іонів. Це покращує процес іонізації, що зрештою призводить до збільшення інтенсивності розпорошення. Показником розпорошення є коефіцієнт розпорошення Y , який можна розрахувати як відношення кількості атомів, вибитих з мішені, до кількості атомів, що падають на мішень [28]. На коефіцієнт розпорошення впливають енергія, маса падаючих іонів, енергія зв'язку атомів поверхні мішені, інертний газ, потужність розпорошення, температура підкладки, зміщення підкладки та кут падаючих іонів.

Існує кілька методів магнетронного розпорошення, що використовуються для виготовлення нанорозмірних матеріалів, основними з яких є магнетронне розпорошення постійного струму та радіочастотне магнетронне розпорошення. Основна відмінність між ними полягає у тому, що магнетронне розпорошення постійного струму придатне лише для провідних матеріалів, оскільки при

нанесенні ізолюючих покриттів на поверхні мішені накопичується електричний заряд, що унеможлиблює подальше розпорошення. Це обмеження долається за допомогою радіочастотного розпорошення, при якому замість постійного застосовується змінний струм високої частоти. У цьому режимі електричне зміщення між катодом і анодом періодично змінюється, що дозволяє уникнути накопичення заряду на поверхні мішені. Радіочастотне магнетронне розпорошення дозволяє осаджувати не лише провідні, а й непровідні матеріали, зокрема діелектрики, полімери, а також іонні та ковалентні сполуки. Магнетрони постійного струму мають обмежену здатність досягати високих рівнів іонізації газу, що є ще однією причиною в заміні джерела живлення постійного струму на радіочастотне (рис. 2.3). Саме тому обладнання для магнетронного розпорошення постійним струмом є дуже складним та вартісним [29].

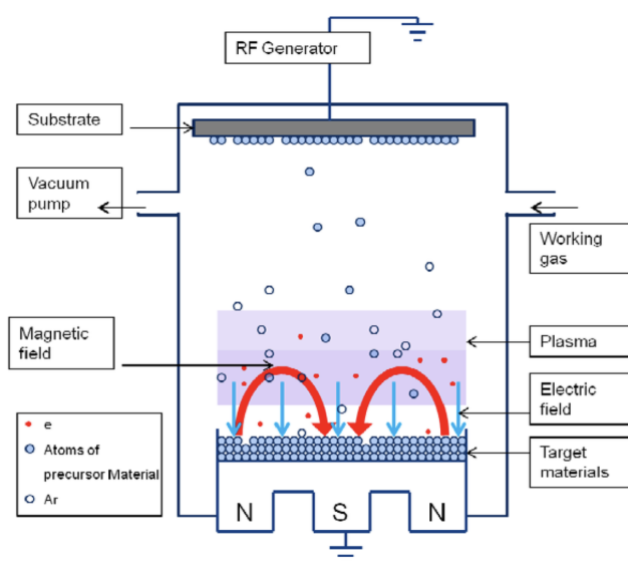


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення процесу радіочастотного магнетронного розпорошення [30]

В даній роботі багатошарові тонкоплівкові композиції Ni/Ti з різним Δ осаджувалися методом радіочастотного магнетронного розпорошення на односторонню поліровану підкладку з монокристалу Si(001) p-типу з окремих мішеней високої чистоти з Ni (99,99 %) та Ti (99,99 %) за кімнатної температури з контрольованою швидкістю осадження 10 нм/хв. Перед осадженням кремнієві

підкладки піддавали стандартній процедурі очищення. Перед вирощуванням плівки не використовувався буферний шар, такий як SiO_2 або Si_3N_4 , щоб потенційно не погіршити властивості пам'яті форми системи [31, 32]. Робочий тиск аргонної плазми під час процесу осадження підтримувався на рівні 0,6 Па, а перед осадженням вакуумна камера відкачувалась до тиску 0,02 мПа.

2.3 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Одним з основних безконтактних, неруйнівних методів аналізу та характеристики матеріалів є рентгеноструктурний фазовий аналіз. Явище засноване на пружному (когерентному) розсіюванні фотонів рентгенівського випромінювання на електронах, які оточують атомні ядра матеріалу. У цьому випадку енергія розсіяної хвилі не змінюється і вона зберігає своє фазове співвідношення з падаючою хвилею. Принцип ґрунтується на дифракції рентгенівського випромінювання на періодичних атомних площинах та кутовій реєстрації дифрагованого сигналу і описується законом В. Бреґга [33]:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta, \quad (2.1)$$

де n – порядок дифракції;

λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання, Å;

d_{hkl} – міжплощинна відстань, Å;

θ – кут дифракції, градуси.

На рисунку 2.4 наведено умови геометрії дифракції, запропонованої В. Бреґгом, коли рентгенівське випромінювання дифрагує на кристалі під певним кутом, відповідно до умов дифракції.

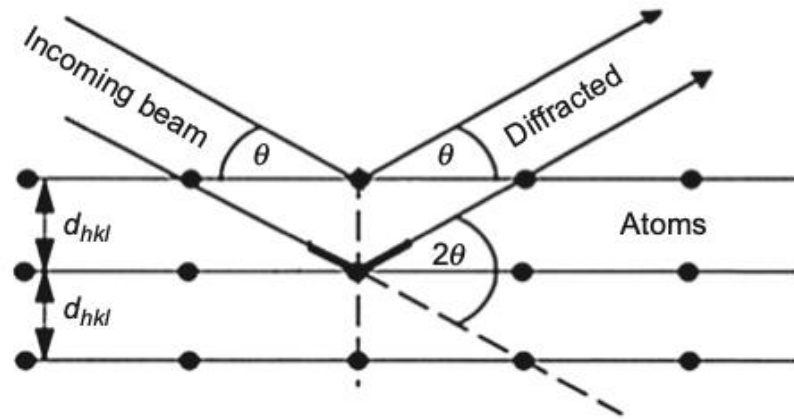


Рисунок 2.4 – Принцип дифракції рентгенівського випромінювання від площин кристалічної ґратки [34]

У полікристалічному нетекстурованому матеріалі з дрібними зернами дифракція виникає для кожної кристалографічної площини, які задовольняють закон В. Брегга для конструктивної інтерференції. Це призводить до формування дифракційних конусів, які на площинному детекторі проявляються у вигляді так званих кілець Дебая або дифракційних кілець (рис. 2.5).

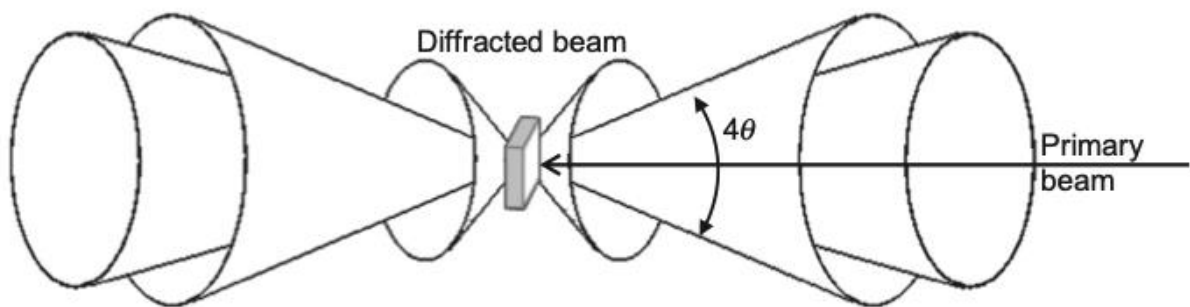


Рисунок 2.5 – Дифракційні конуси, які виникають для полікристалічного матеріалу при взаємодії з рентгенівським випромінюванням [35]

Основним приладом для аналізу рентгенівської дифракції є дифрактометр, який складається з джерела рентгенівського випромінювання, первинної та вторинної оптики, гоніометра, тримача зразка та детектора. Для генерації рентгенівських фотонів необхідне високовольтне прискорення електронів, що виходять з вольфрамової нитки розжарення. Зазвичай використовується напруга

прискорення від 20 кВ до 60 кВ. Оскільки 99 % енергії, що використовується для виробництва рентгенівського випромінювання, розсіюється у вигляді тепла, і лише 1 % доступний для генерації випромінювання, виділення тепла є основною проблемою, що обмежує яскравість рентгенівського променя. Тому безперервне водяне охолодження анода є обов'язковим, і в стандартних рентгенівських трубках зазвичай можна використовувати лише низький струм нижче 60 мА, що обмежує інтенсивність променя. Гоніометр дозволяє дуже точно переміщувати джерело рентгенівського випромінювання, зразок та детектор один відносно одного. Зазвичай використовується геометрія за Бреггом-Брентано, коли відстань між зразком та детектором залишається постійною для всіх кутів θ . Найбільш поширеними режимами зйомки є випадок, коли зразок залишається фіксованим, тоді як джерело рентгенівського випромінювання та детектор рухаються з однаковою швидкістю (рис. 2.6).

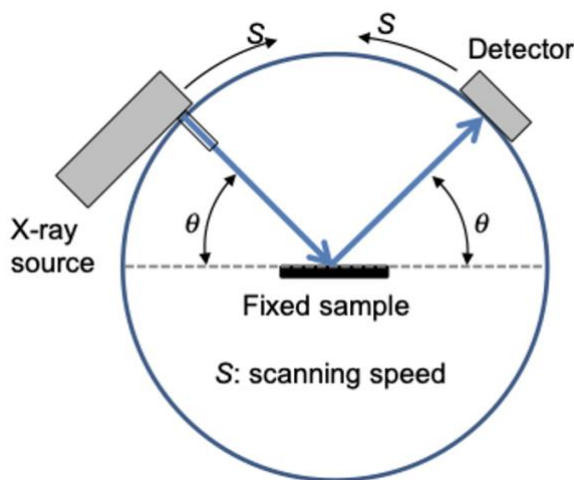


Рисунок 2.6 – Схема фокусування при геометрії зйомки за Бреггом-Брентано [36]

В цій роботі структурний аналіз проводили за допомогою рентгенівської дифракції на дифрактометрах Rigaku RINT (40 кВ, 200 мА) і Rigaku Ultima IV (30 кВ, 20 мА) у мідному випромінюванні ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) у геометрії θ - 2θ Брегга-Брентано. Розміри ОКР шарів Ti та Ni розраховували за даними рентгеноструктурного фазового аналізу за допомогою рівняння Шеррера [36]:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (2.2)$$

де D – розмір ОКР, нм;

k – коефіцієнт форми, який становить 0,9;

β – ширина піку на половині максимуму, градуси.

Дифракційну картину розкладали за допомогою підгонки піків за функцією Гауса. Ступінь кристалічності, який характеризує досконалість і впорядкованість структури, був розрахований з співвідношення [37]:

$$CI = \frac{A_c}{A_a} \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

де CI – ступінь кристалічності, %;

A_c – площа кристалічних рефлексів, відносні одиниці;

A_a – повна площа дифракційної картини, відносні одиниці.

2.4 Рентгенографічний аналіз залишкових напружень

Залишкові напруження в тонких плівках зазвичай виникають на стадії осадження. Ці напруження зазвичай виникають через невідповідність кристалічних решіток на межі розділу «плівка-підкладка» або «шар-шар», а також через структурні дефекти, домішки та інші мікроструктурні фактори. Також добре відомо, що стискаючі або розтягуючі напруження можуть розвиватися в плівці залежно від параметрів осадження, таких як робочий тиск, потужність гармати, швидкість осадження та температура підкладки [38].

Залишкові напруження можуть бути виміряні методом $\sin^2\psi$, який є класичним рентгенівським методом вимірювання напружень. Метод $\sin^2\psi$ аналізує напруження на поверхні зразка, припускаючи, що даний полікристалічний матеріал має плоский напружений стан. Значення напруження отримується шляхом вимірювання кутів дифракції на одній і тій самій площині

дифракції окремих кристалічних зерен під кількома кутами ψ між нормаллю та дифракційною поверхнею зразка.

Зазвичай вимірювання напружень за допомогою методу $\sin^2\psi$ проводиться за таких двох основних режимах, як: «iso-inclination» та «side-inclination», які зображені на рисунку 2.7. У методі «iso-inclination» падаючий та дифрагований рентгенівський промінь лежать у площині x - z , а вісь y обертається так, щоб нормаль до дифрагованої поверхні нахилилася в напрямку осі x (нормаль до площини дифракції, як показано на малюнку, є паралельною до осі z). У результаті можна отримати компонент напруження в напрямку осі x . У цьому методі як джерело рентгенівського випромінювання, так і детектор обертаються навколо однієї й тієї осі y , що робить вимірювальну систему відносно простою у налаштуваннях. На відміну від «iso-inclination», у методі «side-inclination» (бокового нахилу) обертається вісь x , для вимірювання міжплощинних відстаней у різних кутах ψ , що дозволяє отримати компонент напружень в напрямку осі y . Завдяки тому, що поверхня, яка містить як падаючий, так і дифрагований промінь, нахилиється у напрямку вимірювання напруження, цей метод дозволяє розширити величину кута ψ [39].

Напружений стан у даній роботі досліджували методом $\sin^2\psi$ у режимі «iso-inclination» на дифрактометрі Rigaku ULTIMA IV. Залишкові напруження були визначені відповідно до закону дифракції за рівнянням:

$$\left(\frac{d_\psi - d_0}{d_0} \right) = \frac{(1 + \mu)}{E} \sigma_R \sin^2 \psi \quad (2.4)$$

де σ_R – залишкові напруження, ГПа;

ψ – кут між нормаллю до поверхні та дифракційною поверхнею зразка, градуси;

d_ψ – міжплощинні відстані, при відповідних кутах нахилу ψ , Å;

d_0 – міжплощинна відстань, при $\psi = 0^\circ$, Å;

E – модуль пружності, ГПа;

μ – коефіцієнт Пуассона, відносні одиниці.

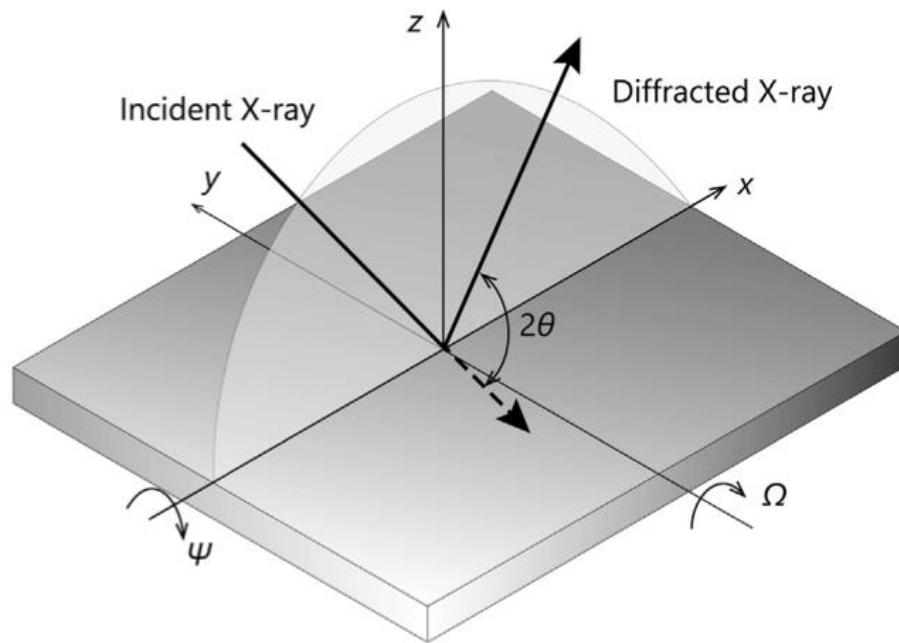


Рисунок 2.7 – «Iso-inclination» (Ω -обертання осі y) та «side-inclination» (ψ -обертання осі x) режими вимірювання залишкових напружень методом $\sin^2\psi$ [39]

Літературні дані щодо модуля пружності (199,5 ГПа) і коефіцієнта Пуассона (0,312) для масивного Ni були використані для розрахунку залишкових напружень [40]. Для визначення величини залишкових напружень в матеріалі необхідно побудувати залежність відносної зміни міжплощинних відстаней від значень $\sin^2\psi$, визначити кут нахилу та підставити використати наступну формулу:

$$\sigma_R = \frac{\tan \alpha \cdot E}{(1 + \mu)}, \quad (2.5)$$

де α – кут нахилу кривої відносної зміни міжплощинних відстаней від значень $\sin^2\psi$, радіани.

2.5 *In-situ* чотирьохзондова резистометрія

Питомий електричний опір ρ твердих матеріалів є однією з найважливіших фізичних властивостей. Питомий електричний опір також використовуються для характеристики та класифікації матеріалів (металів, напівпровідників та ізоляторів). Ця величина є надзвичайно важливою, оскільки вона впливає на ємність, порогову напругу та інші важливі параметри багатьох пристроїв. Для вимірювання електричного опору існує багато різних моделей та методів. Основними факторами, які впливають на придатність різних методів та досягнутої точності є контактний опір матеріалу та форма зразка.

Метод чотирьохзондової резистометрії є оптимальним для вимірювання питомого опору зразків малого розміру. Чотири зонди мають бути розміщені колінеарно з рівною відстанню між ними на зразку (рис. 2.8). Струм пропускається через два зовнішні зонди, а потенціал вимірюється між двома внутрішніми зондами. Похибки, спричинені електричними контактами, відсутні, оскільки підводи струму та напруги розділені [41]. Це широко використовуваний метод вимірювання питомого електричного опору за допомогою поверхневого контакту. Цей метод в основному використовується в напівпровідниковій промисловості, дослідженнях та виробництві.

Питомий електричний опір масивних матеріалів можна розрахувати наступним чином:

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot 2\pi s, \quad (2.6)$$

де ρ – питомий електричний опір, мкОм·см;

s – відстань між двома зондами, мм;

V – напруга, виміряна між внутрішніми зондами, мВ;

I – струм, який подається на зовнішні зондах, мА.

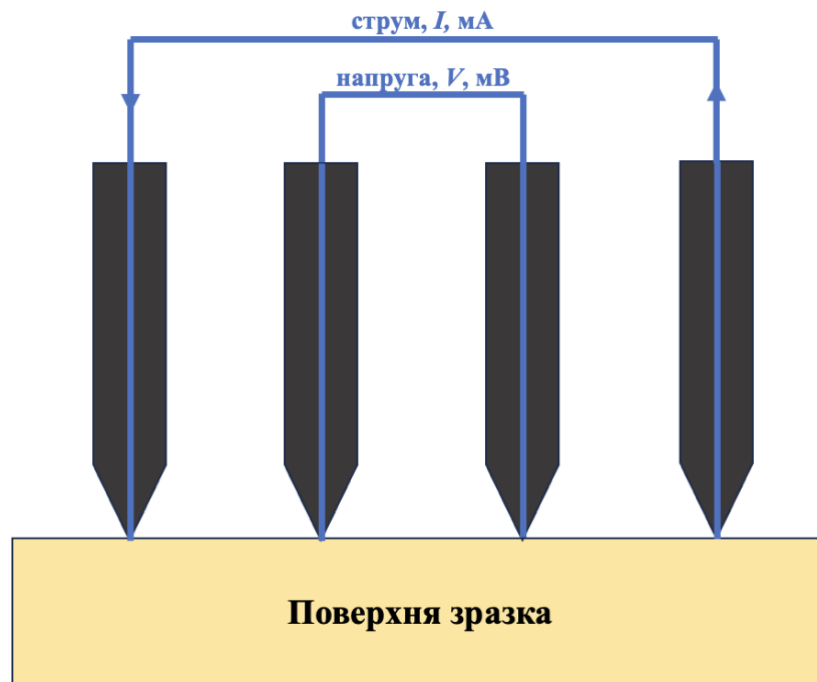


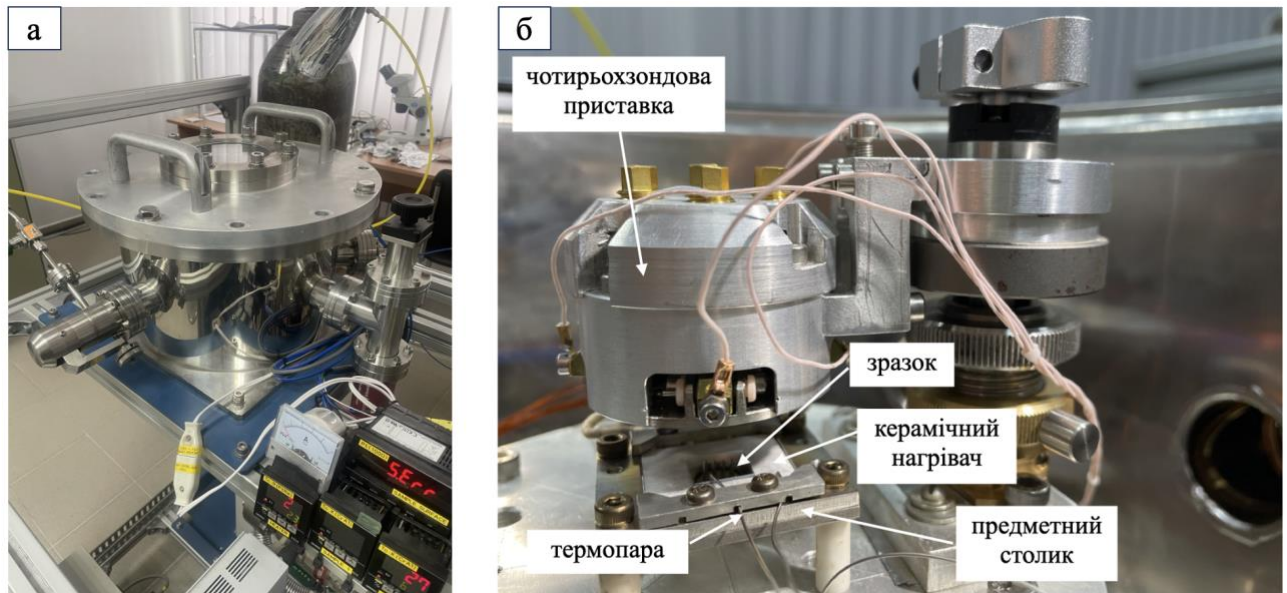
Рисунок 2.8 – Схема вимірювання питомого електричного опору методом чотирьохзондової резистометрії

У випадку тонких металевих плівок, питомий електричний опір плівки, довжина якої значно більша за її товщину, можна отримати за формулою [41]:

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot d \cdot \frac{V}{I} \approx 4,53 \cdot d \cdot \frac{V}{I}, \quad (2.7)$$

де d – товщина тонкоплівкової композиції, нм.

В даній роботі питомий електричний опір усіх багат шарових тонкоплівкових композицій вимірювали за допомогою методу чотирьохзондової *in-situ* резистометрії під час нагрівання та охолодження в діапазоні температур від 30 °С до 150 °С. Дослідження проводилося в вакуумній камері з необхідною приставкою для вимірювання електрофізичних властивостей (рис. 2.9)



а – вакуумна камера, б – приставка для вимірювання електричного опору

Рисунок 2.9 – Устаткування для проведення *in-situ* чотирьохзондової резистометрії

Для зручності проведення розрахунків значення струму для всіх вимірювань дорівнювало 4,53 мА. Відстань між щупами становила 1,6 мм, матеріал, з якого були виготовлені щупи – вольфрам, фоновий тиск у вакуумній камері становив 3×10^{-3} Па, швидкість нагріву була рівною 1 °C/с. Напругу між внутрішніми щупами вимірювали за допомогою мультиметра midi LOGGER GL840, який має похибку вимірювання напруги $\pm 0,02$ мВ, тому похибка вимірювання питомого опору становила $\pm 0,12$ мкОм·см. На рисунку 2.10 схематично зображене необхідне обладнання для проведення *in-situ* вимірювання питомого електричного опору.

Температурний коефіцієнт питомого опору був розрахований з лінійної залежності між питомим електричним опором і температурою [42]:

$$\text{ТКО} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0 \cdot \Delta T}, \quad (2.8)$$

де ρ_0 – питомий опір при кімнатній температурі, мкОм·см;

$\Delta \rho$ — різниця між питомим електричним опором при робочій і кімнатній температурах, мкОм·см;

ΔT — різниця між робочою та кімнатною температурами, $^{\circ}\text{C}$.

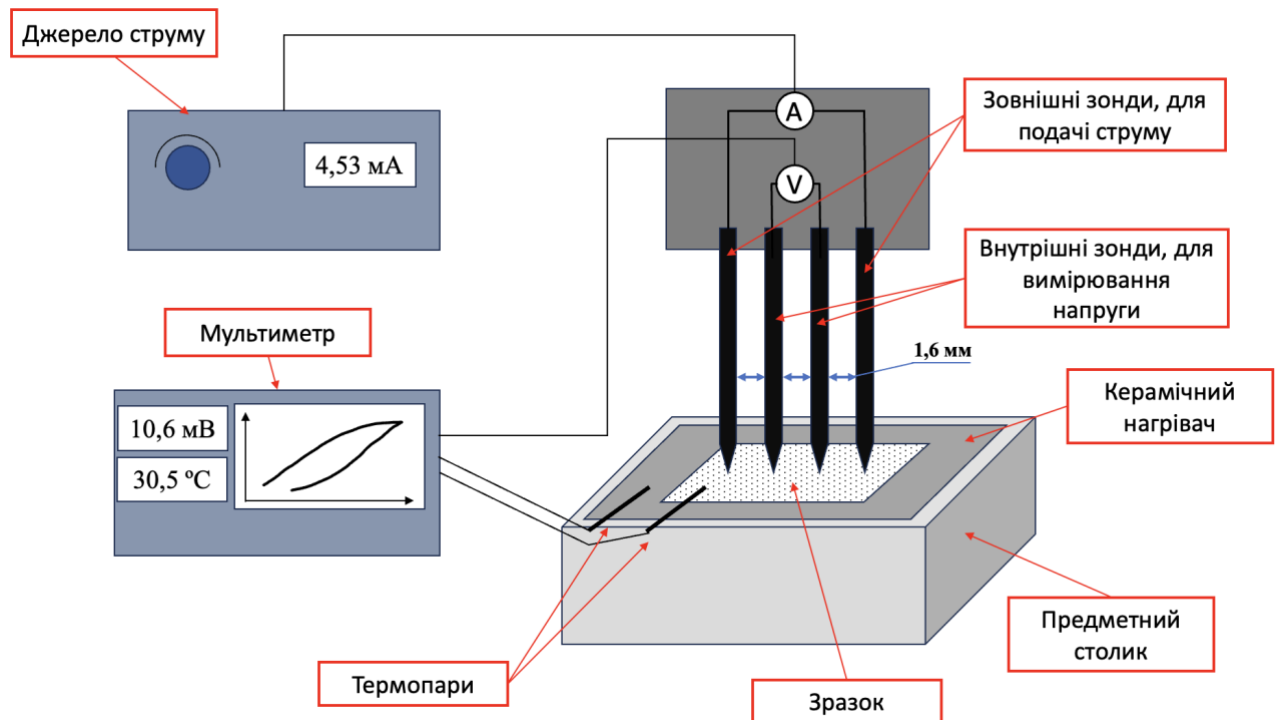


Рисунок 2.10 – Схематичне обладнання для проведення *in-situ* вимірювання питомого електричного опору

Для розрахунку ТКО зазвичай проводять технічний нагрів до температури від $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [43, 44]. В даній роботі застосовано нагрів від кімнатної температури до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значення ТКО розраховувалися з кривої нагріву, оскільки між значеннями ТКО, розрахованими за кривими нагрівання та охолодження, може бути значна різниця, особливо в матеріалах, які зазнають незворотних змін, таких як: фазові переходи, перекристалізація або дифузія. Як наслідок, нахил кривої охолодження може відображати ТКО термічно модифікованого матеріалу, а не вихідного стану. Більш того, нагрів був контрольований, на відміну від охолодження зразка. Для зручності значення температурного коефіцієнту опору було переведено у мільйонні частки на $^{\circ}\text{C}$ (млн.ч/ $^{\circ}\text{C}$).

2.6 Висновки до розділу 2

1. Об'єктами дослідження обрано багатошарові тонкоплівкові композиції Ni/Ti з періодами модуляцій 20 нм, 30 нм та 60 нм, отримані методом радіочастотного магнетронного розпорошення на монокристалічну поліровану підкладку Si(001).

2. Структурні параметри багатошарових тонкоплівкових композицій Ni/Ti з періодами модуляцій 20 нм, 30 нм та 60 нм досліджені методом рентгеноструктурного фазового аналізу.

3. Залишкові напруження багатошарових тонкоплівкових композицій Ni/Ti з періодами модуляцій 20 нм, 30 нм та 60 нм досліджені методом $\sin^2\psi$ у режимі «iso-inclination».

4. Електрофізичні властивості багатошарових тонкоплівкових композицій Ni/Ti з періодами модуляцій 20 нм, 30 нм та 60 нм були досліджені методом *in-situ* чотирьохзондової резистометрії.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Дослідження структурних параметрів в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti з різним періодом модуляції

Структурні параметри в багатошарових тонкоплівкових композиціях Ni/Ti досліджено методом рентгеноструктурного фазового аналізу. На рисунку 3.1 зображені дифрактограми, отримані від багатошарових композицій Ni/Ti з періодами модуляції 20 нм, 30 нм та 60 нм в діапазоні 2θ від 20° до 60° . На дифрактограмі наявні два рефлекси на кутах 2θ $37,8^\circ$ та $44,6^\circ$, які відповідають рефлексам ГЦП-Ti(002) та ГЦК-Ni(111) відповідно. Відсутність найінтенсивнішого рефлексу Ti(101) та наявність піку Ti(002) пов'язане з текстурюванням шару Ti в результаті його росту на монокристалічній підкладці з кристалографічною орієнтацією {001} [12]. Низька інтенсивність рефлексу Ni(200) вказує також на переважну орієнтацію шару Ni {111}. Досить імовірно, що рефлекс Ti(101) зливається з фоном через низький коефіцієнт атомного розсіювання Ti у мідному випромінюванні.

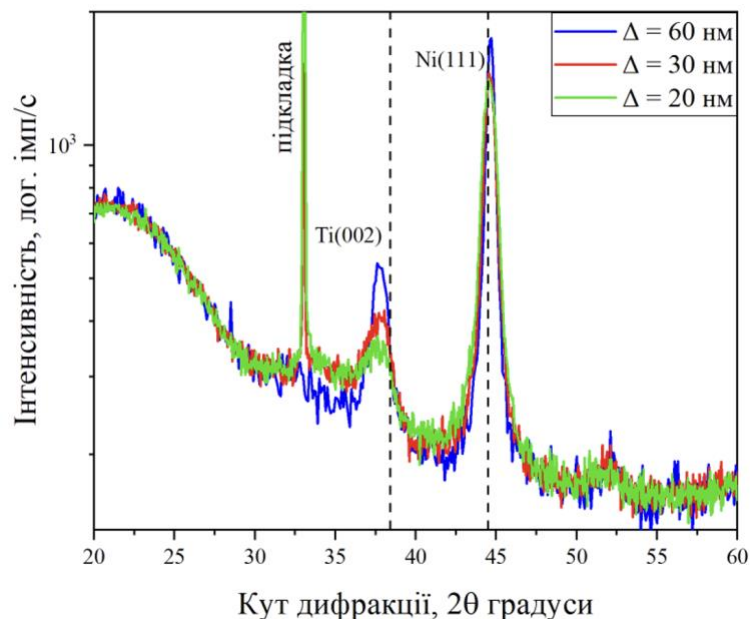


Рисунок 3.1 – Дифрактограми багатошарових композицій Ni/Ti з $\Delta = 20$ нм, 30 нм та 60 нм, в діапазоні 2θ від 20° до 60°

Всі структурні параметри, розраховані за даними рентгеноструктурного фазового аналізу, наведені в таблиці 3.1.

Встановлено, що зменшення Δ від 60 нм до 20 нм зменшує інтенсивність дифракційних піків Ni і Ti і призводить до розширення піків, що свідчить про розупорядкування структури. Встановлено, що зі зменшенням Δ , зменшується розмір ОКР як у Ni (з 12 нм до 8 нм), так і в Ti (з 8 нм до 5 нм). Така поведінка характерна для тонких плівок [25-26] і пов'язана з тим, що максимальний розмір кристалітів обмежений товщиною окремого шару.

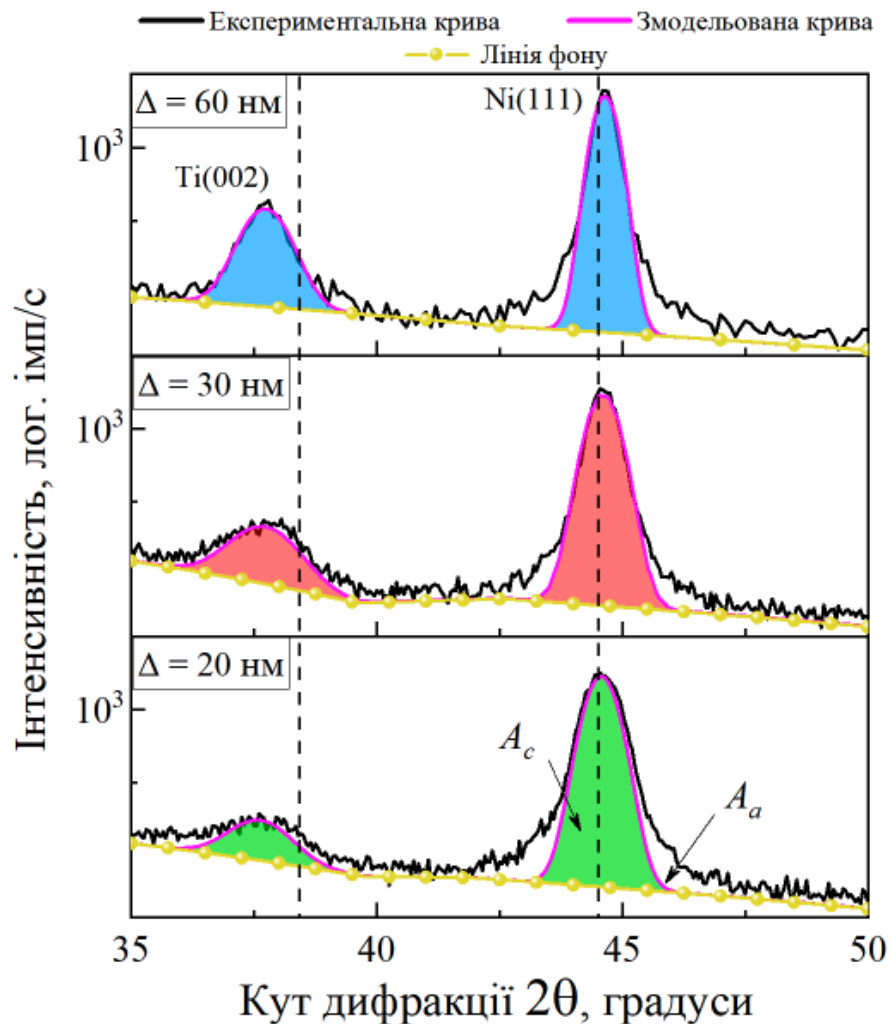
Таблиця 3.1 – Розраховані структурні параметри для багат шарових композицій з періодами модуляції 20 нм, 30 нм та 60 нм

Період модуляції, Δ , нм	Дифракційні рефлекси	Розмір ОКР, D , нм	Ступінь кристалічності, CI , %	Параметр ґратки, a , Å	Параметр ґратки, c , Å
60	Ti(002)	8	82	—	$4,76 \pm 0,01$
	Ni(111)	12		$3,51 \pm 0,01$	—
30	Ti(002)	5	79	—	$4,77 \pm 0,01$
	Ni(111)	9		$3,52 \pm 0,01$	—
20	Ti(002)	5	75	—	$4,79 \pm 0,01$
	Ni(111)	8		$3,52 \pm 0,01$	—

Параметри ґратки були розраховані для Ni і Ti з використанням дифракційних піків (111) і (002) відповідно. Коли Δ зменшується від 60 нм до 20 нм, параметр ґратки Ni залишається майже незмінним (у межах похибки), тоді як у Ti збільшується з $4,76$ Å до $4,79$ Å. Розрахований параметр ґратки Ni добре узгоджується з відповідним масивним значенням, яке становить $3,52$ Å, тоді як кристалічна ґратка Ti значно розтягнута, а її параметр c набагато більший за масивне значення, яке становить $4,68$ Å. Розширення ґратки Ti можна пояснити

кількома факторами: а) насиченістю фоновими домішками з вакуумної камери під час осадження через високу хімічну реакційну здатність Ti; б) нерівноважним ростом плівки, який може бути спричинений «розмірним ефектом»; в) через дифузію атомів Ni в Ti.

На рисунку 3.2 представлені експериментальні дифрактограми, отримані від багатошарових композицій Ni/Ti з періодами модуляції 20 нм, 30 нм та 60 нм в діапазоні 2θ від 35° до 50° , змодельовані криві за допомогою функції Гауса та лінія фону. На основі розрахованих значеннях площ, отриманих з рисунку 3.2, був розрахований ступінь кристалічності.



чорна лінія – експериментальна крива, рожева лінія – змодельована крива за функцією Гауса, жовта лінія – лінія фону

Рисунок 3.2 – Дифрактограми багатошарових композицій Ni/Ti з різним Δ в діапазоні 2θ від 35° до 50°

Розрахунки, вказують, що ступінь кристалічності зменшується від 82 % до 75 % зі зменшенням Δ від 60 нм до 20 нм. Це підтверджує, що плівки формуються в нанокристалічному стані і мають певний ступінь неупорядкованості, яка зростає зі зменшенням Δ .

Враховуючи, що в даній роботі відбувався нагрів до 150 °С (для визначення температурного коефіцієнту опору), то додатково була проведена зйомка дифрактограм багатошарових композицій з різними періодами модуляції після нагріву до 150 °С. На рисунку 3.3 зображені дифрактограми багатошарової композиції Ni/Ti з $\Delta = 20$ нм у вихідному стані та після нагріву до 150 °С. Як випливає з отриманих даних, розміри ОКР, ступені кристалічності та параметри ґраток у вихідному стані та після нагрівання до 150 °С не змінюються (табл. 3.2). Результати також вказують на відсутність рефлексів оксидних фаз. Зміни також не спостерігалися в багатошарових композиціях з періодами модуляції 30 нм та 60 нм.

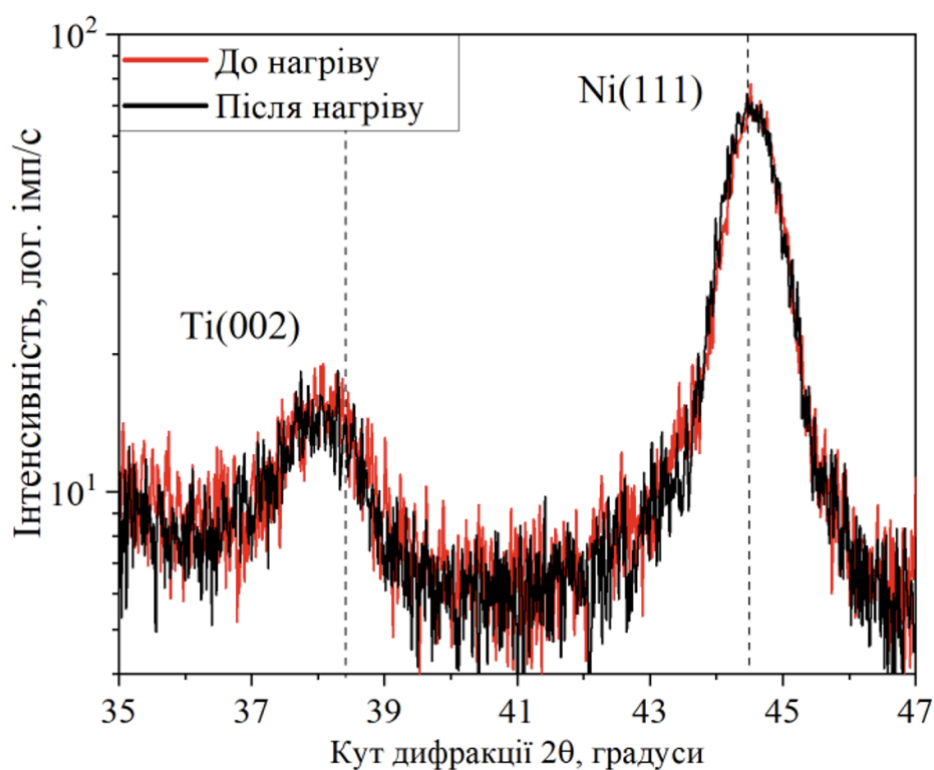


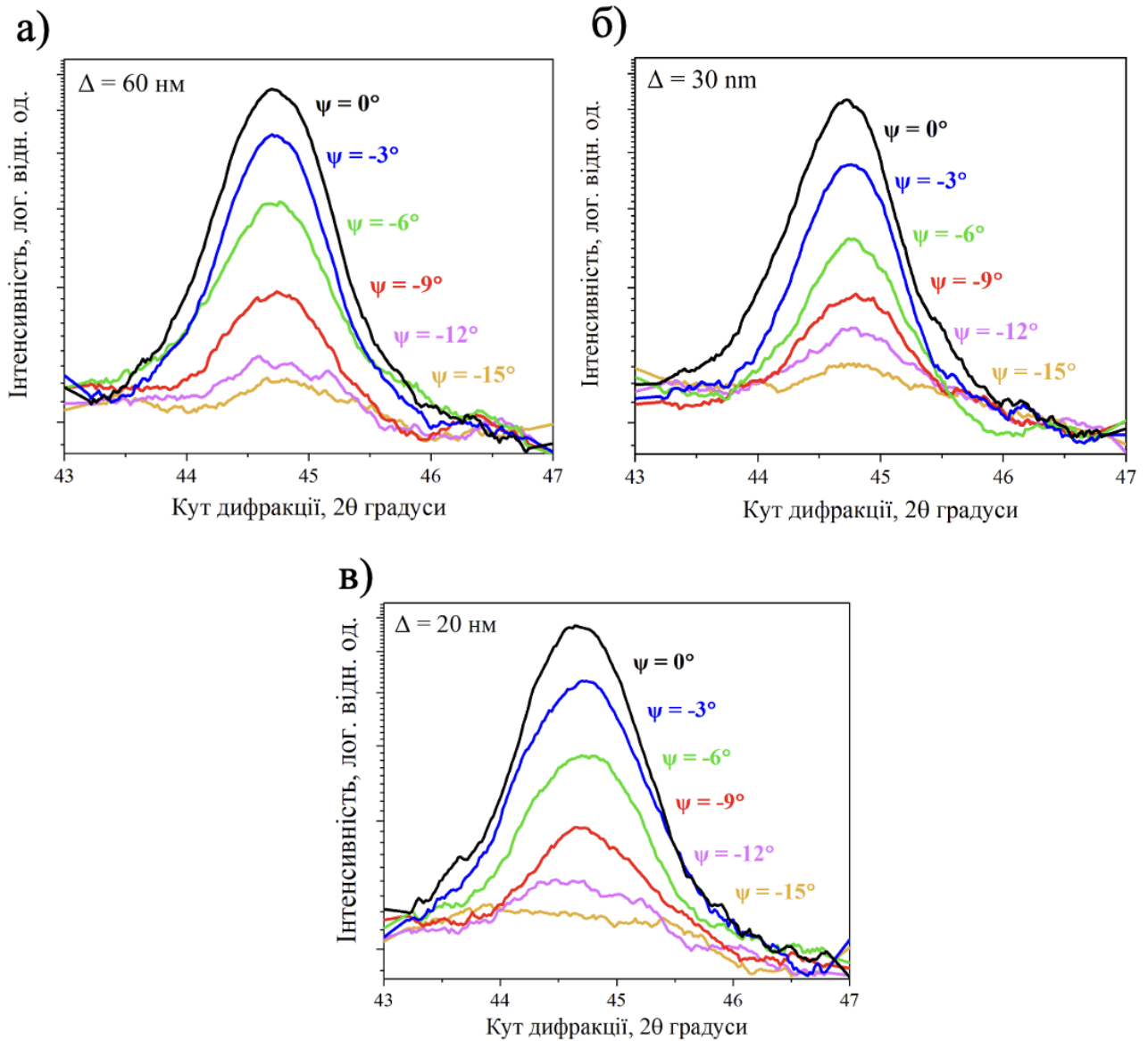
Рисунок 3.3 – Порівняння дифрактограм багатошарової композиції Ni/Ti з $\Delta = 20$ нм у вихідному стані (червона лінія) та після нагріву до 150 °С (чорна лінія)

Таблиця 3.2 – Порівняння структурних параметрів для багатошарової композиції з періодами модуляції 20 нм

	До нагріву		Після нагріву	
Дифракційні рефлекси	Ti(002)	Ni(111)	Ti(002)	Ni(111)
Розмір ОКР, D , нм	5	9	5	9
Ступінь кристалічності, CI , %	79		79	
Параметр ґратки, a , Å	–	$3,52 \pm 0,01$	–	$3,52 \pm 0,01$
Параметр ґратки, c , Å	$4,77 \pm 0,01$	–	$4,77 \pm 0,01$	–

3.2 Визначення залишкових напружень в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti з різним періодом модуляції

Дифрактограми від Ni(111) для багатошарових композицій з різним періодом модуляції, в діапазоні 2θ від 43° до 47° з різними кутами нахилу ψ , зображені на рисунку 3.4. Через низьку інтенсивність Ti аналіз залишкових напружень проводився лише для фази Ni шляхом зміни значень кута ψ : 0° , - 3° , - 6° , - 9° , - 12° , - 15° . Можна побачити, що інтенсивність піку Ni поступово зменшується зі збільшенням величини кута ψ і його положення трохи зміщується в бік більших кутів 2θ .



а – $\Delta = 60$ нм, б – $\Delta = 30$ нм, в – $\Delta = 20$ нм

Рисунок 3.4 – Дифрактограми рефлексу Ni(111) для багатошарових композицій при різних кутах нахилу ψ ($\psi = 0^\circ$, -3° , -6° , -9° , -12° та -15°)

Для визначення величини залишкових напружень розраховано міжплощинні відстані для різних кутів ψ (табл. 3.3). Відповідно до цих значень, були розраховані відносні зміни міжплощинних відстаней, які побудовані на рисунку 3.5 в залежності від відповідних значень $\sin^2\psi$. Можна побачити, що кут нахилу залежності відносної зміни міжплощинних відстаней від значень $\sin^2\psi$ негативний для всіх зразків, величина якого збільшується зі зменшенням періоду

модуляції. Це вказує на те, що залишкова напруга є стискаючою і відповідає - 5,78 ГПа, -8,91 ГПа, -11,74 ГПа для Δ 60 нм, 30 нм і 20 нм відповідно.

Таблиця 3.3 – Значення міжплощинних відстаней багат шарових композицій з періодами модуляції 20 нм, 30 нм та 60 нм при різних кутах ψ

Період модуляції, Δ , нм	Міжплощинна відстань, d , Å					
	$\psi = 0^\circ$	$\psi = -3^\circ$	$\psi = -6^\circ$	$\psi = -9^\circ$	$\psi = -12^\circ$	$\psi = -15^\circ$
60	2,027	2,027	2,027	2,026	2,024	2,022
30	2,027	2,025	2,024	2,025	2,022	2,018
20	2,028	2,027	2,027	2,024	2,022	2,018

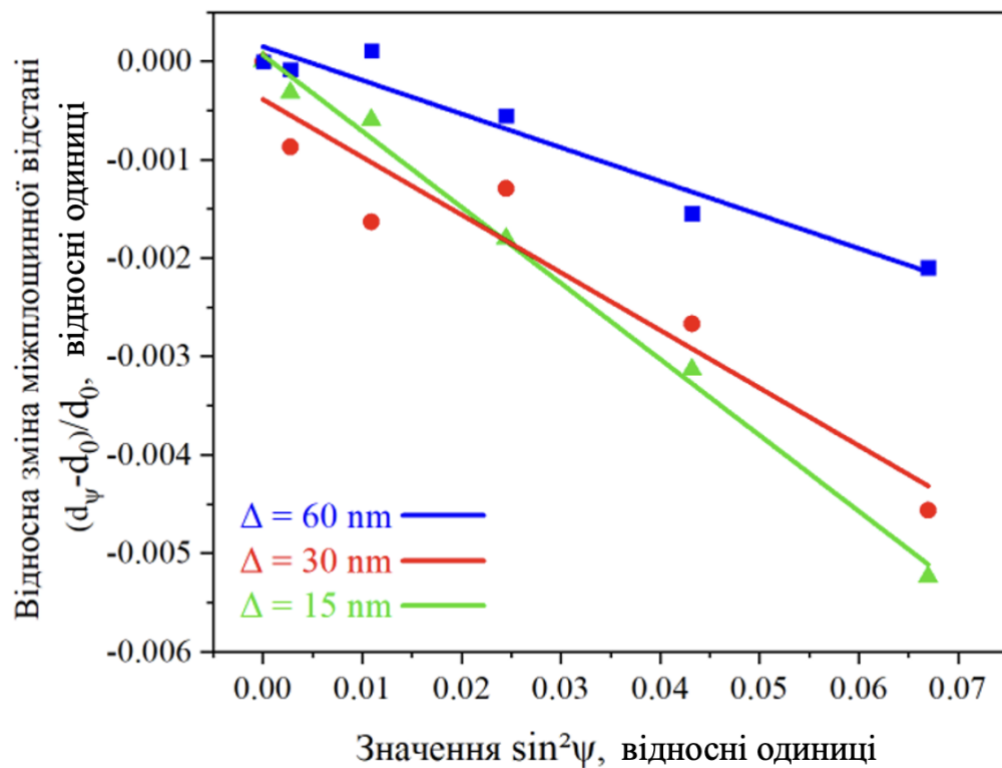


Рисунок 3.5 – Залежність відносної зміни міжплощинних відстаней зі зміною величини $\sin^2\psi$ для багат шарових композицій з періодами модуляції 20 нм, 30 нм та 60 нм

Як вже згадувалося раніше напруження формуються в тонкоплівкових композиціях на стадії осадження і залежать від багатьох параметрів. Саме тому наявність стискаючих залишкових напружень в шарі Ni в даних багат шарових композиціях Ni/Ti може бути пов'язано з низькою швидкістю осадження шарів. Наприклад, у роботі [45] досліджувалися залишкові напруження в тонких плівках Ni. Автори виявили, що коли швидкість росту падає нижче критичного значення (0,42 нм/с), напруження стають стискаючим і зростають зі зменшенням швидкості росту. Враховуючи, що швидкість росту в нашому випадку становить 0,16 нм/с, то цілком логічно очікувати, що напруження в шарі Ni будуть стискаючими. Крім того, слід враховувати, що зростання шару Ni, який текстурований в напрямку [111], на шарі Ti, який текстурований в напрямку [0001], призводить до значної невідповідності їх ґраток. Оскільки шари Ni та Ti орієнтовані вздовж різних кристалографічних напрямків, параметри ґраток відрізняються в різних напрямках, що може призводити до утворення залишкових напружень на границях розділу. Оскільки у Ni більший параметр ґратки порівняно з Ti, він прагне розтягуватися в площині під час осадження, в результаті чого виникають стиснення. Іншою причиною виникнення напружень стиснення може бути розчинення Ni і Ti на границях розділу. Це може бути зумовлений наявністю аморфної фази через її більший молярний об'єм, як зазначено в роботі [20].

Крім того, чим менше Δ , тим більш стискаючими будуть залишкові напруження (рис. 3.6). Отже, можна припустити, що ці стискаючі напруження також пов'язані з утворенням аморфної фази на границях розділу шарів Ni та Ti. Наприклад, у роботі [46] було виявлено, що залишкові стискаючі напруження (- 0,46 ГПа) у вихідному стані багат шарових Mo/Si композицій збільшилося до -15,31 ГПа після відпалу при 316 °C протягом 20 хвилин у результаті утворення аморфного проміжного шару MoSi₂. У нашому випадку збільшення величини залишкових стискаючих напружень може бути аналогічно пов'язане з наявністю тонкого аморфного проміжного шару на границях розділу Ni/Ti, який формується вже на етапах осадження багат шарових композицій.

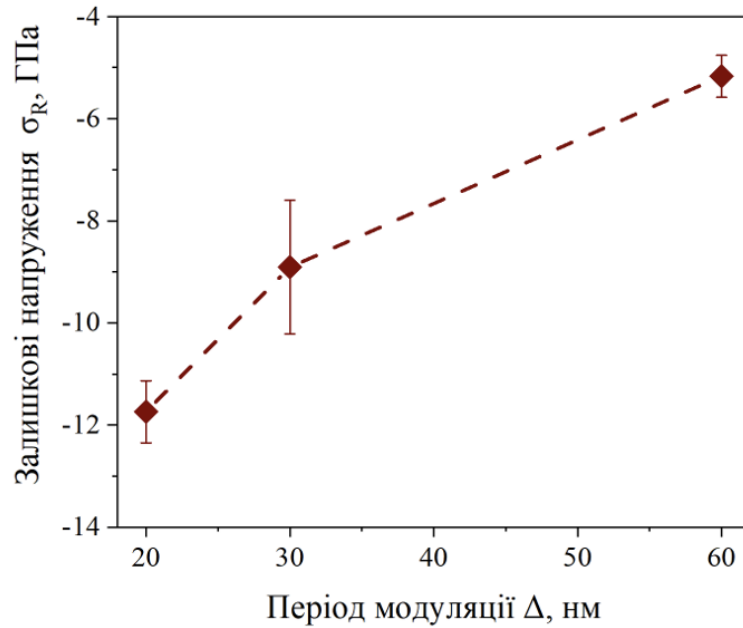


Рисунок 3.6 – Залежність величини залишкових напружень від періоду модуляції для багат шарових композицій Ni/Ti

3.3 Визначення електрофізичних властивостей в тонкоплівкових композиціях Ni/Ti з різним періодом модуляції

На рисунку 3.7 показані залежності питомого електричного опору від температури, виміряні під час нагрівання та охолодження в одному вакуумному циклі в діапазоні температур від 30 °C до 150 °C. Відразу після осадження (при температурі 30 °C) ρ становив 81,78 мкОм·см, 89,58 мкОм·см і 93,14 мкОм·см для багат шарових композицій з Δ 60 нм, 30 нм і 20 нм відповідно. Композиції Ni/Ti з меншим Δ мають більший ρ , оскільки збільшення кількості границь розділу зменшує довжину вільного пробігу електрона. Це спостереження добре узгоджується з теоріями Фукса-Зондхаймера [47, 48] і Майядаса-Шацкеса [49], які вказують на те, що опір тонких металевих композицій вищий, ніж у масивних зразках, і збільшується зі зменшенням товщини шарів. Це пов'язано з тим, що зі зменшенням розмірів питомий електричний опір більше залежить від розсіювання на границях розділу та границях зерен. При нагріванні ρ усіх багат шарових композицій зростає лінійно зі збільшенням температури, що характерно для металів. Це спричинено сильнішими коливаннями кристалічної

ґратки та більшим розсіюванням електронів, викликаним підвищенням температури.

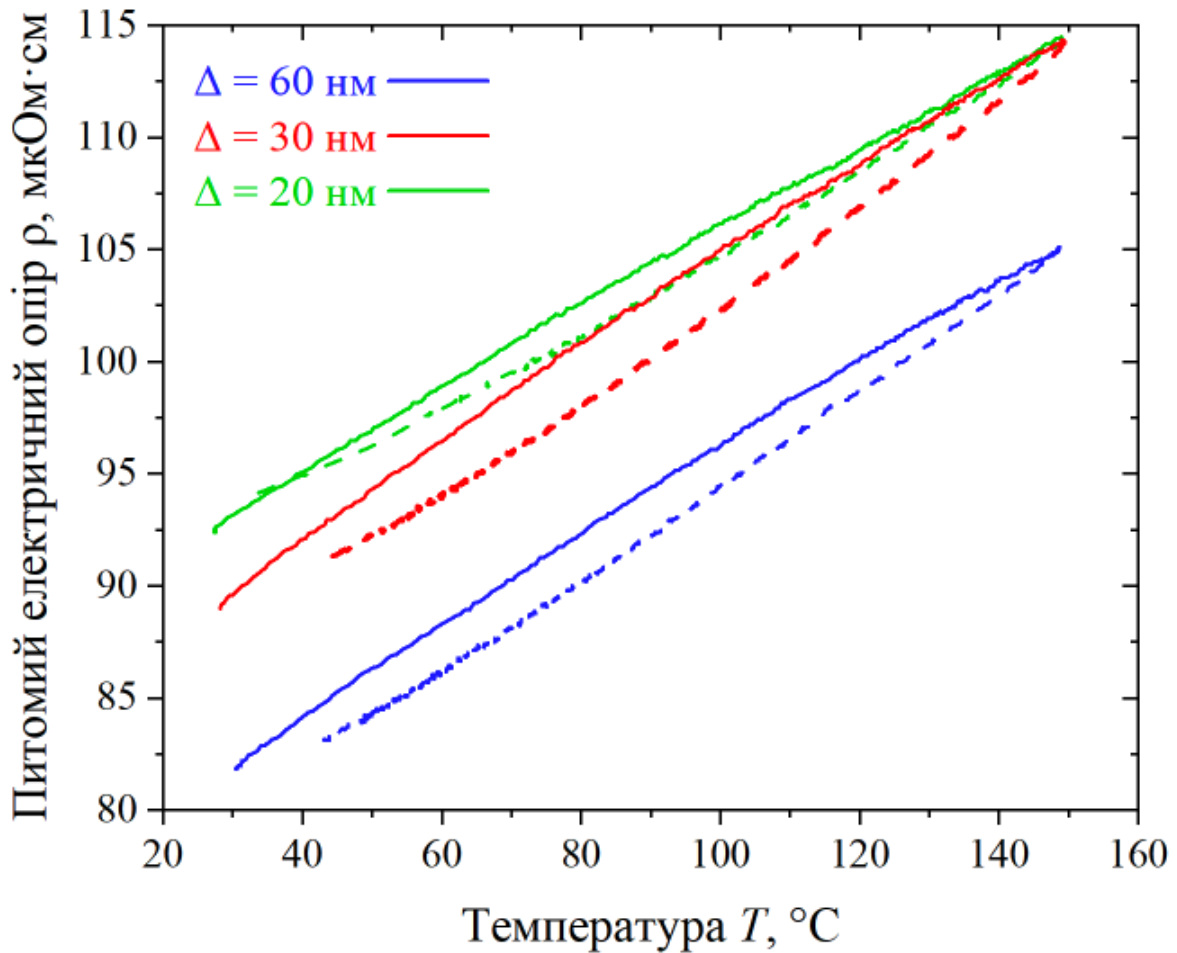


Рисунок 3.7 – Температурна залежність питомого електричного опору для тонкоплівкових композицій з різним періодом модуляції ($\Delta = 20$ нм, 30 нм, 60 нм)

Усі тонкоплівкові композиції Ni/Ti показали оборотну залежність питомого електроопору, але після охолодження до 30 °C, значення питомого електричного опору склали: 81,11 мкОм·см, 89,13 мкОм·см і 93,46 мкОм·см для композицій з Δ 60 нм, 30 нм і 20 нм, відповідно. Значення питомого електричного опору у вихідному стані та після циклу нагріву-охолодження наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Електрофізичні параметри багатошарових композицій Ni/Ti з періодами модуляції 20 нм, 30 нм та 60 нм

Період модуляції, Δ , нм	Питомий електричний опір, мкОм·см			Температурний коефіцієнт опору ТКО, ppm/°C
	Вихідний стан, ρ_1	Після циклу нагрів-охолодження, ρ_2	Зміна питомого електричного опору до та після нагріву, $\rho_1 - \rho_2$	
60	81,78	81,11	0,67	2380
30	89,58	89,13	0,45	2270
20	93,14	93,46	-0,32	1890

Спостерігається, що ρ зменшився на 0,67 мкОм·см для $\Delta = 60$ нм і на 0,45 мкОм·см для $\Delta = 30$ нм порівняно з вихідним станом, а для $\Delta = 20$ нм – навпаки, питомий опір збільшився на 0,32 мкОм·см. Зменшення ρ для композицій з Δ 60 нм та 30 нм можна пояснити тим, що тонкі плівки формуються в нерівноважному стані під час осадження і мають високу щільність структурних дефектів, які можуть бути усунені на в процесі нагрівання [50]. Для найменшого Δ (20 нм) приріст ρ може вказувати на додаткові структурні зміни. Однак не було виявлено жодних структурних змін на рентгенограмі після нагрівання до 150 °C порівняно з його ненагрітим станом (рис. 3.3).

На рисунку 3.8 показано лінійну залежність відносної зміни питомого електричного опору зі зміною температури для всіх досліджуваних багатошарових композицій. На основі цієї залежності були розраховані значення температурного коефіцієнта опору (ТКО) як нахил кривої. ТКО вказує на те, з якою швидкістю буде змінюватися опір зі зміною температури. Значення

становлять 2380 млн.ч./°C, 2270 млн.ч./°C і 1890 млн.ч./°C для тонкоплівкових композицій з Δ 60 нм, 30 нм і 20 нм, відповідно (табл. 3.4).

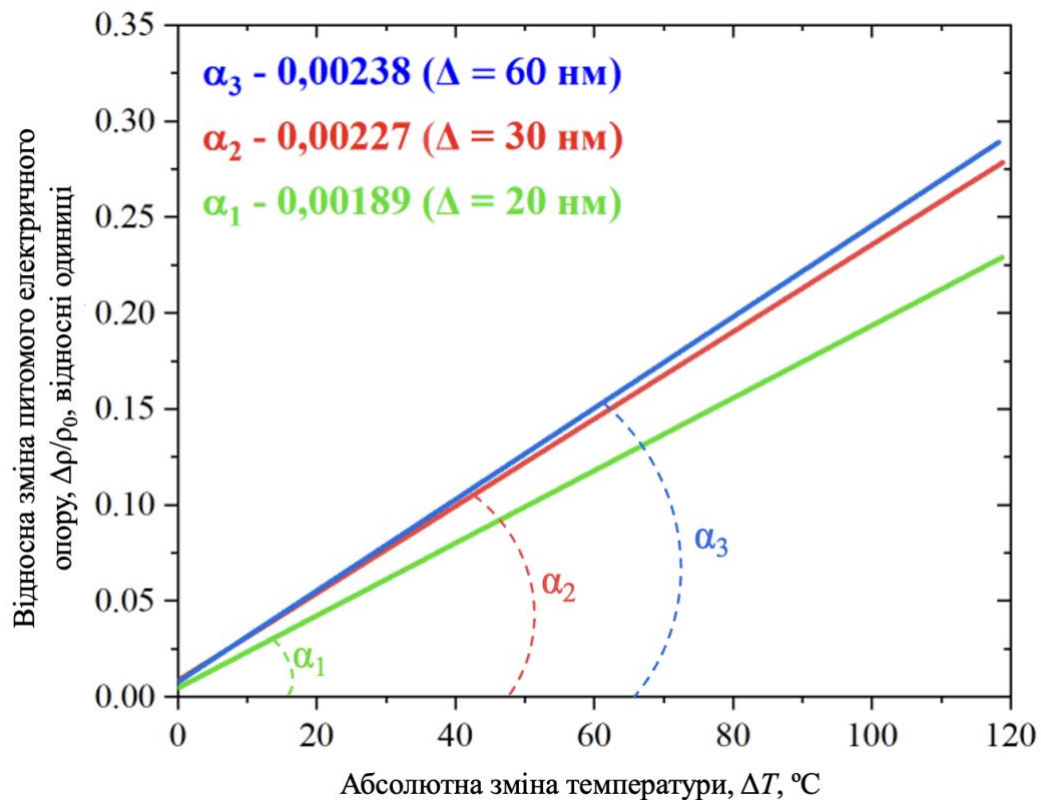


Рисунок 3.8 – Залежність відносної зміни питомого електричного опору зі зміною температури для багат шарових композицій з періодами модуляції 20 нм, 30 нм та 60 нм

На рисунку 3.9 показано, що чим менше період модуляції, тим менше значення температурного коефіцієнту опору і вище значення питомого електричного опору. Згідно з літературними даними, зменшення ТКО з одночасним збільшенням питомого електричного опору загалом може бути пов'язане з декількома факторами: зменшенням розміру ОКР [51], поверхневим окисненням [51] та аморфізацією границь розділу [25, 26].

Оскільки результати рентгеноструктурного фазового аналізу вказують на те, що зі зменшенням періоду модуляції з 60 нм до 30 нм, розмір ОКР значно зменшується (від 8 нм до 5 нм для Ti; від 12 нм до 9 нм для Ni), значення ТКО демонструють лише незначну зміну (від 2380 млн.ч./°C до 2270 млн.ч./°C). І

навпаки, коли період модуляції зменшується з 30 нм до 20 нм, розмір ОКР залишається майже незмінним (розбіжність не перевищує похибки вимірювання розміру ОКР за формулою Шеррера), тоді як значення ТКО демонструють найбільшу зміну (від 2270 млн.ч./°C до 1890 млн.ч./°C). Ці закономірності призводять до висновку, що розмір ОКР не відіграє домінуючої ролі у зменшенні ТКО.

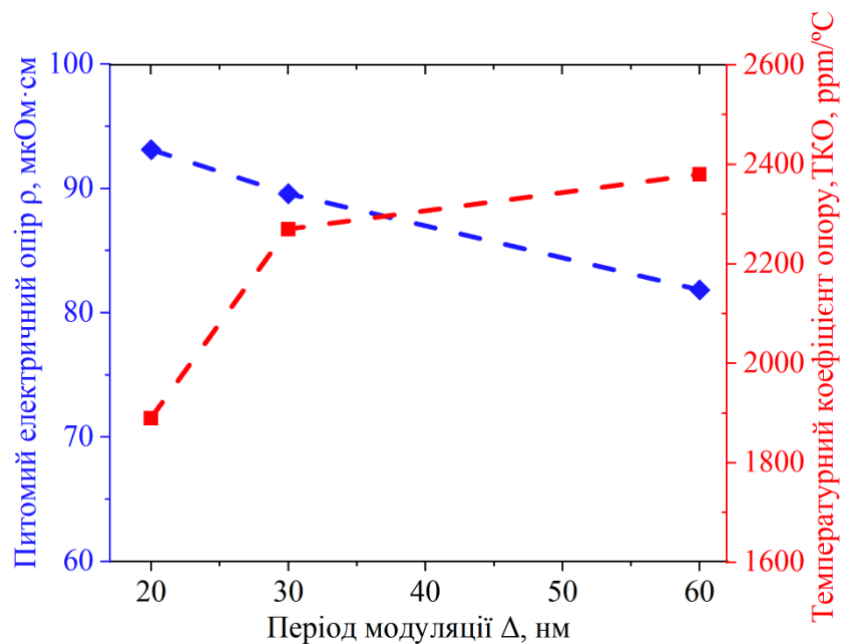


Рисунок 3.9 – Залежності питомого електричного опору (ρ) та температурного коефіцієнту опору (ТКО) від періоду модуляції (Δ)

У роботі [52] показано, що окиснення плівкових багатошарових композицій Ni/Ti з утворенням діоксиду титану на поверхні відбувається при значно вищій температурі (500 °C), ніж застосована в цьому дослідженні. Отже, найімовірніше, що зниження ТКО зі зменшенням Δ не пов'язане з окисненням поверхні, а є результатом аморфізації твердого тіла. Крім того, на дифрактограмах після циклу нагріву-охолодження також не було виявлено рефлексів від оксидних фаз (рис. 3.3).

Таким чином, аморфізація границь розділу цілком може бути причиною зменшення ТКО з одночасним збільшенням питомого електричного опору у вихідному стані. Можна припустити, що існує критичний Δ в діапазоні від 20 нм

до 30 нм, при якому спричинений аморфізацією приріст ρ , після циклу нагріву-охолодження стає домінуючим і повністю перекриває зменшення, спричинене усуненням дефектів.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Проаналізовано структурні параметри багат шарових композицій Ni/Ti з різним періодом модуляції. Встановлено, що ступінь кристалічності зменшується зі зменшенням періоду модуляції, що вказує на розвиток твердотільної аморфізації на границях розділу у вихідному стані.

2. Розрахунок залишкових напружень показав, що Ni у багат шарових композиціях Ni/Ti з різним періодом модуляції має стискаючі напруження. Встановлено, що величина залишкових напружень може бути пов'язана зі збільшенням твердотільної аморфізації на границях розділу у вихідному стані зі зменшенням Δ .

3. Показано, що збільшення питомого електричного опору у багат шарових композиціях Ni/Ti зі зменшенням періоду модуляції пов'язано з більшою кількістю границь розділу та границь зерен. Зменшення величини ТКО зі зменшенням Δ свідчить про збільшення ступеня твердотільної аморфізації на границях розділу у вихідному стані.

4. Встановлено, що метод чотирьохзондової *in-situ* резистометрії є чутливим до незначних структурних змін, які відбуваються при нагріві до 150 °C. Для періодів модуляції 60 нм та 30 нм відбувається відпал дефектів, а для 20 нм спостерігається аморфізація границь розділу.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність

Науково-технічна актуальність дослідження зумовлена високим попитом на функціональні матеріали з ефектом пам'яті форми (ЕПФ) для застосування в мікроелектромеханічних системах (МЕМС), де до матеріалів висуваються особливі вимоги щодо стабільності, точності відгуку, біосумісності та мініатюризації. Одним з найперспективніших матеріалів цього класу є сплав NiTi, який поєднує ЕПФ, хорошу корозійну стійкість, механічну міцність і можливість інтеграції з кремнієвими підкладками. Отримання тонких плівок еквіатомного складу NiTi є технічно складним завданням через різницю в коефіцієнтах розпорошення нікелю і титану. Тому альтернативним є підхід поетапного нанесення окремих шарів з наступним перемішуванням під час відпалу. Проте у таких багатошарових системах вже на етапах осадження та під час відпалу спостерігається аморфізація на межах розділу, яка суттєво впливає на кінетику фазоутворення та властивості матеріалу.

Науково-технічне значення роботи визначається також тим, що результати можуть бути використані для вдосконалення технологій виробництва багатошарових композицій NiTi з контрольованими властивостями, що важливо для машинобудування. Отримані дані сприяють глибшому розумінню процесів аморфізації в композиціях Ni/Ti з періодом модуляції 20 нм, 30 нм та 60 нм.

4.2 Розрахунок собівартості науково-дослідної роботи (НДР)

Розрахунок усіх складових витрат, необхідних для здійснення досліджень НДР, дозволяє визначити собівартість або кошторисну вартість теми. До цих витрат належать: витрати на оплату праці, відрахування на соціальні заходи, витрати на матеріали дослідження, спеціальне обладнання, послуги сторонніх організацій, службові відрядження, інші безпосередні витрати, а також інші

накладні витрати. За допомогою планування кошторису можливо оптимізувати витрати на виконання роботи та досягти високого результату.

4.2.1 Витрати на оплату праці

Оплата праці виконавців розраховується з урахуванням трудомісткості робіт по темі (табл. 4.1) та на основі посадових окладів виконавців (табл. 4.2). Середньоденна заробітна плата виконавців розраховувалася шляхом ділення їх посадового місячного окладу на усереднене число робочих днів за місяць, яке дорівнює 21,2. Трудові витрати оцінювалися за часом, витраченим на кожен етап дослідження, з урахуванням можливих труднощів і непередбачених обставин. Це сприяло ефективному плануванню роботи та вибору оптимальної стратегії для досягнення цілей. Фонд заробітної плати розраховують як добуток середньоденної заробітної плати виконавців на заплановану трудомісткість робіт.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість робіт по темі

Найменування етапів по темі дослідження	Трудомісткість за виконавцями, людино-днів		
	Доцент	Старший викладач	Інженер-дослідник
Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	1	—	2
Аналіз науково-технічних публікацій з теми	—	—	12
Обґрунтування мети та напрямів дослідження	2	—	2
Розробка методики проведення дослідження	3	2	6
Проведення дослідження	5	2	15

Таблиця 4.2 – Трудомісткість робіт по темі

Посада виконавців теми	Планова трудомісткість, люд-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
Доцент	16	23 055,97	1 087,55	17 400,8
Старший викладач	8	20 224,35	953,98	7 631,84
Інженер-дослідник	46	9 840	464,15	21 350,9
Разом оплата праці з теми				46 383,54

4.2.2 Єдиний соціальний внесок

Обов'язковим платежем на загальнообов'язкове державне соціальне страхування є єдиний соціальний внесок (ЄСВ), який з 1 січня 2016 року становить 22 %. Нарахування здійснюється на загальний фонд заробітної плати (ФЗП) за темою:

$$\text{ЄСВ} = \text{ФЗП} \cdot 0,22 = 46\,383,54 \cdot 0,22 = 10\,204,38 \text{ грн.}$$

4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

Для НДР використовувалися три зразки багат шарових нанорозмірних композицій Ni/Ti із різним періодом модуляції (20 нм, 30 нм та 60 нм) з загальною товщиною 60 нм. Витрати на необхідні матеріали разом із супутніми транспортно-заготівельними витратами (B_m) склали 12 200 грн.

4.2.4 Енергоносії для проведення досліджень

У НДР не здійснювалося проведення плавок, нанесення покриттів, а також інших операцій, що потребують значних витрат енергоносіїв, зокрема електроенергії, тому прямі витрати на енергоносії не розраховувалися і враховані в кошторисі непрямо через статтю «Накладні витрати».

4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання

Дослідження проводилися з використанням наявного, раніше придбаного обладнання, витрати на закупівлю приладдя та устаткування не включаються до фінальної вартості дослідження.

4.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій

У межах виконання дипломної НДР залучення сторонніх організацій не передбачалося. Витрати за цією статтею відсутні.

4.2.7 Витрати на службові відрядження

Під час реалізації дипломної НДР службові відрядження не здійснювалися. Відповідно, витрати за цією статтею не передбачені.

4.2.8 Інші прямі невраховані витрати

До цієї статті включено витрати, безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт, які не були враховані в попередніх статтях кошторису. Для орієнтовної оцінки інших прямих неврахованих витрат (I_v) застосовується норматив у розмірі 10 % від загального обсягу витрат на виконання НДР:

$$I_v = (46\,383,54 + 10\,204,38 + 12\,200) \cdot 0,1 = 6\,878,79 \text{ грн.}$$

4.2.9 Накладні витрати

Накладні витрати включаються до калькуляції кошторисної вартості теми пропорційно витратам на оплату праці основних виконавців або сумі прямих витрат на виконання дослідження – згідно з діючими нормативами організації-виконавця. До складу цієї статті входять витрати на загальне управління організацією, витрати на винахідництво та раціоналізацію, амортизацію основних засобів, науково-технічну інформацію, забезпечення умов праці та техніки безпеки, оплату банківських послуг, податки, збори, інші обов’язкові платежі та супутні витрати. Був розглянутий підхід до розрахунку загальних накладних витрат (H_v) пропорційно сумі прямих витрат на рівні 20 %:

$$H_v = (46383,54 + 10204,38 + 12200 + 6878,79) \cdot 0,2 = 15133,34 \text{ грн.}$$

4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Планова калькуляція вартості проведення досліджень по темі складається на підставі виконаних розрахунків та нормативних даних (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1	2	3
Витрати на оплату праці	46 383,54	Відповідно до розрахунків
Єдиний соціальний внесок	10 204,38	22 % від загальних витрат на оплату праці
Матеріали для проведення досліджень	12 200,00	Відповідно до розрахунків

Продовження таблиці 4.3

1	2	3
Енергоносії для проведення досліджень	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
Спецобладнання для наукових цілей	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
Вартість послуг сторонніх організацій	—	За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
Витрати на службові відрядження	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
Інші невраховані прямі витрати по темі	6 878,79	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
Накладні витрати	15 133,34	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
Усього витрат по темі	90 800,05	Сума попередніх статей

4.3 Науково-технічна ефективність НДР

Розрахунок очікуваного економічного ефекту науково-дослідної роботи необхідний для обґрунтування доцільності її проведення. Такий розрахунок є доцільним у випадках, коли дослідження спрямоване на створення нових матеріалів, підвищення якісних характеристик продукції, оптимізацію технологічних процесів або впровадження нових конструктивних рішень. Для

визначення річного економічного ефекту використовують бальну систему оцінювання економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів розробки (K_2);
- теоретичне значення та рівень новизни (K_3);
- складність дослідження (K_4).

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.
- результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;
- результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

- робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;

- під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

- внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

- внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

- отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

- роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;

- роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;

- роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;

- робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;

- робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів:

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4.$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 4.4 становить:

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 3 \cdot 8 \cdot 3 \cdot 5 = 360.$$

Таблиця 4.4 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
Важливість розробки	К ₁	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
Можливість використання результатів розробки	К ₂	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	8
Теоретична значимість та рівень новизни розробки	К ₃	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
Складність дослідження	К ₄	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

Умовний ефект ($E_{\text{НДР}}^y$) НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot Б - E_n \cdot V_{\text{НДР}},$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах від 0,1 до 0,3);

$V_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР, грн (підсумок табл. 4.3).

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 360 - 0,25 \cdot 90\,800,05 = 157\,299,99 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності (E_e). Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}}.$$

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = \frac{157\,299,99}{90\,800,05} = 1,732.$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 1,732 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

4.4 Висновки до розділу 4

1. В розглянутому розділі було визначено планову кошторисну вартість (собівартість) дипломної роботи, яка склала 90 800,05 грн.

2. Проведений економічний аналіз доцільності дослідження, що було проведено під час виконання дипломної роботи вказує на те, що дане дослідження є доцільним з економічної точки зору.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є важливим елементом сучасного виробничого процесу та невід’ємною складовою системи управління будь-якого підприємства або науково-дослідного підрозділу. Основна мета охорони праці полягає у створенні безпечних і здорових умов праці шляхом виявлення, попередження та усунення потенційно шкідливих і небезпечних факторів, що можуть негативно впливати на працівників у процесі виконання професійних обов’язків [53]. Система охорони праці охоплює комплекс організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних, профілактичних та інших заходів, спрямованих на мінімізацію виробничих ризиків. Вона включає аналіз небезпечних виробничих факторів, розробку засобів індивідуального і колективного захисту, навчання персоналу правилам безпеки, а також контроль за дотриманням чинних нормативно-правових актів у сфері охорони праці.

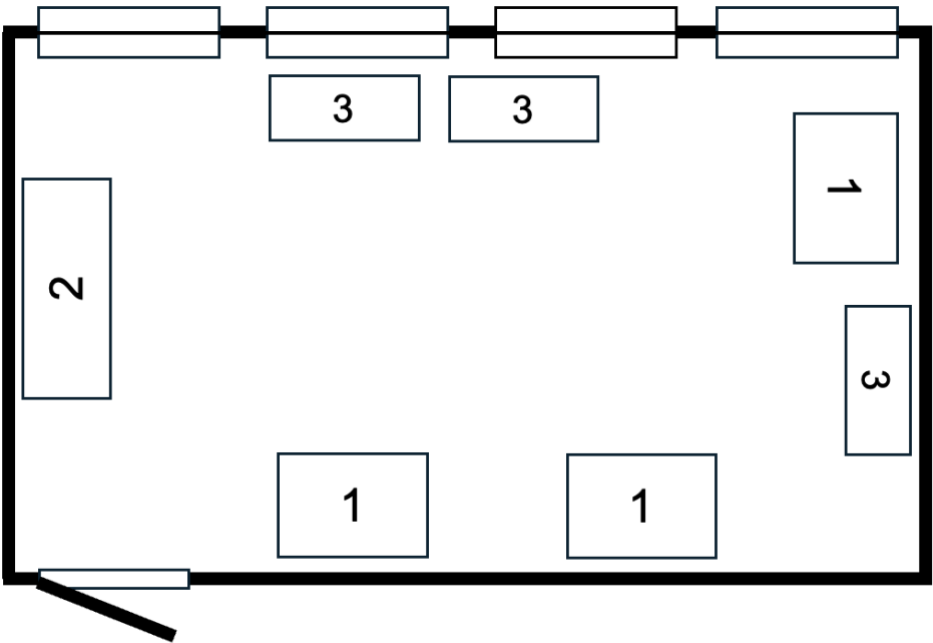
Метою даного розділу є аналіз умов праці під час виконання дипломної роботи, виявлення можливих небезпечних та шкідливих факторів, які можуть виникати під час дослідження тонкоплівкових композицій Ni/Ti, а також розробка заходів щодо їх усунення або зменшення до допустимого рівня.

5.1 Характеристика приміщення

Дослідження виконувались на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Приміщення призначене для виконання експериментальних досліджень із використанням вимірювальної апаратури, комп’ютерної техніки та допоміжного обладнання.

План приміщення наведений на рисунку 5.1. Геометричні параметри приміщення зведені в таблиці 5.1. В лабораторії одночасно працюють троє осіб. Загальна площа лабораторії становить 24 м^2 , а висота стелі – 3 м, що забезпечує об’єм 72 м^3 . Таким чином, на одного працівника припадає по 8 м^2 площі та $25,6 \text{ м}^3$

об’єму, що перевищує мінімально допустимі норми (6 м² площі та 20 м³ об’єму на робоче місце), згідно з чинними санітарними вимогами [54].



1 – стіл, 2 – вакуумна камера, 3 – шафа для зразків

Рисунок 5.1 – Схема лабораторного приміщення

Таблиця 5.1 – Параметри приміщення

Параметри	Кількісна характеристика
Розміри приміщення	6 м × 4 м × 3 м
Кількість працюючих	3
Площа приміщення	24 м ²
Об’єм приміщення	72 м ³

Підлога лабораторії викладена матовою керамічною плиткою, яка має рівну, неслизьку поверхню з коефіцієнтом відбиття в межах від 0,3 до 0,5. Це забезпечує зручність пересування та відповідає вимогам до приміщень з використанням відеодисплейних терміналів.

У лабораторії встановлена вентиляційна система з витяжним відводом, яку можна вмикати вручну за допомогою вимикача. Це дозволяє ефективно видаляти

шкідливі пари, продукти розігріву матеріалів та забезпечує належний повітрообмін у приміщенні.

5.2 Аналіз штучного та природнього освітлення у приміщенні

Освітлення робочого приміщення є важливим чинником для забезпечення комфортних і безпечних умов праці. Правильно організоване освітлення позитивно впливає на зорову працездатність, зменшує втому очей, підвищує концентрацію уваги та ефективність виконання інтелектуальної і фізичної роботи. Категорія робіт, що виконуються у даній лабораторії, належить до четвертого розряду зорових робіт (середня точність). Згідно з [54], значення освітлення освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів має становити від 300 лк до 500 лк. Приміщення лабораторії обладнане чотирма вікнами розміром приблизно 1,4 м × 1,8 м кожне, які розташовані на одній південній стороні будівлі. Така орієнтація забезпечує ефективне природне освітлення впродовж більшої частини дня. Світлові прорізи забезпечують достатній коефіцієнт природного освітлення, який відповідає вимогам будівельних норм. Усі вікна оснащені регульованими горизонтальними жалюзі, що дозволяють змінювати інтенсивність та напрямок світлового потоку відповідно до часу доби та погодних умов, тим самим запобігаючи засліпленню та надмірному яскравому освітленню.

Штучне освітлення в лабораторії забезпечується люмінесцентними лампами типу ЛБ-40, встановленими у чотирьох стельових світильниках. Лампи білого світла (ЛБ) мають спектр, наближений до природного, що сприятливо впливає на зір і знижує рівень зорового навантаження під час тривалої роботи за комп'ютером та з технічним обладнанням. Світильники рівномірно розташовані по площі стелі, що виключає утворення темних зон або різких перепадів яскравості у зоні робочих столів.

5.3 Небезпечні та шкідливі фактори

Під час виконання науково-дослідної роботи в лабораторії, зокрема під час вимірювання електричного опору зразків із нагрівом, виникають низка небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що можуть впливати на стан здоров'я та працездатність виконавця. Ідентифікація таких факторів є необхідною для розробки ефективних заходів безпеки та зниження ризиків для користувачів лабораторного обладнання. Шкідливі фактори та можливі небезпеки, які можуть бути на місці виконання науково-дослідної роботи представлено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Небезпечні та шкідливі фактори

Фізичні	Хімічні	Біологічні	Психофізіологічні
Мікроклімат, шум та вібрації, електронебезпека	Відсутні	Відсутні	Відсутні

5.3.1 Мікроклімат

Мікроклімат у приміщенні є важливим чинником, що впливає на самопочуття, працездатність та безпеку виконавців науково-дослідної роботи. До основних параметрів мікроклімату належать: температура повітря, відносна вологість, швидкість руху повітря, теплове випромінювання від приладів та устаткування.

Систематичне провітрювання приміщення через вікна, які виходять на південну сторону, що забезпечує природну вентиляцію. Установлена механічна витяжна вентиляція, яку можна вмикати вручну через окремий вимикач, дозволяє оперативно видаляти тепле повітря та можливі газоподібні продукти нагріву зразків.

Враховуючи характер виконуваної роботи – вимірювання електрофізичних параметрів зразків при нагріванні та обробці результатів за допомогою

персонального комп'ютера – категорія важкості праці відноситься до Іб (легка праця, переважно сидячи). Відповідно до [55], для цієї категорії роботи оптимальні параметри мікроклімату наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Небезпечні та шкідливі фактори

Період року	Виміряні фактичні величини		
	Температура, °C	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/с
Холодний	21	70	0,1
Теплий	25	55	0,1

У лабораторії кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки були проведені вимірювання параметрів мікроклімату, результати зібрані в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Небезпечні та шкідливі фактори

Період року	Оптимальна температура, °C	Оптимальна відносна вологість, %	Оптимальна швидкість руху повітря, м/с
Холодний	21 – 23	60 – 40	0,1
Теплий	22 – 24	60 – 40	0,2

Як видно з порівняльного аналізу, фактичні параметри мікроклімату відповідають гранично допустимим межах, встановленим для категорії Іб, що дозволяє забезпечити безпечні та комфортні умови праці для виконавців.

5.3.2 Шум та вібрації

У процесі виконання експериментальних досліджень в лабораторії одним із основних джерел шуму є форвакуумний механічний сухий насос, який

використовується для створення зниженого тиску в дослідницьких установках. Під час його роботи виникає низькочастотний механічний шум, рівень якого може сягати від 70 дБ до 75 дБ поблизу обладнання.

Згідно з [56], для категорії робіт, які виконуються у лабораторії, гранично допустимий рівень постійного шуму не повинен перевищувати 80 дБ. Оскільки насос працює періодично, середній рівень шуму залишається в межах допустимих норм. За потреби можливе використання засобів індивідуального захисту слуху, зокрема протишумові навушники.

Крім шуму, насос є також джерелом вібрацій, які передаються через підлогу. Вплив вібрацій є короткочасним, локалізованим і не перевищує допустимих рівнів для вібраційного навантаження на руки або тіло. У лабораторії проведено встановлення гумових амортизуючих прокладок під насосом, що дозволяє зменшити передачу вібрацій на тверді поверхні. Це сприяє зниженню загального вібраційного фону в приміщенні.

5.3.3 Електробезпека

У лабораторії під час виконання експериментальних досліджень використовується низка електротехнічного обладнання, зокрема вакуумна камера, форвакуумні насоси, чотирьохзондова приставка для визначення електричного опору, а також допоміжні прилади, що живляться від мережі змінного струму напругою 220 В. За класифікацією, це електроустановки до 1000 В, і вони становлять потенційну небезпеку у разі порушення правил експлуатації або технічної несправності. Відповідно до [57] робоче приміщення належить до категорії приміщень без підвищеної небезпеки.

Основні заходи з електробезпеки в лабораторії включають:

- застосування заземлення усіх приладів;
- використання автоматичних вимикачів в електричній мережі;
- проведення регулярної перевірки ізоляції проводів та справності розеток;

- використання справних електрошнурів та вилок, які відповідають стандартам безпеки;
- навчання персоналу правилам електробезпеки, а також дій у разі ураження електричним струмом.

Особлива увага приділяється організації робочого місця під час експериментів із використанням електронагріву або вакуумного обладнання, де існує ризик ураження струмом внаслідок високої температури або вологості. Усі включення та відключення обладнання здійснюються лише через справні вимикачі, заборонено торкатися приладів мокрими руками або за наявності пошкоджень проводки. Дотримання встановлених заходів дозволяє звести до мінімуму ризику ураження електричним струмом.

5.4 Заходи забезпечення безпеки праці

Робоче місце – це простір, в якому відбувається трудова діяльність працівників. Для максимальної ефективності роботи та збереження здоров'я персоналу в науково-дослідних установах і на виробництвах дотримуються норм організації праці на робочому місці. Організація праці на робочому місці – це система заходів, що забезпечує ефективне, раціональне та безпечне використання обладнання, матеріалів і простору, а також сприяє підвищенню продуктивності праці та зменшенню виробничих ризиків. Вона передбачає як технічні, так і організаційні методи забезпечення безпеки працівників під час виконання науково-дослідних робіт. Тому у лабораторії визначено відповідні зони для проведення вимірювань, підготовки зразків та обробки даних. Це дозволяє уникнути випадкового контакту з небезпечним обладнанням або процесами. Прилади та апаратура розташовані на робочих столах таким чином, щоб забезпечити зручність обслуговування, вільний доступ до елементів управління та мінімізацію напруження для зору та м'язів.

Для виконання науково-дослідної роботи обрана робоча поза сидячи, оскільки основна частина експериментальної та аналітичної роботи виконується

за допомогою персонального комп'ютера. Під час виконання НДР робоче місце відповідало вимогам [54], які сприяють зменшенню статичної втоми, навантаженню на зір і опорно-руховий апарат:

- монітор розташований на відстані в межах від 400 мм до 800 мм від очей, площа екрана перпендикулярна лінії зору, передбачено регулювання нахилу в межах від 85° до 105° ;
- клавіатура конструктивно відокремлена, розміщена на поверхні столу на відстані від 100 мм до 300 мм від його краю, з кутом нахилу від 5° до 15° , висота не перевищує 30 мм;
- робочий стіл має ширину 900 мм та глибину 600 мм та оптимальну висоту 725 мм;
- робоче крісло регулюється по висоті (в межах від 260 мм до 460 мм), спинка підтримує поперек, має регулювання кута нахилу до 30° та відстані до сидіння;
- сидіння має ширину 400 мм, глибину 400 мм, з можливістю змінювати нахил від $+15^{\circ}$ до -5° .

5.5 Пожежна безпека

Забезпечення пожежної безпеки в лабораторії здійснюється згідно з вимогами [58] та відповідно до чинного законодавства України у сфері пожежної безпеки. Відповідно до вимог [58], лабораторія за пожежною небезпекою відноситься до категорії «Д» (приміщення з наявністю негорючих речовин і матеріалів у холодному стані або з нагріванням, у якому використовується обмежена кількість горючих матеріалів).

Найбільшу пожежну небезпеку несе в собі обладнання, яке знаходиться в приміщенні та проводка, що прокладена для його живлення. Коротке замикання може призвести до появи пожежі у приміщенні. Для виявлення пожежі в приміщенні встановлені автоматичні датчики, також оповіщення про пожежу можливе за допомогою службового зв'язку.

У лабораторному приміщенні передбачено:

- наявність вуглекислотного вогнегасника у легкодоступному місці;
- відповідне маркування місць розташування первинних засобів пожежогасіння;
- чіткий інструктаж персоналу щодо дій у разі виникнення пожежі;
- дотримання вимог щодо електробезпеки та експлуатації нагрівального обладнання (електрична вакуумна камера, насосне обладнання, блоки живлення тощо);
- регулярний огляд і технічне обслуговування електрообладнання.

Евакуація з приміщення здійснюється відповідно до затвердженого плану евакуації (рис. 5.2), що розміщений на видимому місці біля виходів. План включає схему переміщення до евакуаційного виходу та перелік дій персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації. Працівники лабораторії ознайомлені з маршрутом евакуації, проходили первинний і повторний інструктажі з пожежної безпеки та знають порядок дій при виявленні загоряння.

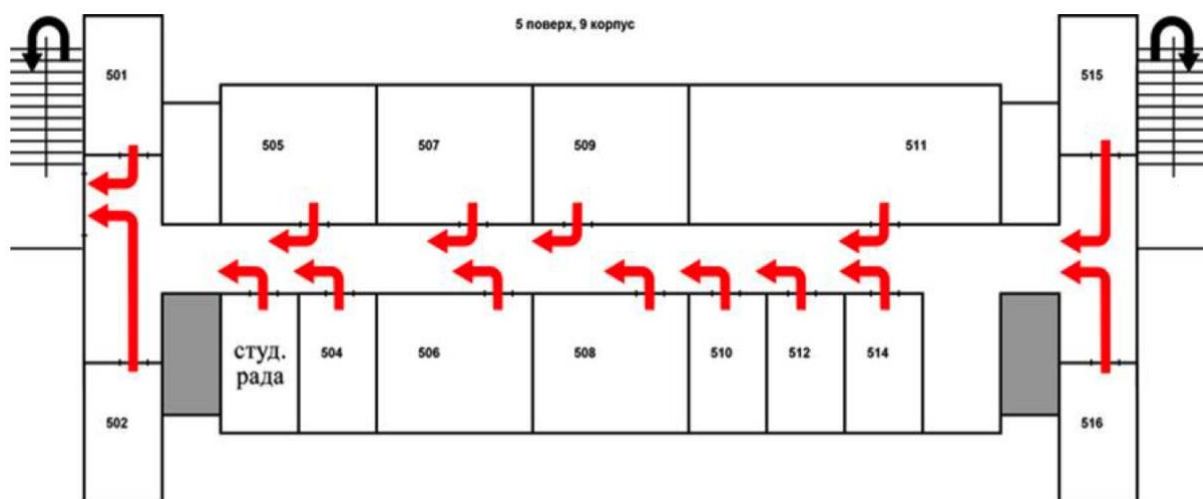


Рисунок 5.2 – План евакуації

5.6 Висновки до розділу 5

1. Лабораторне приміщення повністю відповідає санітарним нормам за площею, об'ємом, вентиляцією та покриттям підлоги для безпечної роботи з обладнанням.
2. Природне та штучне освітлення в лабораторії відповідає вимогам для зорових робіт середньої точності та забезпечує комфортні умови праці.
3. У процесі роботи присутні фізичні шкідливі фактори (мікрокліматичні умови, шум, вібрації, електричне обладнання), однак їх рівень не перевищує гранично допустимих норм.
4. Робочі місця організовано відповідно до вимог та норм, що забезпечує комфортну і безпечну позу сидячи при роботі з ПК.
5. Приміщення належить до категорії пожежної небезпеки «Д» і відповідає вимогам пожежної безпеки згідно з чинними стандартами, план евакуації затверджено і розміщено в доступному місці.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літератури свідчить, що твердотільна аморфізація границь розділу у багат шарових композиціях Ni/Ti відбувається на стадії осадження. Це впливає на подальше формування фази з ЕПФ та визначає перспективність застосування плівок Ni/Ti у нейтронній оптиці.

2. Опановано такі методи аналізу, як: рентгеноструктурний фазовий аналіз, рентгенографічний аналіз залишкових напружень, *in-situ* чотирьохзондова резистометрія.

3. Аналіз структурних параметрів, залишкових напружень та електрофізичних властивостей багат шарових композиціях Ni/Ti показав, що зі зменшенням періоду модуляції збільшується ступінь аморфізації границь розділу.

4. Встановлено, що метод чотирьохзондової *in-situ* резистометрії є чутливим до незначних структурних змін, які відбуваються при нагріві до 150 °C. Зокрема, для періодів модуляції 60 нм та 30 нм відбувається відпал дефектів, а для періоду модуляції 20 нм – домінує аморфізація границь розділу.

5. Вимірювання електрофізичних властивостей методом чотирьохзондової резистометрії представляє потенційний інтерес для застосування для вивчення початкових етапів аморфізації твердого тіла в інших багат шарових структурах.

6. Розрахована планова кошторисна вартість дипломної науково-дослідної роботи, яка становить 90 800,05 грн. Проведений аналіз вказує на те, що дане дослідження є доцільним з економічної точки зору.

7. Проаналізовано та встановлено, що умови праці в лабораторному приміщенні відповідають вимогам охорони праці, санітарно-гігієнічним та протипожежним нормам. Це забезпечує безпечне та комфортне виконання науково-дослідної роботи.

CONCLUSIONS

1. Literature analysis indicates that solid-state amorphization of the interfaces in Ni/Ti multilayer films occurs during the deposition stage. This influences the subsequent formation of the shape memory effect phase and determines the potential of these films for applications in neutron optics.

2. The following analytical methods were mastered: X-ray phase analysis, X-ray residual stress analysis, and in-situ four-point probe resistivity measurements.

3. The analysis of structural parameters, residual stresses, and electrophysical properties of Ni/Ti multilayer films indicates that a decrease in modulation period leads to an increased degree of amorphization at the interfaces.

4. It was determined that the in-situ four-point probe resistivity measurements is sensitive to minor structural changes occurring during slight heating up to 150 °C. For modulation periods of 60 nm and 30 nm, defect annealing takes place, while for a modulation period of 20 nm, amorphization of the interfaces is observed.

5. Measuring electrophysical properties using the four-point probe resistivity measurements holds potential for studying the initial stages of solid-state amorphization in other multilayer structures.

6. The estimated planned cost of the diploma research work was calculated to be 90 800,05 UAH. The conducted analysis indicates that the research is economically feasible.

7. It was analyzed and confirmed that the working conditions in the laboratory comply with occupational safety, sanitary-hygienic, and fire safety regulations. This ensures safe and comfortable execution of the research work.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Development trends and perspectives of future sensors and MEMS/NEMS / Jianxiong Zhu [et al.] // *Micromachines*. – 2019. – V. 11. – № 1. – P. 7.
2. Choudhary N. Shape memory alloy thin films and heterostructures for MEMS applications: a review / Nitin Choudhary, Davinder Kaur // *Sensors and actuators A: physical*. – 2016. – V. 242. – P. 162–181.
3. Optimization of thermal deflection in NiTi-based bimorph microactuators / Vlad Bolocan [et al.] // *Materials today: proceedings*. – 2021. – V. 45. – P. 4216–4220.
4. Sputter-Deposited ni-rich niti thin films: mechanical behavior and composition sensitivity / Ji-Young Kim [et al.] // *Materials science and engineering: a*. – 2024. – P. 146960.
5. Chu K. Reducing functional fatigue, transition stress and hysteresis of NiTi micropillars by one-step overstressed plastic deformation / Kangjie Chu, Qingping Sun // *Scripta materialia*. – 2021. – V. 201. – P. 113958.
6. A survey on crystallization kinetic behavior of direct current magnetron sputter deposited NiTi thin films / Jafar Khalil-Allafi [et al.] // *Physica B: condensed matter*. – 2021. – V. 615. – P. 413086.
7. Current global scenario of Sputter deposited NiTi smart systems / Ajit Behera [et al.] // *Journal of materials research and technology*. – 2020. – V. 9. – № 6. – P. 14582–14598.
8. Shilei Z. Microstructure and phase transition characteristics of niti shape memory alloy / Zhao Shilei, Zhao Kun, Wang Fuwen // *Journal of physics: conference series*. – 2020. – V. 1653. – P. 012045.
9. Sanjabi S. The effect of film composition on the structure and mechanical properties of NiTi shape memory thin films / S. Sanjabi, Z. H. Barber // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – V. 204. – № 8. – P. 1299–1304.
10. The effect of heating rate on the phase transformation of Ni/Ti multilayer thin films / A. J. Cavaleiro [et al.] // *Vacuum*. – 2017. – V. 139. – P. 23–25.

11. Microstructural and mechanical properties of dissimilar nitinol and stainless steel wire joints produced by micro electron beam welding without filler material / Sebastian Hellberg [et al.] // *Welding in the world*. – 2020. – V. 64. – № 12. – P. 2159–2168.

12. Sputter-deposited Ni/Ti double-bilayer thin film and the effect of intermetallics during annealing / Ajit Behera [et al.] // *Surface and interface analysis*. – 2016. – V. 49. – № 7. – P. 620–629.

13. Takaoka G. H. Surface irradiation and materials processing using polyatomic cluster ion beams / Gikan H. Takaoka, Hiromichi Ryuto, Mitsuaki Takeuchi // *Journal of materials research*. – 2012. – V. 27. – № 5. – P. 806–821.

14. A new fabrication process for Ni–Ti shape memory thin films / T. Lehnert [et al.] // *Materials science and engineering: a*. – 1999. – V. 273-275. – P. 713–716.

15. Structural phase transitions in Ni/Ag/Ti and Ni/Cu/Ti tri-layered thin films / Ivan Kruhlov [et al.] // *Vacuum*. – 2025. – V. 233. – P. 113999.

16. Phase transformations in Ni/Ti multilayers investigated by synchrotron radiation-based x-ray diffraction / A. J. Cavaleiro [et al.] // *Journal of alloys and compounds*. – 2015. – V. 646. – P. 1165–1171.

17. Interdiffusion in as-deposited Ni/Ti multilayer thin films analyzed by atom probe tomography / Hisham Aboulfadl [et al.] // *Materials letters*. – 2019. – V. 236. – P. 92–95.

18. Solid-state reaction in Ti/Ni multilayers studied by magneto-optical and optical spectroscopies, and X-ray diffraction / Y. P. Lee [et al.] // *The european physical journal B*. – 2002. – V. 26. – № 1. – P. 41–50.

19. Morphology control in ni/ti multilayer neutron mirrors by ion-assisted interface engineering and B₄C incorporation / Fredrik Eriksson [et al.] // *Optical materials express*. – 2023.

20. Hollanders M. A. Amorphization along interfaces and grain boundaries in polycrystalline multilayers: An x-ray-diffraction study of Ni/Ti multilayers /

Mark A. Hollanders, Barend J. Thijsse, Eric J. Mittemeijer // *Physical review B*. – 1990. – V. 42. – № 9. – P. 5481–5494.

21. Thermal stability of nanometer range Ti/Ni multilayers / Rachana Gupta [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2006. – V. 515. – № 4. – P. 2213–2219.

22. Effect of modulation period on the thermally-induced solid-state reactions in ni/ti thin films / I. O. Kruhlov [et al.] // *Metallofizika i noveishie tekhnologii*. – 2024. – V. 45. – № 7. – P. 843–856.

23. Blanpain B. Crystallization of solid-state amorphized Al-Pt thin films / B. Blanpain, L. H. Allen // *Thin solid films*. – 1994. – V. 248. – № 2. – P. 257–262.

24. Structure and electrical properties of co/ta multilayered thin films / Shi-Hui Ge [et al.] // *Physica status solidi (a)*. – 1993. – V. 136. – № 1. – P. 89–98.

25. Evidence for amorphization in NiTi multilayers from electrical resistivity changes / Anja van der Graaf [et al.] // *Materials science and engineering: a*. – 1991. – V. 133. – P. 636–639.

26. Bouhki M. Amorphization of Ni/Ti multilayers studied by electrical conductance measurements / M. Bouhki, A. Bruson, P. Guilmin // *Solid state communications*. – 1991. – V. 80. – № 9. – P. 663–667.

27. Simon A. H. Sputter processing / Andrew H. Simon // *Handbook of Thin Film Deposition*. – [S. l.], 2025. – P. 93–140.

28. Wasa K. Sputtering phenomena / Kiyotaka Wasa // *Handbook of sputtering technology*. – [S. l.], 2012. – P. 41–75.

29. Transparent ZnO thin-film transistor fabricated by rf magnetron sputtering / P. F. Carcia [et al.] // *Applied physics letters*. – 2003. – V. 82. – № 7. – P. 1117–1119.

30. Surface engineering for bone implants: a trend from passive to active surfaces / Ruggero Bosco [et al.] // *Coatings*. – 2012. – V. – № 3. – P. 95–119.

31. Growth of sputter-deposited Ni-Ti thin films: Effect of a SiO₂ buffer layer / R. M. S. Martins [et al.] // *Applied physics A*. – 2006. – V. 84. – № 3. – P. 285–289.

32. Effect of SiO₂ buffer layer on properties of sputter-deposited NiTi shape memory alloy thin films / X. Huang [et al.] // *Surface and coatings technology*. – 2003. – V. 1672-3. – P. 148–153.

33. Bragg W. L. The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal proceedings of the cambridge philosophical society, 17, 43–57 (1913). communicated by professor sir J. J. thomson. read 11 november 1912. / W. L. Bragg // X-ray and neutron diffraction. – [S. l.], 1966. – P. 109–125.

34. Moderne Röntgenbeugung / Lothar Spieß [et al.]. – Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009. – 564 p.

35. Epp J. X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization / J. Epp // Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods. – [S. l.], 2016. – P. 81–124.

36. Patterson A. L. The scherrer formula for x-ray particle size determination / A. L. Patterson // Physical review. – 1939. – V. 56. – № 10. – P. 978–982.

37. Effects on the thermo-mechanical and crystallinity properties of nylon 6,6 electrospun fibres reinforced with one dimensional (1D) and two dimensional (2D) carbon / Fabiola Navarro-Pardo [et al.] // Materials. – 2013. – V. 6. – № 8. – P. 3494–3513.

38. Effect of residual stress and microstructure on mechanical properties of sputter-grown Cu/W nanomultilayers / Giacomo Lorenzin [et al.] // APL materials. – 2024. – V. 12. – № 10.

39. Kumagai M. X-ray stress analysis / Masayoshi Kumagai // Non-Destructive material characterization methods. – [S. l.], 2024. – P. 683–705.

40. Cardarelli F. Materials handbook: a concise desktop reference / François Cardarelli. – 2nd ed. – [S. l.] : Springer, 2007. – 1316 p.

41. Panta G. Electrical characterization of aluminum (Al) thin films measured by using four- point probe method / G Panta, D Subedi // Kathmandu university journal of science, engineering and technology. – 2013. – V. 8. – № 2. – P. 31–36.

42. Dimmich R. Electronic transport properties of metallic multi-layer films / R. Dimmich // Journal of physics F: metal physics. – 1985. – V. 15. – № 12. – P. 2477–2487.

43. Effect of the deposition temperature on temperature coefficient of resistance in CuNi thin film resistors / Sung-Gi Hur [et al.] // Journal of vacuum science &

technology B: microelectronics and nanometer structures. – 2004. – V. 22. – № 6. – P. 2698.

44. Annealing effect on temperature coefficient of resistance of microflexible thermal shear stress sensor / Baoyun Sun [et al.] // IEEE sensors letters. – 2020. – V. 4. – № 11. – P. 1–4.

45. Engwall A. M. Origins of residual stress in thin films: interaction between microstructure and growth kinetics / A. M. Engwall, Z. Rao, E. Chason // Materials & design. – 2016. – V. 110. – P. 616–623.

46. Structural and residual stress changes in Mo/a-Si multilayer thin films with annealing / M. E. Kassner [et al.] // Journal of materials science. – 1996. – V. 31. – № 9. – P. 2291–2299.

47. Fuchs K. The conductivity of thin metallic films according to the electron theory of metals / K. Fuchs // Mathematical proceedings of the cambridge philosophical society. – 1938. – V. 34. – № 1. – P. 100–108.

48. Sondheimer E. H. The mean free path of electrons in metals / E. H. Sondheimer // Advances in physics. – 2001. – V. 50. – № 6. – P. 499–537.

49. Mayadas A. F. Electrical-Resistivity Model for Polycrystalline Films: the Case of Arbitrary Reflection at External Surfaces / A. F. Mayadas, M. Shatzkes // Physical Review B. – 1970. – V. 1. – № 4. – P. 1382–1389.

50. Vand V. A theory of the irreversible electrical resistance changes of metallic films evaporated in vacuum / Vladimir Vand // Proceedings of the physical society. – 1943. – V. 55. – № 3. – P. 222–246.

51. Kim Y.-J. Effect of seed layers and rapid thermal annealing on the temperature coefficient of resistance of Ni Cr thin films / Youn-Jang Kim, Won-Beom Lee, Kyeong-Keun Choi // Thin solid films. – 2019. – V. 675. – P. 96–102.

52. In-situ thermal evolution of Ni/Ti multilayer thin films / A. J. Cavaleiro [et al.] // Intermetallics. – 2014. – V. 51. – P. 11–17.

53. Охорона праці та цивільний захист : підруч. / О. Г. Левченко [та ін.]. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 420 с.

54. ДСанПіН 3.3.2-007-98. Організація і обладнання робочих місць. – [Чинний від 1998-10-12]. – Київ: МОЗ України, 1998. – 35 с.

55. ДСанПіН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – [Чинний від 1999-01-01]. – Київ: МОЗ України, 1999. – 42 с.

56. ДСанПіН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – [Чинний від 1999-01-01]. – Київ: МОЗ України, 1999. – 48 с.

57. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – [Чинний від 2001-01-01]. – Київ: Держгірпромнагляд, 2001. – 58 с.

58. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухо-пожежною та пожежною небезпекою. – [Чинний від 2016-07-01]. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2016. – 56 с.