

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут матеріалознавства
та зварювання ім. Є.О. Патона**

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

«__»_____ 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг та комп'ютерне
моделювання в матеріалознавстві»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

**на тему: «Вплив відпалу в аргоні на структурно-фазові перетворення в
тонкоплівкових системах Ni/Me/Ti (Me = Ag, Cu)»**

Виконав:

Здобувач IV курсу, групи ФМ-01

Полегенько Олег Олександрович

Керівник:

ас., PhD, Круглов Іван Олександрович

Консультант з розділу охорони праці:

зав. каф., д.т.н., професор Левченко О. Г.

Консультант з економічно-організаційного розділу

доцент, к.е.н., доцент Нараєвський С. В.

Консультант з питань нормконтролю:

ст. викладач Шаповалова Н.А.

Рецензент:

к.т.н., доц. каф. ВТМПМ Соловйова Т.О.

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Здобувач _____

Київ – 2024 року

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

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу здобувачу

Полегеньку Олегу Олександровичу

1. Тема роботи «Вплив відпалу в аргоні на структурно-фазові перетворення в тонкоплівкових системах Ni/Me/Ti (Me = Ag, Cu)», керівник роботи Круглов Іван Олександрович, PhD, затверджені наказом по університету від «30» травня 2024 р. № 2210-с
2. Термін подання студентом роботи _____
3. Вихідні дані до роботи: тонкоплівкові композиції Ni/Ag/Ti та Ni/Cu/Ti; результати переддипломної практики.
4. Зміст роботи: літературний огляд; матеріали та методика досліджень; результати та їх обговорення; економічна частина; охорона праці.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 73 сторінки, 9 таблиць; 24 рисунок; 1 презентація.
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно економічна частина	Нараєвський С.В. доцент		
Охорона праці	Левченко О.Г. зав. каф., професор		
Нормоконтроль	Шаповалова Н.А. ст. викладач		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Видача завдання	20.05.2024	
	Огляд літератури	09.05.2024	
	Освоєння методик дослідження	16.05.2024	
	Виконання експериментальних досліджень	23.05.2024	
	Отримання результатів, їх аналіз	30.05.2024	
	Оформлення дипломної роботи	06.06.2024	
	Попередній захист	05.06.2022	
	Захист на засідання ЕК	17.06.2024	

Здобувач

Олег ПОЛЕГЕНЬКО

Керівник

Іван КРУГЛОВ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 73 сторінки, 9 таблиць, 24 рисунки, 6 формул, 34 джерела.

СПЛАВИ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ, СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ТОНКОПЛІВКОВІ КОМПОЗИЦІЇ

Об'єкт досліджень: нанорозмірні плівкові композиції на основі Ni/Ag/Ti та Ni/Cu/Ti осаджені на підкладку Si(100) методом магнетронного розпорошення.

Предмет дослідження: структурно-фазові перетворення в тонкоплівкових композиціях Ni/Ag/Ti та Ni/Cu/Ti, після термічної обробки.

Мета роботи: дослідження впливу середовища відпалу на структурно-фазові перетворення в тонкоплівкових композиціях Ni/Ag/Ti та Ni/Cu/Ti.

Методи дослідження: рентгеноструктурний фазовий аналіз, скануюча електронна мікроскопія.

Результати досліджень та їх новизна: рентгеноструктурні дослідження показали, що термічна обробка системи з додатковим шаром Ag за температур 200 °C – 300 °C не змінює вихідного фазового складу. Початок дифузійно-індукованих фазоутворювальних процесів спостерігається після відпалу при 400 °C, з формуванням інтерметалідів різного стехіометричного складу – NiTi та Ni₄Ti₃. У системі з проміжним шаром Cu дифузійні процеси і зміна фазового складу спостерігаються після відпалу за температури 300 °C, тобто на 100 °C нижче ніж у системі з шаром Ag. Відбувається формування твердого розчину Cu-Ni, відносний вміст якого збільшується з підвищенням температури термічної обробки, що унеможливорює утворення інтерметалідів Ni-Ti. Збільшення температури до 500 °C супроводжується розвитком процесів оксидоутворення на поверхні.

Сфера застосування: мікроелектромеханічні системи, біомедицина, мікроробототехніка, авіація та оборонна промисловість.

ABSTRACT

Bachelor thesis: 73 pages, 9 tables, 24 figures, 6 formulae 34 references.

HEAT TREATMENT, SHAPE MEMORY ALLOYS, STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS, THIN FILM COMPOSITIONS.

The object of research: nanoscale film compositions based on Ni/Ag/Ti and Ni/Cu/Ti, deposited on the Si(100) substrate by magnetron sputtering.

The subject of research: structural and phase transformations in Ni/Ag/Ti and Ni/Cu/Ti thin film compositions after heat treatment.

Research aim: influence of the annealing environment on structural and phase transformations in Ni/Ag/Ti and Ni/Cu/Ti thin-film compositions.

Research methods: x-ray structural phase analysis, scanning electron microscopy.

Research results and their novelty: x-ray structural studies showed that heat treatment of the system with an additional layer of Ag at temperatures of 200 °C – 300 °C does not change the initial phase composition. The beginning of diffusion-induced phase-forming processes is observed after annealing at 400 °C, with the formation of intermetallics of different stoichiometric composition - NiTi and Ni₄Ti₃. In the system with an intermediate layer of Cu, diffusion processes and a change in the phase composition are observed after annealing at a temperature of 300 °C, i.e. 100 °C lower than in the system with an Ag layer. The formation of a Cu-Ni solid solution takes place, the relative content of which increases with increasing heat treatment temperature, which prevents the formation of Ni-Ti intermetallics. An increase in temperature to 500 °C is accompanied by the development of oxide formation processes on the surface.

Field of application: microelectromechanical systems, biomedicine, microrobotics, aviation and defense industry.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	10
1.1 Матеріали з ефектом пам'яті форми.....	10
1.2 Тонкоплівкові матеріали на основі сплаву Ni-Ti.....	12
1.3 Підходи до синтезу сплаву NiTi в тонкоплівковому стані.....	13
1.4 Особливості структурно-фазових перетворень в сплаві NiTi за термічної обробки	14
1.4.1 Вплив кількості границь розділу.....	14
1.4.2 Вплив середовища відпалу	14
1.4.3 Легування домішковими елементами	14
1.5 Висновки до розділу 1	15
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	16
2.1 Отримання плівкових композицій Ni/Me/Ti (Me = Ag, Cu)	16
2.2 Термічна обробка.....	18
2.3 Рентгеноструктурний фазовий аналіз.....	20
2.4 Скануюча електронна мікроскопія	22
2.5 Висновки до розділу 2	24
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ	25
3.1 Результати рентгеноструктурних досліджень	25
3.2 Результати скануючої електронної мікроскопії.....	35
3.3 Висновки до розділу 3	39
4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	41
4.1 Науково-технічна актуальність.....	41
4.2 Розрахунок витрат на проведення НДР	41
4.2.1 Витрати на оплату праці.....	41
4.2.2 Єдиний соціальний внесок	43

	7
4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень.....	43
4.2.4 Енергоносії для проведення досліджень	43
4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання.....	43
4.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій.....	44
4.2.7 Витрати на службові відрядження.....	44
4.2.8 Інші прямі неврахована витрати	44
4.2.9 Накладні витрати	44
4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми	45
4.3 Науково-технічна ефективність НДР	46
4.4 Висновки до розділу 4	49
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	50
5.1 Аналіз параметрів приміщення.....	50
5.2 Мікроклімат робочої зони.....	52
5.3 Аналіз освітлення в приміщенні лабораторії.....	53
5.3.1 Характеристика природнього освітлення лабораторії термічної обробки	54
5.3.2 Характеристика штучного освітлення лабораторії термічної обробки	55
5.4 Аналіз небезпечних чинників в приміщенні лабораторії термічної обробки	56
5.4.1 Вплив шуму та вібрацій	57
5.4.2 Небезпечні чинники при роботі з установкою ВУП-5М.....	58
5.4.3 Безпека при роботі з електричними приладами.....	60
5.5 Організація робочого місця.....	61
5.6 Пожежна безпека	61
5.7 Алгоритм дій у випадку "Повітряної тривоги" за сигналом цивільного захисту	
5.8 Висновки до розділу 5	65
ВИСНОВКИ	66
CONCLUSIONS.....	68
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

СПФ – сплави з пам'яттю форми

ЕПФ – ефект пам'яті форми

RF – радіочастотне розпилення

DC – розпилення постійного струму

РФА – рентгеноструктурний фазовий аналіз

СЕМ – скануюча електронна мікроскопія

ГЦК – гранецентрована кубічна ґратка

ГЦП – ґратка гексагональна з щільним пакуванням

ОЦК – об'ємцентрована кубічна

ОКР – область когерентного розсіювання

ВСТУП

Сплави з ефектом пам'яті форми (СПФ), які широко використовуються в високотехнологічних галузях промисловості, відомі завдяки фазовому переходу "мартенсит-аустеніт", який дозволяє відновити попередньо деформований стан при нагріві. Проте, з поширенням мініатюризації функціональних пристроїв виникає потреба у використанні нанометрових тонкоплівкових матеріалів з ефектом пам'яті форми.

Одним із перспективних матеріалів є нанорозмірні шаруваті композиції сплаву NiTi, які мають унікальні властивості та великий практичний потенціал у мікроелектромеханічних системах, біомедицині та інших галузях. Проте застосування таких тонкоплівкових матеріалів обмежене необхідністю високотемпературного відпалу для формування кристалічної аустенітної структури $B2$ -NiTi, що може призводити до негативних наслідків, таких як ріст зерен, оксидоутворення та збільшення напружень.

Одним з альтернативних підходів є послідовне осадження окремих шарів металів (Ni, Ti) з наступним відпалом з метою дифузійної гомогенізації хімічного складу, проте цей процес також пов'язаний зі складністю формування аустенітної фази.

Мета даної роботи полягає у дослідженні впливу ізотермічного відпалу у середовищі аргону на перебіг дифузійних процесів та розвиток фазоутворення в нанорозмірній системі Ni/Ti з додатковими проміжними шарами Ag та Cu.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Матеріали з ефектом пам'яті форми

Фундаментально явище відновлення форми в сплавах з пам'яттю форми (СПФ) обумовлено фазовим переходом між низькотемпературною (мартенситною) фазою та високотемпературною (аустенітною) фазою. Мартенситна фаза має низьку симетрію; тоді як аустенітна фаза є фазою високої симетрії. Усі фазові перетворення, які відбуваються в СПФ, є бездифузійними, вони являють собою перетворення ґратки деформацією зсуву великих ансамблів атомів та супроводжується деформаційними явищами. Проходить в кристалічному твердому тілі при низьких температурах, внаслідок яких з його вихідної фази утворюється мартенситна фаза з новою кристалічною ґраткою. Завдяки фазовому перетворенню деформований матеріал може повернутися до своєї початкової форми при нагріванні вище температури переходу [1].

При фазових перетвореннях у СПФ відбуваються помітні зміни у фізичних, механічних, хімічних, електричних і оптичних властивостях, таких як текстура поверхні, шорсткість поверхні, межа текучості, модуль пружності, відновлення форми, демпфування, теплопровідність, коефіцієнт теплового розширення, питомий електричний опір, паропроникність, діелектрична проникність тощо. Ці зміни властивостей дають можливість для проектування та виготовлення високоякісних мікросенсорів, мікроактуаторів тощо [2].

В залежності від механізму деформації мартенситу чи високотемпературної фази ступінь відновлення форми може бути повною чи частковою. Повне відновлення форми спостерігається коли непружна деформація проходить шляхом утворення переважно орієнтованих кристалів мартенситу і/або переорієнтації вже присутніх кристалів мартенситу шляхом деформаційного двійникування кристалів. При нагріванні в процесі

оберненого мартенситного перетворення за рахунок зворотного переміщення міжфазних, міжмартенситних і внутрішньомартенситних границь високотемпературна фаза відновлює вихідну орієнтацію, що, в свою чергу, призводить до зняття непружної деформації [3].

Сплави на основі NiTi є найбільш розповсюдженими сплавами завдяки своїм унікальним характеристикам, а саме ефекту пам'яті форми, суперпластичності, високим тріщиностійкості, корозійній стійкості та біосумісності. Фітінги, медичний інструментарій, імплантанти, вироби для побутової техніки, телефонні антени, термочутливі датчики – ось далеко не повний перелік застосувань таких сплавів [4].

Поліморфне перетворення ГЦП Ti до ОЦК фази при високій температурі обмежує розчинність Ni (<10 мас.% Ni при 942 °C). СПФ на основі NiTi привернули увагу дослідників, оскільки вони підходять для актуаторів, які працюють із великими напруженнями та деформаціями та мають вражаючі властивості як ефект пам'яті форми (ЕПФ), супер-еластичність, висока демпфуюча здатність, висока питома вихідна енергія, біосумісність і висока стійкість до корозії. Після нагрівання або навантаження інтерметалідний сплав проходить оборотне термопружне фазове перетворення, що обмежує дифузію [5].

Сплави з пам'яттю форми здатні перетворюватися з основної фази (аустенітна фаза, B2 фаза, кристалічна структура ОЦК) до мартенситної фази (B'19 фаза, моноклінна кристалічна структура) за температури трохи вище кімнатної. Ця трансформація може відбуватися через метастабільні проміжні R-фази у випадку збагачених нікелем сплавів NiTi. Фазове перетворення пов'язане з бездифузійним процесом з збереженням хімічного складу вихідного та кінцевого стану [6].

У процесі фазового перетворення може спостерігатися суттєва зміна морфології поверхні за високих температур (аустенітна фаза), гладка поверхня змінюється на шорстку (двійниковий мартенсит) при зниженні температури та навпаки. Ключовий елемент, що забезпечує функціонування СПФ, пов'язаний з температурою трансформації та відсотком відновлення-

деформації. На це дуже впливає склад і термічна обробка матеріалів. Сплави Ni-Ti містять кілька різноманітних фаз (наприклад, B2, B19, B19' і фаза R) і інші двійникові структури (наприклад, тип I, тип II і двійникове з'єднання). Температура трансформації та властивість пам'яті форми NiTi залежать від металургійних факторів, таких як склад сплаву, температура відпалу, температура старіння, час старіння та фізико-технологічних параметрів синтезу, зокрема, струму, напруги, швидкості потоку первинного газу, швидкості потоку газу-носія тощо). Ці фактори впливають на фізичні, механічні, хімічні, електричні та оптичні властивості [7].

1.2 Тонкоплівкові матеріали на основі сплаву Ni-Ti

Тонкі плівки NiTi мають значний потенціал для застосування у якості функціональної основи мікроелектромеханічних систем через їх велику робочу густину енергії, низьке енергоспоживання та тривалий термін служби [8]. Вони також мають чудову стійкість до корозії та біосумісність, що дозволяє розробляти такі біомедичні частини, як стенти, фіксатори тканин, використовувати їх для доставки ліків тощо. Хімічний склад для оптимального прояву ефекту пам'яті форми в тонких плівках може значно відрізнятися від відповідних масивних сплавів внаслідок прояву розмірних та поверхневих ефектів. Масивні СПФ мають низьку швидкість відгуку, оскільки вони зазвичай приводяться в дію термічно. Спосіб подачі та відведення тепла в циклі безпосередньо залежить від тривалості циклу, що є чутливим параметром. Порівняно з масивними СПФ, застосування тонких плівок забезпечує більшу швидкість охолодження через їх високе відношення поверхні до об'єму, збільшується швидкість теплообміну і, відповідно, зменшується тривалість циклу і збільшується швидкість відгуку [9].

NiTi демонструє більшу ефективність відновлення деформації та відновлення напруги до (6 – 8) % та 600 МПа відповідно. Це набагато кращі властивості порівняно з іншими матеріалами актуаторів, такими як

електростатичні та п'єзоелектричні матеріали. Підвищення відновлення деформацій разом зі збільшенням відновленням напруги, призводить до більшої енергетичної щільності, до $2,5 \times 10^7$ Дж/м³ [10].

Щоб пришвидшити реакцію тонкоплівкових мікроактуаторів, необхідно зменшити тривалість циклу, тобто час, необхідний для перетворення між аустенітом і мартенситом під час охолодження. Скорочення часу циклу можливе шляхом збільшення швидкості охолодження в тонкоплівкових СПФ та мінімізації температурного діапазону нагрівання та охолодження для завершення прямого і зворотного перетворення [11].

Однорідність хімічного складу тонкої плівки по всій поверхні є дуже важливим фактором для синтезу сплаву, який регулюється геометрією осадження (тобто відстань від підкладки до мішені, діаметр та кут нахилу мішені тощо) і типом використовуваної мішені (зокрема, використання окремих мішеней чистих металів або мішені сплаву) [12].

1.3 Підходи до синтезу сплаву NiTi в тонкоплівковому стані

На сучасному етапі розвитку технологій відомо багато методів синтезу тонких плівок, серед яких є використання імпульсного лазерного осадження, фільтрованого дугового осадження та магнетронного розпорошення. Магнетронне розпорошення виділяється з-поміж інших високою адгезією плівки до підкладки та її порівняно високою чистотою [13].

Тонкоплівкові композиції синтезуються методом імпульсного лазерного осадження шляхом конденсації на поверхні підкладки парів матеріалу, створюваних імпульсним лазерним випромінюванням мішені в вакуумі. Метод характеризується високою швидкістю осадження, високою кристалічністю і морфологічною однорідністю одержуваної плівки. Важливим фактором є те, що через невелику ширину лазерного променя плівка практично не забруднюється компонентами матеріалу камери і

допоміжних пристроїв. Недоліком цього методу є його технічна складність і, як наслідок, висока вартість [14].

Для синтезу сплаву NiTi методом магнетронного осадження важливим є точне управління вихідним співвідношенням компонентів Ni та Ti в плівці, оскільки стехіометричний склад впливає на температуру мартенситної трансформації. Титан розпорошується повільніше, ніж нікель, що змушує адаптувати методи осадження для забезпечення правильного складу сплаву. Часто на мішень NiTi додають пластини з титану для корекції складу, але цей метод вимагає точності в розміщенні і розмірах пластин Ti [15].

Альтернативний метод включає використання окремих мішеней для нікелю та титану, розпорошуючи їх з різною інтенсивністю для отримання бажаного складу плівки. Після депозиції на холодну підкладку плівка є аморфною і не має ефекту пам'яті форми до того моменту, поки не пройде термічна обробка для кристалізації.

Існує також підхід, що полягає в чергуванні осадження шарів металів з подальшим дифузійним перемішуванням під час термообробки. Це дозволяє формувати інтерметалідні фази з ефектом пам'яті форми при нижчій температурі відпалу, порівняно з іншими методами. Такий підхід сприяє утворенню дрібнозернистої структури та забезпечує більш однорідний хімічний склад кінцевого продукту [16].

1.4 Особливості структурно-фазових перетворень в сплаві NiTi за термічної обробки

Можна налаштувати функціональні властивості сплаву відповідно до конкретних потреб потенційних споживачів. Наприклад, при розробці сплавів з пам'яттю форми на основі NiTi були прийняті до уваги наступні аспекти:

- для отримання матеріалу з надпластичними властивостями при кімнатній температурі необхідно додати невелику кількість Co для

розділення перетворень $B2 \Leftrightarrow R$ і $R \Leftrightarrow B19'$, розділення відбувається через різний вплив Co на ці перетворення [17];

- щоб отримати матеріали з інтервалом температур перетворення, близького до $200\text{ }^{\circ}C$, необхідно додати 10% або більше Hf , що збільшує початкову температуру мартенситного перетворення, але в масивному стані ці сплави стають дуже крихкими і вимагають спеціальних методів обробки [18];

- найбільш прийнятними кандидатами на сплави для отримання матеріалу з постійною температурою перетворення в широкому діапазоні варіацій хімічного складу є Cu і Si , крім того, Cu має більшу перевагу, оскільки сплав більш пластичний і працездатний [19].

Хімічний склад середовища, в якому виготовляються та експлуатуються наноструктурні матеріали, може впливати на їхні структурні характеристики та кінетику дифузії при високих температурах. Термічна обробка тонких плівок в атмосфері аргону є поширеною практикою. Зміна умов цієї обробки дозволяє контролювати кінетику фазових перетворень, температурні інтервали, структурні властивості, шорсткість поверхні та термічну стабільність. Проте атмосфера відпалювання може змінювати кінетику дифузії, що, в свою чергу, впливає на термічну стабільність структури. Тому важливо ретельно досліджувати термічну стабільність конкретних контактів на перехідних металах під впливом аргону [20].

Висновки до розділу 1

1. Розглянуто ефект пам'яті форми та явище псевдопружності в сплавах $NiTi$.
2. Проведено аналіз та порівняння тонкоплівкових сплавів системи $Ni-Ti$ з їх масивними аналогами. Проаналізовано області сучасного та майбутнього застосування тонкоплівкових матеріалів на основі $NiTi$.
3. Проаналізовані методи синтезу тонкоплівкових композицій $NiTi$.

4. Розглянуто вплив легуючих елементів та середовища відпалу на структуру та фазовий склад в сплавах NiTi з ефектом пам'яті форми.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Отримання плівкових композицій Ni/Me/Ti (Me = Ag, Cu)

Метод магнетронного розпорошення виник як альтернатива іншим технікам вакуумного нанесення, таким як електронно-променеве та термічне випаровування. Проте ці методи мають свої недоліки. Наприклад, тугоплавкі метали та сплави можуть створювати проблеми через різницю в парціальних тисках насиченої пари компонентів сплаву та їх високої температури плавлення, що вимагає нагрівання джерела до високих температур і може впливати на товщину утворених плівок. До того ж, за низьких тисків випаровування, сполуки можуть розкладатися на окремі хімічні компоненти [21].

Магнетронне розпорошення не тільки вирішує ці проблеми, але й має велику кількість переваг. До основних переваг цього методу включають легкість розпорошення будь-якого металу, сплаву чи сполуки, високі швидкості осадження плівки, високу адгезію плівки з підкладкою, високоякісні плівки, відмінне покриття навіть сходинок та малих деталей, можливість покриття теплочутливих підкладок та легка автоматизація процесу.

Розпорошення – це процес, в ході якого під впливом високоенергетичних частинок атоми або молекули матеріалу вибиваються з поверхні мішені. Існують такі різновиди технології магнетронного

осадження: катодне, діодне, RF (радіочастотне) або DC (постійного струму) розпилення, розпилення іонним променем, реактивне розпилення. Всі вони є різновидами одного й того ж фізичного явища. Коли атоми або молекули матеріалу вибиваються з мішені під впливом високоенергетичних частинок відбувається розпорошення.

Магнетронне розпорошення – це високошвидкісна техніка вакуумного отримання покриттів для нанесення металів, сплавів і сполук на різноманітні матеріали підкладки товщиною до приблизно 5 мкм. Перед іншими методами вакуумного покриття воно має кілька важливих переваг, що призвело до розвитку широкого спектру наукових та комерційних застосувань.

Для ефективного застосування магнетронного розпилення необхідно врахувати кілька аспектів. По-перше, потрібно забезпечити іони з достатньою енергією та, для вибивання атомів матеріалу, направити їх на поверхню мішені. По-друге, потрібно забезпечити вільний рух вибитих атомів до підкладки, яку потрібно покрити, з мінімальним опором на їхньому шляху. Це досягається завдяки розпорошенню у вакуумі, що забезпечує необхідний низький тиск для високої енергії іонів та запобігає занадто великій кількості зіткнень атомів з газом після їх вибиття з мішені.

Магнетрон використовує принцип застосування спеціальної форми магнітного поля до діодної мішені для розпилення. Цей принцип полягає у створенні пасток для електронів на поверхні катоду, розташованого у магнітному полі. По суті, робота джерела магнетрона ґрунтується на утриманні первинних та вторинних електронів у локалізованій області близько до катоду (рис. 2.1). Це значно збільшує їхню ймовірність зіткнення з атомами газу, іонізуючи їх, що в свою чергу збільшує ефективність процесу розпорошення. Таким чином, джерело магнетрона працює при нижчих напругах, порівняно з діодними системами (500 В – 600 В проти декількох кіловольт). Завдяки збільшенню ефективності іонізації збільшується щільність струму іонів на мішені, що безпосередньо впливає на швидкість зношування мішені. Найбільш поширеною конструкцією магнетронів є планарні.

Електромагніти або постійні магніти зазвичай використовуються для спрощення конструкції магнетронів. Їхні лінії магнітного поля утворюють тунельну форму перед поверхнею мішені, що сприяє ефективному утриманню електронів. У простих застосуваннях магнетрон використовується для осадження металевих матеріалів методом магнетронного розпилення постійного струму, оскільки, порівняно з іншими типами джерел, постійні джерела живлення простіше у виготовленні.

Нижче показана схема принципу дії магнетронного розпорошення (рис. 2.1).

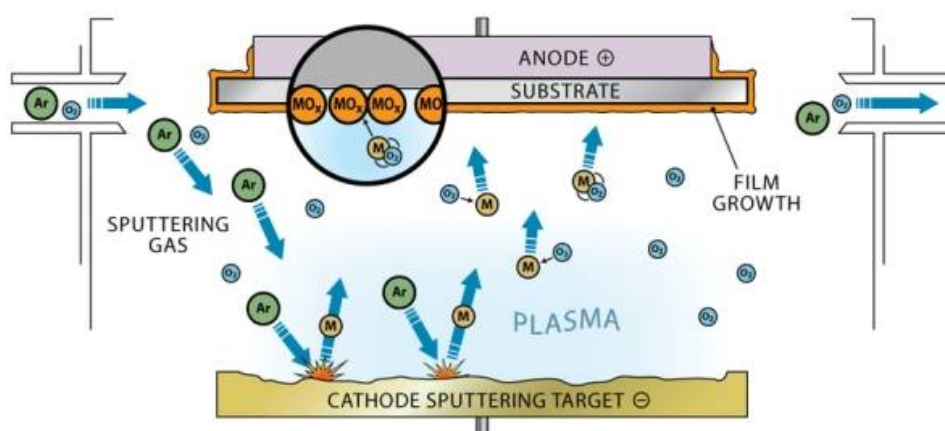


Рисунок 2.1 – Схема магнетронного розпорошення [22]

У цьому дослідженні тонкоплівкові композиції Ni(30 нм)/Cu(10 нм)/Ti(30 нм) та Ni(30 нм)/Ag(10 нм)/Ti(30 нм) було отримано з високочистих мішеней Ni (99,99 %), Ti (99,99 %), Cu (99,99 %) і Ag (99,99 %) методом радіочастотного магнетронного випаровування на монокристалічних підкладках Si(100) за кімнатної температури.

Швидкість напilenня обох компонентів підтримувалася на рівні 10 нм/хв за 300 Вт для Ni і 400 Вт для Ti, відповідно. Товщина плівок в процесі росту контролювалась за допомогою кварцового мікрозонда.

2.2 Термічна обробка

Термічна обробка є важливим кроком у створенні тонких плівок, визначаючи їхню структуру, характеристики та якість. Відпал проводиться

зазвичай у вакуумі при температурних режимах від 300 °С до 700 °С і при тиску 10^{-4} Па, що дозволяє уникнути утворення небажаних сполук з газами залишкової атмосфери, які можуть негативно вплинути на якість кінцевого продукту.

Для забезпечення належних умов відпалу використовуються високовакуумні камери. У виробництві тонких плівок необхідний високий рівень вакууму, що досягається за допомогою спеціального обладнання: вакуумної камери, керамічного нагрівального елемента, форвакуумного насоса для створення початкового вакууму та турбомолекулярного насоса для досягнення високого вакууму.

Форвакуумний насос використовується для створення початкового вакууму на першому етапі відкачування. Він також підтримує тиск на виході насоса вищого вакууму, що дозволяє цьому насосу ефективно працювати. Форвакуумні насоси можуть бути масляними або безмасляними (сухими), причому безмасляні варіанти часто використовуються для створення чистого середовища, необхідного у виробництві тонких плівок.

Для досягнення високого вакууму застосовується турбомолекулярний насос, який працює шляхом прискорення молекул газу у напрямку відкачування за допомогою обертового ротора. Основні частини цього насоса включають ротор і статор, які складаються з чергово розташованих дисків із лопатками. Лопатка ротора надає молекулі газу тангенціальну швидкість, після чого молекула вдаряється у лопатку статора під певним кутом, направляючись вздовж осі насоса. У реальних конструкціях використовується декілька пар ротор-статор, кожна з яких складає один ступінь відкачування.

Турбомолекулярний насос може створювати вакуум у діапазоні від 10^{-2} Па до 10^{-8} Па, працюючи з обертами в кілька десятків тисяч обертів на хвилину. Його робота забезпечується форвакуумним насосом, який підтримує потрібний тиск на виході.

Вакумна камера містить керамічну підставку з нагрівальним елементом для зразка, а температура контролюється термopарою. У випадку осадження

плівки на термоізоляційний матеріал, термопару розміщують на поверхні плівки.

В даному дослідженні відпал тонкоплівкових композицій Ni/Cu/Ti та Ni/Ag/Ti проводили в аргоні за тиску 200 Па. Відпал проводився впродовж 30 хв в інтервалі температур (200 – 500) °С. Температура зразків в процесі відпалу вимірювалась за допомогою термопари К-типу, закріпленої на поверхні плівки.

2.3 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

За допомогою рентгеноструктурного фазового аналізу (РФА) порівнюють експериментальні значення міжплощинних відстаней та відносні інтенсивності з еталонними рентгенограмами. Фазовий аналіз дозволяє визначити фази, присутні у зразку. Якщо у зразку присутні декілька фаз, кожна з них матиме власну дифракційну картину, а загальна дифрактограма буде результатом накладання усіх фаз. Об'єктами дослідження можуть бути метали, сплави, руди та хімічні сполуки. Рентгеноструктурний фазовий аналіз дозволяє визначити наявність та склад неметалічних включень у металах, таких як карбіди, оксиди та сульфіди [23].

Умовою дифракції рентгенівського випромінювання у кристалі є підпорядкування закону Вульфа–Брегга, який визначає напрямки максимумів дифракції пружно розсіяного на кристалі рентгенівського випромінювання.

Рівняння Вульфа – Брегга:

$$n\lambda = 2d \sin\theta, \quad (2.1)$$

де λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання, нм;

d – міжплощинна відстань, Å;

θ – кут дифракції рентгенівських променів, °;

n – порядок дифракційного максимуму.

Рентгенівські дифрактометри працюють за допомогою трьох основних компонентів: рентгенівської трубки, тримача зразка і рентгенівського детектора. У рентгенівській трубці, електрони генеруються за допомогою нагрівання спіралі, що створює електронний потік. Ці електрони прискорюються і направляються на мішень, що спричиняє випромінювання рентгенівських променів (рис. 2.2).

При відповідних умовах, коли рентгенівські промені взаємодіють з зразком відповідно до закону Брегга, вони формують характеристичні спектри. Ці промені фокусуються на зразку, і під час обертання зразка та детектора, реєструється інтенсивність відбитих рентгенівських променів. Детектор обробляє цей сигнал і виводить рівень інтенсивності, який може бути відображений на моніторі комп'ютера або виведений на принтер.

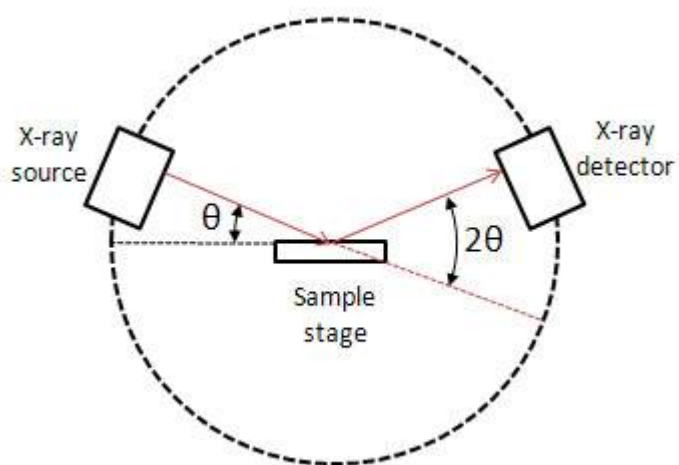


Рисунок 2.2 – Схема рентгеноструктурного фазового аналізу [24]

Геометрія рентгенівського дифрактометра включає в себе обертання зразка під кутом θ у шляху фокусованого променя, тоді як рентгенівський детектор встановлюється під кутом 2θ для збору відбитих променів. Інструмент, що використовується для керування кутом і обертанням зразка, називається гоніометром.

Рентгенівська дифракція є високотехнологічним методом аналізу широкого спектра матеріалів, таких як рідини, метали, мінерали, полімери, каталізатори, пластмаси, фармацевтичні препарати, тонкоплівкові покриття,

кераміка, сонячні елементи та напівпровідники. Цей метод має безліч практичних застосувань у різних галузях промисловості, включаючи мікроелектроніку, енергогенерацію, аерокосмічну галузь та інші. Аналіз рентгенівськими променями дозволяє виявити наявність дефектів у кристалі, його стійкість до напруги, текстуру, розмір зерен і ступінь кристалічності, а також майже будь-які інші параметри кристалічної структури зразка.

Рентгеноструктурний аналіз тонкоплівкових зразків систем Ni/Cu/Ti та Ni/Ag/Ti проводився в режимі сканування θ -2 θ з випромінюванням Cu-K α (1,5405 Å) на дифрактометрі Rigaku ULTIMA IV.

Рентгенограми зразків у вихідному стані та відпалених за різних температур записували при кімнатній температурі з кроком 0,04° із застосуванням однакових параметрів вимірювання для всіх зразків.

2.4 Скануюча електронна мікроскопія

Скануюча електронна мікроскопія (SEM) використовує електронний пучок замість світла, яке застосовується в оптичних мікроскопах, для реалізації зображення об'єктів. У цьому методі зразок опромінюється зфокусованим електронним пучком, який пересувається по його поверхні. Електрони, що розсіюються від зразка, збираються детектором і перетворюються на зображення, що відображає топографію поверхні. SEM дає можливість отримати зображення з значно вищою роздільною здатністю порівняно з оптичною мікроскопією, оскільки електрони мають набагато меншу довжину хвилі, ніж світло. Цей метод застосовується в різних сферах науки і техніки, таких як матеріалознавство, біологія, хімія, медицина, електроніка тощо [25].

SEM також може надати інформацію про топографію поверхні, кристалічну структуру, хімічний склад та електричну поведінку зразка. Для вивчення поведінки в різних умовах можна використовувати різні спеціалізовані методи. Наприклад, при температурах, близьких до абсолютного нуля, катодлюмінесценція (випромінювання світла) набагато

сильніша, ніж при кімнатній температурі, і можна отримати зображення з низьким рівнем шуму від світла, випромінюваного холодним зразком.

У скануючому електронному мікроскопі електронний промінь випромінюється з електронної гармати та зменшується до розміру близько $(0,4 - 5)$ нм в діаметрі за допомогою однієї або двох конденсорних лінз (рис. 2.3). Потім промінь проходить через пару витяжних котушок, щоб відхилити його в осях x та y перед взаємодією з зразком. Це відхилення забезпечує сканування у растровому режимі, створюючи прямокутне зображення зразка. Під час взаємодії електронного променя з зразком, він втрачає енергію через випадкове розсіювання та поглинання зразком.

Промені електронів скануючого електронного мікроскопа взаємодіють з атомами на різних глибинах зразка, щоб створювати різні сигнали, такі як вторинні електрони, відбиті електрони та характеристичні рентгенівські промені. Кожен з цих сигналів має свій власний детектор у скануючому електронному мікроскопі.

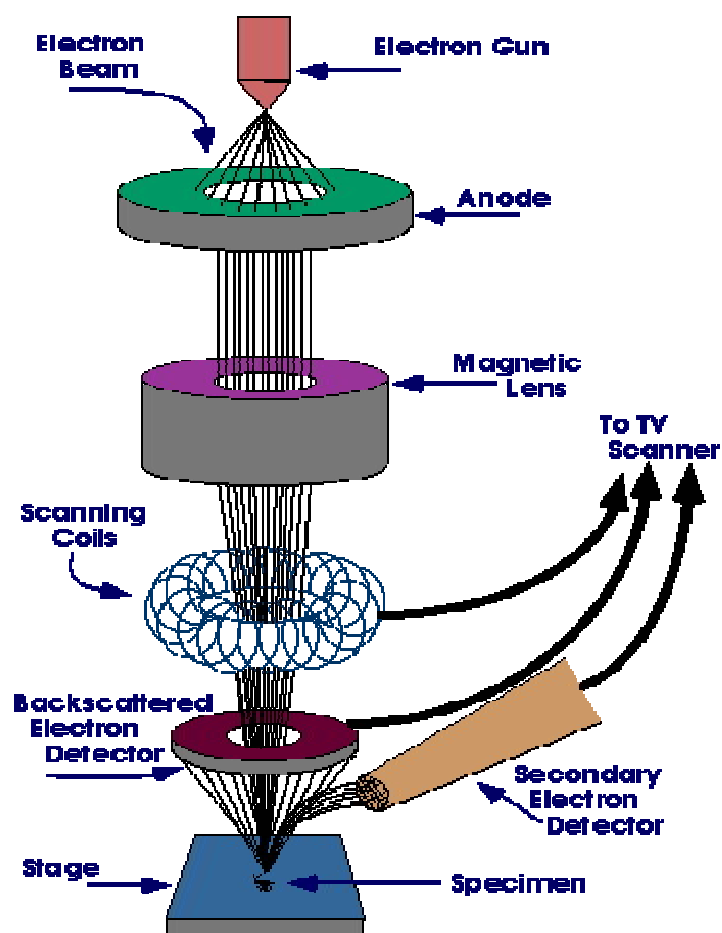


Рисунок 2.3 – Схема принципу роботи СЕМ [26]

Вторинні електрони – це електрони з низькою енергією, які вибиваються з валентної або провідної зони у зразку через непружне розсіювання від променевих електронів. Відбиті електрони – це електрони, які відбиваються від атомів у зразку через еластичні розсіювальні взаємодії. Інтенсивність сигналу відбитих електронів залежить від атомного номера, що дозволяє надавати інформацію про розподіл різних елементів у зразку.

Характеристичні рентгенівські промені випромінюються, коли промені електронів взаємодіють з зразком і збуджують внутрішній електрон. Енергія або довжина хвилі цих рентгенівських променів можуть бути виміряні рентгенівською енергодисперсійною спектроскопією для ідентифікації та вимірювання розподілу елементів у зразку.

Скануюча електронна мікроскопія проводилася на аналітичному скануючому електронному мікроскопі Tescan Vega 3. Використовувались детектори BSE та SE, тиск в камері 10^{-3} Па, режим сканування Resolution, катод електронної гармати W, напруга СЕМ 20 кВ.

Висновки до розділу 2

1. Об'єктами досліджень є нанорозмірні композиції Ni/Ag/Ti та Ni/Cu/Ti з товщиною шару 30 нм для Ni та Ti та 10 нм для Ag та Cu, синтезовані методом магнетронного осадження на підкладки монокристалічного кремнію. Після осадження проведено ізотермічний відпал в середовищі Ar з тиском 200 Па протягом 30 хв за різних температур (200 °C – 500 °C).

2. Структурно-фазовий склад зразків у вихідному стані та після термічної обробки визначено за допомогою методу рентгеноструктурного аналізу з використанням мідного випромінювання на дифрактометрі Rigaku ULTIMA IV.

3. Для вивчення мікроструктури поверхні було застосовано метод скануючої електронної мікроскопії.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

3.1 Результати рентгеноструктурних досліджень

На рисунку 3.1 наведено θ - 2θ дифрактограму плівки Ni/Ag/Ti після осадження. Зйомка всіх досліджуваних плівкових зразків проводилася в кутовому інтервалі 2θ від 10° до 70° , однак всі дифрактограми представлено у вужчому кутовому інтервалі $30^\circ - 55^\circ$, зважаючи на відсутність дифракційних рефлексів поза межами цього проміжку.

У вихідному стані наявні два піки на кутах дифракції $44,66^\circ$ та $52,28^\circ$, що відповідають пікам (111) та (200) гранецентрованої кубічної (ГЦК) фази Ni. На куті $35,48^\circ$ спостерігається пік малої інтенсивності, що відповідає піку (100) гексагональної з щільним пакуванням (ГЦП) фази Ti. На куті дифракції $38,23^\circ$ наявний пік, відповідний до піків (111) ГЦК фази Ag та (002) ГЦП фази Ti. Даний дифракційний максимум є комплексним, розділення ж рефлексів від двох фаз не представляється можливим.

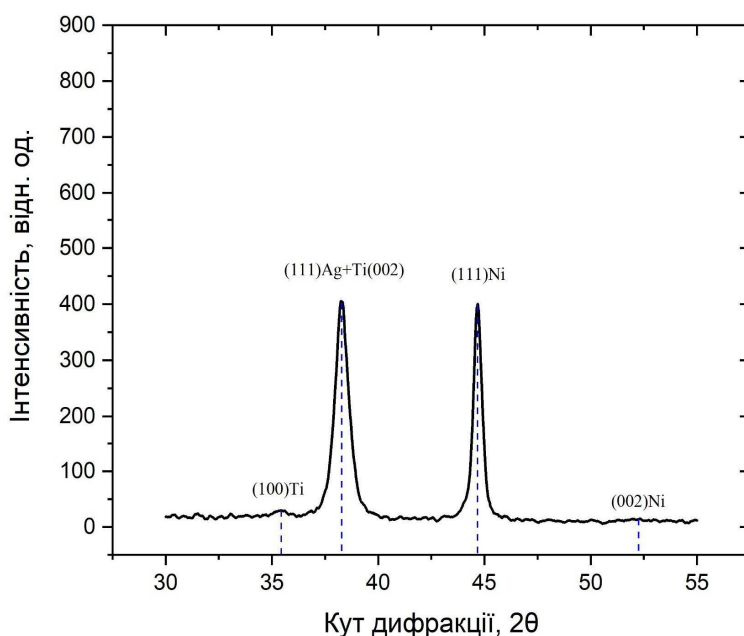


Рисунок 3.1 – Дифрактограма плівки Ni/Ag/Ti у вихідному стані

Після відпалу в аргоні за температури 200 °С упродовж 30 хвилин суттєвих змін у фазовому складі порівняно з вихідним станом не відбулося (рис. 3.2). Аналогічним чином, структура та фазовий залишаються сталими в зразку, відпаленому за температури 300 °С (рис. 3.3). Єдиною суттєвою відмінністю є поява гармонічного дифракційного рефлексу від монокристалічної підкладки на куті дифракції близько 33°.

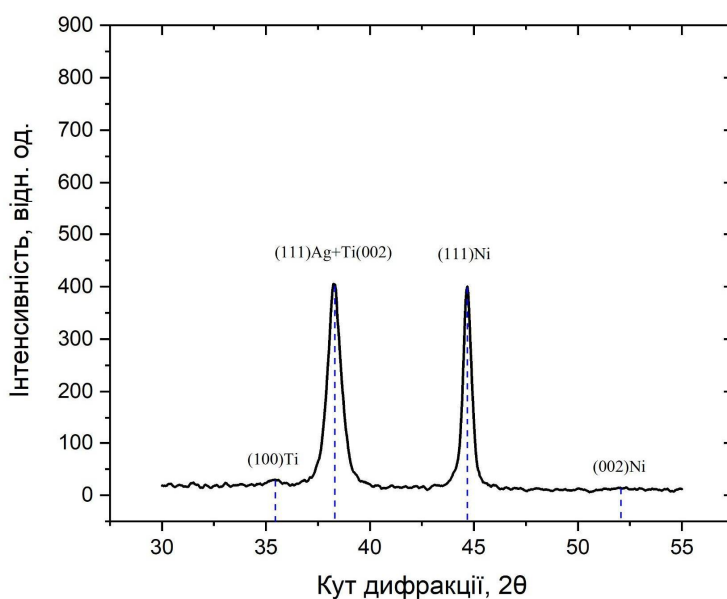


Рисунок 3.2 – Дифрактограма плівки Ni/Ag/Ti після відпалу у середовищі Ar за температури 200 °C упродовж 30 хвилин

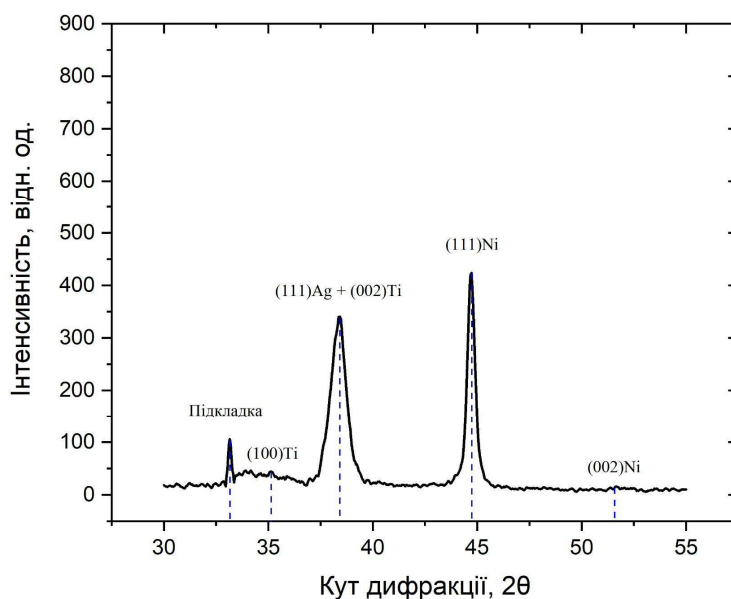


Рисунок 3.3 – Дифрактограма плівки Ni/Ag/Ti після відпалу у середовищі Ar за температури 300 °C упродовж 30 хвилин

Після відпалу за температури 400 °C спостерігаються суттєві зміни в фазовому складі (рис. 3.4). На кутах дифракції 42,59° та 43,58° утворились два піки слабкої інтенсивності (111) та (211), що відповідають інтерметалідним фазам $B2\text{-NiTi}$ та Ni_4Ti_3 . Не можна виключати також піку слабкої інтенсивності від фази (111) Ni, однак його інтенсивність є недостатньою для однозначного висновку. Тобто термічна обробка за температури 400 °C призводить до активації дифузійних процесів між Ni та Ti з наступним формуванням інтерметалідних фаз. Водночас, кутові положення дифракційних максимумів від фаз (111) Ag та (002) Ti залишаються сталими.

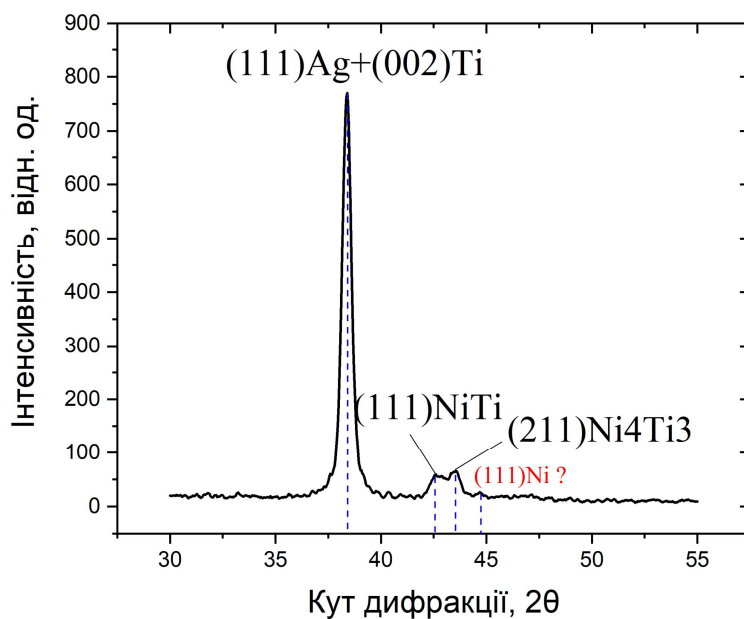


Рисунок 3.4 – Дифрактограма плівки Ni/Ag/Ti після відпалу у середовищі Ar за температури 400 °C упродовж 30 хвилин

Як показано на рисунку 3.5, за температури відпалу 500 °C з'явився новий пік (200) фази Ni_4Ti_3 на куті дифракції $40,54^\circ$. В таблиці 3.1 показано параметри ґратки та розміри ОКР для різних температур відпалу.

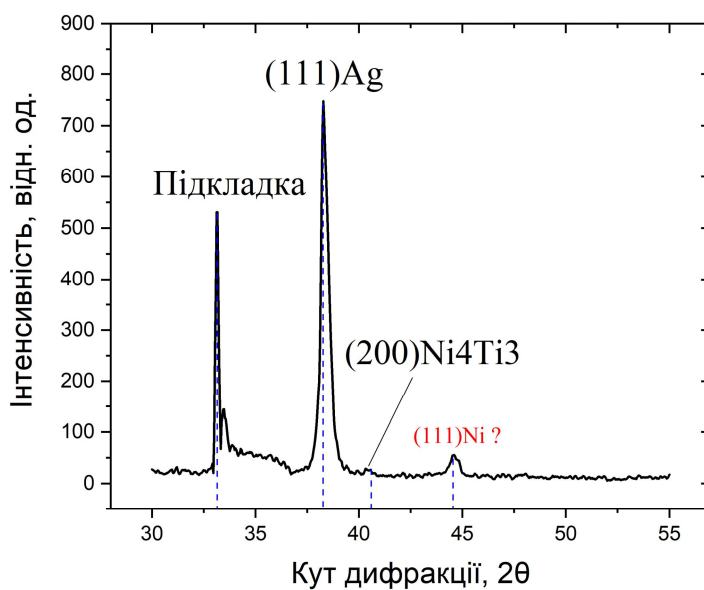


Рисунок 3.5 – Дифрактограма плівки Ni/Ag/Ti після відпалу у середовищі Ar за температури 500 °C упродовж 30 хвилин

Таблиця 3.1 – Параметри ґратки, кристалічність та ОКР для основних фаз тонкої плівки Ni/Ag/Ti

Температура відпалу, °C	Кристалічність, %	Назва фази	a, Å	ОКР, нм
1	2	3	4	5
Вихідний стан	82,51	Ti (100)	3,36	13,04
		Ag (111)	4,08	10,79
		Ni (111)	3,52	17,91
200 °C	80,46	Ti (100)	3,36	13,04
		Ag (111)	4,08	10,79
		Ni (111)	3,52	17,91
300 °C	67,19	Ti (100)	3,36	27,8
		Ag (111)	4,08	9,57
		Ni (111)	3,52	17,06
400 °C	71,76	Ag (111)	4,08	15,79
		NiTi (111)	3,67	12,95
		Ni ₄ Ti ₃ (211)	5,08	13,17
500 °C	44,93	Ag (111)	4,08	19,9
		Ni ₄ Ti ₃ (200)	4,47	23,99

Температурну залежність усередненого розміру ОКР всіх фаз представлено на рисунку 3.6. Можна бачити, що з підвищенням температури розмір ОКР всіх ідентифікованих фаз збільшується. За температури відпалу 300 °C розмір ОКР фази Ti (100) збільшується з 13 нм до приблизно 28 нм, розмір ОКР для Ag (111) починає збільшуватись за температури 400 °C та зростає при подальшому нагріванні до 500 °C. Єдиним виключенням є розмір ОКР від фази нікелю, який залишається практично сталим в інтервалі температур від кімнатної до 300 °C.

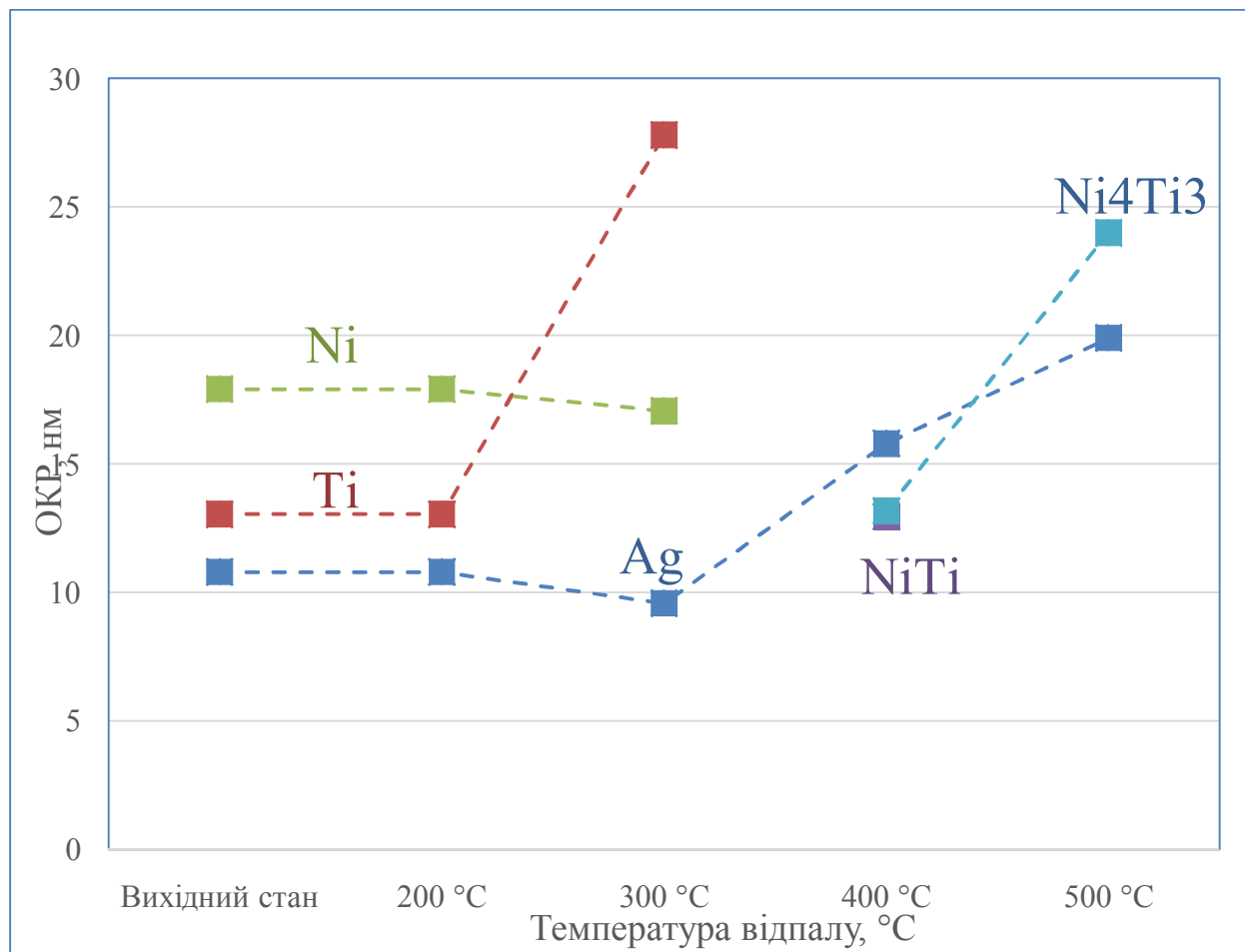


Рисунок 3.6 – Зміна ОКР тонкоплівкових композицій Ni/Ag/Ti у вихідному стані та після відпалу

Для системи з додатковим проміжним шаром міді – Ni/Cu/Ti – у вихідному стані на дифрактограмі (рис. 3.7) спостерігаються фази ГЦК Ni і Cu, а також ГЦП Ti. Це підтверджується наявністю відповідних дифракційних піків: для (111)Ni – при куті дифракції $44,64^\circ$; для (111)Cu – при куті $43,66^\circ$; для (002)Ti – при куті $38,02^\circ$. Деяке накладання дифракційних максимумів (111) від ГЦК фаз міді та нікелю пов'язано з близькістю їх кристалічних решіток – зокрема, для масивних металів значення періоду ґратки складають 0,361 нм та 0,352 нм, відповідно. Внаслідок такого накладання повністю розділити основні рефлекси цих фаз неможливо. На куті $33,12^\circ$ спостерігається рефлекс від підкладки Si.

За температури відпалу 200 °C суттєвих змін фазового складу не відбулось, як і в системі зі сріблом, кутові положення всіх фаз залишаються сталими (рис. 3.8).

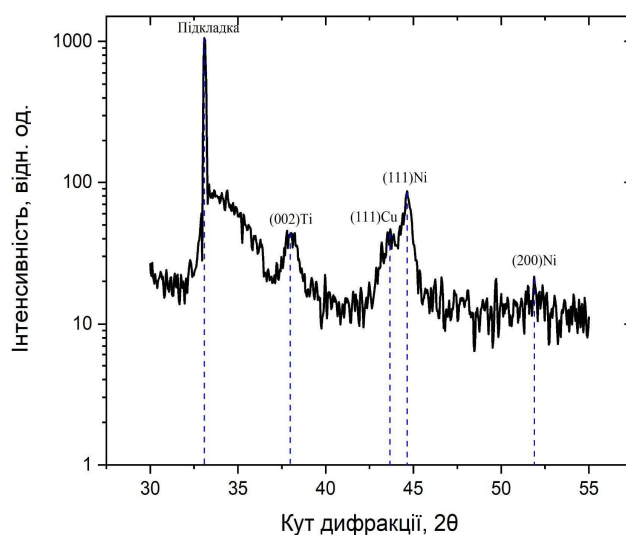


Рисунок 3.7 – Дифрактограма плівки Ni/Cu/Ti у вихідному стані

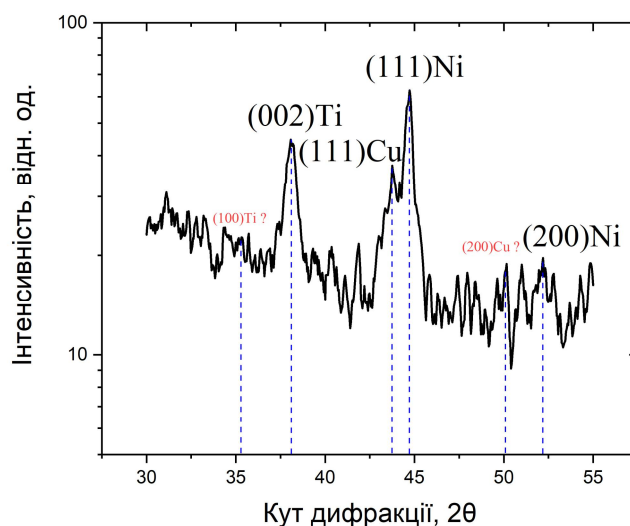


Рисунок 3.8 – Дифрактограма плівки Ni/Cu/Ti після відпалу у середовищі Ar за температури 200 °C упродовж 30 хвилин

Відпал за температури 300 °C (рис. 3.9) обумовлює початок дифузійної взаємодії між нікелем та міддю. Це призводить до початку формування твердого розчину заміщення NiCu, що виражається зближенням відповідних рефлексів, зокрема, зміщенням (111) Cu з 43,66° до 43,78°. Оскільки кутове положення дифракційного максимуму (111) Ni залишається незмінним, в той час як рефлекс (111) Cu зміщується в напрямку більших кутів, можна зробити висновок щодо характеру дифузійної взаємодії компонентів – формується твердий розчин заміщення нікелю в міді внаслідок дифузії атомів Ni в кристалічну ґратку Cu.

При відпалі за температури 400 °С (рис. 3.10) спостерігається формування нових фаз. Зокрема, утворюється твердий розчин заміщення (111) NiCu на основі Cu. Рефлекс (200) Ni змістився з 52,17° до 51,35° та об'єднався з рефлексом (200) Cu, що відповідає кутовому положенню рефлексу (200) твердого розчину NiCu. Не можна виключати також формування інтерметалідних фаз між титаном та міддю, свідченням чого є рефлекси слабкої інтенсивності, що можуть відповідати дифракційним максимумам (002) Cu₃Ti на куті дифракції 40,39° та (101) Cu₃Ti₂ на куті 30,48°. Тобто на відміну від системи з проміжним шаром срібла, в даному випадку ймовірним є формування цілого ряду інтерметалідів на основі легуючого шару міді з обома основними металами.

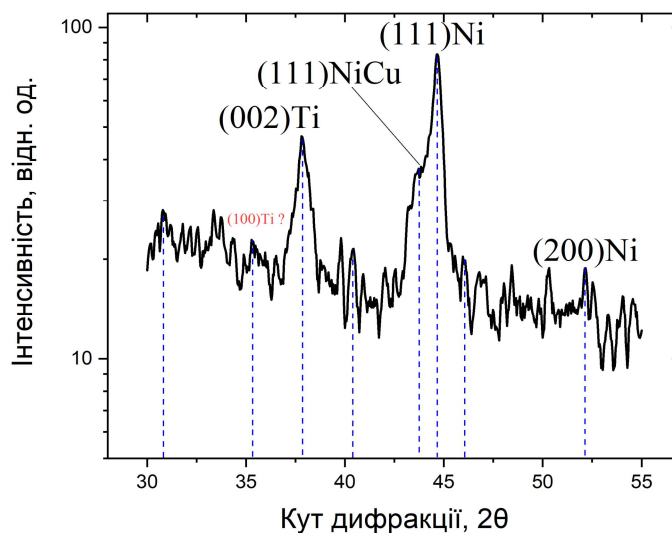


Рисунок 3.9 – Дифрактограма плівки Ni/Cu/Ti після відпалу у середовищі Ar за температури 300 °С упродовж 30 хвилин

За температури відпалу 500 °С (рис. 3.11) спостерігається утворення силіцидів (211) NiTiSi на куті дифракції 40,38°, інтенсивність фази (111) NiCu стала меншою. Тобто у випадку системи з проміжним шаром міді підвищення температури відпалу призводить порушення цілісності границі розділу між плівкою та підкладкою.

В таблиці 3.2 показані зміну параметрів ґратки та розмірів ОКР всіх фаз для різних температур відпалу.

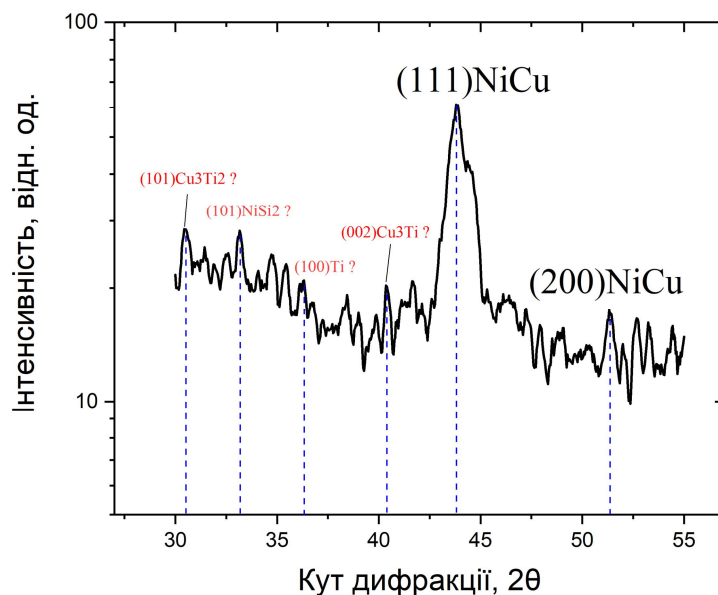


Рисунок 3.10 – Дифрактограма плівки Ni/Cu/Ti після відпалу у середовищі Ar за температури 400 °C упродовж 30 хвилин

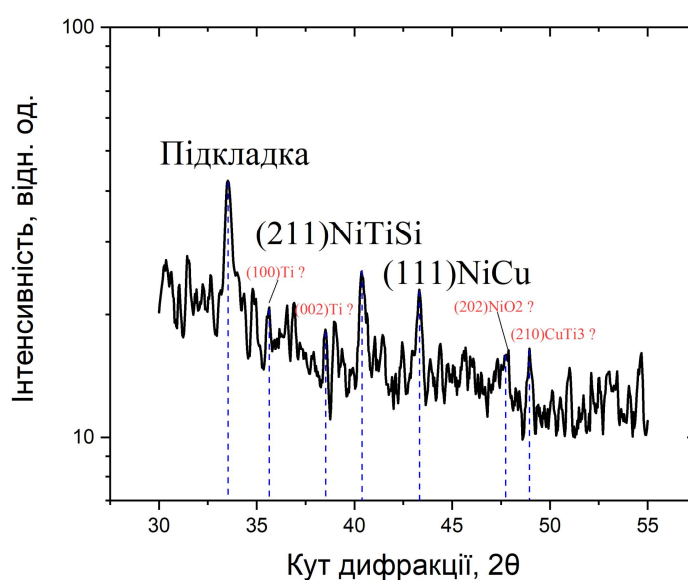


Рисунок 3.11 – Дифрактограма плівки Ni/Cu/Ti після відпалу у середовищі Ar за температури 500 °C упродовж 30 хвилин

Таблиця 3.2 – Параметри ґратки, кристалічність та ОКР для основних фаз тонкої плівки Ni/Cu/Ti

Температура відпалу, °C	Кристалічність, %	Назва фази	a, Å	ОКР, нм
1	2	3	4	5
Вихідний стан	46,08	Ti (002)	4,73	9,68
		Cu (111)	3,59	7,2
		Ni (111)	3,51	11,02
200 °C	45,68	Ti (002)	4,73	9,68

		Cu (111)	3,59	7,2
		Ni (111)	3,51	11,02
300 °C	40,02	Ti (002)	4,75	7,54
		NiCu (111)	3,57	8,64
		Ni (111)	3,43	10,91
400 °C	39,24	NiCu (111)	3,57	7,16
500 °C	34,86	NiTiSi (211)	5,47	16,74
		NiCu (111)	3,61	16,91

Температурну залежність зміни розміру ОКР для системи з проміжним шаром міді наведено на рисунку 3.12.

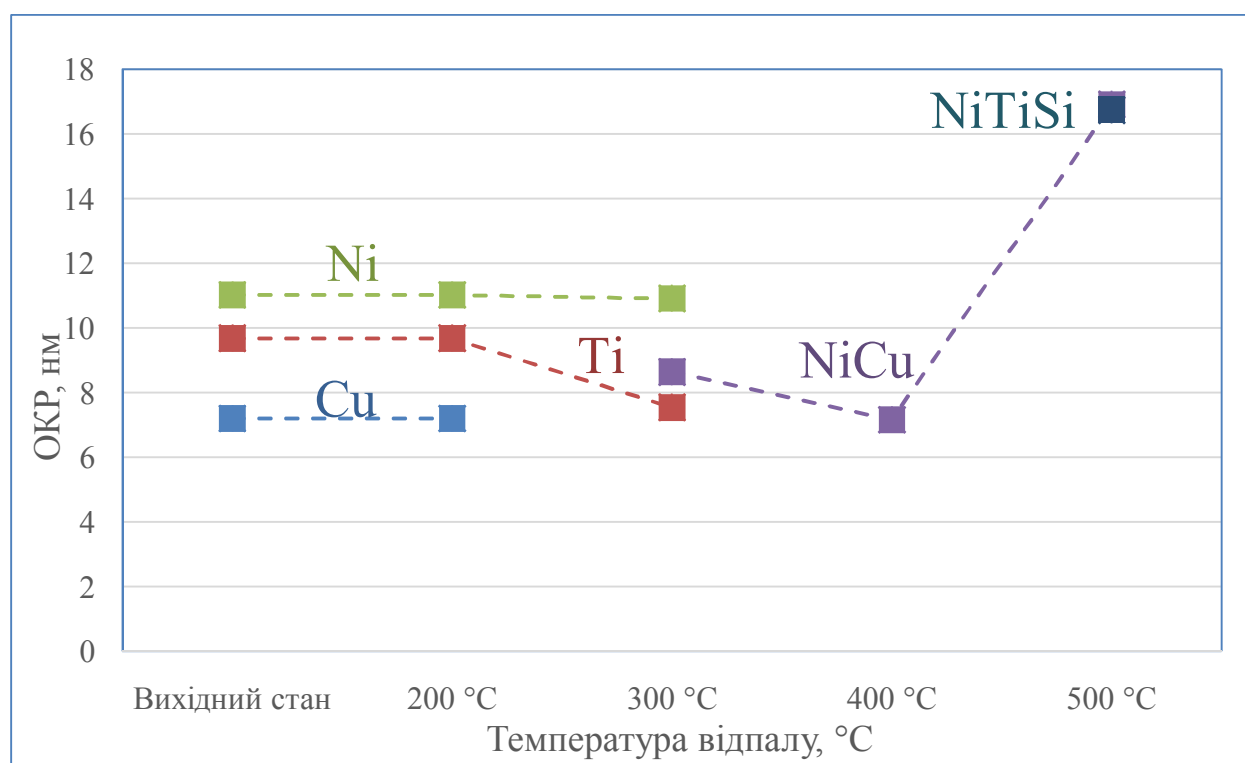


Рисунок 3.12 – Зміна ОКР тонкоплівкових композицій Ni/Cu/Ti у вихідному стані та після відпалу

На відміну від системи з додатковим шаром срібла, значного збільшення розміру ОКР при підвищенні температури обробки в даному випадку не спостерігається. Виключенням є деяке збільшення розміру ОКР фази NiCu внаслідок високотемпературної обробки 500 °C.

На рисунку 3.13 представлено зміну розрахованих значень ступеню кристалічності в залежності від температури термічної обробки. У вихідному стані ступінь кристалічності в системі з додатковим шаром срібла є вдвічі

вищою. Ймовірно, це пов'язано з високою інтенсивністю дифракційного рефлексу від срібла порівняно з помірною інтенсивністю від піку мідної фази. У випадку обох тонкоплівкових систем збільшення температури обробки обумовлює зменшення ступеню кристалічності. Єдиним виключенням є незначне збільшення ступеню кристалічності в системі Ni/Ag/Ti за температури 400 °C, що може бути пов'язано з утворенням нових інтерметалідних фаз між Ni та Ti.

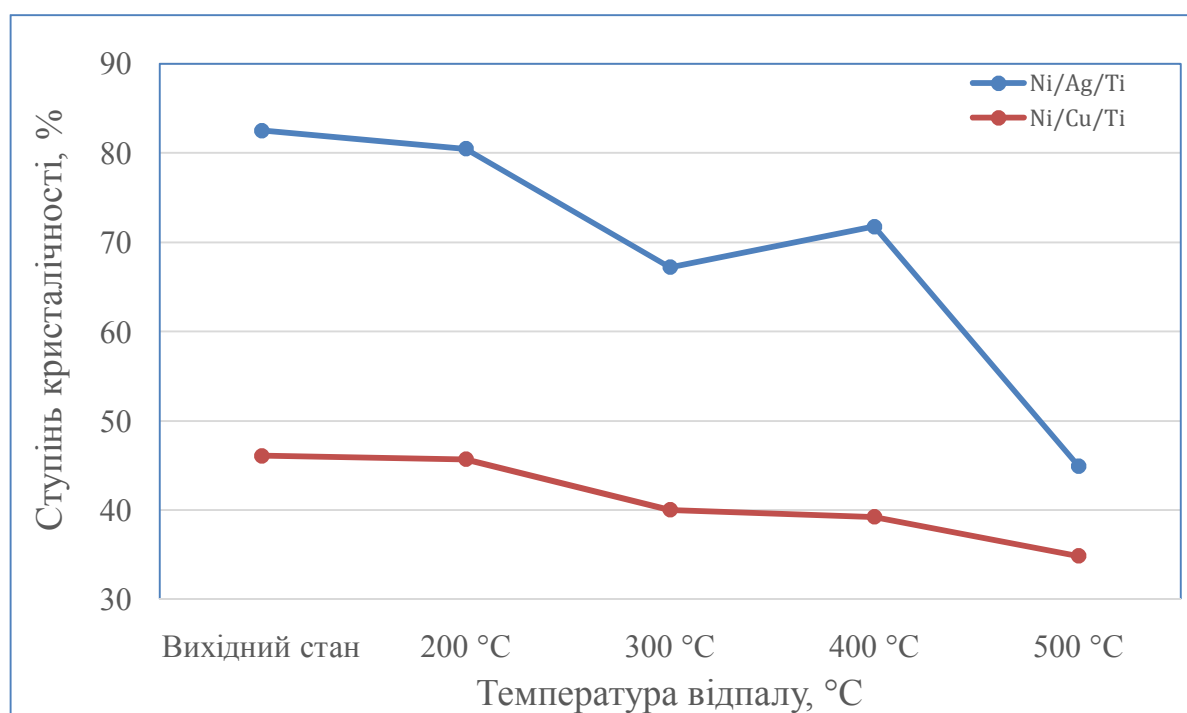


Рисунок 3.13 – Температурна залежність ступеню кристалічності тонкоплівкових систем Ni/Ag/Ti та Ni/Cu/Ti

Зменшення ступеню кристалічності в процесі термічної обробки, ймовірно, є наслідком розвитку процесів насичення тонкоплівкових систем атомам домішок з середовища обробки. Варто зауважити, що хоча термічна обробка проводилася в середовищі високочистого аргону хімічної чистоти 99,993 %, однак навіть за таких умов мінімальна кількість домішок, і зокрема кисню, є достатньою для їх адсорпції поверхнею плівки за підвищених температур.

3.2 Результати скануючої електронної мікроскопії

Нижче наведено результати дослідження мікроструктури поверхні систем Ni/Ag/Ti та Ni/Cu/Ti у вихідному стані, а також після відпалу в середовищі аргону за температур 300 °C та 500°C.

Зображення морфології поверхні зразка системи Ni/Ag/Ti у вихідному стані (рис. 3.14) засвідчує, що плівка після магнетронного осадження формується гладкою, без порушень її суцільності або якихось ознак структурної неоднорідності поверхні. На верхній частині зображення можна бачити скол від кремнієвої підкладки.

Після відпалу за температури 300 °C (рис. 3.15) значних змін в морфології поверхні системи не спостерігається, що добре узгоджується з даними рентгеноструктурного аналізу (рис. 3.3), які засвідчили відсутність фазових перетворень.

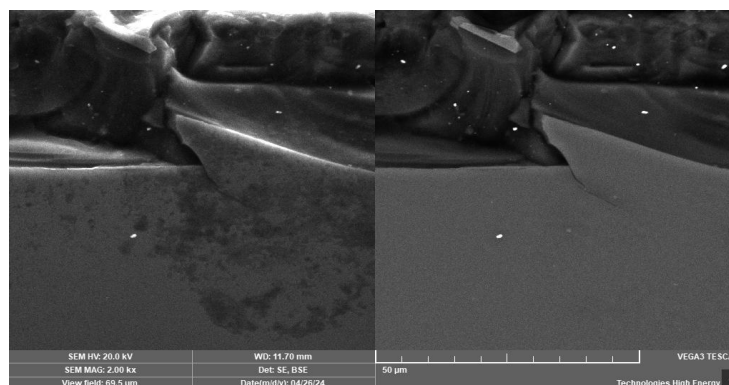
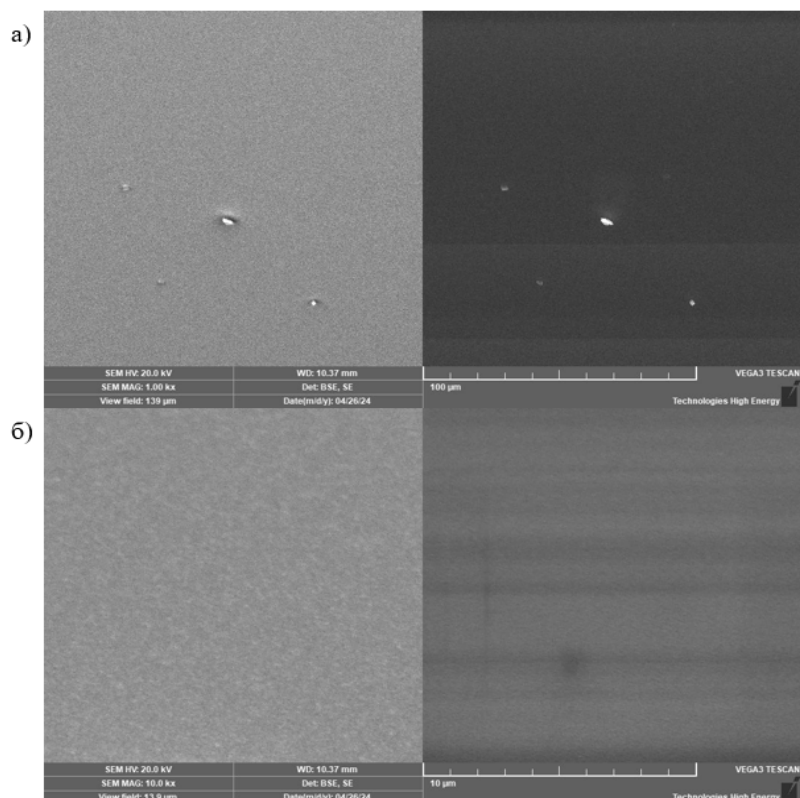


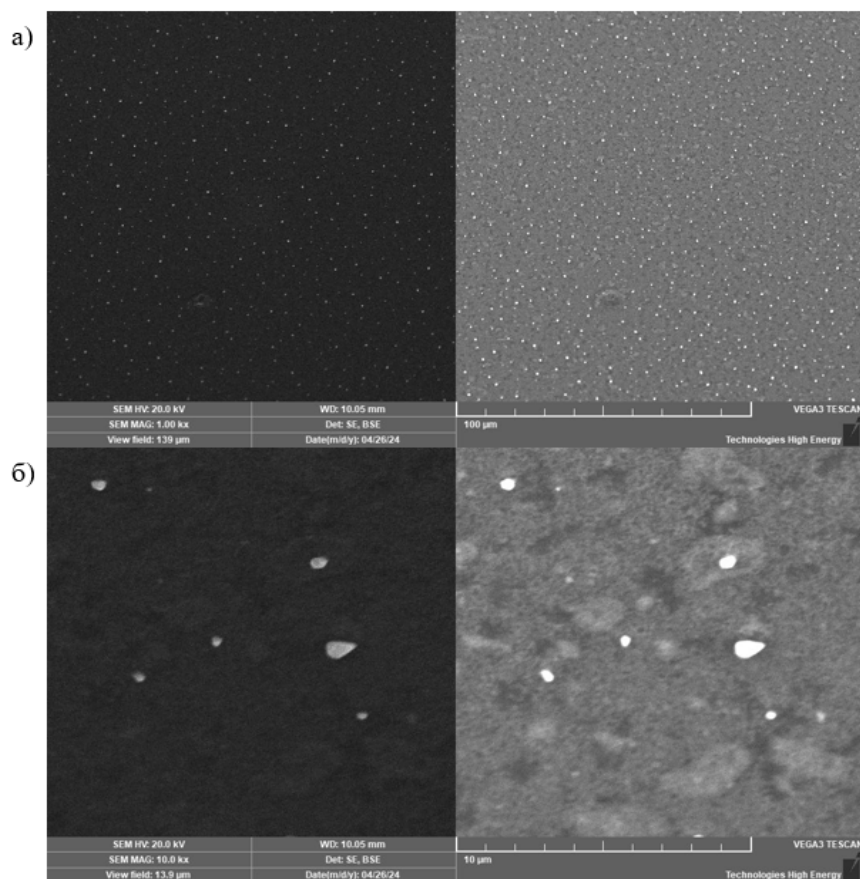
Рисунок 3.14 – Дані скануючої електронної мікроскопії для системи Ni/Ag/Ti у вихідному стані при збільшенні 2000х



a – збільшення 1000х; *б* – збільшення 10000х

Рисунок 3.15 Дані скануючої електронної мікроскопії для системи Ni/Ag/Ti після відпалу за температури 300 °С упродовж 30 хв

З підвищенням температури до 500 °С (рис. 3.16) поверхня зразка помітно змінюється, що особливо помітно за збільшення 1000х. На поверхні спостерігається поява контрастних включень світлого та сірого кольору. Можна припустити, що ці включення відповідають оксидним фазам та сріблу, яке має схильність до поверхневої агломерації внаслідок низької поверхневої енергії. Однак дійти однозначних висновків щодо природи новоутворених поверхневих фаз виключно за даними структурних досліджень не представляється можливим, для подальшого уточнення необхідним є проведення хімічного аналізу.

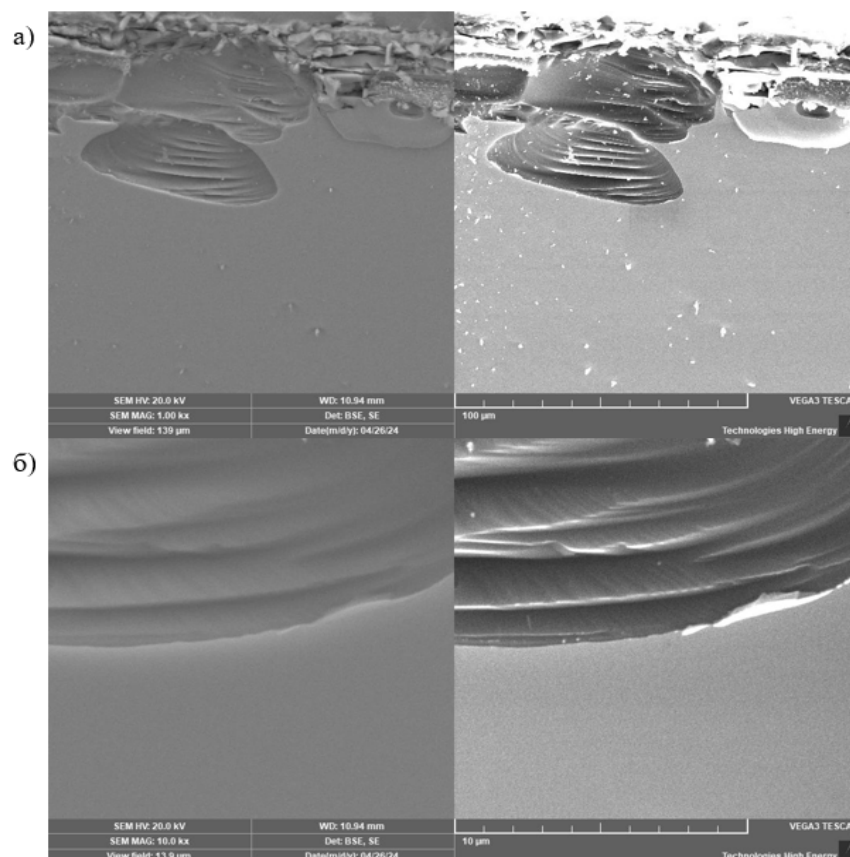


a – збільшення 1000х; *б* – збільшення 10000х

Рисунок 3.16 – Дані скануючої електронної мікроскопії для системи Ni/Ag/Ti після відпалу за температури 500 °С упродовж 30 хв

Зображення морфології поверхні системи Ni/Cu/Ti у вихідному стані (рис. 3.17) засвідчує, що, аналогічно до системи з легуючим шаром срібла, плівка формується гладкою та суцільною. Водночас, її морфологія є більш неоднорідною.

Після відпалу за температури 300 °С (рис. 3.18) поверхня зразка змінюється. На поверхні спостерігається поява контрастних включень світлого кольору. Можна припустити, що ці включення відповідають фазі твердого розчину заміщення Cu-Ni, формування якого було зафіксовано за результатами рентгеноструктурних досліджень (рис. 3.9).



a – збільшення 1000х; *б* – збільшення 10000х

Рисунок 3.17 – Дані скануючої електронної мікроскопії для системи Ni/Cu/Ti у вихідному стані

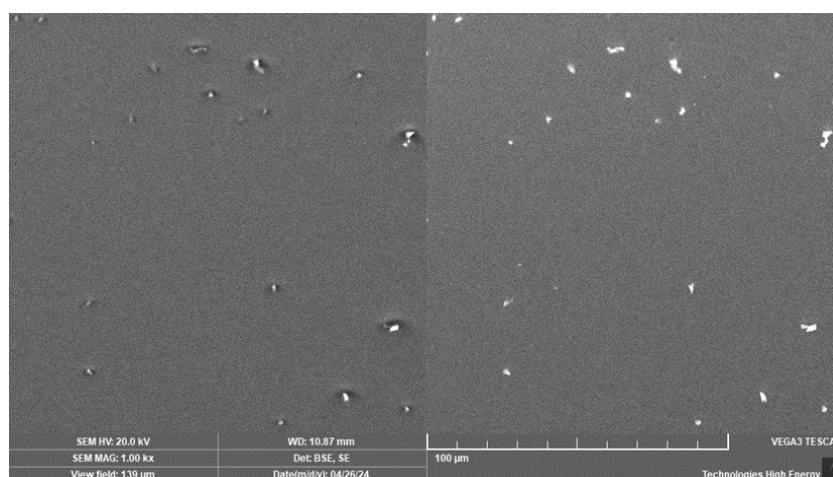
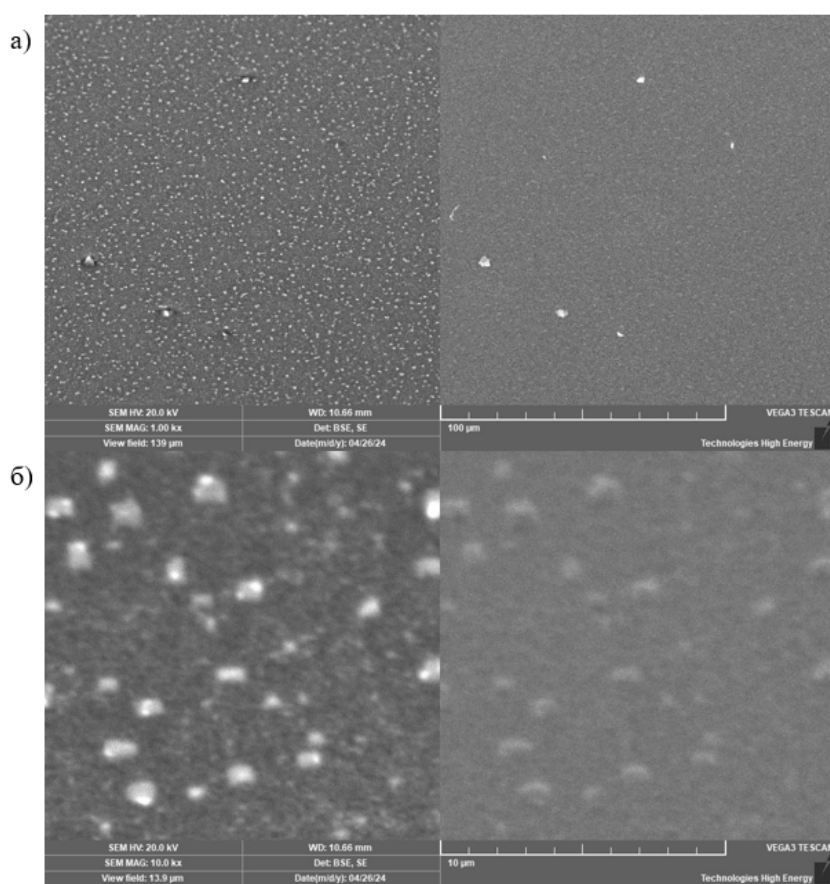


Рисунок 3.18 – Дані скануючої електронної мікроскопії для системи Ni/Cu/Ti після відпалу за температури 300 °С упродовж 30 хв при збільшенні 1000х

З підвищенням температури до 500 °С (рис. 3.19) спостерігається збільшення кількості включень різного розміру, що можуть відповідати

оксидним фазам та фазі твердого розчину заміщення, що узгоджується з даними рентгеноструктурного фазового аналізу (рис. 3.10).



a – збільшення 1000х; *б* – збільшення 10000х

Рисунок 3.19 – Дані скануючої електронної мікроскопії для системи Ni/Cu/Ti після відпалу за температури 500 °С упродовж 30 хв

Висновки до розділу 3

Досліджено особливості зміни структури та фазового складу плівкових композицій різного хімічного складу – Ni(30 нм)/Cu(10 нм)/Ti(30 нм) та Ni(30 нм)/Ag(10 нм)/Ti(30 нм) – за умов ізотермічного відпалу в аргоні з використанням методів рентгенівської дифракції та скануючої електронної мікроскопії.

За результатами рентгеноструктурних досліджень встановлено, що термічна обробка системи з додатковим шаром Ag за температур нижче 400 °С не призводить до зміни вихідного фазового складу. Початок розвитку дифузійно-індукованих процесів фазоутворення спостерігається після відпалу за температури 400 °С з формуванням інтерметалідних фаз різного

стехіометричного складу – NiTi та Ni_4Ti_3 . За даними скануючої електронної мікроскопії показано, що після подальшого збільшення температури термічної обробки до $500\text{ }^\circ\text{C}$ на поверхні фіксується поява нових фаз, розподіл яких за площею зразка є нерівномірним.

Для системи з проміжним шаром Cu результати рентгенівської дифракції засвідчили початок розвитку дифузійних процесів та зміни фазового складу за нижчої температури відпалу, порівняно із системою з легуючим шаром Ag – $300\text{ }^\circ\text{C}$. Зафіксовано формування твердого розчину заміщення Cu-Ni , відносний вміст якого збільшується при подальшому збільшенні температури обробки. Водночас, навіть за умов порівняно високих температур формування інтерметалідних фаз Ni-Ti не відбувається. Згідно даних скануючої електронної мікроскопії, показано що відносна кількість включень світлого кольору на поверхні в системі з додатковим шаром Cu є вищою, порівняно із системою, легованою Ag .

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність

З кожним роком зростає тенденція до мініатюризації приладів, що викликає потребу у створенні зразків відповідного розміру. Перспективним рішенням є використання тонкоплівкових композицій на основі сплаву NiTi. Популярність тонкоплівкових композицій на основі NiTi обумовлена основними властивостями цього сплаву: ефектом пам'яті форми та надпружністю. Завдяки цим властивостям, тонкі плівки NiTi знаходять застосування в багатьох сферах діяльності людини, включаючи медицину, авіакосмічну галузь та мікроелектромеханічні системи.

В даній роботі було досліджено вплив відпалу в середовищі аргону на структурно-фазові перетворення в нанорозмірних плівкових системах Ni/Ag/Ti та Ni/Cu/Ti.

4.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

4.2.1 Витрати на оплату праці

Заробітна плата кожного працівника визначається з урахуванням складності роботи і обчислюється в людино-днях. Щоденні зарплати встановлюються шляхом поділу місячного окладу на кількість днів у вимірі, прийнятому для певних дослідницьких завдань, які передбачають п'ятиденний робочий тиждень (21 – 22 дня).

Фонд заробітної плати розраховується шляхом множення середньоденної заробітної плати для кожної категорії виконавців на планову трудомісткість відповідних робіт. Результати розрахунків даних трудомісткості та фонду заробітної плати представлені в таблицях 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість виконання дипломної роботи

Етапи	Трудомісткість за виконавцями, люд.-дні	
	Старший науковий співробітник	Інженер-дослідник
1	2	3
1.Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	2	2
2.Аналіз науково-технічних публікацій по темі дослідження	-	12
3. Обґрунтування мети та напрямів дослідження	2	2
4.Розробка методики проведення дослідження	2	2
5.Проведення дослідження	10	10
6.Обговорення результатів дослідження	7	7
Усього	23	35

Таблиця 4.2 – Фонд заробітної плати для виконавців дипломної роботи

Посада	Трудомісткість, люд.-дні	Місячний оклад, грн	Денна заробітна плата, грн	Сумарна заробітна плата, грн
Старший науковий співробітник	23	19266,41	908,79	20902,17
Інженер-дослідник	35	9238	435,75	15251,25
Всього	58	28504,41	1344,54	36153,42

4.2.2 Єдиний соціальний внесок

Обов'язковий внесок на загальнодержавне соціальне страхування, відомий як Єдиний соціальний внесок (ЄСВ), складається з обов'язкових відрахувань. З 1 січня 2016 року ставка ЄСВ становить 22 %. Базою для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі (підсумок по табл. 4.2).

Наразі ЄСВ буде становити:

$$\text{ЄСВ} = 36153,42 \times 0,22 = 7\,953,75 \text{ грн.}$$

4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

Матеріали для даної НДР були отримані співробітником кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки, науковим керівником, І.О. Кругловим у науково-дослідницькому синхротронному центрі RIKEN SPring-8 (Японія) в рамках меморандуму про співпрацю, між КПІ ім. Ігоря Сікорського та RIKEN SPring-8 Center, тому витрат на матеріали немає.

4.2.4 Енергоносії для проведення досліджень

Витрати на електроенергію будуть зазначені в статті «Накладні витрати».

4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання

Спеціальне обладнання для проведення НДР не закуповувалось, усе обладнання було надано кафедрою ФМТО Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» та науково-дослідницьким синхротронним центром RIKEN SPring-8 (Японія) в рамках меморандуму про співпрацю.

4.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій

Виконання даної НДР не передбачало використання послуг сторонніх організацій, тому за даною статтею витрати відсутні.

4.2.7 Витрати на службові відрядження

Під час виконання НДР службові відрядження не передбачалися, тому за даною статтею витрати відсутні.

4.2.8 Інші прямі невраховані витрати

У цій статті поєднуються всі витрати на проведення НДР, що не увійшли до попередніх статей. При проведенні роботи інші прямі витрати приймаємо на рівні 10 % від суми врахованих витрат на виконання НДР.

$$I_b = (36153,42 + 7\,953,75) \cdot 0,1 = 4410,72 \text{ грн.}$$

4.2.9 Накладні витрати

У цій статті враховуються різні види витрат, пов'язаних з управлінням виконавчою організацією проекту. Вони включають витрати на розробку і раціоналізацію, амортизацію основних активів, науково-технічну інформацію, забезпечення безпеки та умов праці, оплату банківських послуг, а також податки, збори та інші обов'язкові платежі.

Давайте розглянемо можливий підхід до розрахунку загальних накладних витрат, який полягає у визначенні відсоткового співвідношення витрат на прямі витрати на рівні 20%.

$$H_b = (36153,42 + 7\,953,75 + 4410,72) \cdot 0,2 = 9703,58 \text{ грн.}$$

4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Для складання планової калькуляції вартості досліджень по даній темі використовуються розрахунки та нормативні дані (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1	2	3
1. Витрати на оплату праці	36153,42	Відповідно до розрахунків
2. Єдиний соціальний внесок	7953,75	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3. Матеріали для проведення досліджень	-	Відповідно до розрахунків
4. Енергоносії для проведення досліджень	-	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
5. Спецобладнання для наукових цілей	-	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
6. Вартість послуг сторонніх організацій	-	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
7. Витрати на службові відрядження	-	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
8. Інші невраховані прямі витрати по темі	4410,72	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9. Накладні витрати	9703,58	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)

10. Усього витрат по темі	58221,47	Сума попередніх статей
---------------------------	----------	------------------------

4.3 Науково-технічна ефективність НДР

Для визначення доцільності проведення даної роботи потрібно розрахувати очікуваний економічний ефект науково-дослідної роботи (НДР). Проте такий розрахунок можна здійснити лише для НДР, спрямованих безпосередньо на створення нових матеріалів, покращення якості продукції та розробку нових конструкцій.

Для визначення річного економічного ефекту використовується бальна система оцінювання економічної ефективності за такими показниками: важливість розробки (К1), можливість використання результатів розробки (К2), теоретичне значення та рівень новизни (К3), складність дослідження (К4).

Коефіцієнт К1 може приймати наступні значення:

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

Коефіцієнт К2 може приймати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.
- г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;

д) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт К3 може приймати такі значення:

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

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

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

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

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

Коефіцієнт К4 може приймати такі значення:

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

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

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

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

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

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів:

$$Б = K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K4. \quad (4.1)$$

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

$$Б=3 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 5=315.$$

Таблиця 4.4 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1.Важливість розробки	K_1	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2.Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	7
3.Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
4.Складність дослідження	K_4	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень.	5

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot B - E_n \cdot B_{\text{НДР}}, \quad (4.2)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

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

$B_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР.

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 315 - 0,2 \cdot 58221,47 = 145855,71 \text{ грн.}$$

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:

$$E_e = E_{\text{НДР}} / B_{\text{НДР}}. \quad (4.3)$$

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = 145855,71 / 58221,47 = 2,51.$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 2,51 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

4.4 Висновки до розділу 4

1) Проведені розрахунки для визначення доцільності проведення даної роботи і було визначено, що коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 2,51, що свідчить про доцільність її виконання.

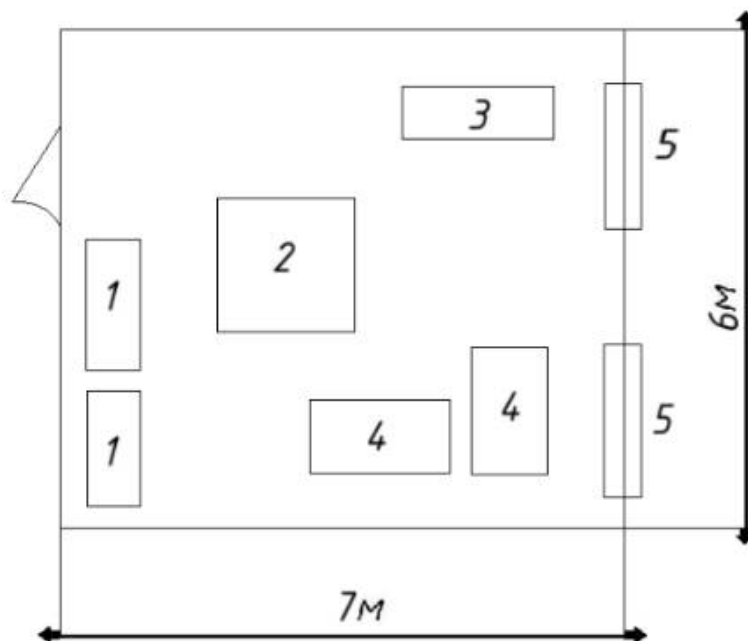
2) Загалом враховуючи витрати на оплату праці, єдиний соціальний внесок, накладні та невраховані прямі витрати по темі, витрачено 58221,47 грн.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Основним завданням забезпечення охорони праці є розробка і впровадження засобів і методів захисту працівників від потенційних загроз та небезпек на робочому місці, а також запобігання аваріям та усунення їх наслідків на підприємстві. Забезпечення безпеки праці починається з аналізу та оцінки потенційних ризиків, пов'язаних з конкретними видами діяльності на робочому місці. На основі аналізу ризиків, розробляються та впроваджуються конкретні заходи безпеки, спрямовані на запобігання небезпекам та зниження ризику для працівників. Забезпечення безпеки на робочому місці вимагає постійного контролю та нагляду. Це включає періодичну перевірку дотримання правил та процедур безпеки, оцінку ефективності заходів безпеки та прийняття необхідних заходів для виправлення виявлених недоліків. В даному розділі проаналізовані потенційні шкідливі та небезпечні фактори, що становлять ризик для людини при проведенні дослідження впливу відпалу в середовищі аргону на структуру та фазовий склад нанорозмірних плівок Ni/Cu/Ti та Ni/Ag/Ti. Також розроблена система заходів для усунення небезпек у випадку надзвичайних ситуацій під час виконання досліджень.

5.1 Аналіз параметрів приміщення

Науково-дослідні роботи були проведені на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки НН ІМЗ ім. Є.О. Патона в корпусі № 9, в лабораторії термічної обробки, кімната 506 на 5-му поверсі. Схема лабораторії представлена на рис. 5.1. Параметри аудиторії представленні в табл. 5.1.



1 – робочий стіл; 2 – установка ВУП-5М(робоче місце); 3 – шафа для зразків;
4 – стіл для підготовки зразків; 5 – вікно

Рисунок 5.1 – Схема лабораторії вакуумно-термічної обробки

Таблиця 5.1 – Параметри аудиторії

Параметр	Розмір, м
Параметри аудиторії	
Довжина	6
Ширина	7
Висота	2,7
Параметри вікна	
Ширина	2,7
Висота	2,5

Площа аудиторії становить: $S=a \times b=6 \times 7=42 \text{ м}^2$.

Об'єм аудиторії становить: $V=a \times b \times c=6 \times 7 \times 2,7=113,4 \text{ м}^3$.

У лабораторії працює дві людини, таким чином, площа, яка приходить на одну людину – 21 м^2 , об'єм – $56,7 \text{ м}^3$. Згідно з ДБН В.2.2-28-2010, де на одну людину повинно приходитись не менше 6 м^2 площі та 20 м^3 об'єму, дані відповідають санітарним нормам [27].

5.2 Мікроклімат робочої зони

Повітря в приміщенні має великий вплив на самопочуття, продуктивність та здоров'я людини. Щоб підтримувати комфортні умови праці повинен бути постійний контроль відповідності повітряного середовища робочого приміщення вимогам щодо умов мікроклімату та вмісту шкідливих речовин. Фактори, що характеризують стан робочого мікроклімату є[28]:

- температура повітря ($^{\circ}\text{C}$);
- відносна вологість повітря (%);
- швидкість руху повітря (м/с);
- інтенсивність інфрачервоного (теплого) випромінювання (Вт/м^2) від поверхні обладнання та активних зон технологічних процесів.

Роботи, що виконуються у лабораторіях чи на підприємствах, поділяються на категорії, які залежать від енерговитрат організму для виконання заданої роботи. Для даних категорій встановлені відповідні допустимі мікрокліматичні вимоги згідно ДСН 3.3.6.042-99[29]. Відповідно до цих вимог, виконання даної науково-дослідної роботи можна віднести до робіт середньої важкості, а саме до категорії Па. Ця категорія включає в себе роботи, що пов'язані з ходінням, переміщенням невеликих (вагою до 1 кг) предметів, виробів у положенні сидячи або стоячи, які потребують незначного рівня фізичного напруження. При таких умовах енерговитрати організму людини складають 160 ккал/год – 210 ккал/год [29].

В таблиці 5.2 наведено параметри мікроклімату приміщення лабораторії термічної обробки, у якій відбувалося виконання даної науково-дослідної роботи.

Таблиця 5.2 – Виміряні та нормовані параметру мікроклімату

Категорія робіт середньої важкості				
Параметр мікроклімату	Період року	Нормовані значення	Дані вимірювання	Вентиляція
Температура	Теплий	21 – 23	23	Природна
	Холодний	18 – 20	18	Природна
Відносна вологість повітря, %	Теплий	40 – 60	50	Природна
	Холодний	40 – 60	60	Природна
Швидкість руху повітря, м/с	Теплий	0,3	0,2	Природна
	Холодний	0,2	0,2	Природна

5.3 Аналіз освітлення в приміщенні лабораторії

Освітленість робочого місця є вагомим фактором комфортних умов праці а правильність його положення позитивно впливає на нервову систему людини. Правильна організація освітлення робочої зони суттєво зменшує напругу на очі і дозволяє вберегти зір працівників.

Освітлення може бути реалізоване природним шляхом (сонячні промені) або штучним шляхом (електричні джерела світла). У випадку недостатнього природного освітлення, його можна доповнити штучним. Залежно від характеристик зорової роботи, розміру об'єкта розрізнення, рівня зорової активності, системи освітлення, фонового освітлення та контрасту об'єкта розрізнення з фоном, встановлюються вимоги відповідно до ДБН В.2.5.28-2006 [30].

Природне освітлення поділяється на такі види: бокове освітлення (одно- або двостороннє), яке здійснюється через світлові отвори (вікна) в зовнішніх стінах; верхнє освітлення – через використання ліхтарів та отворів у дахах та перекриттях; комбіноване освітлення – поєднання верхнього та бокового освітлення.

Відповідно до класифікації зорової роботи виділяють такі класи точності:

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

Роботи, які проводились в лабораторії термообробки, кабінет 506, мають середній клас точності.

В даному приміщенні освітлення є комбінованим, тобто включає в себе як природні, так і штучні джерела світла. Природне світло забезпечується бічними віконними прорізами. Штучне освітлення забезпечується люмінесцентними лампами ЛБ-40.

5.3.1 Характеристика природнього освітлення лабораторії термічної обробки

Коефіцієнт природного освітлення (КПО) вимірює ступінь освітленості всередині приміщення порівняно з освітленістю на вулиці. Зазвичай використовується формула для розрахунку значення КПО (e_n) наступного вигляду:

$$en = e_H \cdot mn, \quad (5.1)$$

де en – значення КПО для робіт середньої точності;

mn – коефіцієнт світлового клімату [30].

У зв'язку з розташуванням вікон на південній стороні приміщення лабораторії термічної обробки, множник mn має значення 0,85. Для категорії робіт середньої точності, КПО складає 1,5%. Враховуючи ці дані,

розрахункове значення КПО для лабораторії термічної обробки становить 1,27.

$$en = 1,5 \cdot 0,85 = 1,2.$$

Отриманий результат свідчить про можливість негативного впливу тривалої роботи при такому рівні освітленості на зір. З метою забезпечення комфортних умов праці, природне освітлення у приміщенні потребує додаткового підсвічування штучним освітленням

5.3.2 Характеристика штучного освітлення лабораторії термічної обробки

У приміщенні лабораторії термічної обробки використовуються 12 люмінесцентних ламп типу ЛБ-40 для освітлення. Щоб оцінити якість штучного освітлення, можна використовувати розрахунок нормованої освітленості з урахуванням коефіцієнта використання світлового потоку.

Нормовану освітленість можна розрахувати за формулою [31]:

$$E = \frac{F \cdot N \cdot n \cdot \eta}{K \cdot S \cdot Z}, \quad (5.2)$$

де E – нормована освітленість, лк;

F – світловий потік;

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світлового потоку;

K – коефіцієнт запасу;

S – площа приміщення, що освітлюється, m^2 ;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення.

Розрахункові параметри задля визначення нормованої освітленості в приміщенні наведено у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Розрахункові параметри для визначення нормованої освітленості

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

Підставляючи дані з таблиці 5.3 в формулу отримуємо наступні результати:

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

Отже, для лабораторії термічної обробки, яка знаходиться у кімнаті 506, розраховане значення нормованої освітленості становить 310 лк. Згідно вимог ДБН В.2.5-28-2006, освітленість робочого приміщення повинна бути не менше 300 лк. Отримане розрахункове значення відповідає встановленій нормі, що свідчить про те, що штучне освітлення для даної лабораторії є достатнім згідно вимог.

5.4 Аналіз небезпечних чинників в приміщенні лабораторії термічної обробки

Виконання даної роботи у лабораторному приміщенні передбачає вплив факторів ризику таких як шум, вібрації, небезпека ураження електричним струмом чи теплові ураження.

У таблиці 5.4 наведені відомості про потенційні небезпеки та шкідливі фактори, пов'язані з використанням обладнання під час проведення науково-дослідних робіт у приміщенні лабораторії.

Таблиця 5.4 – Шкідливі фактори при виконанні НДР

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

До початку роботи в лабораторії термічної обробки, з метою повідомлення працівників про потенційні небезпеки, шкідливі фактори та запобігання нещасних випадків, проводиться інструктаж з питань техніки безпеки.

5.4.1 Вплив шуму та вібрацій

Шум та вібрації мають значний вплив на здоров'я працівників та комфорт у робочій зоні. Високий рівень шуму може призвести до загрози слуху, вплинути на емоційний та психологічний стан, а також спричинити розлади нервової системи. Тривала вібрація може спричинити порушення в опорно-руховому апараті та м'язах.

У процесі виконання науково-дослідної роботи використовуване обладнання може бути джерелом шуму та вібрацій. Установка ВУП-5М працює за допомогою електроустаткування та допоміжних приладів. Основними джерелами шуму під час роботи ВУП-5М є вентилятори

охолодження, розташовані всередині установки, а також дифузійні та механічні вакуумні насоси, які використовуються для формування вакууму у камері установки. Робота цих насосів є основним джерелом шуму та вібрацій. небезпечний рівень шуму для людини визначається як $L = 120$ дБА, при такому рівні можливі фізичні пошкодження та втрата слуху. Під час роботи обладнання рівень шуму становить 52 дБА, що відповідає нормам ДСН 3.3.6.037-99 [32].

Робота механічного форвакуумного насоса супроводжується механічними коливаннями – вібраціями. Щоб запобігти негативному впливу вібрацій на організм людини та обладнання, насос розміщується на гумовій віброізоляційній підставці та з'єднується з установкою ВУП-5М за допомогою гумового шлангу. Ці заходи дозволяють знизити рівень вібрацій до сприятливого рівня, відповідно до санітарних норм.

5.4.2 небезпечні чинники при роботі з установкою ВУП-5М

ВУП-5М є спеціалізованою вакуумною установкою, яка вимагає вміння працювати з вакуумною технікою, дотримання правил роботи з вакуумним обладнанням та знання техніки безпеки. Панель керування установки надає інформацію щодо рівня води в системі охолодження, температури у камері, герметичності вакуумної камери та інших показників.

Дана установка отримує живлення від 380-вольтової мережі, тому можливе пошкодження живильних кабелів та електрообладнання всередині установки може створити ризик ураження електричним струмом. З метою забезпечення безпеки щодо електрики, установка має підключення до заземлювального проводу. Підключення живлення установки до електричної мережі здійснюється за допомогою автоматичних вимикачів.

Під час роботи деякі компоненти установки, наприклад, нагрівальний стілець та дифузійний вакуумний насос, нагріваються до температур, що наближаються до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, що може створювати ризик опіків. Для охолодження нагрітих компонентів використовується система холодного

водопостачання. У разі пошкодження системи охолодження або перерви в подачі води, установка ВУП-5М автоматично зупиняється, щоб уникнути нагрівання згаданих елементів.

Для відведення повітря з вакуумної камери установки ВУП-5М використовується гнучкий гумовий шланг, який приєднаний до вихідного патрубку механічного форвакуумного насосу та виведений на вулицю, з метою уникнення потрапляння потенційно шкідливих випарів та інертних газів всередину лабораторії.

Правильне використання установки ВУП-5М є важливим для її надійної роботи та зниження ризику виникнення небезпечних ситуацій. Початок роботи з установкою та її вимкнення вимагають точного дотримання встановленої послідовності дій:

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

Вимкнення відбувається в такій послідовності:

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

Після вимкнення установки вакуумної камери передбачається підтримка низького рівня вакууму, що заважає взаємодії обладнання всередині камери з киснем повітря.

5.4.3 Безпека при роботі з електричними приладами

Під терміном "електробезпека" розуміють комплекс заходів, які приймаються для захисту працівників від ураження електричним струмом.

Внаслідок ураження електричним струмом від неізольованих дротів або незаземленого обладнання виникає електротравма.

Ураження нервової системи та м'яких тканин організму в результаті дії електричного струму може мати смертельні наслідки [33].

Залежно від ризику ураження електричним струмом, приміщення класифікують на:

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

Лабораторія термічної обробки є приміщенням з підвищеною потенційною небезпекою. Потенційне ризик ураження електричним струмом пов'язаний з роботою установки ВУП-5М та комп'ютерів, що використовуються для обробки експериментальних даних.

Електроживлення обладнання, що використовується в лабораторії, забезпечено підключенням до електромережі через автоматичні електровимикачі, які автоматично відключають струм у разі короткого замикання або випадкового ураження людини струмом.

Електрощиток розташований поруч зі входом до лабораторії, що дозволяє оперативно відключити електропостачання в разі надзвичайної ситуації.

Електричне обладнання лабораторії та установка ВУП-5М мають підключення до мережі з використанням ізольованих дротів та заземлення, що забезпечує ефективний захист від ураження електричним струмом.

Розташування робочих місць сплановано таким чином, щоб уникнути випадкового контакту з небезпечним обладнанням.

5.5 Організація робочого місця

Організація праці на робочому місці – це система заходів, спрямованих на ефективне використання обладнання, знарядь та предметів праці під час виконання роботи [34]. Робоче місце представляє собою простір, де людина здійснює свою трудову діяльність. Дотримання норм організації праці на робочому місці відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98 та НПАОП 0.00-1.28-10 значно підвищує ефективність праці та знижує вплив шкідливих факторів на здоров'я. Згідно з цими нормами, організація робочого простору, графік роботи та відпочинку працівників визначаються залежно від робочої пози (вільна, стояча або сидяча), у якій перебуває працівник.

Виконання даного науково-дослідного завдання передбачає необхідність перебування у сидячій позі, оскільки для основної частини роботи використовується комп'ютер. Оптимальне робоче місце для такої роботи має відповідати таким характеристикам:

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

Параметри та організація робочих місць у лабораторії термічної обробки, де проводилась дана науково-дослідна робота, відповідають санітарним нормам і створюють комфортні умови праці.

5.6 Пожежна безпека

Пожежа належить до першого класу надзвичайних ситуацій, які мають техногенний характер. Визначення категорії приміщення залежить від показників пожежовибухонебезпечності речовин та матеріалів, які знаходяться або використовуються в ньому, а також їх кількості. Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [28], приміщення поділяються на п'ять категорій в залежності від вибухопожежної та пожежної небезпеки (категорії А, Б, В, Г, Д).

Категорія А включає горючі гази, легкозаймисті рідини з температурою спалаху до 28 °С. Категорія Б охоплює горючий пил або волокна, легкозаймисті рідини з температурою спалаху понад 28 °С. Категорія В включає горючі та важкогорючі рідини, тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали. Категорія Г включає негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, при обробці яких виникає виділення променистого тепла, іскор або полум'я. Категорія Д включає негорючі речовини та матеріали у холодному стані.

Лабораторія термічної обробки відноситься до категорії "Г", оскільки в ній присутні негорючі речовини та матеріали, які можуть бути у гарячому або розжареному стані і виділяти тепло. Електроустаткування, використовуване під час науково-дослідної роботи, може бути потенційним джерелом пожежі в лабораторії. Пожежі, що виникають на електроустановках, класифікуються як клас "Е". Для тушіння пожежі на робочій установці рекомендується використовувати порошковий або вуглекислотний вогнегасник.

У разі виникнення пожежі в аудиторії передбачений план евакуації персоналу, який зображений на рис. 5.2. Інформування персоналу про пожежу здійснюється за допомогою внутрішнього комунікаційного засобу.

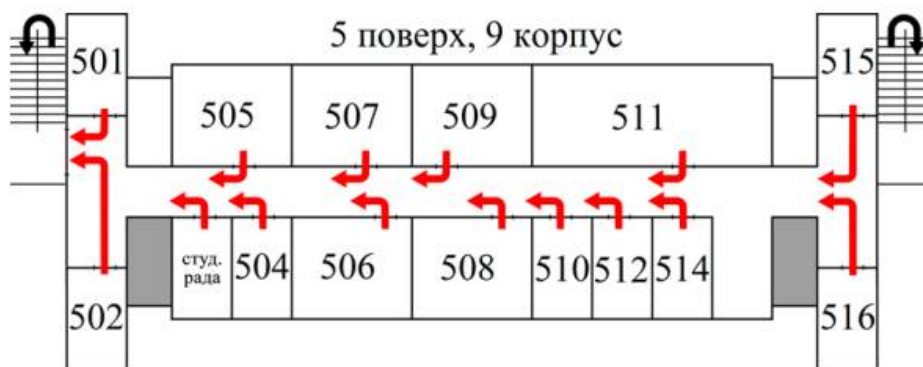


Рисунок 5.2 – План евакуації

Основними заходами для запобігання пожежам є:

- регулярна перевірка працездатності засобів для тушіння пожеж та систем пожежного сповіщення;
- заборона паління у місцях, які не призначені для цього, і в небезпечній близькості до легкозаймистих матеріалів;
- перевірка правильності електричної проводки;
- щорічне тестування ізоляції за допомогою підвищеної напруги приблизно 500 В.

У разі виявлення пробою ізоляції корпусу комп'ютера необхідно відключити живлення в аудиторії та повідомити відповідальну особу за приміщення.

У випадку, коли людина потрапила під дію електричного струму, необхідно вимкнути живлення в аудиторії, покласти постраждалу особу на дерев'яний паркет з підкладенням одягу під голову і негайно зателефонувати за номером екстреної допомоги 103. При необхідності треба надати першу допомогу з реанімації.

Якщо комп'ютер або електрична проводка загорілися, слід вимкнути живлення в аудиторії, зателефонувати за номером пожежної бригади 101 і почати тушити вогонь використовуючи доступний вогнегасник типу ОУБ-2.

5.7 Алгоритм дій у випадку "Повітряної тривоги" за сигналом цивільного захисту

Основні вказівки згідно до наказу від 04.08.2022 № НУ/129/2022 сигнал "Повітряна тривога" поширюється через централізовану систему оповіщення (сирени), регіональне радіо та телебачення. Довготривале звучання сирени триває від трьох до п'яти хвилин і слугує попередженням про загрозу ракетних або авіаційних ударів від противника, а також рекомендацією негайно пересунутись до найближчого укриття.

Крім того, щоб отримувати сигнали цивільного захисту "Повітряна тривога" та "Відбій повітряної тривоги" на телефоні, необхідно встановити додаток "Повітряна тривога" або "Київ цифровий" з магазину Google Play або AppStore.

Для отримання сповіщень слід виконати наступні дії:

а) встановіть додаток "Повітряна тривога" з Google Play або AppStore:

- 1) надайте дозвіл на отримання сповіщень та важливих попереджень;
- 2) виберіть область, з якої бажаєте отримувати сповіщення;
- 3) слідкуйте за початком та закінченням "Повітряної тривоги".

б) встановіть додаток "Київ цифровий" на своєму телефоні:

- 1) в межах профілю та налаштувань додатка надайте дозвіл на отримання сповіщень та важливих попереджень;
- 2) слідкуйте за початком та закінченням "Повітряної тривоги".

Дії працівників на робочому місці під час "Повітряної тривоги":

Працівники повинні знати:

- завдання щодо цивільного захисту, які припадають на їх робочі місця;
- місцезнаходження найближчих укриттів або захисних споруд, куди можна швидко пересунутися;
- порядок дій у разі "Повітряної тривоги".

Дії працівників на робочому місці під час "Повітряної тривоги" [28]:

а) за початком сигналу "Повітряна тривога":

- 1) працівники повинні виконати розпорядження керівництва і перейти до найближчого укриття або захисної споруди;

2) якщо немає можливості негайно пересунутися до укриття, працівники повинні вибрати найбільш захищене місце в приміщенні, подалі від вікон та зовнішніх стін;

3) працівники повинні утримуватися від виходу на вулицю під час тривання "Повітряної тривоги".

б) укриття або захисна споруда:

1) працівники повинні швидко та організовано перейти до укриття або захисної споруди;

2) в укритті необхідно дотримуватися вказівок та інструкцій цивільного захисту, наданих співробітниками керівництва або відповідними органами.

в) після закінчення сигналу "Повітряна тривога":

1) працівники можуть повернутися на робочі місця або відповідно до додаткових вказівок керівництва або органів цивільного захисту;

2) завдання щодо цивільного захисту повинні бути виконані відповідно до інструкцій та вимог.

Загалом, в разі сигналу "Повітряна тривога" працівники повинні діяти оперативно, виконувати розпорядження керівництва і пересуватися до найближчих укриттів або захисних споруд. Дотримання інструкцій та вказівок щодо безпеки є важливим для забезпечення особистої безпеки та мінімізації ризиків під час надзвичайних ситуацій.

5.8 Висновки до розділу 5

1) У приміщенні недостатній рівень природного освітлення, що не відповідає вимогам для комфортних умов праці. З цією метою використовується комбінована система освітлення, яка поєднує природне та штучне освітлення.

2) Мікроклімат, рівень шуму та вібрацій, а також організація робочого місця при виконанні досліджень відповідають санітарним нормам і створюють комфортні умови для проведення науково-дослідної роботи.

3) Було проведено аналіз потенційних ризиків, які можуть виникнути під час науково-дослідної роботи в лабораторії термічної обробки. Виконання роботи з обладнанням лабораторії передбачає підготовку, володіння необхідними навичками та дотримання правил та рекомендацій з метою запобігання можливих аварійних ситуацій та їх наслідків.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних джерел щодо особливостей прояву ефекту пам'яті форми та впливу легуючих елементів на структурно-фазові перетворення в тонкоплівкових сплавах на основі системи NiTi.

2. Для дослідження структурно-фазового складу об'єктів дослідження – плівкових композицій Ni/Ag/Ti та Ni/Cu/Ti – було застосовано метод рентгеноструктурного аналізу з використанням мідного випромінювання на дифрактометрі Rigaku ULTIMA IV. Мікроструктуру поверхні зразків досліджено методом скануючої електронної мікроскопії.

3. За результатами досліджень встановлено, що термічна обробка системи з проміжним шаром Ag за температур нижче 400 °C не призводить до зміни вихідного фазового складу, тоді як в системі, легованій Cu, дифузійні процеси та зміна фазового складу відбуваються за нижчої температури обробки – 300 °C. В системі з проміжним шаром Cu спостерігається формування твердого розчину заміщення CuNi, а також формування інтерметалідних фаз між Cu та Ti. Водночас, на відміну від системи з проміжним шаром Ag, формування інтерметалідних фаз Ni-Ti не зафіксовано в усьому досліджуваному інтервалі температур. За даними скануючої електронної мікроскопії показано, що за підвищених температур термічної обробки (500 °C) відносна кількість оксидних включень на

поверхні в системі з додатковим шаром Cu є вищою, порівняно із системою, легованою Ag .

4. Проведені розрахунки показали доцільність виконання цієї роботи, з коефіцієнтом умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи, який становить 2,51. Це підтверджує обґрунтованість проведення роботи. Загальні витрати на роботу склали 58221,477 грн.

5. Приміщення забезпечене достатнім рівнем комбінованого освітлення, що відповідає вимогам для комфортних умов праці. Мікроклімат, рівень шуму та вібрацій, а також організація робочого місця відповідають санітарним нормам і створюють комфортні умови для проведення науково-дослідної роботи.

6. Проведено аналіз потенційних ризиків, які можуть виникнути під час науково-дослідної роботи в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства. Робота з обладнанням лабораторії вимагає підготовки, наявності необхідних навичок та дотримання правил і рекомендацій для запобігання можливих аварійних ситуацій та їх наслідків.

CONCLUSIONS

1. An analysis of literary sources was carried out regarding the features of the manifestation of the shape memory effect and the influence of alloying elements on structural-phase transformations in thin-film alloys based on the NiTi system.

2. To study the structural and phase composition of the research objects – Ni/Ag/Ti and Ni/Cu/Ti film compositions – the method of X-ray structural analysis using copper radiation on a Rigaku ULTIMA IV diffractometer was applied. The microstructure of the surface of the samples was investigated by scanning electron microscopy.

3. According to the research results, it was established that the heat treatment of the system with an intermediate layer of Ag at temperatures below 400 °C does not lead to a change in the initial phase composition, while in the system doped with Cu, diffusion processes and a change in the phase composition occur at a lower processing temperature of – 300 °C . In the system with an intermediate layer of Cu, the formation of a solid solution of substitution of CuNi is observed, as well as the formation of intermetallic phases between Cu and Ti. At the same time, in contrast to the system with an Ag intermediate layer, the formation of Ni-Ti intermetallic phases was not recorded in the entire studied

temperature range. According to scanning electron microscopy data, it is shown that at elevated heat treatment temperatures (500 °C), the relative amount of oxide inclusions on the surface in the system with an additional layer of Cu is higher, compared to the system doped with Ag.

4. The performed calculations showed the expediency of performing this work, with the coefficient of conditional economic efficiency of research work, which is 2.51. This confirms the validity of the work. The total expenses for the work amounted to UAH 58,221.477.

5. The room is provided with a sufficient level of combined lighting that meets the requirements for comfortable working conditions. The microclimate, the level of noise and vibrations, as well as the organization of the workplace comply with sanitary standards and create comfortable conditions for scientific research work.

6. An analysis of potential risks that may arise during research work in the laboratory of thin-film materials science has been carried out. Working with laboratory equipment requires preparation, the necessary skills, and compliance with rules and recommendations to prevent possible emergency situations and their consequences.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Current global scenario of Sputter deposited NiTi smart systems / Ajit Behera [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9. – no. 6. – P. 14582–14598.
2. TiNi-based thin films in MEMS applications: a review / Yongqing Fu [et al.] // Sensors and Actuators A: Physical. – 2004. – Vol. 112. – no. 2-3. – P. 395–408.
3. Nickel titanium and nickel titanium hafnium shape memory alloy thin films / J. Rao [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2010. – Vol. 204. – no. 15. – P. 2331–2336.
4. Quantitative phase transformation behavior in TiNi shape memory alloy thin films / Bo-Kuai Lai [et al.] // Journal of Materials Research. – 2004. – Vol. 19. – no. 10. – P. 2822–2833.
5. Ziolkowski A. Pseudoelasticity of Shape Memory Alloys: Theory and Experimental Studies / Andrzej Ziolkowski // Elsevier Science & Technology Books, 2015. – 270 p.
6. Characterization of phase transformation in shape memory alloys by atomic force microscope / S. S. Xu [et al.] // Superlattices and Microstructures. – 2008. – Vol. 44. – no. 2. – P. 230–236.

7. Eswar Raju K. S. S. The effect of ageing on tensile behaviour, mode I and mixed mode I/III fracture toughness of 7010 aluminium alloy / K. S. S. Eswar Raju, Ashim K. Mukhopadhyay, Samir V. Kamat // International Journal of Materials Research. – 2006. – Vol. 97. – no. 11. – P. 1550–1558.
8. Recent developments in shape memory thin film technology / Bernhard Winzek [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Vol. 378. – no. 1-2. – P. 40–46.
9. Thin film shape memory alloys: Fundamentals and device applications / ed. by M. Shuichi, F. Y. Qing, H. W. Min. – Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2009. – 459 p.
10. 3D flexible NiTi-braided elastomer composites for smart structure applications / L. Heller [et al.] // Smart Materials and Structures. – 2012. – Vol. 21. – no. 4. – P. 045016.
11. Characterization of High-Speed Microactuator Utilizing Shape Memory Alloy Thin Films / M. Tomozawa [et al.] // Materials Science Forum. – 2005. – Vol. 475-479. – P. 2037–2042.
12. Growth and characterization of $\text{Ti}_x\text{Ni}_{1-x}$ shape memory thin films using simultaneous sputter deposition from separate elemental targets / Sohrab Sanjabi [et al.] // Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 491. – no. 1-2. – P. 190–196.
13. 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. – Vol. 615. – P. 413086.
14. Growth of ZnSe nano-needles by pulsed laser deposition and their application in polymer/inorganic hybrid solar cells / L. Chen [et al.] // Thin Solid Films. – 2013. – Vol. 529. – P. 76–79.
15. Shih C.-L. A robust co-sputtering fabrication procedure for TiNi shape memory alloys for MEMS / C.-L. Shih, B.-K. Lai, H. Kahn // Journal of Microelectromechanical Systems, – 2001. – Vol. 10. – P. 69 – 79.
16. Lehnert T. A new fabrication process for Ni–Ti shape memory thin films / T. Lehnert, S. Tixier, P. Böni, R. Gotthardt // Materials Science and Engineering, – 1999. – Vol. 273 – 275. – P. 713 – 716.

17. УДК 669.01 Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник / Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 348 с.
18. Nakata Y. Composition Dependence of the Atom Location of the Third Element in Ti–Ni–X Shape Memory Alloys / Yoshiyuki Nakata, Tsugio Tadaki, Ken'ichi Shimizu // *Materials Transactions, JIM*. – 1991. – Vol. 32. – no. 12. – P. 1120–1127.
19. Duerig T. W. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys / T. W. Duerig, K. N. Melton, D. Stöckel. // *Elsevier Science & Technology Books*, 2013. – 512 p.
20. Tran Y. Suppressed silicide formation in FePt thin films by nitrogen addition / Y. Tran, C. D. Wright // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2013. – Vol. 331. – P. 216–219.
21. Swann S. Magnetron sputtering / S. Swann // *Physics in Technology*, – 1988. – Vol. 19(2). – P. 67 – 75.
22. Martin P. M. Handbook of deposition technologies for films and coatings: Science, applications and technology / Peter M. Martin. – 3rd ed. – Norwich, N.Y : William Andrew, 2009. – 936 p.
23. Bunaciu A. A. X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications/ A. A. Bunaciu, E. Gabriela Udriștioiu, H. Y. Aboul-Enein // *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, – 2015. – Vol. 45(4). – P. 289 – 299.
24. The impact of crystal cut error on the measured impurity profiles resulting from ion implantation / Y. Chen [et al.] // *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. – 2000. – Vol. 13. – no. 2. – P. 243–248.
25. Scanning Microscopy for Nanotechnology / ed. by W. Zhou, Z. L. Wang. – New York, NY : Springer New York, 2007. – 522 p.
26. Grundy P. J. Electron microscopy in the study of materials / Philip James Grundy. – London : Edward Arnold, 1976. – 174 p.
27. ДСТУ 8604:2015. Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. – [На заміну ГОСТ 12.2.032-78 ; чинний від 2017-07-01]. – Вид. офіц. – Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2015. – 9 с.

28. Охорона праці та цивільний захист / О.Г. Левченко, О.І. Полукаров, В.В. Зацарний та ін. // За ред. О.Г. Левченка. - К.: Основа, 2019. – 472 с.
29. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – [Чинний від 1999-01-01]. – Київ: МОЗ України, 1999. – 42 с.
30. ДБН В.2.5.28-2006. Природне та штучне освітлення. – [Чинний від 2006-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2006. – 64 с.
31. <https://sites.google.com/site/cktehnologicnaosvita/home/molodsij-specialist/osnovi-ohoroni-praci/v-semestr-modul-2/laboratorni/laboratorna-no2> / Освітлення виробничих приміщень | ЦК загальнотехнічних та математичних дисциплін (дата звернення: 04.06.2024).
32. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – [Чинний від 1999-01-01]. – Київ: МОЗ України, 1999. – 48 с.
33. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького. – Львів: Афіша, 2000. – 32 с.
34. НАПБ Б.03.002-2007 – Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою: затв. наказом М-ва надзвичайних ситуацій від 03 грудня 2007 р. №833. Бизнес и безопасность. 2008. №1. С. 54.