

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО–ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Сунгуров Марат Сергійович



УДК 669.017:539.16

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ТЕКСТУРОВАНИХ ПІДКЛАДОК
НА БАЗІ ПАРАМАГНІТНИХ СПЛАВІВ NI-W ДЛЯ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАДПРОВІДНИКІВ ДРУГОГО
ПОКОЛІННЯ**

01.04.07 - фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико–математичних наук

Харків - 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор **Фінкель Віталій Олександрович**,
Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, начальник лабораторії фізичного матеріалознавства функціональних керамічних матеріалів

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор **Вовк Руслан Володимирович**,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна МОН України, декан фізичного факультету

доктор фізико-математичних наук, професор **Малихін Сергій Володимирович**,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України, завідувач кафедри фізики металів та напівпровідників

Захист дисертації відбудеться «___» _____ 2020 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01 Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1, конференц-зал.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1

Автореферат розісланий «__» _____ 2019 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01



Мануйленко О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За більш ніж тридцять років, що минули з часу відкриття явища високотемпературної надпровідності, практично не вирішеними залишаються дві проблеми першорядної важливості: *фундаментальна* – встановлення природи фізичного явища та *прикладна* – створення технічних надпровідників для потужнострумової техніки на основі високотемпературних надпровідних (ВТНП) матеріалів.

Для успішного функціонування таких енергетичних пристроїв, як лінії електропередач, обертальні електричні машини, та ін., необхідно суттєвим чином знизити рівень енергетичних втрат, що виникають у процесі протікання електричного струму, за рахунок використання новітніх ВТНП матеріалів на основі сполуки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, котрі працюють при температурі рідкого азоту ($T = 77.4 \text{ K}$).

На даний час найбільш актуальною проблемою у даній області досліджень є пошук оптимальної «архітектури» високотемпературних надпровідників другого покоління (2G HTS). Загалом композиція 2G HTS складається з трьох основних елементів, точно орієнтованих між собою, а саме: металевої стрічки-підкладки, системи буферних шарів, квазімонокристалічної плівки надпровідника.

Для забезпечення високої струмонесучої спроможності на рівні $j_c = 10^5 - 10^6 \text{ A/cm}^2$ (у нульовому магнітному полі) підкладка повинна мати досконалу кубічну текстуру типу (100)[001], для забезпечення епітаксійного росту плівки ВТНП; знаходитися у парамагнітному стані для зниження рівня феромагнітних втрат при протіканні змінного транспортного струму; мати високий рівень міцності для протидії деформаціям, що виникають під впливом пондеромоторних сил.

Стратегія створення стрічкових підкладок може бути розвинута на підставі дослідження кристалічної структури, електрофізичних, магнітних та інших властивостей сплавів системи Ni-W, що посідають центральне місце в будові 2G HTS; дослідження впливу хімічного складу, умов механічної і термічної обробки сплавів $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$ на структуру та властивості стрічок на їх основі; глибокого вивчення та встановлення природи і механізмів процесів фазо- й текстуроутворення, котрі протікають на межі розділу в системі типу «підкладка – покриття».

Таким чином, усе вище сказане дає загальне уявлення про основні проблеми, розглянуті в дисертаційній роботі, і свідчить про **актуальність** та **важливість** даного напрямку досліджень в області сучасної фізики твердого тіла як у фундаментальному, так і в прикладному аспектах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України. Тема дисертації пов'язана з наступними програмами досліджень і проектів, у виконанні яких автор приймав безпосередню участь у якості виконавця: «Фундаментальні дослідження структури, електронних, магнітних і пружних властивостей металевих, оксидних та напівпровідних матеріалів з особливими фізичними характеристиками, що

необхідні для створення нових приладів та систем ядерної фізики, атомної й термоядерної енергетики та інших галузей сучасної техніки» (2006 – 2010 рр., № держреєстрації 080906UP0010), «Фундаментальні дослідження структури та фізичних властивостей надпровідних, магнітних і напівпровідних матеріалів, що перспективні для створення нових приладів та систем атомної енергетики, зокрема для транспортування, перетворення та накопичування енергії АЕС України» (2011 – 2015 рр., № держреєстрації 0111U009717), «Фундаментальні наукові дослідження зі створення конструкційних та функціональних матеріалів з керованою структурою на основі чистих та надчистих металів (Zr, Hf, Be, Mg, Nb, Cd, Zn, Ag, Te, РЗМ та ін.) з властивостями, що забезпечують сталий розвиток та конкурентоспроможність ядерної енергетики та інших галузей економіки України» (2016 – 2020 рр., № держреєстрації № 0116U006366), проект УНТЦ «Нанотехнологія новітньої генерації ВТНП покритих провідників (BNL-T2-368-UA)» (2010 – 2012 рр., STCU Project № P424). Окрім того, роботу було підтримано стипендією Президії НАН України за наукові роботи молодих вчених в області фізики (2017 – 2019 рр.).

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є встановлення природи та механізмів процесів еволюції кристалічної структури та фундаментальних фізичних властивостей сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ і розробка фізичних основ створення парамагнітних підкладок з кубічною текстурою для високотемпературних надпровідників другого покоління з високою струмонесучою здатністю.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішувалися **наступні завдання:**

1. Вдосконалення методів синтезу (очищення вихідних компонентів сплаву від домішок, оптимізація хімічного складу, умов механічної і термічної обробки) та атестація сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ отриманих у широкому діапазоні концентрацій x .

2. Вивчення фазової діаграми й електрофізичних властивостей сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ у широкому діапазоні температур і концентрацій.

3. Розробка та вдосконалення методів отримання (холодна прокатка) та атестація стрічок на основі сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ різного складу.

4. Встановлення природи впливу «геометрії нанесення» (мається на увазі осадження покриття на лицевий та тіньовий, тобто той, що знаходиться поза зоною прямої видимості катодної плями, боки підкладки), тиску азоту P_{N_2} та часу осадження покриття на кристалічну структуру і процеси фазо- та текстуроутворення в обох компонентах системи $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$.

5. Розробка стратегії вивчення процесів еволюції структури в двошарових системах $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$ на основі поєднання в єдиному експерименті методів абсорбційної і дифракційної спектроскопії.

Об'єкти дослідження: сплави $Ni_{(1-x)}W_x$ різного складу ($0 \leq x \leq 0.5$), тонкі стрічки зі сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$, і двошарові композиції $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$.

Предмет дослідження: процеси фазо- і текстуроутворення в обох компонентах двошарової системи $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$.

Методи дослідження. При дослідженнях були використані добре апробовані методи фізики твердого тіла, а також числові методи та комп'ютерне моделювання. У роботі застосовувалися сучасні експериментальні методи препарування, дослідження та атестації сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ і стрічок на їх основі (у тому числі з покриттям TiN):

1. Високотемпературний синтез сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ у вакуумі.
2. Механічна та термічна обробка сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ і стрічок на їхній основі.
3. Вакуумно-дугове осадження покриттів TiN.
4. Вимірювання електричного опору зразків $Ni_{(1-x)}W_x$ у широкому діапазоні температур та концентрацій x .
5. Рентгенографічний аналіз.
6. Вимірювання макроскопічної щільності зразків сплавів методом гідростатичного зважування (пікнометрія).
7. Оптична мікроскопія.
8. Вимірювання механічних властивостей.

Наукова новизна одержаних результатів. До найбільш суттєвих нових наукових результатів, **вперше** одержаних здобувачем, належать такі:

1. Розроблено та експериментально реалізовано алгоритм дослідження електрофізичних властивостей двокомпонентних сплавів, котрий базується на неперервній зміні температури, дискретній зміні хімічного складу сплавів та незмінному значенні щільності вимірюваного струму, й подальшого перетворення політерм температурних залежностей електричного опору в ізотерми концентраційних залежностей електроопору.

2. На підставі вивчення кристалічної структури, електрофізичних та магнітних властивостей сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ уперше виявлено ефект впливу температури на механізм переносу електричного заряду в евтектичній суміші ГЦК та ОЦК фаз Ni-W поблизу порогу перколяції.

3. Розвинуто оригінальну методологію дослідження будови двошарових об'єктів шляхом поєднання дифракційної та абсорбційної спектроскопії в єдиному експерименті. Вперше на прикладі системи $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$ виявлено рентгенооптичний ефект аномального посилення інтенсивності дифракції від підкладки з ростом товщини покриття.

4. На підставі вивчення динаміки еволюції структури та властивостей системи $Ni_{0.905}W_{0.095} / TiN$ вперше виявлено ефект контрепітаксії, що полягає в узгодженому формуванні кубічної текстури в обох компонентах двошарової композиції «підкладка — покриття».

5. Розроблено концепцію створення текстурованих підкладок на основі парамагнітних ГЦК сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ для стрічкових високотемпературних надпровідників другого покоління 2G HTS, засновану на керуванні складом та взаємною орієнтацією обох компонентів двошарової системи $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$.

Практичне значення одержаних результатів. Основні наукові результати дисертаційної роботи можуть бути використані:

1. Для розробки технології одержання підкладок для високотемпературних надпровідників другої генерації з високою струмонесучою здатністю.

2. Для впровадження алгоритму обробки багатofункціональних залежностей, що базується на використанні кількох типів даних (неперервних, дискретних, постійних) з метою вивчення електрофізичних, магнітних, оптичних та інших властивостей твердих тіл.

3. Для розвитку новітніх методів дослідження процесів еволюції структури двошарових композицій типу «підкладка-покриття», що поєднують обидва канали взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною, а саме дифракцію та абсорбцію рентгенівських квантів.

Особистий внесок автора. Здобувач приймав безпосередню участь в отриманні всіх представлених у роботах [1-21] експериментальних результатів, у постановці мети і завдань дисертаційної роботи. Здобувач самостійно провів пошук та аналіз літературних джерел за темою дисертаційного дослідження. В опублікованих роботах за темою дисертації її автору належить:

- Участь у розробці програми дослідження кристалічної структури, електрофізичних та інших властивостей сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ та стрічок на їх основі з покриттям TiN [1-7,9,10,12,14,18, 19, 20, 21].
- Участь у розробці та реалізації сучасних методів обробки одержаних експериментальних результатів [5,7-11,13,14].
- Участь у розробці оптимальних шляхів синтезу сплавів Ni-W, та отриманні зразків для проведення досліджень [1-7,9,10,12,14-21].
- Участь у розробці шляхів отримання (механічна та термічна обробка заготовок) стрічок на основі сплавів Ni-W та одержання зразків для проведення рентгеноструктурних та ін., досліджень [1,2,16,19-21].
- Розробка засобів оптимізації способів нанесення покриття TiN на поверхню стрічок зі сплавів Ni-W [1,3,4,6,7,10,12,17,21].
- Проведення рентгеноструктурного аналізу об'єктів дослідження [1-21].
- Участь у проведенні вимірювань електрофізичних властивостей об'єктів дослідження [4,5,8,9,11,13,14,20].
- Участь у проведенні пікнометричних досліджень сплавів Ni-W [14].

При підготовці всіх публікацій і доповідей по матеріалам проведених досліджень за темою дисертаційної роботи здобувач брав участь в аналізі, систематизації та узагальненні отриманих результатів, на основі яких він, спільно з науковим керівником, сформулював висновки дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях і симпозіумах: I Міжнародна конференція «Високочисті матеріали: отримання, застосування, властивості», присвячена пам'яті академіка В.М. Ажажі, 15-18 листопада 2011р., Україна, м. Харків; XX International Conference on Physics of Radiation Phenomena and Radiation Material Science, ICPRP-XX, September 10 – 15, 2012, Alushta, Crimea, Ukraine; II Міжнародна конференція «Високочисті матеріали: отримання, застосування,

властивості», присвячена пам'яті академіка В.М. Ажажі, 17-20 вересня 2013р., Україна, м. Харків; Дев'ята міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів», 14 – 15 квітня 2016 р., Київ, Україна; II International Young Scientists Forum on applied physics and engineering «YSF – 2016», October 10-14, 2016, Ukraine, Kharkiv; 2017 IEEE International Young Scientists Forum on applied physics and engineering, October 17-20, 2017, Ukraine, Lviv; XII Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища у твердих тілах», 1 – 4 грудня 2015 р., Харків, Україна. 5-а Міжнародна конференція «Високочисті матеріали: отримання, застосування, властивості», присвячена пам'яті академіка В.М. Ажажі, 10-13 вересня 2019р., Україна, м. Харків.

Публікації. Основні результати, що увійшли у дисертацію, опубліковано у 21 науковій роботі: у 10 статтях [1-10] та 11 матеріалах і тезах доповідей на наукових конференціях [11-21]. Всі зазначені статті опубліковано у спеціалізованих фахових наукових виданнях, 4 статті опубліковано у спеціалізованих фахових наукових виданнях іноземних держав [7-10]. Статті [1-10] опубліковано у наукових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.

Структура та об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається з анотацій, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, 5 розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел та одного додатку. Обсяг дисертації складає 162 сторінки. Робота ілюстрована 60 рисунками та 7 таблицями. Список використаних джерел, викладений на 22 сторінках, містить 181 бібліографічних найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, розкрито суть та стан досліджень за темою дисертації, визначено мету та завдання досліджень, а також шляхи їх досягнення, сформульовано основні результати роботи, їхню наукову новизну та практичне значення, викладено внесок здобувача, наведено відомості про публікації за темою дисертації та апробацію роботи.

У **першому розділі «Архітектура високотемпературних надпровідників другого покоління (2G HTS)»** розглянуто наступне коло питань:

1. Зв'язок архітектури надпровідних матеріалів з механізмом формування їхніх електрофізичних властивостей.

2. Структура та властивості матеріалів, зокрема сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ що можуть використовуватися у якості підкладок - базового елемента архітектури новітніх ВТНП покритих провідників.

3. Структура та властивості покриття на основі нітриду титану TiN, що може бути використаний у якості основного буферного шару в композиційній структурі 2G HTS надпровідників.

При розробці фізичних основ створення підкладок для стрічкових високотемпературних надпровідників новітньої генерації суттєве значення мають енергія дефектів пакування E_{sf} та магнітний стан сплавів Ni-W. Для забезпечення максимальних критичних струмів в 2G HTS підкладка має водночас знаходитися у парамагнітному стані при низьких температурах, і володіти кубічною текстурою типу (100)[001] для того, щоб забезпечити виконання наступних орієнтаційних співвідношень: $(100)_{Ni-W} \parallel (100)_{\text{Буферний шар}} \parallel (001)_{YBCO}$.

У другому розділі «Об'єкти дослідження та методи проведення експериментів» описані методичні аспекти дисертаційної роботи. У даному розділі наведено результати розробки комплексної програми отримання та вивчення фізичних і функціональних властивостей сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$, одношарових (Ni-W) та двошарових (Ni-W / TiN) стрічок. Програма досліджень включає наступне:

1. Розвиток методів отримання сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ з різною кристалічною та магнітною структурою.

2. Розвиток шляхів отримання металевих стрічок на основі сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ різного складу.

3. Розвиток методів отримання двошарових композицій $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$.

4. Адаптацію багатофункціонального програмно-вимірювального комплексу на базі криогенератора Leybold - RGD 210 до вимірів електричних та магнітних властивостей матеріалів, що досліджувалися.

5. Розвиток сучасних методів прецизійного визначення інтенсивності, положення та форми рентгенівських дифракційних ліній за рахунок модернізації конструкції промислового дифрактометра Дрон УМ-1.

6. Розробку методу визначення товщини тонкошарових покриттів, заснованого на ефекті поглинення рентгенівського випромінювання й використанні зразка-свідка зі стабільною кристалографічною текстурою та покриття з кубічною кристалічною структурою, при якій тензор поглинення другого рангу трансформується у скаляр.

Сплави $Ni_{(1-x)}W_x$ синтезували методом порошкової металургії в вакуумі. Було отримано 14 сплавів різного складу зі структурою ГЦК та ГЦК+ОЦК. Для отримання стрічки сплави деформувалися методом холодної прокатки на прецизійному лабораторному прокатному стані. Далі стрічки піддавалися фінальному високотемпературному відпалу. Покриття нітриду титану TiN, на поверхні стрічок Ni-W отримували методом йонно-плазмового осадження.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [1,2,8] і доповідалися на конференціях [11-13,15,17-19,21].

Розділ 3 «Дослідження кристалічної структури, електрофізичних і магнітних властивостей сплавів Ni-W» присвячений вирішенню проблеми встановлення природи та механізмів впливу хімічного і фазового складу сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ на їхню кристалічну структуру та особливостей процесів перенесення електричного заряду в широкому діапазоні температур. Було розглянуто наступне коло питань:

1. Дослідження кристалічної структури сплавів $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$ при $0 \leq x \leq 0.5$.

2. Вивчення температурних залежностей питомого електричного опору сплавів $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$ у широкому діапазоні температур.

3. Відновлення та аналіз концентраційних залежностей питомого опору сплавів $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$ в інтервалі температур $0 \leq T \leq 270$ К.

Дані, що наведено на Рис. 1 несуть інформацію щодо фазового складу і відносного вмісту кожної з фаз у двофазовій системі ГЦК $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$ + ОЦК $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$.

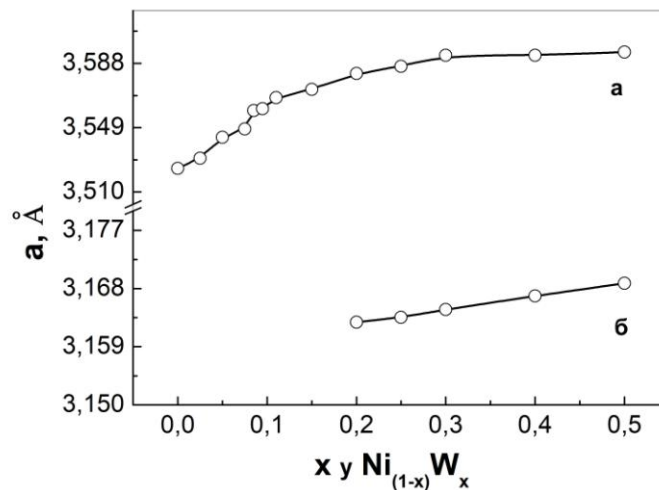


Рис. 1. Концентраційні залежності параметрів кристалічних решіток ГЦК (а) та ОЦК (б) фаз $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$.

Монотонне зростання величини періоду кристалічної решітки $a_{\text{ГЦК}}$ ГЦК фази $\text{Ni}(\text{W})$ (див. Рис. 1, крива а) у діапазоні концентрацій вольфраму $0 \leq x < \sim 0.15$ обумовлене виключно збільшенням частки більш важких атомів W у твердому розчині вольфраму в нікелі. При $x \sim 0.15$ з'являється фаза $\text{W}(\text{Ni})$ з ОЦК структурою. Подальше підвищення концентрації W ($0.15 < x \leq 0.5$) призводить до:

- збільшення сумарної кількості ОЦК фази;
- збільшення вмісту вольфраму в ОЦК фазі (див. Рис. 1, крива б). Склад ГЦК фази практично не змінюється.

На Рис. 2 наведено результати прямих вимірювань температурних залежностей питомого електричного опору сплавів $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$ ($0 \leq x \leq 0.5$) у діапазоні температур ($T = 50 - 270$ К).

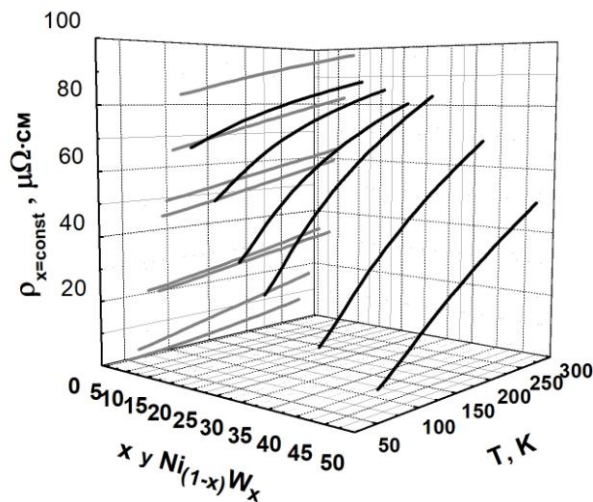


Рис. 2. Температурні залежності питомого електричного опору сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ різного складу в діапазоні температур $T = 50 - 270$ К.

У ході залежностей $\rho(T)$ спостерігаються наступні основні тенденції:

- має місце стійке зростання величини електричного опору R при підвищенні температури;
- у ГЦК області величина R зростає зі збільшенням концентрації вольфраму в сплаві;
- в ОЦК області величина R зменшується при збільшенні вмісту W .

На Рис. 3. наведено концентраційну залежність залишкового електричного опору сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ $RRR(x)$.

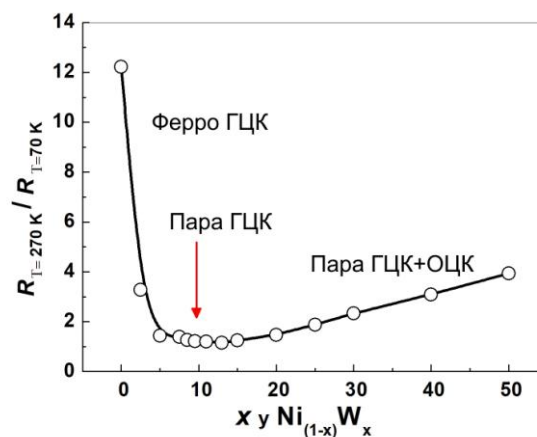


Рис. 3. Концентраційна залежність залишкового опору $RRR(x) = R_{270\text{ К}}(x) / R_{70\text{ К}}(x)$ сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$.

Сильне падіння величини залишкового опору при $0 \leq x \leq 0.085$, обумовлене зменшенням магнітного внеску (R_{magn}) у електричний опір при зниженні концентрації магнітоактивних атомів Ni в сплаві, а також зниженням ферромагнітної точки Кюрі i , як наслідок, загального рівня намагніченості M у діапазоні температур $T = 50 - 273$ К.

Відсутність залежності RRR від вмісту W в області існування «парамагнітної модифікації» ГЦК фази при $0.085 < x < \sim 0.15$. пов'язується з дією лише механізму електрон-фононної взаємодії.

Помітне зростання величини залишкового опору в області ГЦК + ОЦК при $x > 0.15$ пов'язане з посиленням вкладу менш щільної ОЦК фази (див. Рис. 1) у процеси розсіювання електронів на коливаннях кристалічної ґратки $Ni_{(1-x)}W_x$.

Таким чином було встановлено зв'язок між електрофізичними та магнітними властивостями сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$, і здійснено науково обґрунтований вибір оптимального складу сплаву для створення підкладки, а саме $Ni_{0.905}W_{0.095}$.

Для встановлення природи та механізмів впливу різних факторів на процеси протікання електричного струму в сплавах Ni-W було необхідно дослідити концентраційні залежності питомого опору сплавів. Для цього, за допомогою розробленого у роботі алгоритму дослідження електрофізичних та інших властивостей матеріалів, що базується на використанні трьох типів експериментальних даних (неперервних, дискретних, постійних), і подальшому перетворенні величин, що залежать від неперервного параметру, у величини, котрі залежать від дискретного параметру, політерми $\rho(T)_{x=const}$ були трансформовані в ізотерми $\rho(x)_{T=const}$.

Результати обробки експериментальних даних за схемою «політерма \rightarrow ізотерма», показані на Рис. 4, свідчать по наступне.

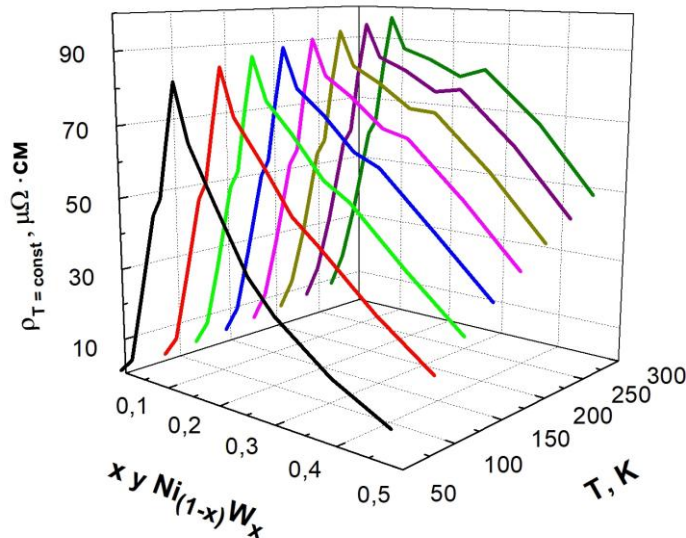


Рис. 4. Концентраційні залежності питомого опору $\rho(x)_{T=const}$ сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$. Величина вимірюваного струму $j_m = 500 \text{ mA} / \text{cm}^2$.

За відносно високих температурах при $x < 0.3$ рух електричного заряду в сплавах $Ni_{(1-x)}W_x$ відбувається по зернам ГЦК фази, склад якої практично не змінюється. При $x \sim 0.3$ на залежностях $\rho(x)$ має місце стрибок резистивності. Ця обставина вказує на зміну механізму протікання струму в області співіснування

двох твердих розчинів $Ni_{(1-x)}W_x$ з ГЦК та ОЦК структурами при досягненні порогу перколяції — трансфер електричного заряду відбувається переважно по неперервним каналам, утвореним зернами ОЦК фази з меншим питомим опором. Необхідно зазначити, що при зниженні температури границі ділянки на якій спостерігається стрибок питомого опору розмиваються.

Таким чином, у роботі вперше виявлено унікальний ефект впливу температури на кінетику перколяційного механізму переносу електричного заряду в сплавах $Ni_{(1-x)}W_x$. Слід вважати, що при зменшенні температури розширюються канали протікання електричного струму, тобто суттєво зростає вклад ОЦК фази в загальну електропровідність сплавів системи Ni-W.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [1,4,5,9] і доповідалися на конференціях [11,13,14,20].

У 4 розділі «Еволюція кристалічної структури стрічки на основі ГЦК сплавів Ni-W у процесі отримання, механічної та термічної обробки» вивчається принципова можливість використання парамагнітних сплавів Ni-W в архітектурі 2G HTS.

У розділі розглядається наступне коло питань:

1. Вивчення динаміки еволюції текстури деформації стрічок $Ni_{1-x}W_x$ при зміні хімічного складу і умов механічної обробки сплавів.

2. Вивчення динаміки еволюції текстури рекристалізації стрічок при зміні хімічного складу і умов термічної обробки.

3. Порівняльний аналіз текстури стрічок зі сплавів $Ni_{0.95}W_{0.05}$ та $Ni_{0.905}W_{0.095}$ після механічної та термічної обробки.

Як відомо, кубічна текстура (100)[001] формується після високотемпературного рекристалізаційного відпалу. На підставі аналізу наведених нижче залежностей інтенсивності дифракційних ліній від кубічної площини типу (h00) кристалічної ґратки $Ni_{0.905}W_{0.095}$, що є маркером розвитку кубічної текстури в стрічці, від температури T (див. Рис. 5) та часу фінального відпалу τ (див. Рис. 6), було встановлено оптимальні умови термічної обробки стрічок: $T = 1000\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ год}$.

На Рис. 7 наведено набір дифрактограм стрічок зі сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ ($x = 0 - 0.095$) після високотемпературного відпалу. При низькій концентрації W в сплаві на всіх рентгенограмах спостерігаються аномально сильні відбиття виключно від площин типу (h00), що вказує на формування біаксіальної кубічної текстури. При $x \geq 0.075$ інтенсивність ліній (h00) помітно зменшується, крім того на дифрактограмах присутні відбитки від площин типу (hk0) та (hkl), що свідчить про зниження ступеню кубічної текстури в стрічках із підвищеним вмістом W в сплаві, тобто з низькою енергією дефектів пакування E_{sf} .

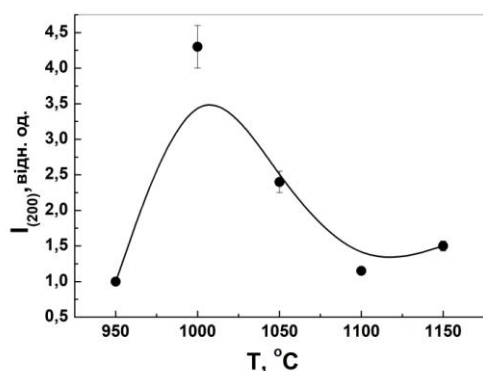


Рис. 5. Залежність інтенсивності $I_{(200)}$ від температури фінального відпалу стрічки зі сплаву $Ni_{0.905}W_{0.095}$.

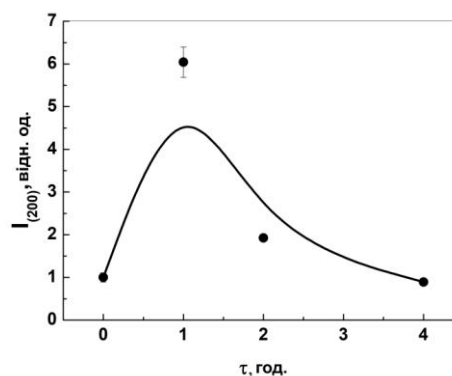


Рис. 6. Залежність інтенсивності $I_{(200)}$ від часу фінального відпалу стрічки зі сплаву $Ni_{0.905}W_{0.095}$.

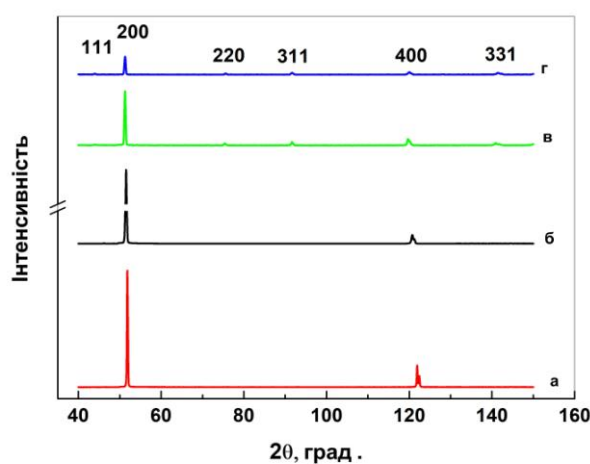


Рис. 7. Дифрактограми стрічок $Ni_{(1-x)}W_x$ після рекристалізаційного відпалу: а) $x = 0$; б) $x = 0.05$; в) $x = 0.075$; г) $x = 0.095$. Товщина стрічки складає ~ 100 μm .

На Рис. 8 наведено результати дослідження механічних властивостей стрічок $Ni_{(1-x)}W_x$.

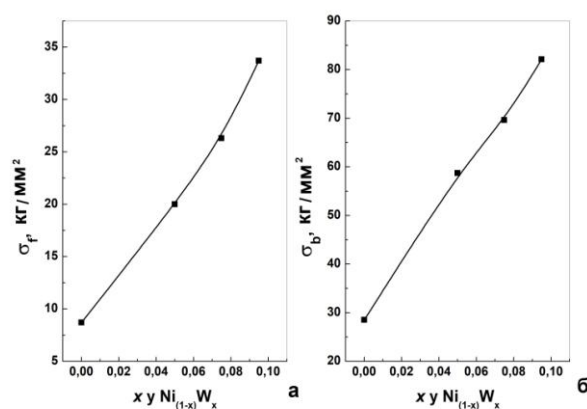


Рис. 8. Концентраційні залежності межі плинності $\sigma_p(x)$ (а) та межі міцності $\sigma_b(x)$ (б) стрічок на основі сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ після фінального відпалу.

Як видно, зростання концентрації вольфраму в сплаві до $x = 0.095$ призводить до значного підвищення величин меж плинності σ_f та міцності σ_b

У роботі розвинуто та реалізовано два доповнюючих один одного алгоритми кількісного аналізу текстури: метод кривих гойдання (ω - сканування) та метод кругових діаграм (ϕ - сканування). У Таблиці 1 наведено результати ω та ϕ сканування для кубічної площини (200) стрічок на основі сплавів $Ni_{0.95}W_{0.05}$ (феромагнітний стан, досконала кубічна текстура (100)[001] та $Ni_{0.905}W_{0.095}$ (парамагнітний стан, слабка текстура) на кінцевих стадіях механічної і термічної обробки. Ширина кривої гойдання $\Delta\omega$ є подвоєною мірою розсіювання текстури. Статистичний параметр “хі-квадрат” у випадку ідеальної текстури наближається до нуля $\chi^2 \rightarrow 0$.

Таблиця 1.

Параметри отриманих «кривих гойдання» та «кругових діаграм» для кристалографічної площини (200) стрічки зі сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ з різною магнітною структурою

$Ni_{(1-x)}W_x$	ω сканування (криві гойдання)		ϕ сканування (кругові діаграми)
	$\Delta\omega_{RD}$, град.	$\Delta\omega_{TD}$, град.	χ^2
$Ni_{0.95}W_{0.05}$	9.75	10.35	0.07
$Ni_{0.905}W_{0.095}$	13.4	15.7	0.25

На підставі даних, поданих на Рис. 5-8 і в Таблиці 1 встановлено, що у стрічці зі сплаву $Ni_{0.905}W_{0.095}$ попри задовільні магнітні та механічні властивості суттєво підвищити ступінь досконалості кубічної текстури шляхом тільки холодної прокатки і відпалу не вдається. Слід вважати, що залишкових напружень, які виникають внаслідок механічної і термічної обробки стрічки недостатньо для утворення ідеальної кубічної текстури. Тому, виникає необхідність розробки принципово нових шляхів підвищення E_{sf} в парамагнітних сплавах $Ni_{(1-x)}W_x$, що має призвести до формування текстури типу (100)[001] у стрічці.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [1,2,10] і доповідалися на конференціях [15,17-19].

У 5 розділі «Природа і механізми процесів текстуроутворення у тонкошарових системах Ni-W / TiN» наводяться результати вирішення однієї з головних проблем роботи, а саме розробка та розвиток нових шляхів створення текстурованих підкладок з високими функціональними властивостями на базі парамагнітних ГЦК сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$.

У якості матеріалу проміжного шару був обраний нітрид титану TiN зі структурою типу NaCl.

У даному розділі дисертаційної роботи розглянуто наступне коло питань:

1. Експериментальне дослідження впливу тиску азоту при випаровуванні титану на структурні особливості обох компонентів двошарової системи $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$ – визначення оптимального значення тиску азоту.

2. Експериментальне дослідження впливу часу осадження TiN на структурні особливості компонентів системи $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$ при оптимальній величині тиску азоту.

3. Експериментальне дослідження впливу геометрії осадження TiN на структурні особливості обох компонентів системи $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$.

4. Розробка методології вивчення рентгенооптичних ефектів, пов'язаних із взаємодією рентгенівського випромінювання з речовиною (дифракційне розсіювання та поглинання) у двошарових системах типу «підкладка - покриття».

5. Експериментальне вивчення та встановлення природи процесів фазо – і текстуроутворення у системах $Ni_{0.95}W_{0.05} / TiN$ та $Ni_{0.905}W_{0.095} / TiN$, що мають різну магнітну структуру.

6. Розробка на основі фундаментальних досліджень фізичних основ створення підкладок для високотемпературних надпровідників другої генерації.

Параметри експериментів з осадження покриття TiN на поверхню стрічок зі сплавів $Ni_{0.95}W_{0.05}$ та $Ni_{0.905}W_{0.095}$ варіювалися у наступному діапазоні:

- Тиск парів азоту при випаровуванні титану $p_{N_2} = 0 - 6.2 \cdot 10^{-2}$ Торр.
- Час осадження TiN $\tau_{TiN} = 0 - 15$ хв.
- Геометрія осадження покриття: нанесення TiN на лицьовий (f-геометрія) та тіньовий (b-геометрія) боки підкладок.

У якості ілюстрації до пункту 1 програми досліджень на Рис. 9 наведено набір дифрактограм композицій $Ni_{0.905}W_{0.095} / TiN$ отриманих при різних значеннях тиску азоту p_{N_2} , постійному часі ($\tau_{TiN} = 3$ хв) та b-геометрії осадження покриття.

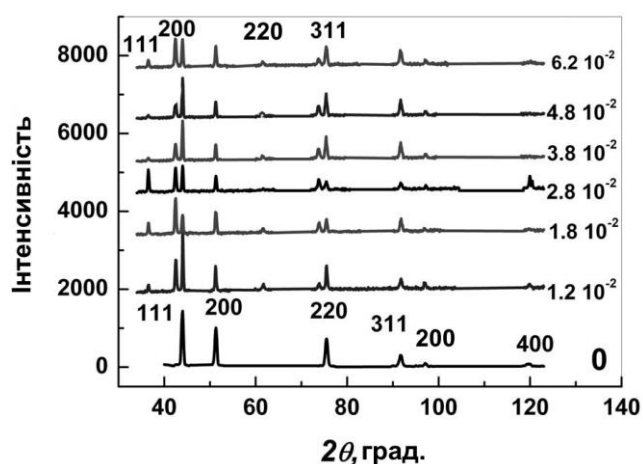


Рис. 9. Набір дифрактограм зразків двошарової системи $Ni_{0.905}W_{0.095} / TiN$, отриманих при $p_{N_2} = 0 - 6.2 \cdot 10^{-2}$ Тор (знизу догори), фіксованому часі $\tau_{TiN} = 3$ хв та b-геометрії осадження. Угорі позначено кристалографічні індекси площин кристалічної ґратки TiN , внизу - $Ni_{0.905}W_{0.095}$.

Важлива також та обставина, що осадження TiN на «тіньову» сторону підкладки дозволяє отримувати безкрапельні покриття, що, безумовно, важливо з прикладної точки зору.

Як видно, на всіх рентгенограмах за винятком звісно випадку $p_{N_2} = 0$ спостерігається дві системи дифракційних ліній: від кристалічної ґратки сплаву $Ni_{0.905}W_{0.095}$ та шару покриття TiN. Цілком природно, що збільшення p_{N_2} призводить до зростання інтенсивності дифракційних ліній TiN, однак разом з тим з'являється тенденція до перерозподілу інтенсивностей дифракційних ліній в підсистемі $Ni_{0.905}W_{0.095}$. У роботі визначено оптимальні умови нанесення покриття TiN: $p_{N_2} = 1.8 \cdot 10^{-2}$ Торр, b-геометрія.

Для встановлення механізмів процесів формування текстури та фазоутворення у двошарових системах в роботі була розвинута суттєво нова методологія вивчення в єдиному експерименті процесів дифракційного розсіювання та поглинання рентгенівських квантів речовиною. Експериментальна реалізація розробленого алгоритму, що полягає в одночасній реєстрації дифракційної картини від обох компонентів двошарової композиції, і ступеня поглинання монохроматичного рентгенівського випромінювання у зовнішньому шарі (покриття) об'єкта дослідження, потребує проведення серії експериментів з θ - 2θ сканування (фокусування дифрактометра за схемою Бреґґа-Брентано) у монохроматичному випромінюванні об'єктів, котрі відрізняються за хімічним складом та кристалографічною текстурою.

Результати θ - 2θ сканування двошарових об'єктів $Ni_{0.95}W_{0.05} / TiN$ (феромагнітний стан, високе значення енергії дефектів пакування E_{sf} , досконала текстура (100)[001] (F серія) і $Ni_{0.905}W_{0.095} / TiN$ (парамагнітний стан, низька величина E_{sf} , слабка кубічна текстура) (P серія), вказують на ту обставину, що характери зміни дифракційних картин в обох серіях принципово різняться (див. Рис. 10, 11).

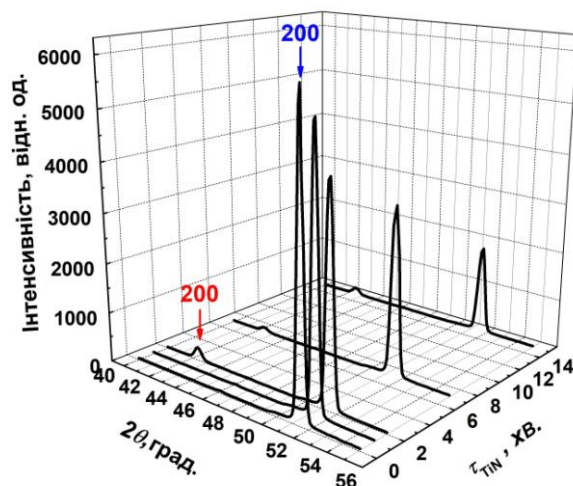


Рис. 10. Результати θ - 2θ сканування системи $Ni_{0.95}W_{0.05} / TiN$ (F серія): індекси ліній, що належать до підсистеми $Ni_{0.95}W_{0.05}$ позначені червоним, TiN – синім.

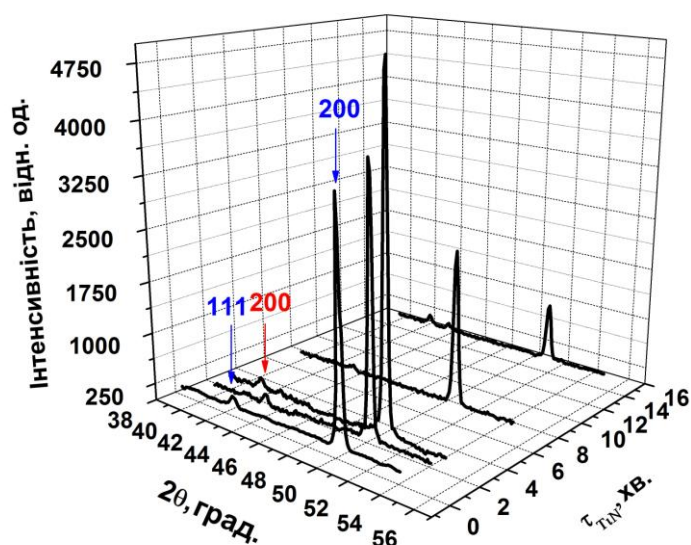


Рис. 11. Результати θ - 2θ сканування системи $Ni_{0.905}W_{0.095} / TiN$ (Р серія): індекси ліній, що належать до підсистеми $Ni_{0.95}W_{0.05}$ позначені червоним, TiN – синім.

Як видно, при $\tau_{TiN} = 0$ на дифрактограмі системи F присутній дифракційний максимум виключно від кубічної площини $(200)_{NiW}$. У системі Р спостерігається менш інтенсивний рефлекс $(200)_{NiW}$, і відбиток від діагональної площини $(111)_{NiW}$. При високих значеннях кутів дифракції $2\theta \approx 120$ град., для досліджуваних систем спостерігаються відбитки другого порядку $(400)_{NiW}$. При $\tau_{TiN} = 1$ хв інтенсивність $I_{(200)_{NiW}}$ у системі F починає зменшуватися. У випадку Р $I_{(200)_{NiW}}$ зростає, а рефлекс $(111)_{NiW}$ практично відсутній. При $\tau_{TiN} = 2$ хв тенденції до послаблення $I_{(200)_{NiW}}$ у системі F і зростання $I_{(200)_{NiW}}$ у системі Р зберігаються. Одночасно в обох системах з'являються дифракційні лінії $(200)_{TiN}$ від покриття. При $\tau_{TiN} > 2$ хв. інтенсивність $I_{(200)_{NiW}}$ у системі F продовжує послаблюватися зі збільшенням τ_{TiN} . У системі Р ріст $I_{(200)_{NiW}}$ змінюється падінням.

Для обговорення вищенаведених результатів рентгенографічних досліджень необхідно було перейти від розгляду залежностей інтенсивності дифракційних ліній від часу осадження, до залежностей інтенсивності дифракції в функції товщини покриття. Товщина покриття визначалася за допомогою оберненого рівняння Ламберта-Бера у вигляді:

$$h_{TiN}(\tau) = -\frac{\sin(2\theta_{NiW} / 2)}{2\mu_{TiN}} \cdot \ln\left(\frac{I_h(\tau)}{I_0}\right) \quad (1)$$

де h_{TiN} – товщина шару покриття TiN , μ_{TiN} – лінійний коефіцієнт поглинання TiN , 2θ – кут дифракції, I_0 , I_h – відповідно інтенсивності падаючого та дифрагованого пучків рентгенівських променів.

У якості тест-об'єкту для встановлення кореляції між τ_{TiN} і h_{TiN} були використані зразки стрічки $Ni_{0.95}W_{0.05}$ що має, як встановлено (див., нижче), стабільну текстуру $(100)[001]$.

Результати перетворення експериментальних даних по схемі $I_{hkl}(\tau_{TiN}) \rightarrow I_{hkl}(h_{TiN})$, наведені на Рис. 12, свідчать про наступне:

- В модельній системі F (див. Рис. 12, а) має місце зменшення інтенсивності лінії $I_{(200)NiW}$ при збільшенні h_{TiN} , відповідно до закону Ламберта-Бера (коефіцієнт кореляції $R^2 = 0.99$).

- В реальній системі P (див. Рис. 12, б) вперше знайдено *аномальний рентгенооптичний ефект*, що полягає у зростанні інтенсивності дифракційних ліній $I_{(h00)NiW}$ від підкладки при рості товщини покриття при $0 \leq h_{TiN} \leq 1$ мкм. При $h_{TiN} > 1$ мкм хід залежності приймає нормальний характер.

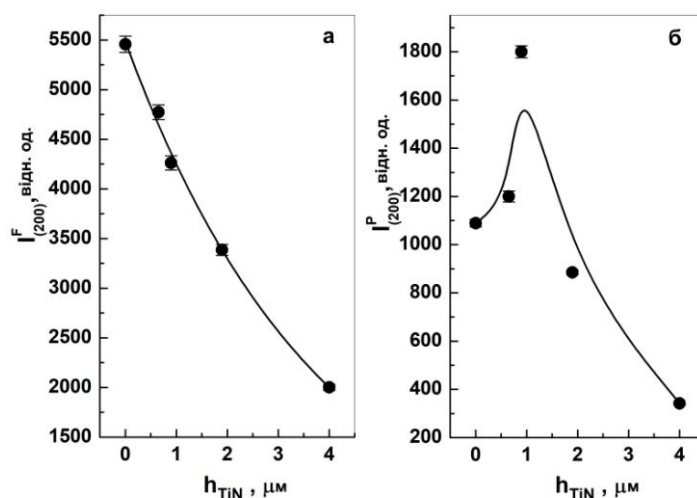


Рис. 12. Залежність інтенсивності кубічної дифракційної лінії $I_{(200)NiW}$ від товщини шару покриття TiN: а - $Ni_{0.95}W_{0.05}/TiN$; б - $Ni_{0.905}W_{0.095}/TiN$.

Таким чином, характер взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною для об'єктів F серії з високою E_{sf} вказує на відсутність якісних змін в архітектурі двошарової композиції. Це означає, що динаміка еволюції дифракційної картини в системі $Ni_{0.95}W_{0.05}/TiN$ обумовлена виключно процесами поглинання рентгенівського випромінювання.

Екстремальний характер еволюції дифракційного спектра системи P з низькою E_{sf} матеріалу підкладки свідчить про суперпозицію двох різних процесів:

1. Поглинання рентгенівських променів у шарі покриття у всьому діапазоні товщин TiN.

2. Увімкнення *якісно* іншого механізму взаємодії, що призводить до посилення інтенсивності дифракційних ліній від кубічної площини типу (h00) підкладки $Ni_{0.905}W_{0.09}$ при зростанні товщини покриття.

Слід вважати, що в системі $Ni_{0.905}W_{0.095}/TiN$ у діапазоні $0 \leq h_{TiN} \leq \sim 1$ μm у полі напружень, які виникають на міжфазній границі матеріалів з різними величинами параметрів кристалічних решіток $a_{NiW} \approx 3.56$ \AA і $a_{TiN} \approx 4.24$ \AA відбувається переорієнтація кристалітів $Ni_{0.905}W_{0.095}$ у лабораторній системі координат, що призводить до посилення ступеню кубічної текстури в підкладці. Маркером завершення процесу структурної перебудови в сплаві $Ni_{0.905}W_{0.095}$ є

поява при $h_{\text{TiN}} \approx 1 \mu\text{м}$ точки переходу від висхідної гілки до низхідної, нижче якої хід залежностей $I_{(h00)_{\text{NW}}}(h_{\text{TiN}})$ в системах Р та F якісно збігається.

Результати порівняльного аналізу текстури в системах F і Р (Таблиця 2) свідчать про те, що при $h_{\text{TiN}} \approx 1 \mu\text{м}$ в покриттях TiN осаджених на поверхні стрічок із парамагнітного $\text{Ni}_{0.905}\text{W}_{0.095}$ і феромагнітного $\text{Ni}_{0.95}\text{W}_{0.05}$ сплавів формується сильна кубічна текстура¹. Слід зазначити, що при $h_{\text{TiN}} \geq 2 \mu\text{м}$ ступінь досконалості текстури TiN в системі $\text{Ni}_{0.905}\text{W}_{0.095} / \text{TiN}$ помітно знижується.

Таблиця 2.

Результати аналізу текстури в системах $\text{Ni}_{0.905}\text{W}_{0.095} / \text{TiN}$ та $\text{Ni}_{0.95}\text{W}_{0.05} / \text{TiN}$ при $h_{\text{TiN}} = 1 \mu\text{м}$

Двошарова композиція	Підсистема	$\Delta\omega_{\text{RD}}$, град.	$\Delta\omega_{\text{TD}}$, град.	χ^2
$\text{Ni}_{0.95}\text{W}_{0.05} / \text{TiN}$	$\text{Ni}_{0.95}\text{W}_{0.05}$	9.75	10.35	0.07
	TiN	9.55	9.55	0.003
$\text{Ni}_{0.905}\text{W}_{0.095} / \text{TiN}$	$\text{Ni}_{0.905}\text{W}_{0.095}$	11.5	13.1	0.1
	TiN	9.75	9.8	0.005

Таким чином, на прикладі системи Р вперше знайдено ефект *контрреітаксії* - процес корельованого формування кубічної текстури в обох компонентах двошарової системи «підкладка – покриття».

Основні результати розділу опубліковані в роботах [1,3,4,6,7,10] і доповідалися на конференціях [12,15-18,21].

ВИСНОВКИ:

У дисертаційній роботі **розв'язане конкретне наукове завдання** - розробка фізичних основ створення парамагнітних підкладок з кубічною текстурою для ВТНП покритих провідників другого покоління з високою струмовідною здатністю на основі вивчення кристалічної структури та фундаментальних фізичних властивостей сплавів $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$. На підставі результатів проведених досліджень можуть бути сформульовані наступні висновки:

1. Розвинуто новітні методи дослідження фундаментальних фізичних властивостей багатошарових і багатокомпонентних матеріалів, що засновані на сполученні дифракційної та абсорбційної спектроскопії в єдиному експерименті, і резистометрії з використанням трьох типів даних (неперервних, дискретних, постійних).

2. Вперше виявлено ефект впливу температури на кінетику перколяційного перенесення електричного заряду в двофазових сплавах ГЦК Ni-W + ОЦК Ni-W,

¹ Цілком очевидно, що в системі F процес текстуроутворення носить виражений епітаксціальний характер, текстура покриття наслідуює текстуру підкладки.

та розвинуто уявлення щодо природи ефекту - зміни ефективного перетину каналів розповсюдження електричного струму при зниженні температури.

3. Вперше виявлено аномальний рентгенооптичний ефект, що полягає в посиленні інтенсивності дифракційних ліній від підкладки при збільшенні товщини покриття внаслідок переорієнтації кристалітів підкладки у полі внутрішніх напружень.

4. Вперше знайдено ефект корельованого формування кубічної текстури в обох компонентах двошарової системи «парамагнітний сплав $\text{Ni}_{0.905}\text{W}_{0.095}$ - покриття TiN » (ефект контрепітаксії) під дією напружень, що виникають на міжфазній межі в системі «підкладка — покриття».

5. На підставі вивчення кристалічної структури, електрофізичних, магнітних, та механічних властивостей сплавів системи Ni-W , тонких стрічок на їх основі і композицій $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x / \text{TiN}$ розроблено стратегію створення текстурованих підкладок на основі парамагнітних сплавів $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$. Отримано дослідні партії підкладок для високотемпературних надпровідників другої генерації.

Основним підсумком даної роботи слід вважати експериментальне встановлення можливості реалізації кубічної текстури в обох компонентах двошарової системи «парамагнітний сплав $\text{Ni}_{0.905}\text{W}_{0.095}$ — покриття TiN », що забезпечує суттєве підвищення щільності критичного струму в високотемпературних надпровідниках другого покоління 2G HTS.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. V.A. Finkel, A.M. Bovda, V.V. Derevyanko, V.M. Khoroshikh, S.A. Leonov, M.S. Sungurov, T.V. Sukhareva, Yu.N. Shakhov. Researches and developments on production of Ni – W alloy based substrates for secondgeneration high-temperature superconductors // *Functional Materials*. 2012. V. 19. № 1. P. 109 – 115.

2. V.A. Finkel, V.V. Derevyanko, M.S. Sungurov, T.V. Sukhareva, Yu.N. Shakhov. Production of textured ribbons based on paramagnetic Ni-W alloys // *Functional Materials*. 2013. V. 20. №1. P. 103 – 109.

3. M.S.Sunhurov, S.A.Leonov, T.V.Sukhareva, V.V.Derevyanko, V.A.Finkel, Yu.N.Shakhov. Research on processes of texture formation in "NiW substrate and TiN coating" system and creation of the new type textured paramagnetic substrates for HTS based on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ // *Functional Materials*. 2017. V. 24. № 1. P. 63 – 67.

4. M.S.Sunhurov, S.A.Leonov, T.V.Sukhareva, V.V.Derevyanko, V.A.Finkel, Yu.N.Shakhov. Structural aspects of the phase and texture formation processes in thin-layer Ni-W/TiN systems which are perspective for creating high-temperature superconductors of the second generation // *Functional Materials*. 2017. V. 24. № 3. P. 353 – 359.

5. V.V. Derevyanko, M.S. Sunhurov, T.V. Sukhareva, V.A. Finkel, Yu.N. Shakhov Crystal structure and electrical resistance of Ni-W alloys // *Functional Materials*. 2018. V. 25. No. 1. P. 48 – 53.

6. M.S. Sungurov, T.V. Sukhareva, V.A. Finkel. Mechanisms of texture formation in thin-film systems « $\text{Ni}_{1-x}\text{W}_x / \text{TiN}$ » // *Functional Materials*. 2018. V. 25. № 3. P. 1 – 8.

7. M.S. Sungurov, V.A. Finkel. Texturing in a Ni–W / TiN Thin-Film System // *Technical Physics*. 2018. V. 63. №. 8. P. 1182 – 1188.

8. V. V. Derevyanko, M. S. Sungurov, T. V. Sukhareva, V. A. Finkel. Phase transitions in a MgB_2 granular BCS superconductor in weak magnetic fields // *Physics of the Solid State*. 2017. V. 59. №. 2. P. 229 – 235.

9. V.V. Derevyanko, M.S. Sungurov, T.V. Suchreva, V.A. Finkel, Yu.N. Shakhov. Effect of the Composition and the Crystal Structure on the Electrophysical Properties of the $Ni_{1-x}W_x$ System at Low Temperatures // *Physics of the Solid State*. 2018. V. 60. № 10. P. 1930 – 1934.

10. M. S. Sungurov. Substrates with a cubic texture based on paramagnetic Ni-W alloy ribbons with thin TiN coating for second-generation high-temperature superconductors // *Technical Physics Letters*. 2014. V. 40. № 9. P. 797 – 800.

11. V. V. Derevyanko, V. A. Finkel, T. V. Sukhareva, M. S. Sunhurov. Evolution of vortex structure of two-level granular high temperature superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ under influence of temperature, magnetic field, and transport current // *IEEE Xplore Digital Library. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017. P. 171 – 174.

12. M. S. Sunhurov, T. V. Sukhareva, V. A. Finkel. Investigations and developments of the new type strongly textured paramagnetic Ni-W substrates with buffer coating TiN for creating the second generation high temperature superconductors // *IEEE Xplore Digital Library. 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2016. P. 96-99.

13. M. S. Sunhurov, V. V. Derevyanko, T. V. Sukhareva, V. A. Finkel. Phase transitions for MgB_2 granular BCS - superconductor in weak magnetic fields // *IEEE Xplore Digital Library. 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2016. P. 92-95.

14. M.S. Sunhurov, T.V. Sukhareva, V.A. Finkel. Investigation of crystal structure and electrophysical properties of Ni-W alloys: Percolation processes // *IEEE Xplore Digital Library. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017. P. 167 – 170.

15. М.С. Сунгуров. Текстурированные подложки для нанесения ВТСП покрытий // 2 Міжнародна конференція «Високочисті матеріали: отримання, застосування, властивості» (17 – 20 вересня 2013 р). Харків.: матеріали доп. / Харків, 2013. С. 56.

16. М. С. Сунгуров. Природа и механизмы формирования текстуры в тонкослойной двухкомпонентной системе «NiW / TiN» // XII Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища у твердих тілах» (1 – 4 грудня 2015 р). Харків.: матеріали доп. / Харків, 2015. С. 168.

17. М. С. Сунгуров. Дослідження процесів отримання текстурованих підложок для створення високотемпературних надпровідників другого покоління (2G HTS) // 9-та Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (14 – 15 квітня 2016 р.) Київ.: матеріали доп. / Київ, 2016. С. 78.

18. А.М. Бовда, В.В. Деревянко, С.А. Леонов, М.С. Сунгуров, Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, В.М. Хороших, Ю.Н. Шахов. Подложки на основе сплавов Ni–W для получения ВТСП-проводников второго поколения // 1 Міжнародна конференція «Високочисті матеріали: отримання, застосування, властивості» (15 – 18 вересня 2011 р). Харків.: матеріали доп. / Харків, 2011. С. 51.

19. В.В. Деревянко, С.А. Леонов, М.С. Сунгуров, Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, Ю.Н. Шахов. Получение текстурированной ленты из парамагнитных сплавов Ni-W с высоким содержанием вольфрама для создания высокотемпературных сверхпроводников второго поколения // XX Internatioa conference on physics of radiation phenomena and radiation material science / Международная конференция по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (10 – 15 сентября, 2011 г). Алушта, Крым.: труды конф. / Алушта, 2011. С. 300 – 301.

20. В.В. Деревянко, М.С. Сунгуров, Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, Ю.Н. Шахов. Структура и электрофизические свойства сплавов $Ni_{(1-x)}W_x$ // 5 Міжнародна конференція «Високочисті матеріали: отримання, застосування, властивості» (10 – 13 вересня 2019 р). Харків.: матеріали доп. / Харків, 2019. С. 103 – 104.

21. В.В. Деревянко, М.С. Сунгуров, Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, Ю.Н. Шахов. Получение и исследование подложек для ВТСП второго поколения (2G HTS) // 5 Міжнародна

конференція «Високочисті матеріали: отримання, застосування, властивості» (10 – 13 вересня 2019 р). Харків.: матеріали доп. / Харків, 2019. С. 105 – 106.

АНОТАЦІЯ

Сунгуров М.С. «Фізичні основи створення текстурованих підкладок на базі парамагнітних сплавів Ni-W для високотемпературних надпровідників другого покоління». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Національний Науковий Центр «Харківський фізико-технічний інститут». – Харків, 2018.

У дисертаційному дослідженні вирішена важлива наукова задача — вивчення фундаментальних властивостей сплавів системи Ni-W та розробка на цій основі принципів створення текстурованих парамагнітних підкладок для високотемпературних надпровідників другого покоління.

У роботі оптимізовано склад сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$, умови отримання стрічок на їх основі та двошарових композицій $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$.

На підставі вивчення кристалічної структури та електрофізичних властивостей сплавів $Ni_{(1-x)}W_x$ у широкому діапазоні концентрацій та температур вперше виявлено ефект впливу температури на перколяційний механізм протікання електричного струму в двофазовій системі ГЦК Ni-W + ОЦК Ni-W та встановлено його природу.

Розвинуто методологію дослідження «архітектури» двошарових об'єктів типу «підкладка-покриття», засновану на вивченні явищ дифракційного розсіювання і поглинання рентгенівського випромінювання в єдиному експерименті. Показано, що спектри дифракції та поглинання рентгенівського випромінювання для систем $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$ на базі феромагнітного $Ni_{0.95}W_{0.05}$ і парамагнітного $Ni_{0.905}W_{0.095}$ сплавів носять принципово відмінний характер. В системі $Ni_{0.905}W_{0.095} / TiN$ вперше виявлено аномальний рентгенооптичний ефект - посилення інтенсивності дифракційних ліній підкладки при збільшенні товщини покриття; та ефект контрепітаксії - корельоване формування кубічної текстури типу (100)[001] в обох компонентах двошарової системи. Встановлено природу та механізми відкритих ефектів.

Ключові слова: сплави $Ni_{(1-x)}W_x$, нітрид титану, металеві стрічки, двошарові системи $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$, електрофізичні властивості, магнітні властивості, текстура, міжфазні напруження, низькі температури, 2G HTS.

АННОТАЦИЯ

Сунгуров М.С. «Физические основы создания текстурированных подложек на базе парамагнитных сплавов Ni-W для высокотемпературных сверхпроводников второго поколения». – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. –

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, 2018

В диссертационном исследовании решена важная научная задача — изучение фундаментальных свойств сплавов системы Ni-W и разработка на этой основе принципов создания текстурированных парамагнитных подложек для высокотемпературных сверхпроводников второго поколения.

В работе оптимизирован состав сплавов $Ni_{(1-x)}W_x$, условия получения лент на их основе, и двухслойных композиций $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$.

На основании изучения кристаллической структуры и электрофизических свойств сплавов $Ni_{(1-x)}W_x$ в широком диапазоне концентраций и температур, впервые обнаружен эффект влияния температуры на перколяционный механизм протекания электрического тока в двухфазной системе ГЦК Ni-W + ОЦК Ni-W.

Развита методология исследования «архитектуры» двухслойных объектов типа «подложка-покрытие», основанная на изучении явлений дифракционного рассеяния и поглощения рентгеновского излучения в едином эксперименте. Показано, что спектры дифракции и поглощения рентгеновского излучения для систем $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$ на базе ферромагнитного $Ni_{0.95}W_{0.05}$ и парамагнитного $Ni_{0.905}W_{0.095}$ сплавов носят принципиально отличный характер. В системе $Ni_{0.905}W_{0.095} / TiN$ впервые обнаружен аномальный рентгенооптический эффект - усиление интенсивности дифракционных линий подложки при увеличении толщины покрытия; и эффект контрепитаксии - коррелированное формирование кубической текстуры типа (100)[001] в обоих компонентах двухслойной системы. Установлены природа и механизмы обнаруженных эффектов.

Ключевые слова: сплавы $Ni_{(1-x)}W_x$, нитрид титана, металлические ленты, двухслойные системы $Ni_{(1-x)}W_x / TiN$, электрофизические свойства, текстура, межфазные напряжения, низкие температуры, магнитные свойства, 2G HTS.

ABSTRACT

Sungurov M.S. «Physical basis for the creation of textured substrates based on paramagnetic Ni-W alloys for the second generation high-temperature superconductors». – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.07 – solid state physics. – National Scientific Center «Kharkov Institute of Physics and Technology». - Kharkov, 2018.

The important scientific problem is solved in the thesis – investigation of the fundamental properties of $Ni_{(1-x)}W_x$ alloys and the development on this basis the principles to creating the textured substrates based on Ni-W alloys with paramagnetic structure for the second generation high-temperature superconductors.

The strategy of creating elongated ribbon-type substrates can be developed due to study of the structure, electrophysical, magnetic and other properties of Ni-W system; investigation of the influence of the chemical composition, the conditions of mechanical and thermal treatment on the structure and properties of $Ni_{(1-x)}W_x$ tapes; the

establishment of the nature and mechanisms of the processes of phase and texture formation, proceeding at the boundary of the interface "substrate – buffer coating".

The newest methods for investigating the fundamental physical properties of multilayer and multicomponent materials based on the combination of diffraction and absorption spectroscopy in a single experiment and low temperature resistometry using three types of data are developed.

Based on the research of the crystal structure and the electrophysical properties of $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$ alloys in the wide range of concentrations ($x = 0 - 0.5$) and temperatures (50 – 270 K), the main mechanisms of the flow of electric current in eutectic mixture of crystallites with an FCC and BCC crystal structures are established. At relatively high temperatures at concentrations of tungsten below the value corresponding to the percolation threshold, electric current flows exclusively through the grains of the FCC phase with an increased specific electrical resistance. When the percolation threshold is reached the electric charge transfer occurs mainly through continuous channels formed by Ni-W grains with BCC structure of lower resistance. The effect of temperature on the percolation mechanism of electric current flow in a two-phase system FCC Ni-W + BCC Ni-W is found and developed the insights about its nature. When the temperature decreases, on the one hand, the resistance of the FCC phase decreases, on the other hand, the percolation channels of current flow expand, i.e. the contribution of the BCC phase to the total electrical conductivity of alloys increases significantly.

The following factors have been shown to influence the crystalline structure and morphology of the two-layer system $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x / \text{TiN}$: the chemical composition, magnetic state, and the stacking fault energy.

It is shown that the X-ray diffraction and absorption spectra for the $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x / \text{TiN}$ systems based on ferromagnetic $\text{Ni}_{0.95}\text{W}_{0.05}$ and paramagnetic $\text{Ni}_{0.905}\text{W}_{0.095}$ alloys have fundamentally different behavior. It is shown that the dynamics of the change in the character of the diffraction pattern in the $\text{Ni}_{0.95}\text{W}_{0.05} / \text{TiN}$ system which possesses stable cubic texture are almost completely determined by the absorption processes of characteristic X-rays, while the morphology of the system naturally does not change.

In the $\text{Ni}_{0.905}\text{W}_{0.095} / \text{TiN}$ system, for the first time were observed the anomalous X-ray optical effect – an increase in the intensity of the diffraction lines of the substrate with growth of the coating thickness; and the effect of counter-epitaxy — the correlated formation of a cubic texture of $\langle 100 \rangle$ (001) type in both components of a two-layer composition. It is established that the process of structural adjustment takes place in a very narrow range of coating thickness TiN ($\Delta h_{\text{TiN}} = 0 - 1 \mu\text{m}$).

The nature and mechanisms of the observed effects are established. The driving force of the process associated with changes in the morphology of the system $\text{Ni}_{0.905}\text{W}_{0.095} / \text{TiN}$ (that is the reorientation of the crystallites in the laboratory coordinate system) are strains arising at the interface between materials with different values of the parameters of the crystal lattices.

Key words: alloys $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x$, titanium nitride, two-layer systems $\text{Ni}_{(1-x)}\text{W}_x / \text{TiN}$, electrophysical properties, texture, metal tapes, buffer layers, interphase stresses, low temperatures, magnetic properties, 2G HTS.