

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Тищенко Костянтин Володимирович



УДК 621.316.8; 621.318.1

**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ
НА ОСНОВІ МАГНІТНИХ МЕТАЛІВ**

Спеціальність 01.04.07– фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – заслужений діяч науки і техніки України, доктор фізико-математичних наук, професор **Проценко Іван Юхимович**, завідувач кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор **Семенько Михайло Петрович**, професор кафедри фізики металів Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

доктор технічних наук, професор **Береснєв В'ячеслав Мартинович**, професор кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Захист відбудеться 8 червня 2018 року о 12-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус БІЦ, ауд. Б-308.
E-mail: d55.051.02@sumdu.edu.ua.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, а також на сайті інституційного репозитарію СумДУ. Режим доступу : <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/67479>.

Автореферат розіслано 27 квітня 2018 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І. В. Чешко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток електроніки тісно пов'язаний із пошуком матеріалів, що забезпечують кращі робочі характеристики чутливих елементів сенсорів. Плівкові системи на основі феромагнітних (Fe) та парамагнітних (Pt) або рідкоземельних (Gd) металів є перспективними об'єктами для спінтроники, магнітооптики та систем високощільного зберігання інформації, а сплави на основі Fe і Ni в масивному стані використовують як матеріал елементів високоточних приладів. Відомо, що на робочі характеристики приладів значною мірою впливають зовнішні фактори (деформації, температура, електричні та магнітні поля). Знаючи характер і величину впливу таких факторів, можна спрогнозувати поведінку приладу в конкретних зовнішніх умовах та досягти високої стабільності робочих характеристик. Одержання тонких плівок із наперед заданими властивостями забезпечується врахуванням концентраційних та розмірних ефектів.

На сьогодні досить добре вивчені магнітні властивості плівкових систем на основі Fe і Pt та Fe і Gd, у той самий час залишаються невивченими їх електромеханічні властивості та вплив на них структурно-фазового стану. Механічні властивості сплавів на основі Fe і Ni в масивному стані довго перебувають у полі зору дослідників. Відомі також літературні дані щодо дослідження деяких механічних властивостей (мікротвердість, модуль пружності) товстих ($d > 1$ мкм) плівок. Дослідження електромеханічних властивостей таких сплавів у тонких плівках не проводилися.

Із вищезазначеного випиває доцільність комплексного дослідження електромеханічних (відзначимо, що поряд із терміном «тензорезистивні властивості» використовують термін «електромеханічні властивості» як рівнозначні) властивостей дво- і багат шарових плівок на основі Fe і Pt та Fe і Gd, а також плівкових сплавів на основі Fe і Ni та впливу на них структурно-фазового стану і умов одержання. Важливим завданням є пояснення нелінійних ефектів, що виникають під час дослідження електромеханічних властивостей тонких плівок, а також реалізації аномально малих значень коефіцієнта тензочутливості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету в рамках держбюджетних тем: «Фазовий склад, електро- і магніторезистивні властивості плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів» № 0109U001387 (2009–2011 рр.); «Електрофізичні і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів» № 0112U001381 (2012–2014 рр.); «Вплив фізичних процесів на властивості спін-вентильних структур на основі плівок Fe, Co та Ag, Au, Cu і магнітних наночастинок» № 0116U002623 (2016–2018 рр.); «Термостабільні металеві спін клапани для реалізації спінових каналів в компонентах гнучкої сенсорної електроніки» № 0117U003925 (2017–2020 рр.); спільного проекту науково-технічного співробітництва «Фазові

перетворення, дифузійні процеси і магніторезистивні властивості мультишарів на основі Fe і Pd, Pt або Ag», № М/362–2012 від 20.05.2012 р. між СумДУ та Університетом Барода (м. Вадодара, Індія) (2013–2014 рр.).

Дисертант брав участь у виконанні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень та підготовці проміжних і завершальних звітів.

Мета і задачі досліджень. Мета роботи полягала в проведенні комплексних досліджень електромеханічних властивостей дво- і тришарових металевих плівок і плівкових сплавів на основі Fe і Pt, Gd або Ni та поясненні фізичних ефектів, що виникають у системах в області пружної, квазіпружної та пластичної деформації.

Відповідно до поставленої мети необхідно було вирішити такі наукові задачі:

- проведення комплексних експериментальних і теоретичних досліджень електромеханічних та механічних властивостей багатошарових плівкових систем на основі Fe, Gd і Pt та плівкових сплавів Fe_xNi_{1-x} в інтервалах деформації: $\Delta\epsilon_l = 0 - 1\%$, $\Delta\epsilon_l = 0 - 2\%$ і $\Delta\epsilon_l = 0 - 3\%$;

- встановлення впливу зміни структурно-фазового стану досліджуваних плівок на їх електромеханічні властивості;

- встановлення особливостей залежності опору, відносної зміни опору і межі переходу між пружною та пластичною деформацією від величини деформації й номера деформаційного циклу;

- вивчення особливостей розмірного ефекту електромеханічних властивостей багатошарових плівкових систем на основі Fe, Gd і Pt та плівкових сплавів Fe_xNi_{1-x} ;

- експериментальне визначення рівня механічних макронапружень та характеру їх розмірних залежностей;

- пояснення аномально малих значень коефіцієнта тензочутливості в тонких плівках.

Об'єкт дослідження — фізичні процеси, розмірні та концентраційні ефекти у електромеханічних властивостях плівкових матеріалів на основі Fe, Gd і Pt та плівкових сплавів Fe_xNi_{1-x} .

Предмет дослідження — структурно-фазовий стан, електромеханічні та механічні властивості багатошарових плівкових систем на основі Fe, Gd і Pt та плівкових сплавів Fe_xNi_{1-x} .

Методи дослідження: методи експериментальної фізики твердого тіла: резистометрія, метод дослідження повздовжнього коефіцієнта тензочутливості, метод Стоні дослідження механічних властивостей, електронна мікроскопія та електронографія, енергодисперсійний мікроаналіз; математичні методи обробки експериментальних результатів; розробка та аналіз феноменологічних моделей коефіцієнта тензочутливості тонких плівок.

Наукова новизна одержаних результатів. Дослідження електромеханічних властивостей плівкових матеріалів на основі магнітних металів дозволило одержати такі наукові результати:

1. Уперше досліджено електромеханічні властивості тонких плівок на основі Fe і Gd та Fe і Pt та плівкових сплавів Fe_xNi_{1-x} . Показано, що на залежностях диференціального коефіцієнта тензочутливості від деформації спостерігаються локальні максимуми; в рамках напівфеноменологічного підходу уперше пояснені причини і закономірності їх появи, запропонована модель, яка описує реалізацію таких ефектів у плівкових матеріалах. Установлено, що їх виникнення викликане нелінійною за деформацією зміною опору в плівках.

2. Установлено взаємозв'язок між структурно-фазовим станом плівок та їх електромеханічними властивостями. Показано, що зменшення розмірів зерен призводить до зміщення межі переходу від пружної до пластичної деформації (ε_m) у бік менших деформацій.

3. На основі експериментальних даних уперше побудовано розмірно-концентраційні залежності коефіцієнта повздовжньої тензочутливості γ_l і межі переходу між типами деформації для дво- та тришарових плівок на основі Fe і Gd, а також плівкових сплавів Fe_xNi_{1-x} .

4. Запропоновано пояснення реалізації аномально малих значень коефіцієнта γ_l (до 3 одиниць) у тонких плівках.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані у процесі експериментальних досліджень результати поглиблюють розуміння фізичних процесів, що відбуваються при механічному впливі на тонкі плівки, це дає можливість більш точно прогнозувати робочі характеристики чутливих елементів сенсорів деформації. Пояснення аномально малих значень коефіцієнта тензочутливості γ_l , які мають місце під час дослідження електромеханічних властивостей тонких плівок, дають більш глибокі уявлення про природу тензоефекту і дозволяють прогнозувати умови одержання та параметри плівок для реалізації відносно великих значень коефіцієнта тензочутливості.

Розроблена система одночасного дослідження електромеханічних властивостей декількох тонкоплівкових зразків дозволяє встановити вплив кожного з шарів на електромеханічні властивості багатошарових плівок.

Особистий внесок здобувача полягає в самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, проведенні наукових досліджень. Автор особисто одержував зразки, проводив дослідження електромеханічних, механічних, структурно-фазових властивостей, оброблення й аналіз одержаних результатів. Постановку задач досліджень та узагальнення результатів здійснено разом із науковим керівником – доктором. фіз.-мат. наук, проф. І. Ю. Проценком. В обговоренні результатів досліджень брали участь проф. Л. В. Однорець, доц. І. В. Чешко та доц. І. М. Пазуха. Автор особисто брав участь на всіх етапах досліджень в усіх опублікованих наукових працях: у процесі виконання експериментальних досліджень, обробленні та інтерпретації одержаних результатів та публікації наукових праць [1 – 24]. У праці [1] дисертант брав безпосередню участь в аналізі літературних даних щодо механічних властивостей плівкових матеріалів та виконував порівняння з експериментальними даними.

У праці [2] здобувачем проведений аналіз експериментальних даних електромеханічних властивостей дво- та тришарових плівок на основі Fe і Gd.

У праці [3] автором дисертації проаналізовано особливості електромеханічних властивостей плівок при пружній та пластичній деформації.

У праці [4] наведені експериментальні дані електромеханічних властивостей та структурно-фазового стану плівкового сплаву на основі Fe та Ni. Проаналізовані закономірності появи нелінійностей на деформаційних залежностях та з'ясовані причини їх реалізації.

У праці [5] дисертантом проведений аналіз особливостей деформаційних залежностей тонких металевих плівок та запропонована феноменологічна модель, що пояснює нелінійні ефекти в електромеханічних властивостях тонких плівок.

Праця [6] присвячена дослідженню електрофізичних властивостей плівок Pt, зокрема, автором проведений аналіз особливостей кристалічної будови та тензорезистивних властивостей досліджуваних плівок.

У праці [7] проведений аналіз реалізації у тонких плівках аномально малих значень коефіцієнта тензочутливості та запропоноване пояснення їх появи.

У працях [8, 9] здобувачем проведений аналіз деформаційних залежностей плівок магнітних металів.

Основні наукові результати доповідались особисто автором на наукових семінарах і конференціях [10—24]. Усі наукові положення й висновки, винесені на захист, належать авторові дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: Міжнародній науковій конференції «Моделювання-2010» (Київ, 2010 р.); 8-й Міжнародній конференції «International Conference on electronic processes in organic and inorganic materials» (Київ, 2010 р.); 2-й Міжнародній конференції «Сучасні проблеми фізики конденсованого стану» (Київ, 2010 р.); 13-й Міжнародній конференції «Physics and technology of thin films and nanosystems» (Івано-Франківськ, 2011 р.); науково-технічних конференціях «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2010–2014, 2016–2018 рр.); міжнародних конференціях студентів і молодих науковців із теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (м. Львів, 2010–2012, 2014 рр.); міжнародних конференціях «Nanomaterials: Applications and Properties» (м. Алушта, 2012, 2013 рр.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 23 працях, серед яких 8 статей у фахових виданнях України, 1 стаття в зарубіжному науковому журналі, 7 з яких індексуються наукометричною базою Scopus, 3 статті у матеріалах конференцій і 11 тез доповідей.

Структура і зміст роботи. Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел із 164 найменувань на 16 сторінках. Дисертацію викладено на 150 сторінках, з яких 108 сторінок основного тексту; робота містить 53 рисунки і 4 таблиці, зокрема 41 рисунок і 2 таблиці на 28 окремих аркушах.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, відзначений зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовані мета й основні задачі дослідження, висвітлені наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, наведена інформація про особистий внесок здобувача, апробацію одержаних результатів, структуру та зміст дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Кристалічна будова, фазоутворення та механічні властивості плівкових матеріалів (літературний огляд)» наведений огляд літературних даних щодо накопичених результатів дослідження електромеханічних властивостей плівкових матеріалів на основі магнітних металів.

Перший підрозділ містить узагальнені дані стосовно дослідження електромеханічних властивостей тонких плівок. Установлено, що на сьогодні накопичено велику кількість експериментальних результатів щодо дослідження механічних властивостей масивних матеріалів та плівок мікронної товщини як у вільному стані, так і на підкладках різних типів. У той самий час такі результати для тонких плівок практично відсутні.

У *другому підрозділі* проведений огляд теоретичних моделей тензоефекту для багатошарових плівок та плівкових сплавів. Установлено, що розрахункові дані за існуючими моделями хоч і добре узгоджуються з експериментальними дослідженнями, але не враховують усіх процесів, які відбуваються у плівках на макро- та мікроскопічному рівнях.

У *третьому підрозділі* розглянуто особливості кристалічної будови та процесів фазоутворення у плівках на основі заліза. Установлено, що в плівковому сплаві на основі Fe та Ni можуть утворюватися три стабільні фази FeNi_3 , FeNi й Fe_3Ni (так звана α -фаза). Плівки Gd при осадженні в умовах технічного вакууму мають аморфну структуру за товщин $d_{\text{Gd}} < 15$ нм та можуть містити домішкову фазу GdH_2 . Для плівок на основі Fe і Pt характерним є утворення при осадженні неупорядкованої фази типу A1 та упорядкованої – $L1_0$, стабілізація якої відбувається за 1 573 K.

У **другому розділі** «Методика і техніка експерименту» описані методи одержання і дослідження механічних та електромеханічних властивостей плівкових зразків на основі Fe, Ni, Gd і Pt, а також їх структурно-фазового стану. У *першому та другому підрозділах* описане обладнання для одержання тонких плівок, а також методика дослідження їх електромеханічних властивостей та макронапружень. Плівкові зразки одержували методом термічного випаровування у високому вакуумі (10^{-4} Па) на полістиролові підкладки з використанням напівавтоматичної системи для напилення плівок заданої конфігурації. Товщину контролювали методом кварцового резонатора в процесі осадження та методом оптичної інтерферометрії після конденсації. Дослідження тензорезистивних властивостей проводили в автоматичному режимі за допомогою автоматизованої системи керування експериментом та програмного

забезпечення, розробленого в середовищі LabVIEW, яке дозволяло проводити експеримент у динамічному режимі за наперед заданим сценарієм упродовж необмеженої кількості деформаційних циклів.

Третій підрозділ присвячений методиці дослідження структури, фазового та елементного складу тонких плівок. Для аналізу фазового складу плівок за результатами електроннографічних досліджень було розроблено програмне забезпечення у середовищі LabVIEW для розкладання дифракційних картин у спектр інтенсивності. Такий підхід дозволяє точніше аналізувати та інтерпретувати одержувані результати. Для аналізу елементного складу та розрахунку концентрації окремих компонент у плівках було використано енергодисперсійний спектрометр у складі растрового електронного мікроскопа РЕММА-102.

У **третьому розділі** «Фазовий та елементний склад плівок на основі Fe, Pt та Gd і плівкового сплаву NiFe» подані експериментальні дослідження структури та фазоутворення у свіжосконденсованих плівках.

Перший підрозділ присвячений дослідженню мікроструктури та фазового складу одношарових плівок Fe, Ni, Pt та Gd; дво- і тришарових плівок та сплавів на основі Fe і Ni. Встановлено, що невідпалені плівки Pt в інтервалі товщин 5–80 нм мають нанодисперсну структуру з розміром кристалітів 2–6 нм. Фазовий склад цих плівок відповідає ГЦК решітці з параметром $a = 0,394 \pm 0,001$ нм, що дещо більше порівняні зі значенням для масивного матеріалу (a_0 (Pt) = 0,392 нм), а домішкові фази при дослідженнях не спостерігаються. Електронно-мікроскопічні та електроннографічні дослідження плівок Gd (рис. 1) свідчать про те, що відносно тонкі зразки (рис. 1 а) мають квазіаморфну структуру, а на електроннограмах фіксується три гало з ефективними міжплощинними відстанями $d_{hkl} = 0,296$; 0,180 та 0,112 нм. Положення ефективних площин відповідає рефлексам від фаз ГЦП-Gd, ГЦК-GdH₂ або ОЦК-Gd₂O₃. За збільшення товщини зразків у плівках починають проявлятися процеси кристалізації та упорядкування структури. Як наслідок цих процесів, лінії на електроннограмах стають більш чіткими, що дає можливість більш точної інтерпретації фазового складу плівок. На рисунку 1 б наведені результати розшифрування електроннограми від плівки Gd(75)/Pt. Із літературних даних відомо, що плівки Gd схильні до аморфізації. При цьому ступінь розупорядкування їх структури сильно залежить не лише від умов одержання (ступінь вакууму, температури підкладки під час конденсації та ін.), а й від ефективної товщини плівок (d_{ef}). Так, при $d_{ef} < 10$ нм для плівок Gd на електроннограмах спостерігається квазіаморфна фаза. Поступове збільшення товщини призводить до появи зародків кристалічного ГЦП-Gd. Проведений аналіз свідчить про хорошу відповідність процесів фазоутворення у наших експериментах із літературними даними.

Аналіз фазового складу плівок Fe і Ni підтверджує, що при осадженні у наших умовах вони, згідно з електроннографічними дослідженнями, не містять домішкових фаз, а параметри решітки $a_{Fe} = 0,286$ і $a_{Ni} = 0,352$ нм добре

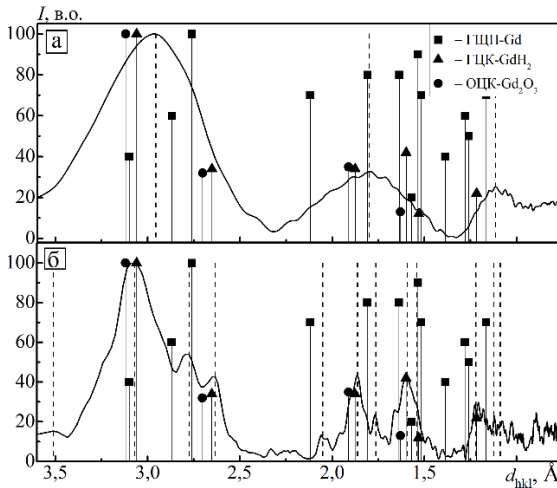


Рисунок 1 – Спектри дифракції від плівки a-Gd(18)/П (а) та Gd(75)/П (б). У дужках тут і далі зазначена товщина в нм. Символами \blacksquare , \blacktriangle та \bullet позначені місцеположення дифракційних ліній згідно із літературними даними

узгоджується з літературними даними для масивних ОЦК-Fe і ГЦК-Ni.

Електроннографічні дослідження плівок Fe/Pt/П вказують на те, що вже на етапі конденсації відбувається утворення неупорядкованого твердого розчину (т. р.) α -Fe (Pt), про що свідчить стале значення параметра решітки по усім розшифрованим на електроннограмах лініям. Відзначимо, що упорядковані фази $L1_0$ -FePt і $L1_2$ -Fe₃Pt у цій роботі не фіксувалися, оскільки зразки не проходили термообробки. Ці плівки характеризуються дрібнодисперсною структурою, як і одношарові плівки Pt, з розміром зерен $L = 4\text{—}10$ нм.

Для свіжосконденсованих дво- та тришарових плівок на основі Gd і Fe за результатами електроннографічних досліджень можна сформулювати такі закономірності фазоутворення: у разі комбінації тонкого шару Gd та достатньо товстого Fe на дифракційній картині спостерігається набір кілець, характерних для ОЦК-Fe, а також, як і у випадку одношарових плівок Gd, розмиті гало невисокої інтенсивності від аморфної фази Gd. Зі збільшенням товщини шару Gd спостерігаються його часткова кристалізація і поява рефлексів від ГЦП-Gd, ГЦК-GdH₂ та ОЦК-Gd₂O₃ (тип γ -Fe₂O₃), інтенсивність рефлексів Fe при цьому поступово зменшуються. Як і у разі одношарових плівок Gd у цій системі інтерпретація окремих фаз ускладнена внаслідок близького розміщення їх рефлексів один щодо одного, а також наявності аморфної фази.

Плівки Fe_xNi_{1-x}/П мають дрібнодисперсну (розміри кристалітів не перевищують 25 нм) кристалічну будову, яка має лабіринтний характер (рис. 2), що типово для плівкових магнітних матеріалів. Плівки із концентрацією $c_{\text{Fe}} \cong 25$ ат. % за результатами електроннографічних досліджень мають двофазний склад, що відповідає ГЦК фазам FeNi₃ (структурний тип Cu₃Au) із параметром решітки $a = 0,354 \pm 0,001$ нм та ОЦК-Fe із параметром решітки $a = 0,284 \pm 0,002$ нм (рис. 2 а); за концентрації $c_{\text{Fe}} \cong 50$ ат. % плівки мають склад ГЦК-FeNi (структурний тип CuAu) із $a = 0,359 \pm 0,001$ нм та ОЦК-Fe (рис. 2 б).

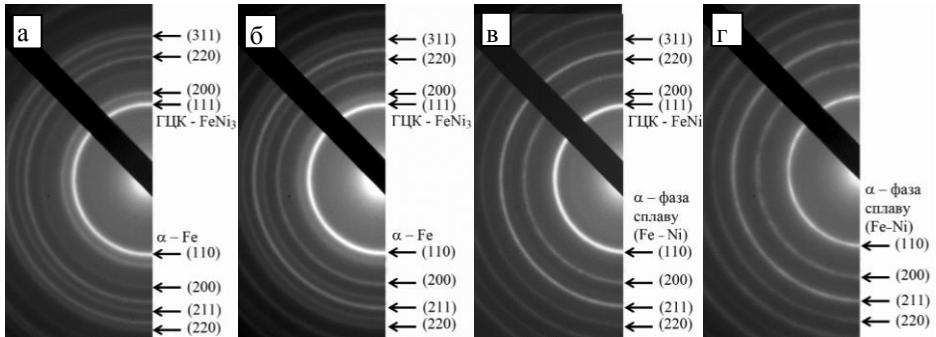


Рисунок 2 – Дифракційні картини плівок $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}/\text{Pt}$ із концентрацією c_{Fe} , ат. % : 25 (а), 50 (б), 64 (в) і 75 (г)

Необхідно зазначити, що вузька область гомогенності фаз FeNi_3 і FeNi спричиняє у разі наявності надлишкових атомів Fe утворення кристалітів ОЦК-Fe, рефлекси від яких внаслідок малої концентрації мають низьку інтенсивність і майже не помітні на електронограмах. Параметр ОЦК-решітки α -фази (Fe–Ni) $a = 0,286 \pm 0,001$ нм, і ця фаза стабілізується за $c_{\text{Fe}} \cong 75$ ат. % (рис. 2 г). Відзначимо, що в окремих випадках (за $c_{\text{Fe}} > 60$ ат. %) фіксується двофазний склад плівкового сплаву ГЦК-FeNi + α -фаза (Fe–Ni) (рис. 2 в), у той самий час склад ГЦК- FeNi_3 + ГЦК-FeNi жодного разу не спостерігався, що можна пояснити різними температурними інтервалами їх стабілізації.

У **четвертому розділі** «Електромеханічні властивості плівкових матеріалів на основі Fe, Ni, Pt і Gd» наведені результати експериментальних досліджень електромеханічних та механічних властивостей тонких плівок.

У **першому підрозділі** подані експериментальні деформаційні залежності $(\Delta R/R(0))$ від ε_l для одношарових плівок Fe, Ni, Pt і Gd та розрахункові залежності диференціального $(\gamma)_{\text{dif}} = \gamma_m = d \ln R_i / d \varepsilon_{li}$ коефіцієнта тензочутливості від ε_l і значення межі переходу від пружної до пластичної деформації (ε_m). На рисунку 3 наведено розмірні залежності інтегрального $(\gamma)_{\text{int}} = \gamma$ коефіцієнта тензочутливості та ε_m , розміщених у певному коридорі, та таких, що зміщуються між деформаційними циклами. Встановлено, що при деформації плівок Ni, Pt і Gd до двох або трьох відсотків коефіцієнт тензочутливості поступово зменшується зі збільшенням товщини, а для плівок Fe характерним є його зростання, що пояснюється їх підвищеною чутливістю до деформації. Коефіцієнт γ_l змінюється у межах 2,7–9,5 одиниць для плівок Fe (товщина 7–65 нм); 4,6–1,7 одиниць – для Pt (товщина 20–80 нм); 1,4–1,0 – для a-Gd (товщина 75–120 нм) і 9,3–2,8 – для Ni (товщина 10–90 нм). Перехід між типами деформації для плівок Fe становить 0,55–0,25 %, Pt – 0,04–0,15 %, Gd – 0,1–0,15 %, Ni – 0,50–0,31 % для таких самих товщин. Нетипові значення деформації переходу в плівках Pt і Gd пов'язані з особливістю деформаційних процесів у нанодисперсних (Pt) та аморфних (Gd) плівках.

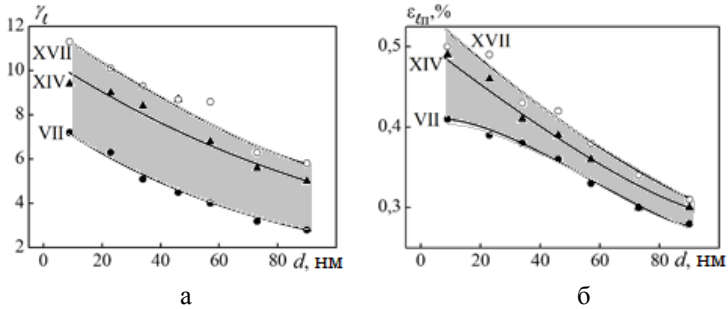


Рисунок 3 – Залежності γ_l (а) та ε_{mn} (б) від товщини для плівок Ni. Деформаційний цикл: ● – VII, ▲ – XIV та ○ – XVII

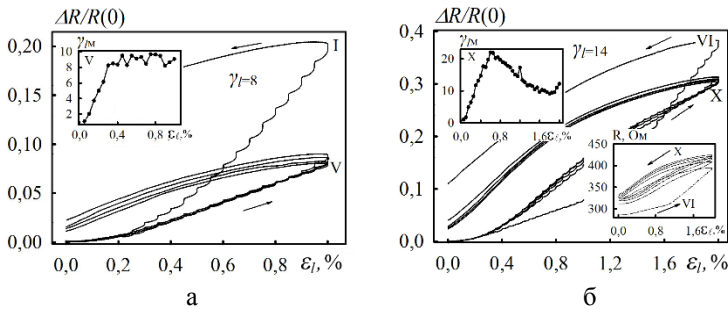


Рисунок 4 – Залежність $\Delta R/R(0)$, γ_m і R від ε_i для плівки a-Gd(30)/Fe(50)/Pi. Інтервал деформацій: $\Delta\varepsilon_{i1} = 0-1\%$ (а), $\Delta\varepsilon_{i2} = 0-2\%$ (б)

Другий підрозділ містить експериментальні результати дослідження електромеханічних властивостей дво- і багатшарових плівок та плівкових сплавів.

Під час дослідження електромеханічних властивостей дво- та тришарових плівок на основі Gd і Fe характерним є вихід залежності γ_m від ε_i на насичення за ε_{mn} (рис. 4 а, вставка). Початок цієї області змінюється в широких межах від 0,2 % до 1,5 % у залежності від загальної товщини плівкової системи та концентрації компонент у ній. На вставці рис. 4 б, на прикладі плівкової системи a-Gd(30)/Fe(50)/Pi, можна спостерігати нову особливість – появу максимуму (ε_l) на залежностях γ_m від ε_i в інтервалі $\Delta\varepsilon_{i2} = 0-2\%$ перед виходом її на насичення. Величина γ_m в максимумі (γ_{ml}) в два рази більша за γ_{mn} . Також у цих плівкових системах спостерігається тенденція до появи другого максимуму (ε_{II}).

Дослідження електромеханічних властивостей плівок Fe/Pt/Pi проводилися за змінної товщини шару Fe та фіксованій d_{Pt} . Було встановлено, що за відносно малих товщин Fe залежність $\Delta R/R(0)$ від ε_i має близький до лінійного характер, подібно до одношарових плівок Pt. Із збільшенням товщини плівки Fe плівка Pt починає відігравати меншу роль в електромеханічних властивостях плівкової системи і характер деформаційних залежностей поступово набуває вигляду,

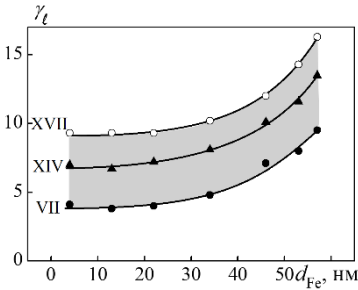


Рисунок 5 – Залежність γ_t від товщини шару Fe для плівкової системи Fe(d_{Fe})/Pt(18)/П. Деформацій цикл: ● – VII, ▲ – XIV та ○ – XVII

подібного до одношарових плівок Fe. Очевидно, шар Fe має хороший адгезійний зв'язок із шаром Pt, що змушує плівкову систему деформуватися подібно до плівки Fe. Приклад залежності γ_t від товщини шару Fe за фіксованої товщини Pt показано на рис. 5. Значення коефіцієнта γ_t до $d_{Fe} = 30$ нм залишається сталим, оскільки на його величину впливають два параметри (d_{Fe} і d_{Pt}), і до цієї критичної товщини визначальний вплив на величину γ_t має шар Pt. Варто зауважити, що нанокристалічний шар Pt майже одразу ($\varepsilon_{пн} = 0,02-0,1$ % залежно від товщини) починає деформуватися пластично, а Fe має дещо вище значення межі переходу ($\varepsilon_{пн} = 0,25-0,40$ %), тому збільшення концентрації атомів Fe розширює діапазон пружної деформації системи до певної критичної товщини, після цього знову починається процес зменшення значення межі пружно-пластичного переходу, але вже внаслідок збільшення товщини шару Fe.

Дослідження електромеханічних властивостей плівок $Fe_xNi_{1-x}/П$ було проведено для зразків із різною концентрацією компонент ($c_{Fe} = 25, 50, 64$ і 75 ат.%) у трьох деформаційних інтервалах – $\Delta\varepsilon_1 = 0-1\%$, $\Delta\varepsilon_2 = 0-2\%$ та $\Delta\varepsilon_3 = 0-3\%$. Зважаючи на те, що електромеханічні властивості одержаних у плівковому сплаві фаз пермалою, інвару та α -фази (Fe – Ni) раніше не досліджувалися, були проведені комплексні вимірювання диференціального та інтегрального коефіцієнтів тензочутливості. Для всіх деформаційних і концентраційних інтервалів характерним є зростання коефіцієнта тензочутливості із збільшенням товщини, а за $c_{Fe} = 50$ і 64 ат.% фіксується його різке зростання, починаючи з товщини $d = 30$ нм. Цей ефект пояснюється проявом аномальних механічних властивостей плівок поблизу інварної зони ($c_{Fe} = 64$ ат.%), викликаних зміною магнітних властивостей.

У *третьому підрозділі* наведені результати вимірювання макронапружень для плівок Pt, Gd, Fe, Ni, Fe_xNi_{1-x} на підкладках зі сталі. Для плівок Pt товщиною $d = 10-63$ нм та Gd $d = 40-63$ нм загальні (сума термічних та структурних) макронапруження становлять величину порядку 10^8 Н/м², і поступово зростають із збільшенням товщини (рис. 6 а, б). Макронапруження плівок Fe, Ni та сплаву Fe_xNi_{1-x} були виміряні в інтервалі товщин 15–150 нм. За вибраної в цій роботі швидкості конденсації (1,5–2,0 нм/с) величина S має порядок 10^7 Н/м², а розмірні залежності характеризуються наявністю максимуму в інтервалі $d = 30-60$ нм і виходять на насичення за подальшого збільшення товщини (рис. 6 в). Також плівки сплаву Fe_xNi_{1-x} за величиною макронапружень досить добре узгоджуються

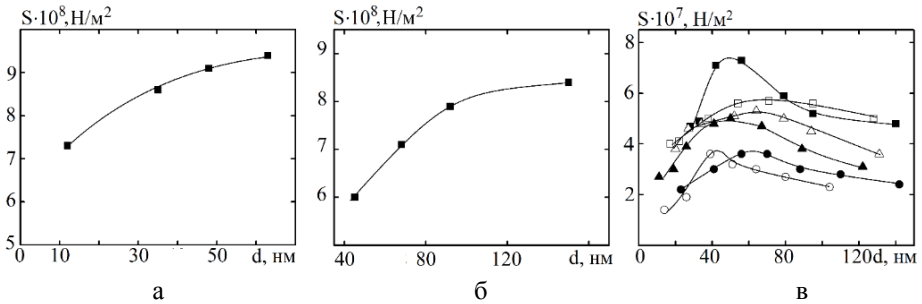


Рисунок 6 – Макронапруження у плівках Pt (а), Gd (б) і $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ (в).
На позиції (в) Fe (■), Ni (○); $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ c_{Fe} , ат.‰: 25(●), 50(▲), 64(Δ) та 75(□)

з концентрацією компонент, із цього можна зробити висновок, що вплив інварного ефекту на величину S відсутній, або не значний, а їх збільшення у вузькому інтервалі товщин, швидше за все, пов'язане зі зміною механічних властивостей, викликаних змінами субструктури плівок.

П'ятий розділ «Нелінійні ефекти в дослідженні електромеханічних властивостей плівкових матеріалів» складається з трьох підрозділів.

Перший підрозділ присвячений вивченню нелінійних ефектів у розмірно-концентраційних залежностях коефіцієнта тензочутливості та межі переходу від пружної до пластичної деформації. Із побудованих на основі експериментальних даних залежностей η та $\varepsilon_{\text{п}}$ для дво- та тришарових плівок на основі Fe і Gd у загальному випадку не спостерігається чітко виражених нелінійностей залежності в інтервалі товщин $d = 20\text{--}100$ нм та $c_{\text{Fe}} = 30\text{--}90$ ат.‰. Для цих плівок характерним є збільшення коефіцієнта тензочутливості від 2 до 25 одиниць із збільшенням товщини плівкової системи, у той самий час концентраційна залежність цієї величини простежується досить слабо (у межах 3–4 одиниць для плівок однакової товщини). Для величини $\varepsilon_{\text{п}}$, на відміну від η , спостерігається яскраво виражена концентраційна залежність величини, особливо в області малих загальних товщин плівкової системи, де відбувається підвищення її значення до $\varepsilon_{\text{п}} = 1,2\%$ ($d = 20$ нм, $c_{\text{Fe}} = 90$ ат.‰). Монотонне зменшення межі пружно-пластичного переходу відбувається зі збільшенням товщини та зменшенням загальної концентрації атомів Fe у плівковій системі.

Розмірно-концентраційні залежності η і $\varepsilon_{\text{п}}$ плівок $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}/\text{П}$ були побудовані на основі експериментальних даних для плівкових сплавів із $c_{\text{Fe}} = 25, 50, 64$ і 75 ат.‰, доповнених даними для одношарових плівок Fe і Ni. За такого підходу було змодельовано η і $\varepsilon_{\text{п}}$ плівкового сплаву $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}/\text{П}$ із концентрацією $c_{\text{Fe}} = (0\text{--}100)$ ат.‰ та товщиною $d = (5\text{--}90)$ нм (рис. 7) у деформаційних інтервалах $\Delta\varepsilon_1 = 0\text{--}1\%$, $\Delta\varepsilon_2 = 0\text{--}2\%$ і $\Delta\varepsilon_3 = 0\text{--}3\%$. Для цього сплаву в області малої концентрації атомів Fe зберігається характерна для плівок Ni класична розмірна залежність η , збільшення концентрації призводить до зміни її характеру, і плівки починають деформуватися подібно до Fe. На залежностях η від d та c_{Fe} (рис. 7 а)

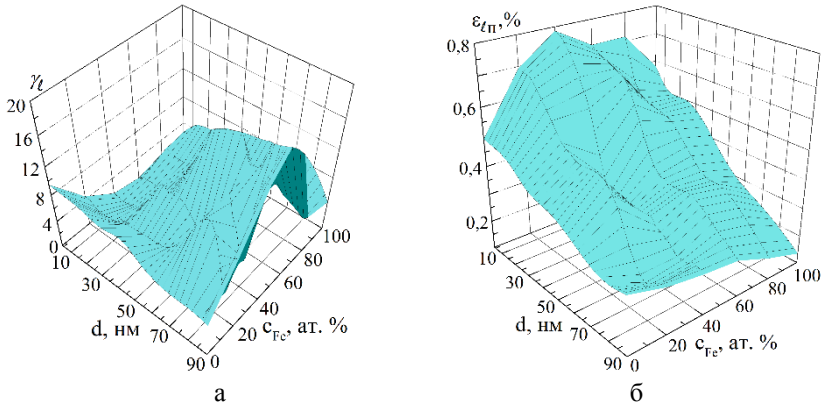


Рисунок 7 – Залежності ν_l (а) та $\varepsilon_{лп}$ (б) від d та c_{Fe} для плівок Fe_xNi_{1-x}/Pi . Інтервал деформації $\Delta\varepsilon_{l2} = 0-2\%$

починає проявлятися локальна область з підвищеними значеннями ν_l , її положення знаходиться близько $c_{Fe} = 55$ ат.%, що поряд з інварною зоною ($c_{Fe} = 64$ ат.%) для масивного сплаву, що, на нашу думку, є впливом інварного ефекту (зміна механічних властивостей внаслідок зміни внутрішньої намагніченості) у досліджуваних плівках. Проаналізувавши розмірно-концентраційні залежності $\varepsilon_{лп}$ (рис. 7 б), ми робимо висновок, що величина межі переходу між типами деформації поступово зменшується зі збільшенням товщини плівки у всьому концентраційному інтервалі. Водночас поблизу інварної зони сплаву Fe_xNi_{1-x} спостерігається зменшення величини $\varepsilon_{лп}$ порівняно з іншими концентраціями компонент, що також підтверджує прояв інварного ефекту у досліджуваних плівках. Виходячи з того, що положення локальних областей з аномальними значеннями ν_l і $\varepsilon_{лп}$ збігається, ми робимо висновок, що ці величини взаємозв'язані і зміна механічних властивостей $\varepsilon_{лп}$ у певному інтервалі концентрацій та/або товщин призводить до зміни електромеханічних властивостей плівок, у нашому випадку коефіцієнт ν_l має підвищені значення.

Другий підрозділ присвячений аналізу можливих причин реалізації аномально малих значень коефіцієнта тензочутливості у тонких плівках.

Експериментально одержані значення коефіцієнта ν_l здебільшого досить малі, що певною мірою суперечить класичній теорії тензоефекту. Реалізація значень ν_l , менших деякої граничної величини ν_l^b , що відповідає значенню коефіцієнта Пуассона $\mu_f = 0,5$, залишається незрозумілою, а наближене її значення лежить у межах $\nu_l^b \approx (1 + 2\mu_f) - 3$ од., тобто (1,7-3) од.

Для оцінювання цієї величини ми скористалися співвідношенням для ν_l тонкої плівки:

$$\nu_l \cong \frac{d \ln R}{d \varepsilon} = \frac{d \ln \rho}{d \varepsilon} + (1 + \mu_f + \mu_f') \cong \frac{d \ln \rho}{d \varepsilon} + (1 + 2\mu_f), \quad (1)$$

де R і ρ – опір і питомий опір; $d\varepsilon = d \ln l$ (l – довжина зразка); $\mu_f' = \mu_f \cdot (1 - \mu_s / 1 - \mu_f) \cong \mu_f (\mu_s - \text{коefficient Пуассона матеріалу підкладки})$.

Враховуючи, що $\frac{d \ln \Theta_D}{d \ln V} = g$ (Θ_D – температура Дебая; V – об'єм; g – стала Грюнайзена), співвідношення (1) запишеться так:

$$\gamma_l = 1 + (2g - 4\mu_f g) + (1 + 2\mu_f). \quad (2)$$

Із співвідношення (2) випливає, що $\gamma_l^b = \lim_{\mu_f \rightarrow 0,5} = 2(1 + \mu_f) \approx 3$ (хоча за умови $d \ln \rho / d \ln \varepsilon_l = 0$, тобто $\gamma_l^p = 0$ величина $\gamma_l^b = 2$). У рамках моделі Фукса-Зондгеймера (ФЗ) у граничному випадку малих товщин ($\frac{d}{\lambda_0} \ll 1$),

співвідношення для η має такий вигляд:

$$\gamma_l = 2\left(\frac{5}{6} + \mu_f\right) + (2g - 4g\mu_f), \quad (3)$$

що за $\mu_f = 0,5$ дає величину $\gamma_l^b = 2,7$.

В іншому граничному випадку моделі ФЗ, якщо $\frac{d}{\lambda_0} \gg 1$, співвідношення для η записується так:

$$\gamma_l \approx 2 + (2g - 4\mu_f g), \quad (4)$$

що при $\mu_f = 0,5$ дає $\gamma_l^b = 2$.

Реалізацію аномально малих значень $\gamma_l < \gamma_l^b$ можна пояснити, виходячи з одного із співвідношень (2)–(4). Розрахунки величини μ_f для різних значень η за фіксованих величин сталої Грюнайзена (рис. 8) підтверджують, що аномальні малі величини η мають місце за величини $\mu_f > 0,4$, тобто в області квазіпружної та пластичної деформації. Із співвідношень (3)–(5) випливає, що величина η повністю визначається доданком $(2g - 4\mu_f g)$: за $\mu_f < 0,5$ він дає додатний внесок у величину η , а при великих μ_f (більших ніж 0,5) – від'ємний внесок. Із рисунка 8 бачимо, що при $\eta < 2,5$ –3,0 одиниць, μ_f має значення більші ніж 0,5, тобто деформація плівки відбувається в області квазіпружності або пластичності.

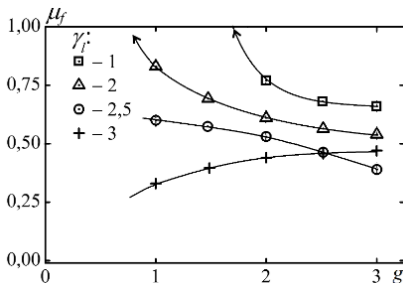


Рисунок 8 – Розрахункові величини μ_f на основі співвідношення (5.4) за різних значеннях g і η .

Залежність, що відповідає $\gamma = 1$, свідчить про те, що пояснити причину аномально малих значень γ лише виходячи з ідеї збільшення μ_f неможливо, оскільки необхідно допускати можливість збільшення μ_f до величини більше ніж 1. Таким чином, у цьому випадку, паралельно із збільшенням μ_f повинна зменшуватися стала Грюнайзена.

Відомо, що у тонких плівках або малих частинках спостерігається зменшення Θ_D , яке призводить до збільшення середньоквадратичного зміщення атомів, оскільки $\overline{u^2} \sim (T / \Theta_D)^2$. Збільшення $\overline{u^2}$ обумовить деяке ефективне збільшення

$$\mu_f' = - \frac{d \ln d}{d \ln l}.$$

Таким чином, в усіх плівкових матеріалах величина μ_f буде у цілому менша ніж 0,5, якщо Θ_D збільшується під час деформації плівки, і більша ніж 0,5, якщо Θ_D зменшується.

Інший механізм збільшення μ_f' пов'язаний із деяким зменшенням товщини за рахунок дифузії поверхневих атомів на межі зерен, в яких під час деформації буде збільшуватися ширина. Згладжування поверхневого рель'єфу плівки спричинить додатковий внесок $\Delta \mu_f'$ у величину μ_f' . Також можливе зменшення величини γ спричинить зменшення доданка $(2g - 4\mu_f g)$.

Третій підрозділ присвячений аналізу появи нелінійності на залежностях електромеханічних властивостей.

Для встановлення умови появи максимуму на залежностях γ_m від ε_1 скористаємося співвідношенням $\partial \gamma / \partial \varepsilon_1 = 0$, тобто умовою екстремуму. Записавши це співвідношення через питомий опір для плівкової системи зі збереженням індивідуальності окремих шарів та провівши аналіз множників, що мають малу величину, після диференціювання одержуємо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial \varepsilon^2} \cong - \frac{\rho_1 d_2 \frac{\partial \gamma_1}{\partial \varepsilon}}{\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1} + \frac{\frac{\partial \rho_1}{\partial \varepsilon} d_2 (\gamma_1 \rho_1 d_2 + \gamma_2 \rho_2 d_1)}{(\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1)^2}, \\ \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial^2 \rho_2}{\partial \varepsilon^2} \cong - \frac{\rho_2 d_1 \frac{\partial \gamma_2}{\partial \varepsilon}}{\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1} + \frac{\frac{\partial \rho_2}{\partial \varepsilon} d_1 (\gamma_1 \rho_1 d_2 + \gamma_2 \rho_2 d_1)}{(\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1)^2}. \end{cases} \quad (5)$$

Проведемо їх аналіз для двох граничних випадків (I та II), якщо питомий опір одного з шарів набагато менший, ніж іншого, та в припущенні стосовно залежності коефіцієнта Пуассона від деформації ($\partial \mu_i / \partial \varepsilon_1 \neq 0$):

(I): $\rho_1 \ll \rho_2$: позначивши ρ_1^2 / ρ_2 як A , а d_2 / d_1 як B , отримаємо рівняння:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial \varepsilon_1} \cong BA \gamma_1^2 \varepsilon_1 + a; \quad (6)$$

а $\rho_1(\varepsilon_1)$ зведеться до виду:

$$\rho_1(\varepsilon_1) = BA\gamma_1^2\varepsilon_1^2 + a\varepsilon_1 + b \quad (7)$$

(II): $\rho_2 \ll \rho_1$: за аналогією з першим випадком запишемо ρ_2^2 / ρ_1 як C і одержимо:

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial \varepsilon_1} \cong \frac{1}{CB} \gamma_2 \varepsilon_1 + a', \quad (8)$$

$$\rho_2(\varepsilon_1) = \frac{1}{CB} \gamma_2 \varepsilon_1^2 + a' \varepsilon_1 + b'. \quad (9)$$

Для плівкового сплаву з двох компонент, вважаючи, що відбувається повне перемішування компонент і градієнт концентрації за товщиною $\cong 0$, замінивши у співвідношеннях товщину шарів (d_1 та d_2) на загальну концентрацію компонент (c_1 та c_2), можна зробити висновки, аналогічні системі типу «біпластина».

Проведений аналіз свідчить, що поява максимуму на залежностях γ_{lm} від ε_l зумовлена нелінійними за деформацією змінами питомого опору, що має місце за відповідного способу деформації або у результаті структурних змін у плівковій системі при переході від пружної до пластичної деформації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведені комплексні дослідження електромеханічних властивостей, кристалічної структури та фазового складу багатшарових плівок на основі Fe, Pt і Gd та плівкових сплавів на основі Fe і Ni.

У роботі одержані такі результати:

1. Дослідження кристалічної структури і фазового складу багатшарових плівок та плівкових сплавів у свіжосконденсованому стані дозволили встановити таке:

- одношарові плівки Gd за малих товщин мають квазіаморфну структуру, за збільшення товщини починаються процеси кристалізації, а фазовий склад відповідає системі ГЦП-Gd + ГЦК-GdH₂ + ОЦК-Gd₂O₃;

- фазовий склад плівкових систем a-Gd/Fe/П та Fe/a-Gd/Fe/П містить аморфну й кристалічну складові, співвідношення яких залежить як від концентрації атомів окремих компонент, так і товщини шару Gd;

- у дво- і тришарових плівкових системах на основі Fe і Pt після конденсації відбувається утворення неупорядкованого твердого розчину α -Fe (Pt), зразки мають дрібнодисперсну структуру з розмірами кристалітів від 4 до 10 нм;

- у плівках Fe_xNi_{1-x} залежно від концентрації компонент стабілізуються фази FeNi₃, FeNi та α -фаза (Fe – Ni).

2. Експериментальні дослідження електромеханічних властивостей показують таке:

- величина коефіцієнта η у деформаційних інтервалах $\Delta\varepsilon_1 = 0-1$ та $\Delta\varepsilon_2 = 0-2\%$ змінюється у межах 2,7-9,5 одиниць (плівки Fe товщиною 7-65 нм); 4,6-1,7 одиниць (плівки Pt товщиною 20-80 нм); 1,4-1,0 (плівки Gd товщиною 75-120 нм) і 9,3-2,8 (плівки Ni товщиною 10-90 нм);

– деформаційні залежності для плівкових систем на основі Gd і Fe виходять на насичення при $\varepsilon_{п} = 0,4-1,1$ % і мають чітко виражений максимум, в якому величина η до 2 разів більша порівняно з областю насичення, що пояснюється нелінійними за деформацією змінами опору та можливими структурними змінами за деформації плівок;

– у системах Fe/Pt/P за товщини шару Fe від 5 до 30 нм величина коефіцієнта η практично не змінюється у всіх деформаційних інтервалах і має значення залежно від товщини 3–9 одиниць;

– у плівкових сплавах Fe_xNi_{1-x} в інтервалі товщин $d > 30$ нм за концентрацій $c_{Fe} = 50$ та 64 ат.% спостерігається аномальне збільшення коефіцієнта η до 15–25 одиниць, викликане зміною магнітних властивостей плівок у цій концентраційній області та їх впливу на механічні властивості.

3. Величина деформації переходу від пружної до пластичної деформації для плівок Fe, Pt, Gd і Ni у всіх деформаційних інтервалах становить: 0,55–0,25 % (плівки Fe товщиною 5–65 нм); 0,04–0,15 (плівки Pt товщиною 20–80 нм); 0,1–0,15 (плівки Gd товщиною 75 – 118 нм); 0,5–0,27 % (плівки Ni товщиною 10–90 нм). Нетипові значення деформації переходу в плівках Pt і Gd пов'язані з особливостями кристалічної структури. Межа переходу $\varepsilon_{п}$ у плівковому сплаві Ni_xFe_{1-x} в загальному випадку зменшується зі збільшенням товщини плівок, також поблизу інварної зони спостерігається її незначне локальне зменшення.

4. Макронапруження у досліджуваних плівках не справляють значного впливу на електромеханічні властивості досліджуваних плівок, оскільки за підвищення значення макронапружень зі збільшенням товщини не спостерігається підвищення коефіцієнта тензочутливості.

5. Аномально малі значення коефіцієнта η у тонких плівках можна пояснити реалізацією двох фізичних механізмів: по-перше, у всіх плівкових системах величина коефіцієнта Пуассона $\mu_f < 0,5$, якщо за деформації температура Дебая збільшується і $\mu_f > 0,5$ у разі її зменшення; по-друге, зменшення η пов'язане із дифузією поверхневих атомів на межі зерен, результатом цього є зменшення загальної товщини плівки.

6. Поява максимуму на залежностях γ_{lm} від ε_l пояснюється нелінійними за деформацією змінами питомого опору, що має місце за відповідного методу деформації або у результаті структурних змін у плівковій системі при переході від пружної до пластичної деформації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Механічні властивості мікронних і нанорозмірних металевих плівок / О. П. Ткач, **К. В. Тищенко**, Л. В. Однодворець, С. І. Проценко, Д. В. Великодний, І. Ю. Проценко // Журнал нано- та електронної фізики. – 2010. – Т. 2, № 1. – С. 51–59.

2. **Тищенко К. В.** Особливості тензоефекту в плівках на основі ОЦК-Fe і a-

Gd / К. В. Тищенко, Л. В. Однорець, І. Ю. Проценко // *Металлофиз. новейшие технол.* – 2011. – Т. 33, № 10, – С. 1351–1359.

3. Великодний Д. В. Особливості тензорезистивних властивостей тонких металевих плівок при пружній та пластичній деформації / Д. В. Великодний, **К. В. Тищенко**, І. Ю. Проценко // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології.* – 2011. – Т. 9. – № 3. – С. 617–624.

4. **Тищенко К. В.** Нелінійні ефекти в тензорезистивних властивостях плівкових стопів на основі Fe та Ni / К. В. Тищенко, І. Ю. Проценко // *Металлофиз. новейш. технол.* – 2012. – Т. 34. – С. 907–917.

5. Peculiarities of the dependence of the strain coefficient on the deformation of metal films / **К. V. Tyschenko**, L. V. Odnodvoretz, C. J. Panchal, I. Yu. Protsenko // *Journal of Nano- and Electronic Physics.* – 2012. – V. 4. – P. 04014-1–04014-4.

6. Electrophysical properties on nanocrystalline platinum thin films / **К. V. Tyschenko**, I. M. Pazukha, T. M. Shabelnyk, I. Yu. Protsenko // *Journal of Nano- and Electronic Physics.* – 2013. – V. 5. – № 1.– P. 01029-1–01029-5.

7. Features strain properties thin-films: anomalous small of strain coefficient / I. Yu. Protsenko, L. V. Odnodvoretz, **К. V. Tyschenko**, M. O. Shumakova // *Journal of Mechanical Engineering and Technology.* – 2013. – V. 1, № 1. – P. 34–39.

8. Деформаційний, магніторезистивний і магнітодеформаційний ефекти у плівкових матеріалах на основі магнітних металів / З. М. Макуха, Д. В. Подуремне, **К. В. Тищенко**, І. Ю. Проценко // *Журнал фізики та інженерії поверхні.* – 2015. – Т. 13. – № 3. – С. 356–362.

9. Тензорезистивні властивості плівкових систем на основі пермалою та срібла / Д. О. Шуляренко, О. В. Пилипенко, **К. В. Тищенко**, І. М. Пазуха, Л. В. Однорець // *Журнал нано- та електронної фізики.* – 2018. – Т. 10, № 1. – С. 01010-1–01010-4.

2. Наукові праці апробаційного характеру

10. **Tyschenko K. V.** Tensoreistive Properties of Thin Film System Based on Fe and Pt / К. V. Tyschenko, I. M. Pazukha, N. I. Shumakova // *Materials of XIV International conference «Physics and technology of thin films and nanosystems» (Ivano-Frankivsk, May 20–25, 2013 year) Ivano-Frankivsk, 2013.* – P. 423.

11. **Тищенко К.** Тензорезистивні властивості тришарової тонкоплівкової системи Fe/Gd/Fe в області пружної та пластичної деформації / К. Тищенко // *Матеріали міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА-2011 (Львів, 18–20 травня 2011 р.)* – Львів – 2011. – С. С35

12. **Тищенко К. В.** Моделирование тензорезистивных свойств пленочных материалов / К. В. Тищенко, И. В. Чешко // *Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць (спеціальний випуск) (Матеріали міжнародної наукової конференції «Моделювання – 2010»)* (Київ, 12–14 травня 2010 р.), 2010 – Т. 3 – С. 229–233

13. Pazukha I. M. Electrophysical properties of nanodimensional Pt thin films / I. M. Pazukha, **K. V. Tyschenko**, N. I. Shumakova // Proceedings of International Conferences «Nanomaterials: Application and properties» (Alushta, Crimea, 17-22 September 2012). – Sumy, 2012.– V. 1, № 3. – P. 03MTF09-1–03MTF09-3

14. **Tyschenko K. V.** Strain Properties of Nanodimensional Film Systems Based on Fe and Pt / K. V. Tyschenko, I. M. Pazukha, N. I. Shumakova // Proceedings of International Conferences «Nanomaterials: Application and properties» (Alushta, Crimea, 16-21 September 2013). – Sumy, 2013.– V. 2, № 1. – P. 01NTF25-1–01NTF25-4.

15. **Тищенко К.** Нелінійні ефекти в тензорезистивних властивостях плівкових сплавів на основі Fe та Ni / К. Тищенко // Матеріали Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2012» (Львів, 19–22 квітня 2012 р.). – Львів, 2012. – С. D13.

16. **Тищенко К. В.** Електромеханічні властивості плівок інвару / К. В. Тищенко // Фізика, електроніка, електротехніка, «ФЕЕ-2013». Матеріали та програма науково-технічної конференції (Суми, 22–27 квітня 2013 р.). – Суми: СумДУ. – 2013. – С. 92.

17. **Тищенко К. В.** Дослідження деформаційних характеристик плівок на основі Ni та Fe / К. В. Тищенко // Фізика, електроніка, електротехніка, «ФЕЕ–2012». Матеріали та програма науково-технічної конференції (Суми, 16–21 квітня 2012 р.). – Суми: СумДУ. – 2012. – С. 120.

3. Праці, які додатково відображають наукові результати

18. Phase state formation in double-layer films systems / L.V. Odnodvoretz, S. A. Nepijko, O. P. Tkach, **K. V. Tyschenko**, I. Yu. Protsenko // Book of abstracts of 8-th International Conference on electronic processes in organic and inorganic materials (Резиденція Синьогора, Івано-Франківська обл., 17–22 травня 2010 р.). – Київ: «Науковий світ» –2010. – P. 71–72.

19. **Тищенко К. В.** Автоматизований комплекс для дослідження стабільності елементів гнучкої електроніки // М. В. Васюхно, К. В. Тищенко // Фізика, електроніка, електротехніка, «ФЕЕ-2018». Матеріали та програма науково-технічної конференції (Суми, 5–9 лютого 2018). – Суми: СумДУ. – 2018. – С. 78.

20. Protsenko I. Yu. Strain deformation properties of film materials: the problem, achievements and prospects of investigation / I. Yu. Protsenko, **K. V. Tyschenko** Матеріали XIII міжнародної конференції «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем» (Івано-Франківськ, 16–21 травня 2011р.). – Івано-Франківськ. – 2011. – Т. 1, С. 72.

21. Автоматизовані системи для дослідження електрофізичних властивостей плівкових матеріалів / Д. В. Великодний, О. В. Власенко, О. В. Пилипенко **К. В. Тищенко** // Програма і тези доповідей міжнародної конференції молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2011» (Ужгород, 24–27 травня 2011 р.). – Ужгород: Мистецька лінія. – 2011. – С. 153.

22. **Тищенко К. В.** Особенности деформационной зависимости коэффициента тензочувствительности в двухслойных пленках / К. В. Тищенко, З. Н. Макуха, И. Е. Проценко // Матеріали Х Міжнародної конференції «Фізичні явища в твердих тілах», (Харків, 6–9 грудня 2011 р.). – Харків, 2011. – С. 88.

23. Деформаційні ефекти в тензочутливості плівкових матеріалів як чутливих елементів електроніки / А. С. Кулак, О. С. Лободюк, А. К. Рилова, **К. В. Тищенко** // Фізика, електроніка, електротехніка, «ФЕЕ-2018». Матеріали та програма науково-технічної конференції (Суми, 5–9 лютого 2018). – Суми,: СумДУ. – 2018. – С. 73–74.

АНОТАЦІЯ

Тищенко К. В. Електромеханічні властивості плівкових матеріалів на основі магнітних металів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2018.

Дисертацію присвячено комплексному дослідженню електромеханічних властивостей дво- і тришарових металевих плівок і плівкових сплавів на основі Fe і Pt, Gd або Ni та поясненню фізичних ефектів, що виникають у плівках в області пружної, квазіпружної і пластичної деформації.

Встановлено взаємозв'язок між структурно-фазовим станом досліджуваних плівок та їх електромеханічними властивостями. Показано, що зменшення розмірів зерен призводить до зменшення значення межі переходу від пружної до пластичної деформації.

Уперше встановлені закономірності появи нелінійних ефектів у електромеханічних властивостях тонких плівок, запропонована модель, що описує реалізацію таких ефектів у тонких плівках.

Запропоноване пояснення реалізації аномально малих значень коефіцієнта γ_1 в тонких плівках внаслідок двох фізичних механізмів: зміни коефіцієнта Пуассона, викликаної зміною температури Дебая за їх деформації; зменшення ефективної товщини плівок внаслідок дифузії поверхневих атомів на межі зерен.

Ключові слова: електромеханічні властивості, коефіцієнт тензочутливості, структурно-фазовий стан, нелінійний ефект, аномально малий коефіцієнт тензочутливості.

АННОТАЦИЯ

Тищенко К. В. Электромеханические свойства пленочных материалов на основе магнитных металлов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2018.

Диссертация посвящена комплексному исследованию электромеханических свойств двух- и трехслойных металлических пленок и пленочных сплавов на основе Fe и Pt, Gd или Ni и трактованию физических эффектов, которые возникают в пленках в области упругой, квазиупругой и пластической деформации.

Установлена взаимосвязь между структурно-фазовым состоянием исследуемых пленок и их электромеханическими свойствами. Показано, что уменьшение размеров зерен приводит к уменьшению значения границы перехода от упругой к пластической деформации.

Впервые установлены закономерности появления нелинейных эффектов в электромеханических свойствах тонких пленок, предложена модель, которая описывает реализацию таких эффектов в тонких пленках.

Предложено объяснение реализации аномально малых значений коэффициента γ_l в тонких пленках вследствие двух физических механизмов: изменения коэффициента Пуассона, вызванного изменением температуры Дебая при их деформации; уменьшение эффективной толщины пленок вследствие диффузии поверхностных атомов на границы зерен.

Ключевые слова: электромеханические свойства, коэффициент тензочувствительности, структурно-фазовое состояние, нелинейный эффект, аномально малый коэффициент тензочувствительности.

ABSTRACT

Tyschenko K. V. Electromechanical properties of film materials based on magnetic metals. – Manuscript.

The thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D) on physical and mathematical sciences, speciality 01.04.07 – Solid State Physics. – Sumy State University, Sumy, 2018.

Dissertation is devoted to research of electromechanical properties of two- and three-layer metal films and film-based alloys Fe and Pt, Gd or Ni and explain the physical effects that occur in films in the elastic, quasi-elastic and plastic deformation.

It was demonstrated the interrelation between structural-phase state of studied films and their electromechanical properties. It was shown that reducing of the grain size leads to a reduction of the transition value from elastic to plastic deformation.

First, it was established the pattern of occurrence of nonlinear effects in the electromechanical properties of thin films, we proposed the model that describes the realization of such effects in thin films.

It was suggested the explanation of implementation abnormally low values of γ_l in thin films in the result of two physical mechanisms: the Poisson ratio changes caused by Debye temperature changes in films deformation; the reduction of effective film thickness caused by the diffusion of surface atoms at the grain boundaries.

Keywords: Electromechanical properties gauge factor, structural-phase state, nonlinear effects, abnormally low gauge factor.

Підписано до друку 18.04.2018.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 451.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.