

**Сумський державний університет**

На правах рукопису

**Великодний Дмитро Володимирович**

**УДК 621.316.8**

**ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ  
Cu/Cr I Fe/Cr В ОБЛАСТІ ПРУЖНОЇ І ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

**ДИСЕРТАЦІЯ**

на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник

**Проценко Іван Юхимович,**

заслужений діяч науки і техніки

України, професор, доктор фізико-

математичних наук

**Суми - 2009**

## ЗМІСТ

	стор.
<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1. Тензорезистивні властивості двошарових плівкових систем як чутливих елементів тензодатчиків (літературний огляд)</b> .....	9
1.1. Теоретичні феноменологічні моделі ефекту тензочутливості.....	10
1.2. Механічні та тензорезистивні властивості дво- і багатошарових металевих плівкових систем в області пружної і пластичної деформації.....	13
1.3. Особливості кристалічної структури і дифузійні процеси в плівкових чутливих елементах тензодатчиків.....	17
1.4. Чутливі елементи плівкових тензодатчиків на основі металів, сплавів і багатошарових систем.....	22
Висновки до Розділу 1.....	30
<b>РОЗДІЛ 2. Методика і техніка експерименту</b> .....	31
2.1. Методика отримання плівкових зразків і дослідження їх тензорезистивних властивостей.....	32
2.1.1. Формування контактів на підкладках.....	32
2.1.2. Апаратні та програмні засоби автоматизації фізичного експерименту...	34
2.1.3. Обладнання для отримання тонкоплівкових зразків.....	38
2.1.4. Обладнання для дослідження тензорезистивних властивостей...	45
2.2. Методи дослідження кристалічної структури і фазового складу.....	54
Висновки до Розділу 2.....	56
<b>РОЗДІЛ 3. Тензорезистивні властивості плівкових систем на основі Cu і Cr як чутливих елементів тензодатчиків</b> .....	57
3.1. Тензочутливість одношарових плівок Cu і Cr в області пружної і пластичної деформації.....	57
3.1.1. Експериментальні результати.....	57

3.1.2. Деякі особливості деформаційної залежності тензорезистивних параметрів та чутливості до деформації.....	69
3.2. Тензочутливість дво- і багат шарових плівок на основі Cu і Cr в області пружної і пластичної деформації.....	75
3.2.1. Експериментальні результати.....	75
3.2.2. Особливості деформаційних залежностей.....	80
3.2.3. Розрахунок параметрів електроперенесення для двошарової плівкової системи Cu/Cr.....	82
3.2.4. Можливість застосування дво- і багат шарових плівкових систем Cu/Cr як чутливих елементів тензодатчиків.....	85
Висновки до Розділу 3.....	87
<b>РОЗДІЛ 4. Тензорезистивні властивості плівкових систем на основі <math>\alpha</math>-Fe і Cr як чутливих елементів тензодатчиків.....</b>	<b>88</b>
4.1. Тензочутливість одношарових плівок $\alpha$ -Fe.....	88
4.2. Тензочутливість дво- і багат шарових плівкових систем на основі Fe і Cr в області пружної і пластичної деформації.....	95
4.2.1. Експериментальні результати.....	95
4.2.2. Особливості деформаційних залежностей і „правило важеля”... ..	101
4.2.3. Особливості деформаційної залежності тензорезистивних параметрів та чутливості до деформації.....	104
4.2.4. Можливість застосування дво- і багат шарових плівок на основі $\alpha$ -Fe і Cr як чутливих елементів тензодатчиків.....	109
4.3. Узагальнення експериментальних результатів для плівкових систем Cu/Cr і $\alpha$ -Fe/Cr.....	111
Висновки до Розділу 4.....	113
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>115</b>
<b>ПРИМІТКИ.....</b>	<b>118</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>119</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Велика увага дослідників до плівкових матеріалів обумовлена їх унікальними механічними, електричними, оптичними та іншими властивостями [1-6], що дає можливість їх широкого використання як чутливих елементів різних сенсорів. Не зважаючи на тривалий час досліджень тензорезистивних властивостей різних матеріалів, ця проблема й досі залишається актуальною [1, 7], хоча відносно тензочутливості в області пружної деформації (до 1 %) тонких дротів, одно- та багат шарових плівок, у тому числі і плівкових сплавів, накопичений значний теоретичний і експериментальний матеріал. Поряд із цим вивчення тензорезистивних, механічних та інших властивостей в області непружної деформації залишається актуальним і до теперішнього часу. Вузловими тут залишаються питання, пов'язані з впливом дисперсності плівки на механічні та електрофізичні властивості, роллю дифузійних процесів і фазоутворення у цих явищах. Також слід зазначити, що дослідження останніх років відображають тенденцію пошуку різних матеріалів із покращеними тензорезистивними характеристиками [8-11] і, зокрема, з підвищеною термостійкістю, більшою величиною коефіцієнта тензочутливості (КТ) та більш широким інтервалом пружної деформації. Виходячи із узагальнень літературних даних і аналізу результатів робіт, ми дійшли до висновку, що певну перспективу з точки зору температурного інтервалу стійкості і величини КТ мають дво- і багат шарові плівкові системи. Ця обставина і визначила мету наших досліджень тензорезистивних властивостей двошарових металевих плівок на основі Cu і Cr (вони задовольняють умові двошаровості, або біпластини) та Fe і Cr (в них утворюється твердий розчин на основі ОЦК Fe) у діапазоні повздовжньої деформації 0-2 %, який включає у себе пружну, квазіпружну та пластичну деформацію.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконувалась відповідно до держбюджетних тем № 0106U001942 „Формування кристалічної структури і електрофізичних властивостей плівкових матеріалів на основі багат шарових металевих наносистем” (2006-2008 рр.) та № 0109U001387 „Фазовий склад, електро- і магніторезистивні властивості плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів” Міністерства освіти і науки України та спільних проектів науково-технічного співробітництва № М/344-2008 „Електрофізичні властивості (температурний коефіцієнт опору і тензочутливість) багат шарових плівкових систем Cr/Fe і Gd/Fe” (2008-2010 рр.) між Сумським держуніверситетом і Університетом Барода (м. Вадодара, Індія). Дисертант брав участь у виконанні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень та при підготовці проміжних і заключних звітів.

**Мета і задачі досліджень.** Мета дисертаційної роботи полягає у проведенні комплексних експериментальних та теоретичних досліджень фізичних процесів у чутливих елементах тензодатчиків на основі двошарових плівкових систем Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації, встановленні взаємного зв'язку між структурно-фазовим складом і тензорезистивними властивостями та закономірностей тензоефекту з метою подальшого прогнозування тензорезистивних властивостей.

Для досягнення даної мети нами були поставлені та розв'язані такі *задачі*:

- розроблена автоматизована система із відповідними апаратно-програмними засобами, що дозволяє отримувати плівкові зразки з наперед заданими товщинами;
- виготовлена автоматизована система для дослідження повздовжньої тензочутливості у діапазоні деформації до 2 % із використанням апаратних засобів та програмного забезпечення, розробленого у середовищі програмування LabVIEW;
- розроблена методика контролю структурного стану плівки у процесі деформації за допомогою оптичної системи;

- встановлені особливості деформаційних залежностей опору, відносної зміни опору та миттєвого коефіцієнта тензочутливості від величини деформації та номера деформаційного циклу;
- вивчені особливості розмірного ефекту у КТ двошарових плівок Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації;
- здійснена експериментальна перевірка феноменологічних моделей та „правила важеля” для КТ двох різних типів систем: перша система Cu/Cr задовольняє умові двошаровості, або біпластини, а друга Fe/Cr – умові гомогенності, оскільки у ній вже у процесі конденсації утворюється по всьому об’єму зразка твердий розчин (т.р.) ( $\alpha$ -Fe,Cr);
- розраховані параметри електроперенесення і їх зміна при деформації плівок.

*Об’єкт дослідження:* фізичні процеси у чутливих елементах плівкових високотемпературних тензодатчиків у діапазоні пружної, квазіпружної та пластичної деформації на основі металевих плівок.

*Предмет дослідження:* тензорезистивні властивості двошарових плівкових систем Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації.

Відповідно до поставлених задач були використані такі *методи одержання та дослідження* зразків:

- термічне випаровування і пошарова конденсація плівок;
- метод дослідження тензорезистивних властивостей за допомогою розробленої автоматизованої системи;
- методика контролю структурного стану поверхні зразка на основі оптичних вимірювань;
- електронна мікроскопія та електронографія.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Здійснені у роботі експериментальні та теоретичні дослідження фізичних процесів і тензорезистивних властивостей одно- та багатошарових плівок на базі Cu, Cr та Fe в області пружної та пластичної деформації дозволили отримати такі нові результати:

- вперше отримані експериментальні дані про тензорезистивні властивості плівок Cu/Cr та Fe/Cr як чутливих елементів високотемпературних тензодатчиків у діапазоні деформацій до 2 %, що включає область пружної, квазіпружної та пластичної деформації;
- здійснено порівняння експериментальних результатів з розрахунковими на основі феноменологічних моделей та „правила важеля”;
- вперше здійснено розрахунок параметрів електроперенесення для плівок Cu/Cr та Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації;
- вперше встановлені особливості тензорезистивних властивостей для двошарових плівок Cu/Cr та Fe/Cr при великих кількостях деформаційних циклів (до 35-и) та при різних швидкостях деформації (від 0 до 0,1 %/с).

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичну цінність становлять більшість отриманих експериментальних результатів, які можуть бути у подальшому використані у різноманітних сферах науки і техніки, у приладобудуванні, мікро- та наноелектроніці. Фундаментальне значення мають дані, що розширюють уявлення про властивості плівкових систем, деформування яких відбувається не лише у діапазоні пружної, але й пластичної деформації.

**Особистий внесок здобувача.** Виготовлення плівкових зразків та дослідження їх тензорезистивних властивостей, проведення електронно-мікроскопічних та електронографічних досліджень, обробка всіх експериментальних результатів. Постановка мети та задачі досліджень виконані спільно з науковим керівником проф. Проценком І.Ю. Розробка автоматизованої системи вимірювання КТ здійснена спільно з доц. Проценком С.І. Особисто автором підготовлені статті [96, 99, 100], тези доповідей [94, 95, 103, 108, 109, 110, 111, 114], окремі розділи у [20, 107, 115], обговорювалися матеріали робіт [38, 101, 106].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати, що були отримані у ході виконання експериментів та підготовки роботи, обговорювалися на таких наукових конференціях та семінарах: II Міжнародній конференції „Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології” (Київ, 2007 р.);

VIII Міжнародній конференції „Фізичні явища у твердих тілах” (Харків, 2007 р.); Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики „ЕВРИКА” (Львів, 2008 р.); Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів Сумського державного університету (Суми, 2005, 2007, 2008, 2009 рр.); Міжнародній науковій конференції „Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур” (Харків, 2008 р.); у рамках Харківської нанотехнологічної Асамблеї (Харків, 2008 р.); семінарі кафедри прикладної фізики Університету Барода (Вадодара, Індія, 2008 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 17 публікаціях [20, 38, 94, 95, 96, 99, 100, 101, 103, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 114, 115], основними з них є 9 [20, 38, 96, 99, 100, 101, 106, 107, 115], серед них 7 статей [20, 38, 96, 101, 106, 107, 115], опублікованих у фахових наукових журналах, 2 статті [99, 100] у нефархових виданнях та 8 тез доповідей [94, 95, 103, 108, 109, 110, 111, 114].

**Структура і зміст роботи.** Робота складається із вступу, 4-х розділів, висновків та списку використаних джерел із 121 найменувань. Дисертація викладена на 132 сторінках, містить 53 рисунки і 33 таблиці.



**РОЗДІЛ 1**  
**ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ДВОШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ**  
**СИСТЕМ ЯК ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕНЗОДАТЧИКІВ**  
**(літературний огляд)**

Ефект тензочутливості був відкритий У. Томсоном (Кельвіном) ще у 1856 році та перевідкритий у 1881 році О.Д. Хвольсоном. Систематичні дослідження цього явища почалися у 1930-х рр. Стимулом до цього послужило створення перших зразків дротяних тензодатчиків американськими вченими Є. Сіммонсом і Л. Руже (1938 р.). Великий внесок у вивчення тензочутливості масивних і плівкових матеріалів у 1950 – 70-х рр. зробили Г. Кузинські (1950-і рр.), А. Колумбані (1960 р.), П. Туре (1961 р.), Р. Паркер і А. Кринські (1963 р.), З. Мейксін, Р. Худзинські (1967 р.), Дж. Вітт і Т. Коутс (1970-і рр.), Б. Верма (1970-і рр.) та ін. Усі ці дослідження, за винятком робіт З. Мейксіна та ін., мали експериментальний характер і, в основному, практичну направленість. Кінець 1970-х і 1980-х років ознаменувався інтенсивними теоретичними дослідженнями розмірного ефекту (РЕ) у тензочутливості одношарових металевих плівок Ф. Варкуша [10] і К. Тельє, К. Пішар і А. Тоссе [1], початком аналогічних досліджень на прикладі двошарових плівок у роботі Ф. Катера [7]. Апробація цих теоретичних моделей була здійснена у роботі [11]. Крім того, розробка більш досконалих експериментальних методів вимірювання коефіцієнтів тензочутливості [12, 13] сприяла отриманню більш коректних результатів для одно- і двошарових плівкових систем.

Перехід від двошарових плівкових систем до багатошарових і мультишарів з експериментальної точки зору не несе якихось складностей методичного характеру, але з точки зору побудови теоретичних напівкласичних моделей, аналогічних запропонованим у [1, 10], цей перехід обумовлює певні проблеми, які, по суті, не вирішені і на цей час.

Починаючи з кінця 1980-х рр., інтенсивно ведуться експериментальні дослідження електрофізичних властивостей (ЕФВ) багатошарових плівкових

систем загального типу (власне, їх ми і називаємо багат шаровими плівковими системами) або періодичного типу (до них слід відносити т. зв. надрешітки і мультишари). У зв'язку із відсутністю напівкласичних моделей для РЕ у тензочутливості, як більш коректних і послідовних, можна представити ряд робіт, у яких запропоновано макроскопічні [14-16] і напівфеноменологічні моделі [16, 17] для інтерпретації експериментальних результатів. Роботи [15, 16, 18], у яких запропоновані напівкласичні моделі для термічного коефіцієнту опору (ТКО) та КТ багат шарових плівок і мультишарів, відкривають перспективу для створення більш коректних теоретичних моделей стосовно тензочутливості мультишарів.

### **1.1. Теоретичні феноменологічні моделі ефекту тензочутливості**

Складність апробації напівкласичних моделей, запропонованих у роботі [19], не дає якоїсь їх переваги перед феноменологічними моделями для КТ ( $\gamma_\ell$ ). У зв'язку з цим наведемо основні співвідношення цих моделей, які в загальному вигляді представлені в [20] для трьох випадків:

- двошарова плівкова система, у якій зберігається індивідуальність окремих шарів, (біпластина);
- гомогенна система у вигляді плівкового сплаву по всій товщині вихідної двошарової системи;
- двошарова система з проміжним біля інтерфейсу шаром плівкового сплаву.

При отриманні співвідношень авторами враховується, що в першому і третьому випадку зразок можна представити як паралельне з'єднання двох чи трьох шарів (це загальноприйнятий підхід (див., наприклад, [19]), хоча у зв'язку із відхиленням від умови паралельності, у порівнянні з експериментальними даними допускається похибка  $\pm 15\%$ ). Виходячи із співвідношень для питомого опору ( $\rho$ ) дво- чи тришарової системи

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_2 (d_1 + d_2)}{\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1} \text{ та } \rho = \frac{\rho_1 \rho_2 \rho_3 (d_1 + d_2 + d_3)}{\rho_2 \rho_3 d_1 + \rho_1 \rho_3 d_2 + \rho_1 \rho_2 d_3},$$

означення для відносної зміни питомого опору при деформації  $\gamma_\ell^\rho$

$$\gamma_\ell^\rho = \frac{d \ln \rho}{d \ln \ell},$$

де  $\ell$  – довжина плівки;  $d \ln \ell = \frac{d\ell}{\ell} = d\varepsilon_\ell$  – деформація, та формули для питомого опору сплаву

$$\rho = \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2,$$

де  $c$  – концентрація, отримаємо необхідні співвідношення для коефіцієнта тензочутливості біпластини, плівкового сплаву і двошарової системи із проміжним шаром відповідно:

$$\begin{aligned} \gamma_\ell^\rho &= \gamma_{\ell 1}^\rho + \gamma_{\ell 2}^\rho - \frac{d_1 \mu_1 + d_2 \mu_2}{d_1 + d_2} - \frac{\gamma_{\ell 1}^\rho \rho_1 d_2 - \rho_1 d_2 \mu_2 + \gamma_{\ell 2}^\rho \rho_2 d_1 - \rho_2 d_1 \mu_1}{\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1} \cong \\ &\cong \gamma_{\ell 1}^\rho + \gamma_{\ell 2}^\rho - \frac{\gamma_{\ell 1}^\rho \rho_1 d_2 + \gamma_{\ell 2}^\rho \rho_2 d_1}{\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1} \end{aligned} \quad (1.1)$$

де  $\mu_i$  – коефіцієнт Пуассона  $i$ -го шару;

$$\begin{aligned} \gamma_\ell^\rho &= \frac{\gamma_{\ell 1}^\rho \rho_1 c_1 + \rho_1 c_1 \gamma_{\ell 1}^c + \gamma_{\ell 2}^\rho \rho_2 c_2 + \rho_2 c_2 \gamma_{\ell 2}^c}{c_1 \rho_1 + c_2 \rho_2} \cong \\ &\cong \frac{\gamma_{\ell 1}^\rho \rho_1 c_1 + \gamma_{\ell 2}^\rho \rho_2 c_2}{c_1 \rho_1 + c_2 \rho_2} = \frac{\gamma_{\ell 1}^\rho}{1 + \frac{c_2 \rho_2}{c_1 \rho_1}} + \frac{\gamma_{\ell 2}^\rho}{1 + \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

де  $\gamma_{\ell i}^c = \frac{d \ln c_i}{d \ln \ell}$  – відносна зміна концентрації  $i$ -го елемента при деформації;

$c_i$  – концентрації атомів певного металу у плівковій системі, яка розраховується за формулою:

$$c_i = \frac{D_i d_i \mu_i^{-1}}{D_1 d_1 \mu_1^{-1} + D_2 d_2 \mu_2^{-1}}, \quad (1.3)$$

де  $D_i$  та  $\mu_i$  – густина і молярна маса  $i$ -го шару ( $i = 1, 2$ ).

Для отримання останнього співвідношення користуються геометричною моделлю двошарової системи із проміжним шаром сплаву біля інтерфейсу (рис. 1.1).

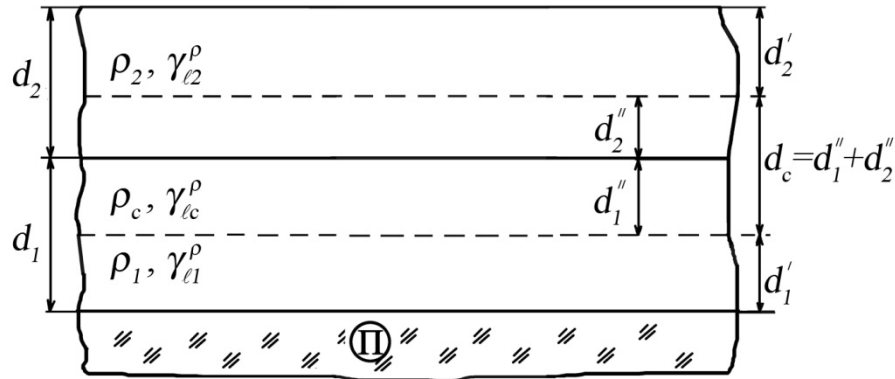


Рис. 1.1 Геометрична модель двошарової плівкової системи із проміжним шаром сплаву (т.р.) біля інтерфейсу

По аналогії з (1.1) отримується таке співвідношення:

$$\gamma_{\ell}^p \cong \gamma_{l1}^p + \gamma_{lc}^p + \gamma_{l2}^p - \frac{(d_1 - d_1'')( \gamma_{lc}^p \rho_c \rho_2 + \gamma_{l2}^p \rho_c \rho_2 ) + (d_2 - d_2'')( \gamma_{lc}^p \rho_c \rho_1 + \gamma_{l1}^p \rho_c \rho_1 )}{(d_1 - d_1'') \rho_c \rho_2 + (d_2 - d_2'') \rho_c \rho_1 + (d_1'' + d_2'') \rho_1 \rho_2} + \frac{(d_1'' + d_2'')( \gamma_{l1}^p \rho_1 \rho_2 + \gamma_{l2}^p \rho_1 \rho_2 )}{(d_1 - d_1'') \rho_c \rho_2 + (d_2 - d_2'') \rho_c \rho_1 + (d_1'' + d_2'') \rho_1 \rho_2}, \quad (1.4)$$

у чисельнику якого знехтували доданками, пропорційними  $\mu$ , тобто доданками такого типу  $d_i \mu_i \rho_{\ell} \rho_k$ .

Застосовуючи такі позначення

$$A_1 = (d_1 - d_1'') \rho_c \rho_2, \quad A_2 = (d_2 - d_2'') \rho_c \rho_1 \quad \text{та} \quad A_3 = (d_1'' + d_2'') \rho_1 \rho_2,$$

співвідношення (1.4) спрощується до виду:

$$\gamma_{\ell}^p \cong \gamma_{l1}^p + \gamma_{lc}^p + \gamma_{l2}^p - \frac{A_1 (\gamma_{lc}^p + \gamma_{l2}^p) + A_2 (\gamma_{lc}^p + \gamma_{l1}^p) + A_3 (\gamma_{l1}^p + \gamma_{l2}^p)}{A_1 + A_2 + A_3}, \quad (1.4')$$

який зручний для апробації.

Відмітимо, що між  $\gamma_\ell^p$  і експериментальною величиною коефіцієнта тензочутливості, що вимірюються через відносну зміну опору, існує взаємозв'язок:

$$\gamma_\ell = \gamma_\ell^p + 1 + 2\mu, \quad (1.5)$$

який враховується при апробації співвідношення (1.4').

## **1.2. Механічні та тензорезистивні властивості дво- і багат шарових металевих плівкових систем в області пружної і пластичної деформації**

Велика увага дослідників (див., наприклад, [12]) до плівкових матеріалів зумовлена відмінностями їх механічних, електричних, оптичних та інших властивостей у порівнянні з масивними зразками. Незважаючи на тривалий час [21] дослідження тензорезистивного ефекту в тонких плівках і плівкових матеріалах, ця проблема й досі залишається актуальною. Якщо точніше, то слід зазначити, що дослідження тензорезистивного ефекту в тонких дротах [21, 22], одно- і багат шарових плівках, у тому числі і у плівкових сплавах [2, 17, 23-30], при малих деформаціях (до 1%) вже наближаються до певної завершеності, у той час як вивчення розмірного ефекту тензочутливості при великих статичних або динамічних деформаціях лише започатковано [31]. Маловивченими залишаються питання, пов'язані з механізмом деформації плівок, особливостями їх механічних властивостей, впливом ступеня дисперсності (внутрішній розмірний ефект) на електромеханічні властивості. Останнім часом з'явилася серія робіт, присвячених цим питанням. Зокрема, у роботі [32] проведено теоретичний аналіз деформаційних ефектів (при малих і великих деформаціях) у тонких і товстих мультишарах із урахуванням геометрії шарів, їх пластичності та градієнта концентрації. Автори [33] вивчали ефект пам'яті форми та надпластичності у плівкових сплавах  $\text{Ti}+(48\div 51)\text{at.\%Ni}$ . У роботі [34] методом атомно-силової мікроскопії вивчено механізм деформації, величина

якої не перевищує 2%, і руйнування тонких ( $d \approx 240$  нм) плівок Ni на полікарбонатній підкладці. Відмічається, що методика досліджень дозволяє також визначити локальні напруження у плівках Ni та їх адгезію до підкладки. Автори [35], використовуючи оригінальну установку (на основі фотолітографічного пристрою і лазера), провели дослідження механічних властивостей вільних одношарових плівок Cu( $d_1$ ), Ag( $d_2$ ) та мультишарів Ag( $d_2$ )/Cu( $d_1$ ), де товщини  $d_1, d_2 = 1,5$  нм ÷ 1,5 мкм. Виходячи із діаграм „напруження-деформація”, автори роботи [35] отримали параметри  $\sigma_y, \sigma_0, k, n$  у рівнянні Холла-Петча  $\sigma_y = \sigma_0 + kL^n$  ( $\sigma_y$  – межа текучості,  $L$  – середній розмір кристалітів,  $\sigma_0, k, n$  – сталі величини) для плівок Cu, Ag та мультишарів Ag/Cu. Аналогічні дослідження на прикладі плівок Cu ( $d = 0,2 \div 2$  мкм) з різним ступенем дисперсності проведені авторами робіт [36]. Відмінність результатів полягає у тому, що згідно з [35] величина  $n = -0,34$ , у той час як у [36]  $n = -0,5$ , як і у класичному законі Холла-Петча для масивних зразків. Розмірний ефект ( $d = 0,2$  та 1 мкм) у механічних властивостях вільних плівок Al і Cu вивчений авторами роботи [37].

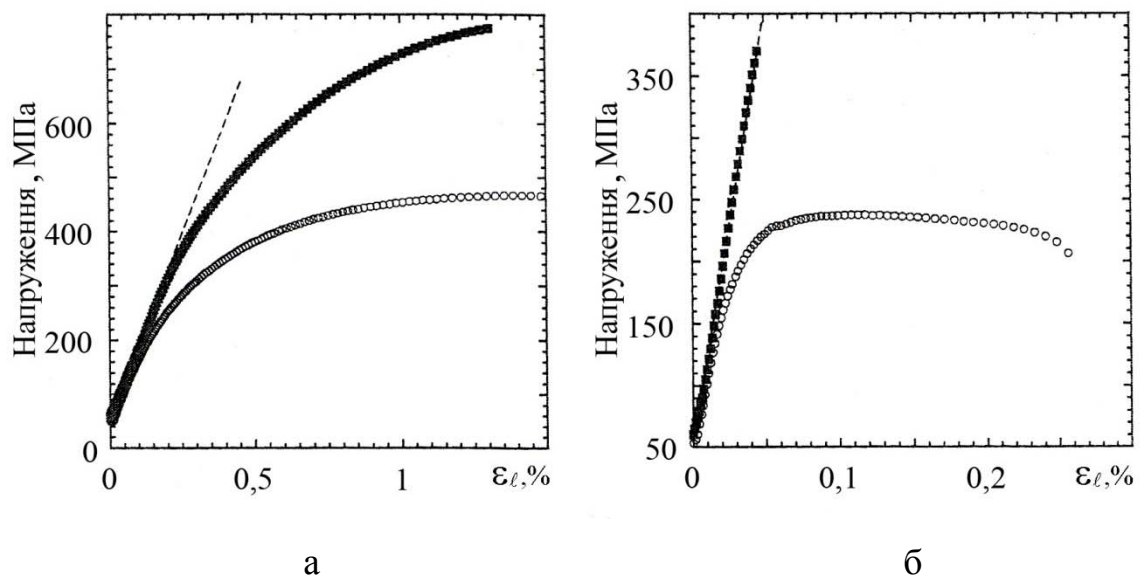


Рис. 1.2 Діаграми напруження-деформації для вільних плівок Cu (а) та Al (б). Товщина, мкм: ○ – 1,0; ■ – 0,2 [37]

Отримані діаграми деформації дозволили визначити модуль Юнга і встановити нові особливості механічних властивостей. Так, наприклад, для Cu, при зменшенні товщини від 1 до 0,2 мкм межа текучості зростає більш ніж удвічі, від 160 МПа до 345 МПа. Al також виявляє подібну поведінку, однак плівки товщиною 0,2 мкм не виявляють ознак пластичної деформації і руйнуються у цілковито крихкий спосіб. Межа текучості плівки Al 1 мкм склала 150 МПа, а напруження руйнування 0,2 мкм плівки – 375 МПа. У роботі [12] відмічається, що аналіз результатів робіт різних авторів свідчить про те, що основну увагу в них приділено дослідженню взаємозв'язку між механічними властивостями і структурним станом зразка. Але при цьому майже відсутні дослідження тензорезистивного ефекту металічних плівок в області відносно великих деформацій (до 10%), яка в основному і включає у себе область пружної деформації тонкопліткових зразків.

Широке застосування плівкових матеріалів як чутливих елементів різних сенсорів служить постійним стимулом пошуків таких матеріалів із покращеними характеристиками [38]. У зв'язку з цим вивчення механічних термо- і тензорезистивних, магніторезистивних, оптичних та ін. властивостей тонких плівок залишаються актуальними і на даний час. Зокрема, робота [39] присвячена всебічному аналізу тензочутливості з точки зору теоретичних моделей ефекту, їх узгодженості з експериментальними результатами та застосуванню плівкових матеріалів як чутливих елементів тензодатчиків. Дослідження останніх років [40-50] відображають тенденцію пошуку різних матеріалів із покращеними тензорезистивними характеристиками і, зокрема, із підвищеною термостійкістю, більшою величиною КТ та більш широким інтервалом пружної деформації.

Автори робіт [40-43] вивчали ефект тензочутливості у полікристалічних [40, 42-44] або злегка орієнтованих [41] діамантових плівках, які були синтезовані методом хімічного осадження (CVD). Авторами [40] було виявлено, що у полікристалічних плівках полі-C із р-провідністю і домішками В величина КТ дорівнює приблизно 1200 одиниць при  $T \cong 370$  К і біля 700

одиниць при  $T \cong 470$  К, що у декілька разів більше у порівнянні із плівками Si [44] з р- або n-провідністю (КТ відповідно дорівнює 9-25 або -(11-16) одиниць). Поряд з цим, згідно даних [42, 43], величина КТ у плівках полі-С без домішок В має величину від 3 до 30 одиниць [42] або від 8 до 28 (малі зерна) і від 10 до 65 (великі зерна) одиниць [43], що значно відрізняється від даних роботи [40], а також від даних роботи [41], у якій досліджувалися текстуровані плівки полі-С, які мали максимальну величину  $KT = 5,1$  одиниць.

У роботах [45-47] проведені тензорезистивні дослідження плівок оксинітриду Та [45] ( $KT \cong 3$  одиниці), ТаN [46] (КТ у залежності від концентрації  $N_2$  і температури відпалювання змінюється у межах 3,4 – 6,5 одиниць) та двошарових плівках ТаN/Cu [47] ( $KT = 1,8 - 5,2$  одиниць).

Автори роботи [48] встановили, що товсті шари ( $d \cong 15 \pm 5$  мкм) напівпровідника GaSb-FeGa<sub>1,3</sub> мають величину  $KT = 40 \pm 5$  одиниць. Однак до деякої міри рекордна величина  $KT = 600-1000$  одиниць спостерігається у напівпровідникових (або квазіметалевих) вуглецевих нанотрубках [49, 50].

Певний інтерес викликають роботи із дослідження можливості застосування плівок моносольфіду самарія як чутливого елемента тензодатчиків [51]. Автор зазначає, що варіювання температури підкладки у діапазоні 670-870 К та температури випаровування у діапазоні 2770-2970 К дає можливість отримувати плівки SmS, величина КТ у яких знаходиться у діапазоні 60-80 одиниць. Перспективність промислового застосування таких плівкових тензодатчиків підтверджується даними роботи [52]. За їх даними КТ датчиків на основі SmS складає 30-100 одиниць, а чутливість електроопору до всебічного стискання 1-3% на 10 МПа (100 атм.). Вони зберігають свої характеристики до 0,3% відносної деформації, тисків всебічного стискання  $10^3$  МПа і температури 670 К, мають високу часову стабільність і рекордну радіаційну стійкість серед усіх відомих напівпровідників.

Ряд авторів прийшли до висновку про можливість використання як чутливого елемента тензодатчика тришарової плівкової системи FeCo/Cu/Ni, у якій спостерігається гігантський магнітний опір.



Виходячи з узагальнень літературних даних [19, 39, 53] і аналізу результатів робіт [40-50], ми прийшли до висновку, що певну перспективу, з точки зору температурного інтервалу стійкості й величини КТ, мають дво- і багатошарові плівкові системи. Нами були обрані двошарові системи Cu/Cr/П (П-підкладка) і Fe/Cr/П, які мають дуже відмінний структурно-фазовий стан: перша система задовольняє умові двошаровості або біпластини, а друга – умові гомогенності, оскільки у ній вже у процесі конденсації утворюється по всьому об'єму зразка т.р. ( $\alpha$ -Fe, Cr).

### **1.3. Особливості кристалічної структури і дифузійні процеси в плівкових чутливих елементах тензодатчиків**

При дослідженні електро- і магнітотранспортних властивостей плівкових систем у вигляді багатошарової плівки чи мультишару завжди велика увага приділяється питанню про дифузійні процеси і фазоутворення на межі поділу окремих шарів (інтерфейсів) та, як залежну від цих процесів, їх стабільність [16, 54, 55]. Виходячи з мети нашої роботи, основне питання буде приділено системам на основі Cu і Cr та Fe і Cr. Плівкові системи на основі Cr, Cu часто використовуються як модельні зразки для апробації нових теоретичних моделей термічного коефіцієнту опору або коефіцієнта тензочутливості. Крім того, дослідження електрофізичних властивостей двошарових плівок Cu/Cr/П має самостійний інтерес, оскільки вони використовуються як струмопровідні доріжки [56]. Інтерес до плівкових систем на основі Fe і Cr, окрім модельних властивостей, пов'язаний ще й з тим, що у мультишарах  $[\text{Fe/Cr}]_n/\text{П}$  ( $n$  – число фрагментів Fe/Cr) вперше у 1988 р. спостерігався ефект гігантського магнітоопору [57].

Особливістю зазначених плівкових систем є те, що невідпалені одношарові плівки, як компоненти багатошарових систем, мають у відповідності із специфікацією [58] нанокристалічну (плівки Cr та Fe) або субмікротристалічну (плівки Cu) структуру. При цьому спільним для цих плівок є те, що вони мають

тип і параметр кристалічної решітки, який відповідає масивним зразкам (ГЦК-Cu та ОЦК-Cr та  $\alpha$ -Fe) [20].

Електронно-мікроскопічні дослідження двошарових плівок на основі  $\alpha$ -Fe і Cr вказують на те, що у них утворюється т.р. ( $\alpha$ -Fe, Cr) вже на стадії конденсації верхнього шару, хоча згідно з діаграмами стану конденсаційно-температурні інтервали конденсації відповідають евтектичному стану. Причину утворення т.р. автори пов'язують із перегріванням плівкової системи у цілому вище температури евтектики при осадженні верхнього шару. Поряд із цим фактором велику роль відіграє конденсаційно-стимульована зерномежева дифузія [20, 59 - 60].

Стосовно плівок Cu і Cr автор [15] відмітив наступні особливості кристалічної будови одношарових плівкових зразків. По-перше, у вихідному стані, тобто у невідпалених зразках, мікроструктура сильно дисперсна. Це має місце як у випадку плівок Cr, так і у випадку плівок Cu, у яких при відпалюванні найбільш ефективно протікають процеси рекристалізації. Усі одношарові плівки мають наноструктуру (середній розмір кристалітів  $L \sim 10-100$  нм), про що свідчать також результати досліджень методом атомної силової мікроскопії. Ізохронний відпал ( $\tau \cong 10$  хв.) при  $T_v \cong 700$  К призводить до помітної рекристалізації зразків. Так, при  $d \cong 50$  нм величина  $L$  складає близько 110 (Cu), 30 (Cr) нм [61].

У роботі [62] з метою дослідження дифузійних процесів плівкової системи Fe(40)/Cr(40)/П був використаний метод ВІМС. Аналіз спектрів ВІМС показав, що вже на стадії конденсації має місце досить значне взаємне проникнення атомів компонентів верхнього шару, що у свою чергу призводить до утворення твердих розчинів ( $\alpha$ -Fe, Cr) у об'ємі двошарової плівки. Серед факторів, що призводить до такого результату, автори виділяють у першу чергу конденсаційно-стимульовану дифузію (КСД) атомів Fe та підвищену дифузійну рухливість Cr по межах зерен. Поблизу межі поділу відбувається майже повне

насичення меж зерен атомами компонентів. Крім того було помічено, що нетермостабілізовані плівки мають вищу концентрацію дефектів та вищу дисперсність кристалів, ніж відпалені зразки. На рис. 1.3 наведено дифузійний профіль для відпаленої протягом 15 хв. при  $T_v = 700$  К плівкової системи Fe(40)/Cr(40)/П. Результати досліджень методом ВІМС, можна узагальнити у вигляді таблиці 1.1.

Результати роботи [56], у якій автори методом ВІМС досліджували дифузійні процеси у плівкових сиграх Cu/Cr/П до та після термообробки, дали можливість зробити наступні висновки. У невідпалених плівках Cu/Cr/П у значній мірі зберігається індивідуальність шарів Cu та Cr і зразки з відхиленням у декілька відсотків являють собою біпластини, у той час як у відпалених плівках відхилення від біпластини складає (в залежності від товщини плівкової системи) від 18 до 54% і індивідуальність шарів не зберігається. Термообробка двошарових плівкових систем Cu/Cr/П призводить до дифузійних процесів, у результаті яких відбувається насичення меж зерен атомами іншого елемента, що робить їх більш досконалыми і обумовлює зменшення коефіцієнта розсіювання електронів на межі зерен, а відповідно, і величини ТКО і КТ.

Автори роботи [63] провели дослідження методом ВІМС взаємної дифузії атомів на прикладі плівкової системи Cr/Cu/Ni/Au/П у невідпаленому стані та відпаленої протягом 900 с при  $T_v = 600$  К. Дифузійні профілі наведені на рис. 1.4.

На основі цих досліджень можна зробити висновок про збереження індивідуальності окремих шарів у невідпаленому стані. Після відпалювання відбувається повне перемішування атомів, причому у випадку рекристалізації плівок Cu/Cr у об'ємі великих зерен Cu відбувається сегрегація („захоплення”) атомів Cr до 20 ат.% (при об'ємній розчинності у масивних зразках 0,1 ат.%), хоча через слабку рекристалізацію зерен Cr зворотній процес не спостерігається.

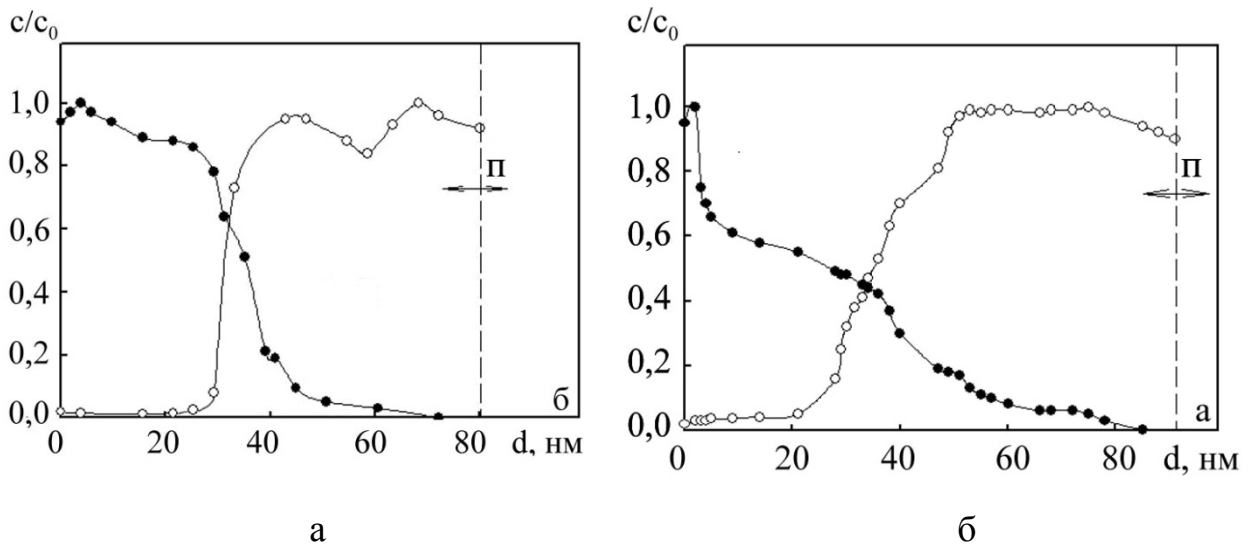


Рис. 1.3. Дифузійні профілі для плівкової системи Fe(40)/Cr(40)/П у невідпаленому (а) та відпаленому (б) стані:  $T_B$  - 700 К. ● – Fe; ○ – Cr [62]

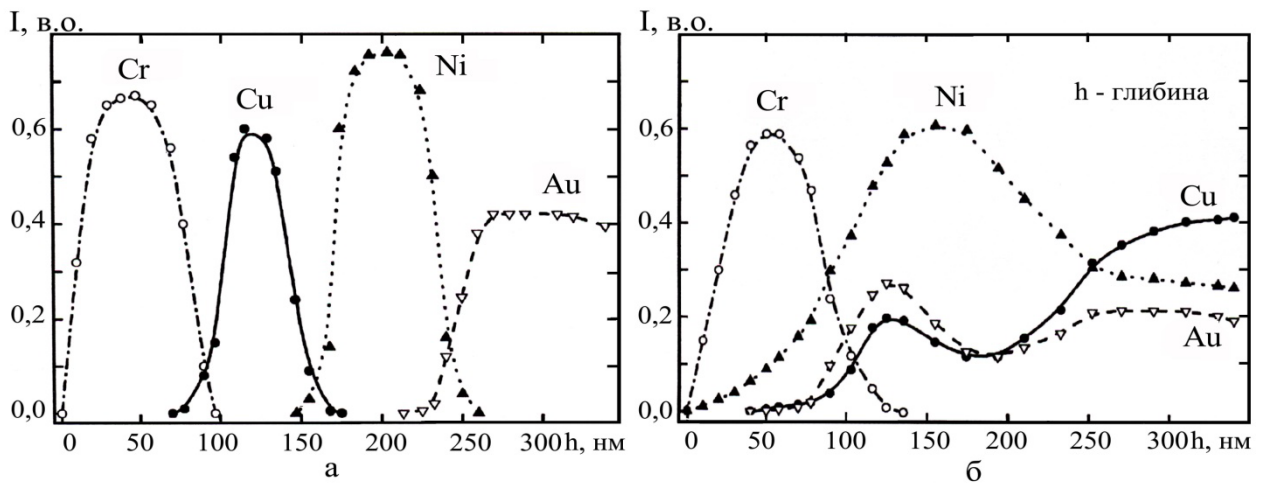


Рис. 1.4. Дифузійні профілі для невідпаленої (а) та відпаленої протягом 900 с. при  $T_B = 630$  К (б) плівкової системи Cr/Cu/Ni/Au/П [63]

Таблиця 1.1

Ефективні коефіцієнти дифузії атомів у плівкових системах на  
основі Fe і Cr [62]

Плівкова система, нм	КСД (ОЕС)		ТД ( $T_B = 637K$ )		КСД+ІСД (ВІМС)		КСД+ІСД+ТД (ВІМС)	
	$l$ , нм	$D \times 10^{19}$ , $M^2/c$	$l^*$ , нм	$D \times 10^{19}$ , $M^2/c$	$l$ , нм	$D \times 10^{19}$ , $M^2/c$	$l$ , нм	$D \times 10^{19}$ , $M^2/c$
Fe(10)/Cr(10)/П	Cr → Fe ≤3,0    ≤5,0		Cr → Fe ≥2,0    ≥0,004					
Cr(5)/ Fe (10)/П	Fe → Cr ≤2,5    ≤0,9		Fe → Cr ≥1,0    ≥0,02					
Fe(40)/Cr(40)/П					Fe → Cr 36        6,5 Cr → Fe 20        2,0			
Fe(40)/Cr(40)/П							Fe → Cr 40 0,2 Cr → Fe 12 0,02	
* $\Delta l = l_{ТД} - l_{КСД}$ , нм								

#### 1.4. Чутливі елементи плівкових тензодатчиків на основі металів, сплавів і багат шарових систем

Роботу [64] необхідно розглядати як проблемну і пошукову з точки зору можливого застосування плівкових матеріалів як тензорезисторів. Характерною особливістю цієї роботи є не тільки великий об'єм експериментальних досліджень  $\gamma_\ell$  від  $R_\square$ , але і узагальнення відомих результатів, отриманих авторами у 1940 – 60-х рр., з акцентом уваги на матеріали з відносно великим  $\gamma_\ell$ , на інтервал товщин, при яких має місце мінімум, на залежності  $\gamma_\ell$  від  $R_\square$ , на співвідношення між  $\gamma_\ell$  і  $\gamma_{0\ell}$ . Показовою є констатація авторами [64] ролі тунельного ефекту електронів у великому значенні КТ острівцевих плівок. У пізніших роботах це підтверджено неодноразово, у чому можна переконатися із даних для острівцевих плівок Au ( $\gamma_{\ell\max} = 120$  [65], 40 [66]) або Cr(5)/Au(50) ( $\gamma_{\ell\max} = 5,5$  [67]) (див. також посилання на літературні джерела у [65-67]).

Робота [68] ідейно споріднена [64], але у ній вже вказані сфери застосування явища тензочутливості. Зокрема мова іде про датчики тиску і деформації, гідрофони, мікрофони і т.п. із схематичним зображенням можливих варіантів розміщення чутливих плівкових елементів на діафрагмах, стрижнях, циліндричних поверхнях тощо.

Характерною рисою сучасної плівкової сенсорики є використання багатокомпонентних тензорезисторів, як між іншим і терморезисторів. У роботі [69] на прикладі тензо- і терморезисторів на основі  $\text{Pd}_{0,87}\text{Cr}_{0,13}$  викладена загальна концепція конструювання цих сенсорів (рис. 1.5).

Особливістю концепції виготовлення сенсорів є їх багатфункціональність, яка ілюструється на рис. 1.6. Такого виду сенсори успішно використовуються для тензометрії лопаток турбін та інших вигнутих конструкцій. Автори [69] відмічають, що сенсор на основі  $\text{Pd}_{0,87}\text{Cr}_{0,13}$  стабільний високотемпературний, оскільки в інтервалі температур 300 – 1320 К  $\gamma_\ell$  зменшується лише на 22%, тобто  $\beta_{\gamma_\ell} = -2,1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Хоча у роботі [69] значення  $\gamma_\ell$  не наводиться, відомо

(див., наприклад, [23, 70, 71]), що у плівкових сплавах  $\text{Ni}_x\text{Ag}_{1-x}$  або ніхрому величина  $\gamma_\ell = 1,94 - 2,10$  [23] або від  $1,4 - 1,6$  [70] до 2 одиниць [71] при  $T \cong 300$  К. Таким чином, з точки зору величини  $\gamma_\ell$  металеві плівкові тензорезистори не ефективні, але їх перевагою є термічна стабільність.

Перехід до композиційних плівкових матеріалів дозволяє вирішити обидві проблеми – отримати відносно велике значення  $\gamma_\ell$  і широкий температурний інтервал. Наприклад, у цитованій нами вище роботі [72] наводяться дані про величину  $\gamma_\ell$  від 520 до 5000 одиниць у волокнах на основі Fe, Si, B, Nb і Cu. Як кандидати на високотемпературні тензорезистори (до 600 К) розглядаються [73] плівки  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TiSi}_2$ ,  $\text{TaSi}_2$  та  $\text{WSi}_2$ , хоча і з малою величиною  $\gamma_\ell$  (таблиця 1.2). Принципова схема такого тензодатчика, яка відповідає концепції [69], наведена на рис. 1.7. Ряд авторів застосовують тензорезистори на основі порошків із металевих оксидів, компактованих у різні пасти, як наприклад, товстоплівкові тензорезистори на основі  $\text{IrO}_2$  [74]. Відмітимо, що у цій роботі також застосована концепція [69] на мембрані із  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . У тонкоплівкових тензорезисторах на основі  $\text{V}_2\text{O}_5$  із різним вмістом  $\text{BiO}_3$  (від 40 до 90 мол.%) вдається реалізувати величину  $\gamma_\ell$  від 4,9 до 17 одиниць [75].

Очевидно, що відносно велике значення  $\gamma_\ell$  для оксидів ванадію досить типова ситуація, оскільки і у випадку плівок VO [76]  $\gamma_\ell = 80$  одиниць при  $d = 205$  нм. У плівках In-Sn-оксид, які пропонуються авторами [77] як активні елементи високотемпературного тензодатчика (до 1720 К), величина  $\gamma_\ell$  (відповідно і  $\beta_{\gamma_\ell}$ ) характеризується двома температурними інтервалами. Від 270 до 1070 К  $\gamma_\ell$  змінюється від -6 до -4 одиниць ( $\beta_{\gamma_\ell} = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ), а від -4 до +15 одиниць ( $\beta_{\gamma_\ell} = 158 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ). Відносно простий метод реактивного розпилення суміші 90 ваг.%  $\text{In}_2\text{O}_3$  і 10 ваг.%  $\text{SnO}_2$  при температурі 370 К відкриває хорошу перспективу використання цього резистора у тензометрії. Використання оксидних плівкових матеріалів, зокрема  $\text{TiO}_2$ , як тензорезисторів є методологічною основою запропонованого у роботі [78] методу вимірювання

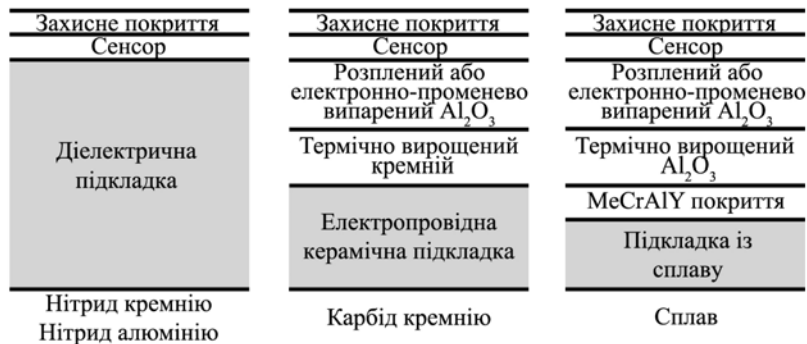


Рис. 1.5. Схематичне зображення тонкоплівкових сенсорів на різних підкладках Me-Fe, Co, Ni [69]

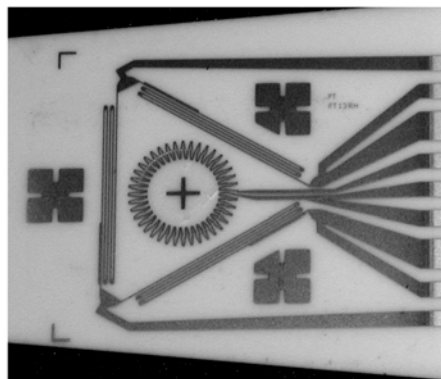
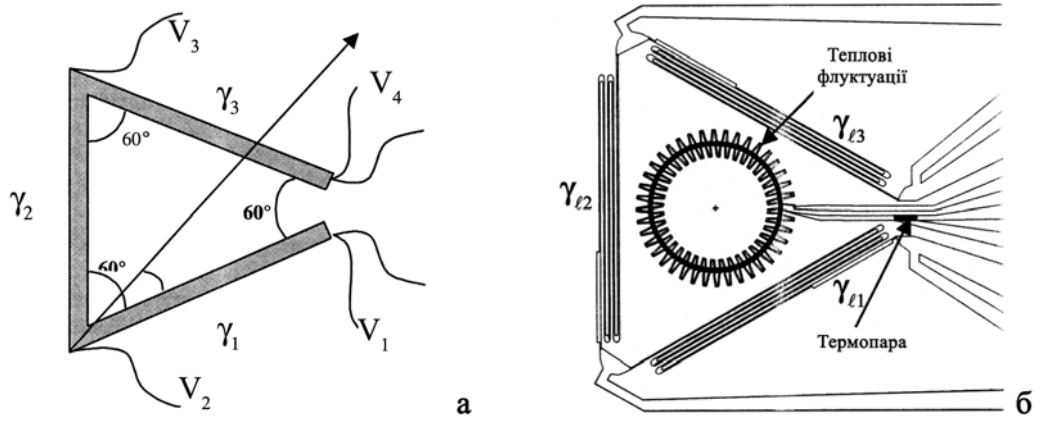
Таблиця 1.2

Термо- і тензорезистивні властивості плівок на основі

Ti і B та Ti, Ta, W і Si [73].

Плівка	$d$ , нм	$R_{\square}$ , Ом	$\rho \cdot 10^6$ , Ом·м	$\beta \cdot 10^4$ , K <sup>-1</sup>	$\gamma_l$ (П-Si)	$\gamma_l$ (П-кераміка)
TiB <sub>2</sub>	140	4,2	0,6	-0,5	1,4	0,7
TiSi <sub>2</sub>	170	190,0	32,0	-27,0	1,1	0,7
TaSi <sub>2</sub>	340	20,0	6,8	-26,0	1,5	-
WSi <sub>2</sub>	720	4,0	2,9	-45,0	2,2	2,0





в

Рис. 1.6. Концепція (а), схема (б) і зовнішній вигляд (в) багатофункціонального сенсора [69]

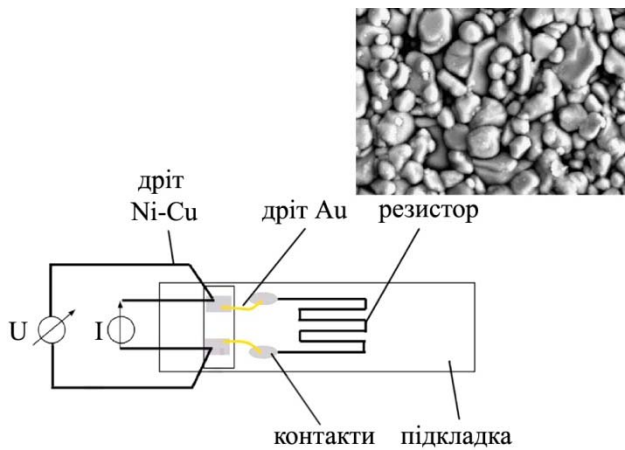


Рис. 1.7. Схематична будова тензодатчика на основі плівки  $TiB_2$ . На вставці: РЕМ зображення мікроструктури плівки [73]

коефіцієнту тензочутливості при згинанні підкладки консольного типу. Суть його полягає у тому, що оксидна плівка виступає з однієї сторони як діелектричний прошарок товстоплівкового металевого конденсатора, а з іншої – як тензорезистор. Виходячи із формули для ємкості плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon' S}{h},$$

можна перейти до диференціального співвідношення

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta \varepsilon'}{\varepsilon'} + \frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta h}{h},$$

де  $\varepsilon'$  – абсолютна діелектрична проникливість;

$S$  – площа обкладинок конденсатора (сенсора);

$h$  – товщина плівки  $\text{TiO}_2$ ;

$\Delta h/h = \Delta E/E$  ( $E$  – напруженість електричного поля).

Оскільки деформацію  $\varepsilon_\ell$  і  $\Delta E$  можна пов'язати зі зміною геометричних розмірів тензорезистора, то легко перейти до робочої формули для  $C = \frac{\Delta C/C}{\varepsilon_\ell}$ .

Проведені у [78] дослідження ресурсу роботи тензодатчика із  $\text{TiO}_2$  протягом 20 деформаційних циклів дали максимальний розкид величини  $\gamma_\ell$  у 18% при  $\bar{\gamma}_\ell = 30$  одиниць. Ідеї [78] надалі були реалізовані у роботі [79], але на прикладі вимірювання  $\gamma_\ell$  металевих плівок  $\text{NiCr}$ . Оскільки даний тензорезистор не є діелектриком, то величина  $\Delta C/C$  розраховувалася на основі вимірювання зміни резонансної частоти плівкового LC-контур.

Нова сенсорна концепція запропонована у [80], суть якої полягає в одночасному вимірюванні температури (терморезистор із плівки  $\text{Pt}$ ) і тензочутливості (тензорезистор із ніхрому  $\text{Ni}_{0,8}\text{Cr}_{0,2}$ ). В основі вимірювань лежать залежності опору резистора від температури і деформації:

$$R(T) = R_n(1 + \beta T), \quad R(\varepsilon) = R_n(1 + \gamma_\ell \cdot \varepsilon_\ell),$$

де  $R_n$  – початковий опір.

При одночасній дії температурних і деформаційних полів дві попередні залежності об'єднуються в одну:

$$R(T, \varepsilon) = R_0 + R_1 \beta T + R_2 \gamma_\ell \varepsilon_\ell \quad (1.6)$$

У процесі термо- і тензометрії використовується два резистора, для яких справедливе співвідношення (1.6). Маючи залежності  $R(T)$  при  $\varepsilon_\ell = 0$  і  $R(\varepsilon_\ell)$  при  $T = T_0$  для двох резисторів, можна на основі залежностей  $R_1(T, \varepsilon_\ell)$  і  $R_2(T, \varepsilon_\ell)$  розрахувати одночасно  $\beta$  і  $\gamma_\ell$ . У роботі [80] наведені вказані експериментальні залежності і результати розрахунків, які узгоджуються з відомими у літературі даними для  $\beta$  і  $\gamma_\ell$ .

Цикл робіт М. Хрвата та ін. [29, 81, 82] містять дані, які дозволяють узагальнити інформацію про товстоплівкові тензорезистори (таблиці 1.3 і 1.4). Для нас найбільший інтерес представляють їх тензорезистивні властивості, хоча у вказаних роботах наведені також рентгеноструктурні і РЕМ дослідження. Ілюстрація впливу термообробки на ці параметри наведена у таблиці 1.4, а залежність  $\gamma_\ell$  від  $R_0$  на рис. 1.8. Роботи 2005-х рр. (наприклад, [50]) вказують на те, що певну перспективу подальшого розвитку тензометрії слід пов'язувати із нанотрубками у якості тензорезисторів. Згідно [50],  $\gamma_\ell$  для них має величину від -200 до +200 одиниць, хоча це можна розглядати як проміжний результат.

Тензорезистори та датчики, сконструйовані на їх основі, можуть бути використані для вирішення широкого кола задач, наприклад: визначення механічних характеристик впливу, якому піддаються досліджувані об'єкти, видача параметрів, на основі яких можна оцінити стан об'єктів, довготривалий моніторинг об'єктів у процесі експлуатації. Число таких задач надзвичайно велике, вони виникають практично у всіх областях техніки і деякими з них є: аерокосмічна промисловість, будівництво, нафтова та газова промисловість тощо [55].

Так, автори [83, 84] за допомогою т. зв. вертикального товстоплівкового тензорезистора на основі  $ZrSiO_4$  з домішками Si та Zr проводять вимірювання

Таблиця 1.3

Тензометричні параметри товстоплівкових резисторів [82]

Резистор	Провідна фаза	Головні елементи	Інші елементи	$\gamma_e$	$\frac{\gamma_t}{\gamma_e}$
8039	Рутеніт (P)	Si, Pb, Al	Zr	12,5	0,84
8041	RuO <sub>2</sub>	Si, Pb, Al	Zr, Cu	4,0	0,86
2041	RuO <sub>2</sub> + P	Si, Pb, Al	Mg, Zn, Ca	12,0	0,78
QM-84	RuO <sub>2</sub> + P	Si, Pb, Al	Cu, Zr	11,0	0,83
QM-94	RuO <sub>2</sub> + P	Si, Pb, Al	Ca, Mn, Cu	10,0	0,78
3414	P	Si, Pb	Al, K	20,0	0,65
8241	RuO <sub>2</sub>	Si, Pb, Al	Ca	16,0	0,81

Таблиця 1.4

Температурна залежність  $\beta$  і  $\gamma_e$  для товстоплівкових резисторів [29, 81]

Резистор	$T_{обр.}, K$	$\beta \cdot 10^6, K^{-1}$ (від 250 до 300 K)	$\beta \cdot 10^6, K^{-1}$ (від 250 до 300 K)	$\gamma_e$
8039	1020	- 5	75	9,5
	1070	- 15	85	11,0
	1120	+ 50	90	11,0
	1170	+ 270	285	10,0
	1220	+ 1730	1685	2,0
8241	1020	20	60	17,0
	1070	20	65	15,5
	1120	20	60	15,5
	1170	5	45	15,5
	1220	5	40	15,2

баричного коефіцієнта опору  $\gamma_p = \frac{dR}{Rdp}$  і перпендикулярних деформацій.

Тензорезистор на основі плівки манганину автори [85] застосували для вимірювання всебічного тиску на основі співвідношення для  $\gamma_p$ . Автори [86] використовують тензорезистор на основі плівкового сплаву Pt-W для вимірювання тиску плазми у вакуумній камері. Інверсний магнітострикційний ефект Віларі автори [87] використовують для вимірювання сили, тиску та видовження. Чутливим елементом сенсора виступає мікротрансформатор, який виготовлений із плівки магнітоеластичного сплаву  $Ni_{0,45}Fe_{0,55}$  і має O-подібну форму (рис. 1.9).

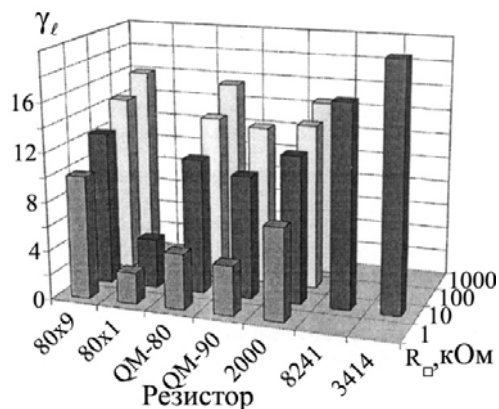


Рис. 1.8. Величина  $\gamma_e$  для різних типів тензорезисторів [82]

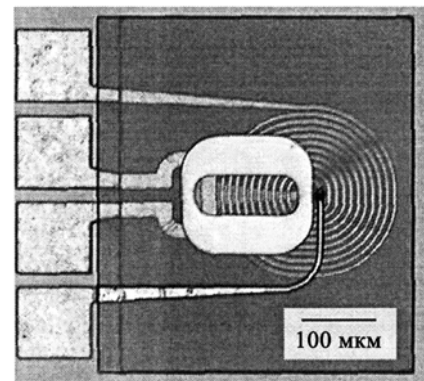


Рис. 1.9. Зовнішній вигляд сенсора на основі мікротрансформатора [87]

Узагальнюючи вищезазначене, можна стверджувати, що до основних характеристик і вимог тензорезисторів відносяться [52]:

- температурна та часова стабільність, великий ресурс роботи;
- похибка вимірювання деформації, яка не повинна перевищувати  $\Delta l/l = 1 \text{ мкм/м}$ ;
- довжина і ширина датчика повинні бути достатньо малими для адекватного вимірювання деформації у заданій точці;
- інерційність датчика повинна бути малою для реєстрації високочастотних динамічних процесів;
- лінійність вихідного сигналу датчика у межах всього діапазону;
- економічність датчика та пов'язаних з ним пристроїв;

- мінімальні вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу для встановлення та проведення досліджень.

Аналіз, проведений нами, вказує на те, що чутливі елементи на основі плівкових систем Cu/Cr і Fe/Cr до великої міри задовольняють цим вимогам. Додатковим аргументом на користь цих чутливих елементів також може бути їх високотемпературна стабільність.

### **Висновки до Розділу 1**

1. Застосування одно- та багатошарових плівкових систем як чутливих елементів тензодатчиків має значну перспективу їх використання в області проміжних і високих температур, при яких напівпровідникові датчики не ефективні.

2. Роботи, що присвячені дослідженню кристалічної структури та дифузійних процесів, дають можливість стверджувати, що плівкові тензодатчики на основі Cu/Cr і Fe/Cr можуть проявити високу стабільність в області високих температур.

3. Літературні дані стосовно тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів вказують на те, що вони в області пружної деформації вивчені досить детально, у той час як дослідження в області пружної деформації лише започатковані.

4. Відомі феноменологічні, класичні і напівкласичні теоретичні моделі для тензоефекту в області пружної деформації відкривають можливості як для попередньої оцінки, так і комп'ютерного моделювання тензорезистивних властивостей різних плівкових систем в області пружної деформації, хоча стосовно області пластичної деформації аналогічні моделі відсутні.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Проаналізувавши літературні дані про один із напрямів плівкового приладобудування – конструювання сенсорів деформації і тиску – нами був сформульований основний напрям досліджень. Його можна реалізувати шляхом виконання таких двох етапів.

На першому етапі розробляються експериментальні методики і обладнання для автоматизації процесів вакуумної конденсації та дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів.

На другому етапі вирішуються такі експериментальні і теоретичні задачі:

- досліджується тензорезистивний ефект у двошарових плівках Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації у статичному і динамічному режимі;
- отримуються залежності опору, відносної зміни опору і миттєвого коефіцієнта тензочутливості від повздовжньої деформації;
- використовуючи запропоновану оптичну схему здійснюється контроль структурного стану зразків;
- отримані експериментальні результати порівнюються із розрахунковими на основі теоретичних моделей для плівкового сплаву і біпластини.

Вибір плівкових матеріалів, а також систем на їх основі, що використовувалися для дослідження у даній роботі, був пов'язаний з наступними факторами.

По-перше, плівкові системи Cu/Cr та Fe/Cr у нашій роботі виступають як модельні системи. Перша з них являє собою систему типу біпластина, у якій практично відсутня взаємна дифузія атомів і, відповідно, зберігається індивідуальність шарів. Друга – твердий розчин на основі ( $\alpha$ -Fe, Cr), що утворюється ще на стадії конденсації плівки. Це дає можливість на плівкових системах Cu/Cr та Fe/Cr здійснити апробацію відомих теоретичних моделей КТ.

По-друге, практичний напрямок досліджень полягає у тому, що чутливі елементи у вигляді дво- або багатошарових систем на основі Cu та Cr або Fe та

Cr мають високу температурну стабільність з точки зору фазових перетворень. Так, у плівковій системі Cu/Cr до 900 К майже повністю відсутня взаємна розчинність атомів, що гарантує стабільність характеристик тензорезистора і підвищене значення  $\gamma_\ell$  у результаті інтерфейсного розсіювання електронів. Крім того, використання як нижнього підшару плівки Cr дозволяє забезпечити хорошу адгезію тензорезистора до діелектричної підкладки. Перевага плівкової системи Fe/Cr полягає у тому, що у ній утворюється твердий розчин ( $\alpha$ -Fe, Cr), який стабільний до температури 1800 К. Одним із шляхів підвищення величини  $\gamma_\ell$  у випадку даної системи може бути перехід до багатошарових плівкових систем, у яких реалізується стан зі спін-залежним розсіюванням електронів, і величина  $\gamma_\ell$  буде пов'язана зі зміною ГМО при деформації.

Далі детальніше зупинимося на методах отримання і дослідження плівкових зразків.

## **2.1. Методика отримання і дослідження тензорезистивних властивостей плівкових зразків**

### **2.1.1 Формування контактів на підкладках**

У ході вимірювання тензорезистивних властивостей тонкоплівкових зразків треба мати на увазі, що опір плівок, а особливо плівкових систем, може мати доволі невеликі значення (від 10 Ом). Тому при проведенні експериментальних досліджень велика увага повинна звертатися на підготовку підкладок з низькоомними контактами, які б у мінімальній мірі впливали на тензорезистивні властивості досліджуваних плівкових систем. Відповідно до цього нами використовувалася спеціально розроблена методика підготовки підкладок зі струмопровідними контактними майданчиками. Детально ця методика описана у роботі [61].



Особливість нашої методики у порівнянні з методикою, яка використовувалася у роботах [15, 88], що виконувалися на кафедрі прикладної фізики СумДУ, полягає в тому, що замість склотекстолітових, фторопластових чи підкладок з нікелевої фольги нами як підкладки з контактними майданчиками використовувалися стрічки полістиролу товщиною 0,4 мм.

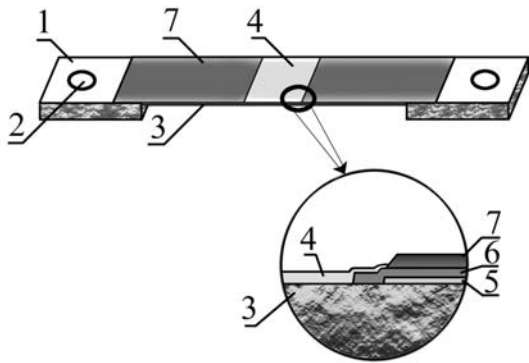


Рис. 2.1. Схематична будова підкладки для вимірювання КТ: 1 – алюмінієві кріплення; 2 – отвори під гвинти; 3 – підкладка з полістиролу; 4 – плівковий зразок; 5, 6 – підшар Cr і Cu; 7 – шар електролітично осадженого Cu

Переваги плівки полістиролу полягають у тому, що стрічки мають добре відшліфовану поверхню і хороші пружні характеристики у діапазоні деформацій до 2%. До недоліків можна віднести її низьку температурну стійкість (до 500 К).

На поверхні полістиролових підкладок шляхом вакуумної конденсації через маску формувалися плівкові контакти у вигляді двошарової плівки Cu/Cr/П (П-підкладка). Нанесення першого шару плівки Cr товщиною до 20 нм на підігріту підкладку гарантувало добру адгезію. Далі конденсувався шар Cu ( $d \cong 60$  нм). Для створення гарного електричного контакту, який у мінімальній мірі б впливав на тензорезистивні властивості зразків, шляхом електрохімічного осадження відбувалося потовщення шару Cu до товщини 2 мкм з формуванням східців змінної товщини.

### 2.1.2. Апаратні та програмні засоби автоматизації фізичного експерименту

Для забезпечення високої точності вимірювань та достовірності отриманих результатів у даній дисертаційній роботі велика увага була приділена різноманітним можливостям автоматизації фізичного експерименту отримання та дослідження електрофізичних властивостей плівкових матеріалів. Нижче буде наведено ряд розроблених нами автоматизованих систем, які у значній мірі покращили можливості отримання та обробки інформації, а також дозволили проводити експериментальні дослідження на більш високому якісному рівні. Автоматизація дозволила підвищити точність вимірювання електрофізичних величин і забезпечила автоматичний контроль та управління ходом проведення експерименту, звела до мінімуму кількість ручних операцій та вплив людського фактору на результати отримання експериментальних даних.

Дана автоматизація стала можлива завдяки вдалому поєднанню апаратних та програмних засобів. Зупинимось детальніше на описі цих двох складових.

Основу апаратної частини склали пристрої віддаленого і розподіленого збору даних та управління ADAM-4018, ADAM-4068 та ADAM-4561 фірми Advantech [89, 90]. Кожен з цих пристроїв мав своє чітке призначення у структурі наших систем автоматизації, а їх універсальність дозволила нам обмежитися лише ними для реалізації усіх запланованих задач по автоматизації експериментального обладнання.

Для перетворення сигналів напруги, струму та температури з датчиків у цифровий формат даних використовувався мікроконтролерний модуль ADAM-4018, що містить у собі аналого-цифровий сигма-дельта перетворювач, керований 16-ти бітовим мікропроцесором.

При запиті з боку системного (host) комп'ютера модуль передає у нього дані по стандартному інтерфейсу RS-485. Модуль ADAM-4018 забезпечує узгодження сигналів, аналого-цифрове перетворення, перемикання діапазонів,

цифровий зв'язок по інтерфейсу RS-485, контроль верхньої/нижньої межі. Модуль ADAM-4018 має вбудоване ізольоване джерело живлення. Дозволяє працювати з 2-х або 3-х провідними передавачами сигналу без додаткового зовнішнього джерела живлення. Має індивідуальні контури живлення по кожному каналу, що спрощує процес його підключення до датчика при одночасному забезпеченні ізоляції між ланцюгами підключених джерел сигналів. Містить два цифрові виходи і один цифровий вхід.

За своїми технічними характеристиками він має 8 аналогових входів, шість диференціальних каналів та два із загальним проводом. Тип вхідних сигналів та вимірюваний діапазон: напруга  $-0,015...+0,015$ ,  $-0,05...+0,05$ ,  $-0,1...+0,1$ ,  $-0,5...+0,5$ ,  $-1...+1$ ,  $-2,5...+2,5$  В; струм  $-20...+20$  мА; температура з відповідним типом термопар  $-270...+2320$  °С.

Вимірювання опору тонкоплівкових зразків з використанням модуля ADAM-4018 виконувалося за чотириточковою схемою. З цією метою була використана спеціальна схема (рис. 2.2), що складалася зі стабілізованого джерела струму (1 мА) та еталонних прецизійних резисторів номіналом 13,024, 40,209 та 80,614 Ом.

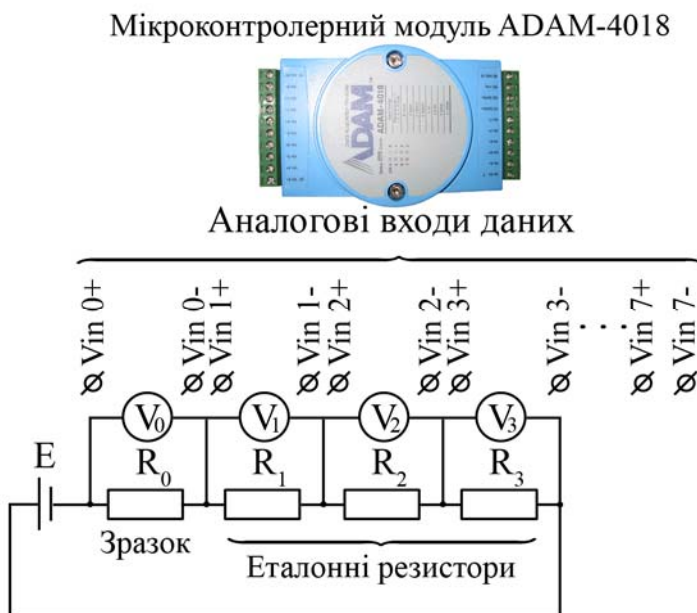


Рис. 2.2. Електрична принципова схема вимірювання опору за допомогою модуля ADAM-4018.

Струм протікає по електричному колу, що складається з послідовно включених еталонних резисторів та зразків. ADAM-4018, зчитуючи падіння напруги з еталонних резисторів, визначає силу струму у колі, а, відповідно, знаючи падіння напруги на зразках, можна визначити їх опір.

Для управління системою зворотного зв'язку (управління електродвигуном та електромагнітами) використовувався модуль ADAM-4068, що включає у себе 8 електромагнітних реле. Інтерфейс підключення RS-485, гальванічна ізоляція 1500 В, максимальний комутований струм постійний 1A@24В, змінний 0.5A@120В, час комутації включення 5 мс, виключення 2 мс.

На рис. 2.3 наведено електричну принципову схему управління асинхронним конденсаторним електродвигуном типу Д-219П1УЗ[91].

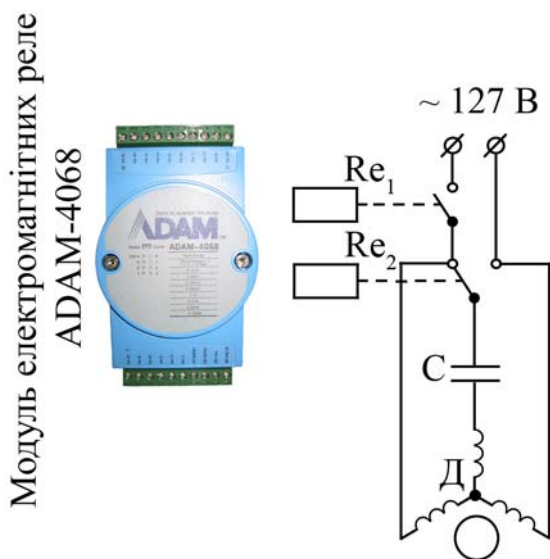


Рис. 2.3. Електрична принципова схема управління асинхронним конденсаторним електродвигуном типу Д-219П1УЗ.

Для перетворення сигналів з промислового інтерфейсу RS-485 до інтерфейсу USB, що на даний час найпоширеніший при роботі з периферійними пристроями, використовувався перетворювач інтерфейсів ADAM-4561. Він застосовується для перетворення стандартів RS-232, RS-485 або RS-422 до стандарту USB з автоматичним контролем за напрямом та гальванічною ізоляцією до 3000 В. Підтримує максимальну кількість модулів у мережі до 256 з використанням повторювачів або 32 без їх використання для (RS-485). Швидкість передачі даних 300 ~ 115200 кБіт/с. Максимальна довжина лінії зв'язку RS-485 – 1200 м, USB – 4,6 м. Для живлення модулів ADAM-4018 та ADAM-4068 використовувалося стабілізоване джерело живлення БЖІ-24В/0,3А напругою на 24 В.

Усі програми для автоматизації вимірювання та управління фізичним експериментом були розроблені на кафедрі прикладної фізики з використанням середовища графічного програмування LabVIEW 8.X компанії National

Instruments при консультаціях доцента кафедри прикладної фізики Проценка С.І.

National Instruments LabVIEW – високоефективне середовище графічного програмування, у якому можна створювати гнучкі і масштабовані додатки вимірювань, управління і тестування з мінімальними витратами фінансів та часу. LabVIEW поєднує у собі гнучкість традиційної мови програмування з інтерактивною технологією Експрес ВП (віртуальний прилад), яка включає автоматичне створення коду, використання помічників при конфігурації вимірювань, шаблони додатків, що налагоджуються Експрес ВП [92, 93].

До переваг LabVIEW можна віднести:

- повноцінна мова програмування;
- інтуїтивно зрозумілий процес графічного програмування;
- широкі можливості збору, обробки і аналізу даних, управління приладами, генерації звітів і обміну даних через мережеві інтерфейси;
- драйверна підтримка більше 2000 приладів;
- можливості інтерактивної генерації коду;
- шаблони додатків, тисячі прикладів; висока швидкість виконання програм, що відкомпілювалися;
- технічна підтримка світового рівня;
- сумісність з операційними системами Windows 2000/NT/XP, Mac OS X, Linux і Solaris.

Великою перевагою LabVIEW у порівнянні зі звичайними текстовими мовами програмування є його наочність і простота створення додатків. Можливості настройки і конфігурації устаткування, аналізу і обробки отриманих даних, відображення і запису результатів вимірювань.

LabVIEW використовується у системах збору і обробки даних, а також для управління технічними об'єктами і технологічними процесами. Графічна мова програмування «G», що використовується у LabVIEW, заснована на архітектурі потоків даних. Послідовність виконання операторів у таких мовах визначається не порядком їх проходження (як у імперативних мовах програмування), а

наявністю даних на входах цих операторів. Оператори, які не пов'язані даними, виконуються паралельно у довільному порядку.

Особливу увагу хотілося б звернути на National Instruments Vision Development Module, який є додатком LabVIEW і використовувався нами для написання програм. Vision Development Module призначений для інженерів і вчених, що використовують технології технічного зору у промислових і наукових завданнях. Електронна обробка зображень є технологією, що швидко розвивається. Використання цифрової камери як "універсального датчика" та відповідне програмне забезпечення для аналізу і обробки даних у ряді випадків стало доцільніше та економічно обґрунтоване, ніж альтернативне сенсорне застосування.

Далі в цьому розділі буде детальніше описано принцип розпізнавання зображення за допомогою системи машинного зору, що використовувався для написання програми дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів.

### **2.1.3. Обладнання для отримання тонкоплівкових зразків**

Тонкоплівкові зразки Cu, Cr і Fe, а також плівкові системи на основі цих металів, отримувалися методом термічного випаровування у вакуумній камері установки ВУП-5М з тиском залишкових газів  $\sim 10^{-4}$  Па. Вимірювання товщини проводилося методом кварцового резонатора, а також перепроверялося методом оптичної інтерферометрії Лінника на приладі МП-4.

Для забезпечення відтворюваності результатів конденсації плівкових шарів однакової товщини та удосконалення даного технологічного процесу нами була розроблена автоматизована система, яка дала можливість отримувати плівкові зразки з наперед заданою товщиною [94-96].

Автоматизовану систему, структурна схема якої наведена на рис. 2.4 а, можна розділити на дві основні складові частини: система вимірювання товщини та система зворотного зв'язку персонального комп'ютера з вакуумною

установкою. Система вимірювання товщини складається з пластини кварцу, на яку конденсується плівка, зовнішнього генератора та частотоміра. Система зворотного зв'язку включає у себе привод екрану з електромагнітом та блок електромагнітних реле, що подає напругу керування на електромагніт від блоку живлення системи.

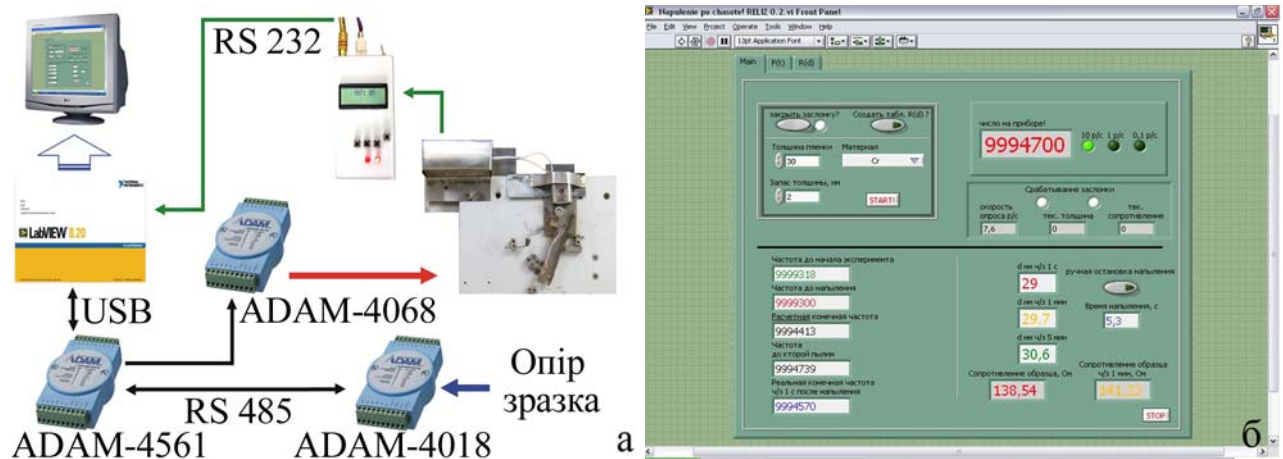


Рис. 2.4. Структурна схема автоматизованої системи вакуумної конденсації тонкоплівкових зразків (а) та інтерфейс програмного забезпечення (б)

Роботою системи керує персональний комп'ютер з розробленим нами під відповідну апаратну задачу програмним забезпеченням. Система розміщується на спеціально сконструйованому столику, на якому кріпляться її основні вузли та механізми, і являє собою універсальну систему для отримання тонкоплівкових зразків.

Частотомір представляє собою самостійно виготовлений прилад і забезпечує можливість підключення до комп'ютера по послідовному інтерфейсу RS-232C (відмітимо, що за допомогою перетворювача інтерфейсів RS-232→USB даний прилад з легкістю може бути підключеним до сучасних комп'ютерів та ноутбуків, що не мають COM-порту (RS-232)). Частотомір може працювати у режимах зчитування 10 р/с, 1 р/с та 0,1 р/с, при цьому забезпечуючи точність вимірювання відповідно 10 Гц, 1 Гц та 0,1 Гц. Також у ньому реалізована можливість визначення різниці між початковим і поточним значенням частот, що є доволі зручними при використанні його окремо від автоматизованої системи.

Привод екрану, зв'язаний з електромагнітом, відкриває і закриває її у необхідні моменти часу, в залежності від сигналів поданих комп'ютером, і тим самим обмежує процес конденсації плівки як на кварцову пластину, так і на підкладку, на якій отримується плівка заданої товщини. Управляюча напруга 12 В подається на електромагніт від блока живлення через модуль електромагнітних реле ADAM-4068.

Дана система також передбачає можливість вимірювання опору плівкового зразка безпосередньо у ході конденсації та після її завершення. Опір вимірюється за чотириточковою схемою з використанням 8-канального 16-бітового сигма-дельта АЦП ADAM-4018 (детальний опис даного приладу і схема його підключення буде розглянута у наступному підрозділі).

Описати роботу автоматизованої системи вакуумної конденсації тонкоплівкових зразків можна наступним чином. У робочому вікні програми (рис. 2.2 б) вказується матеріал та товщина плівки, яку необхідно отримати. Виходячи з того, що реакція системи зворотного зв'язку на управляючий сигнал займає певний час (швидкість спрацювання механіки закриття екрану складає близько 150 мс), при високих швидкостях конденсації плівки ( $\sim 10$  нм/с) необхідно вказувати певну похибку (запас) на товщину майбутньої плівки. У більшості випадків величина похибки не перевищує 0,5-1 нм. Після запуску програма починає зчитувати значення частоти з частотоміру, і очікує команди від користувача на початок виконання експерименту. Після включення експериментатором випарників і доведенні їх до стану, коли починається рівномірний процес конденсації матеріалу з випарника, він подає відповідну команду управляючій програмі (шляхом натиснення кнопки на блоці керування частотоміра і переведенням його з режиму зчитування один раз за секунду у режим зчитування 10 р/с). Надалі програма бере керування процесом на себе. Фіксує початкове значення частоти кварцового резонатору та відкриває екран кварцу та підкладки. Програма безперервно зчитує частоту кварцу та за відповідною формулою розраховує товщину плівки. При досягненні необхідної величини система зворотного зв'язку видає команду на закриття екрану.



Програма обчислює товщину плівки одразу після закінчення конденсації, через 1 та через 5 хвилин, з метою уточнення значень товщини отриманої плівки. Автоматизована система дає можливість отримувати тонкоплівкові зразки заданої товщини з точністю  $\pm 1$  нм, будувати графіки залежності  $d(t)$  та  $R(d)$ . Після виконання експерименту створюється файл звіту у форматі \*.txt (рис. 2.5 та 2.6).

Дана система представляє собою інтерес ще й з огляду на те, що одночасно може забезпечити підводку лазеру під плівку (для дослідження на просвічування плівкового зразка) або галогенової лампи (для забезпечення прогріву підкладки перед конденсацією та/або відпалювання зразка).

Плівкові зразки, дослідження тензорезистивних властивостей яких ми проводили, після конденсації і до початку експерименту витримувалися у вакуумі від 17 до 24 годин з метою стабілізації структурно-фазових процесів. Рис. 2.7 ілюструє зміну опору плівкової системи Cu(35)/Cr(20)/П з часом. Проведення досліджень тензорезистивних властивостей раніше, ніж відбудеться стабілізація плівки, призведе до похибок у отриманих експериментальних даних. Найбільш інтенсивно опір падає перші 3 години після конденсації, а стабільним його значення стає лише після 18 годин витримки. Висновки, зроблені на основі цих експериментальних досліджень, вплинули на наше рішення проводити витримку сконденсованих плівок протягом такого довгого проміжку часу.

З метою отримання в одному технологічному циклі конденсації серії одношарових плівок та мультишарів нами була розроблена універсальна автоматизована система вакуумної конденсації [97].

Методика вимірювання та контролю товщини, що використовується у даній системі подібна до розглянутої вище системи (метод вимірювання на основі кварцового резонатора, метод контролю – екран з вакуумним електромагнітом). Відмінність її полягає у використанні рухомого столика з розміщеними на ньому зразками. Столик закріплений на направляючих та приводиться у рух кроковим двигуном. Система підводки зразків

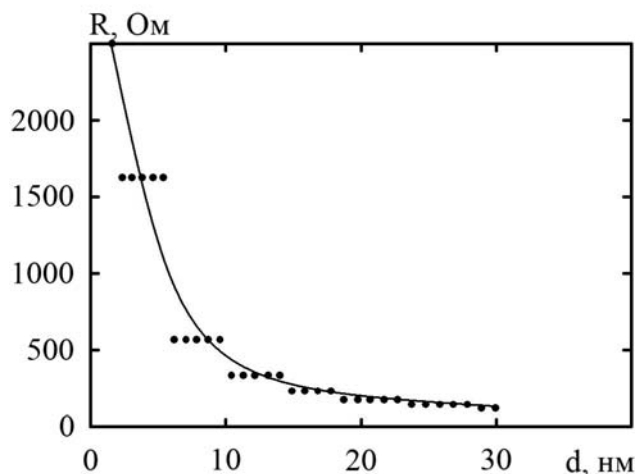


Рис. 2.5. Залежність опору  $R$  плівки  $Cr$  від товщини  $d$ . Залежність отримана у процесі конденсації за допомогою автоматизованої системи вакуумної конденсації тонкоплівкових зразків

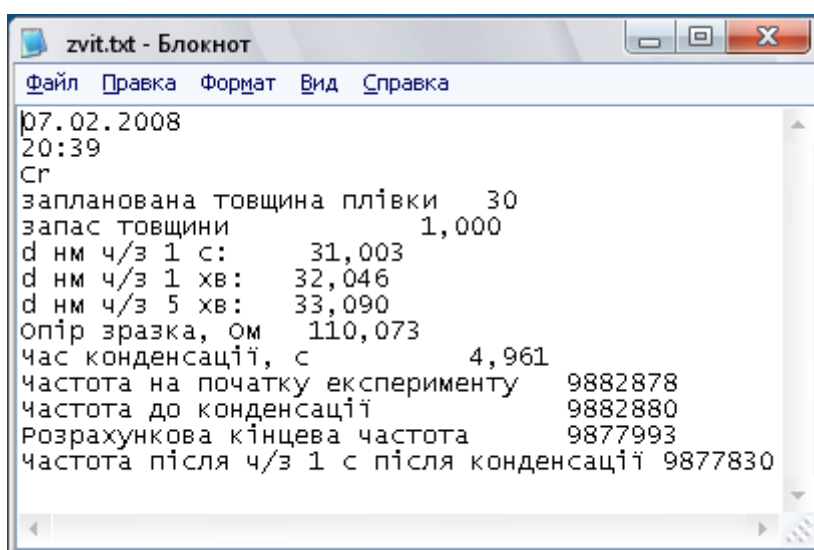


Рис. 2.6. Файл звіту роботи програми автоматизованої системи вакуумної конденсації

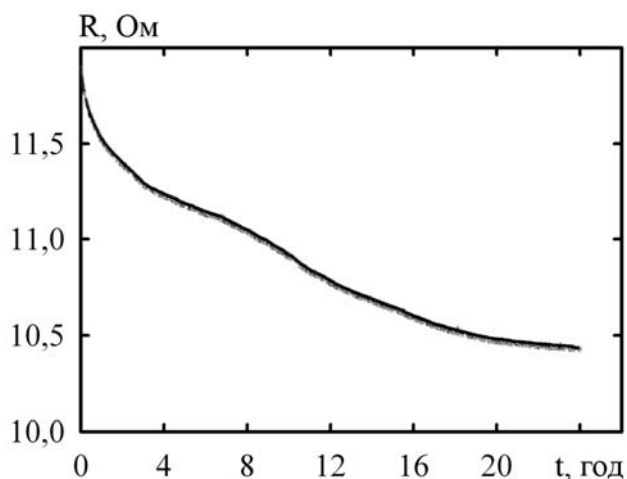
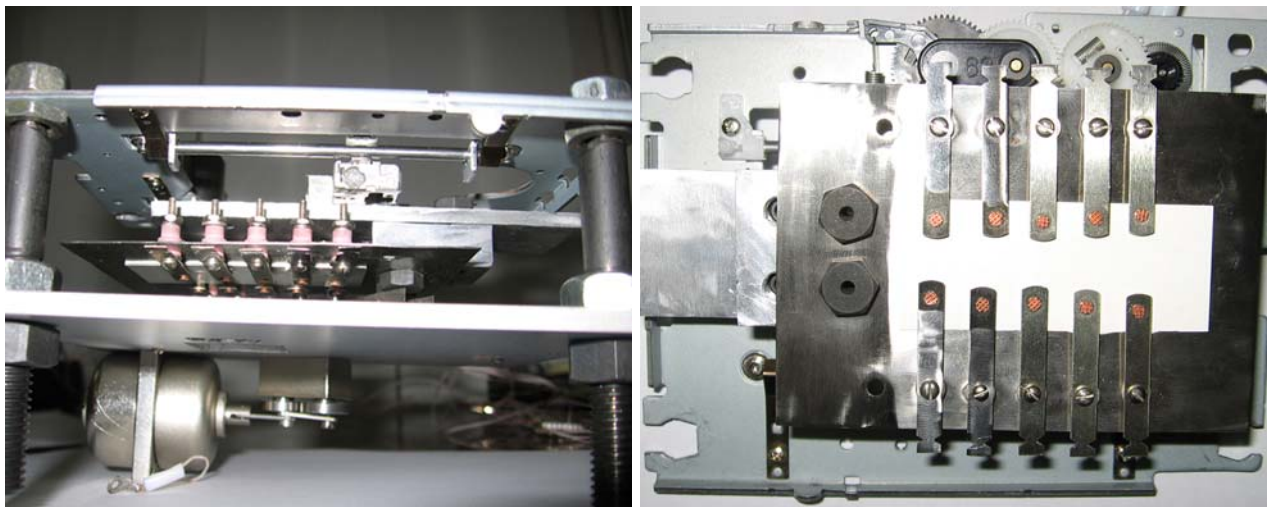


Рис. 2.7. Залежність опору сконденсованої плівкової системи  $Cu(35)/Cr(20)/P$  від часу

розташовує під випарником у робочій зоні одночасно два зразка. Процес конденсації відбувається аналогічно до попередньої системи, після чого столик переміщується таким чином, щоб один з двох зразків розмістився за екраном, а новий зразок попав у робочу зону конденсації. Таким чином у одному технологічному циклі може бути отримана система зразків з різноманітними варіантами одно- та багатошарових плівкових систем.

Універсальність даної системи полягає в можливості використання змінних столиків, що дає можливість забезпечити не лише конденсацію окремих зразків заданої товщини і складу, а й отримання певного набору зразків для паралельного дослідження їх властивостей. На рис. 2.8 наведено зовнішній вигляд універсальної автоматизованої системи вакуумної конденсації та приклад змінного столика для паралельного дослідження терморезистивних властивостей п'яти плівкових зразків.



а

б

Рис. 2.8. Зовнішній вигляд універсальної автоматизованої системи вакуумної конденсації (а) та приклад змінного столика для паралельного дослідження терморезистивних властивостей п'яти плівкових зразків (б)

На рис 2.9 наведено приклади можливих варіантів отримання плівкових систем на п'яти підкладках. Обмеження у п'ять зразків умовне і вказано нами виходячи з того, що ширина зразка дорівнює 8 мм (ширина підкладки для

дослідження тензорезистивних властивостей) і при цьому обмежена областю переміщення столика. При використанні зразків меншої ширини з'являється можливість збільшення їх кількості. Крім того необхідно мати на увазі, що у приладі ADAM-4018+ можуть бути задіяні лише п'ять вільних каналів для зчитування опору (з 8 каналів для зчитування вхідних даних 2 використовуються для еталонних опорів та 1 для термопари).

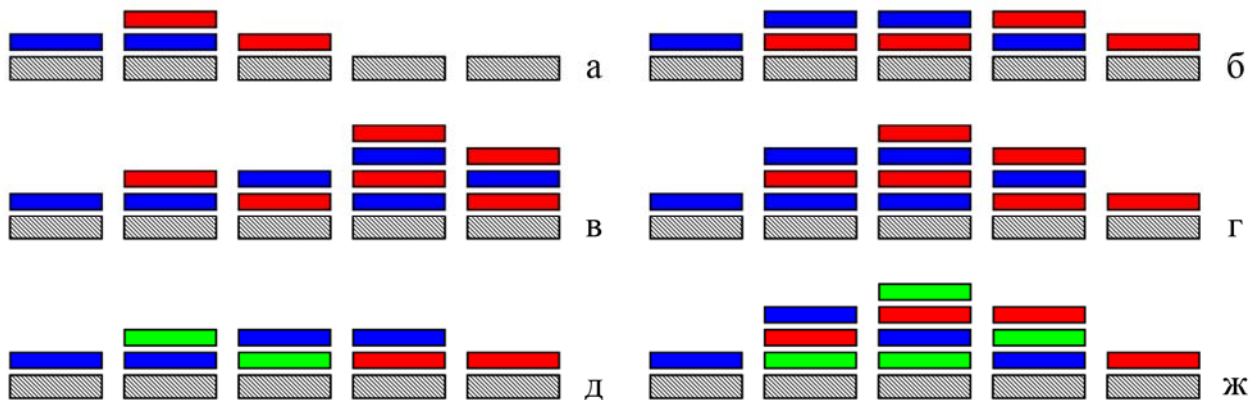


Рис. 2.9. Приклади можливих варіантів отримання плівкових систем з використанням автоматизованої системи вакуумної конденсації

Особливість даної автоматизованої системи порівняно з попередньою також полягає в повній автоматизації випарників вакуумної установки. Управління випарниками базується на роботі крокового двигуна, який обертає вал багатообертового змінного резистора, і тим самим регулює потужність випарників. Кроковий двигун, обертаючи резистор, плавно розігріває випарник, що дозволяє реалізувати стан рівномірної конденсації. Оскільки у більшості випадків у процесі вакуумної конденсації металів потужність випарників не обов'язково змінювати, то даний принцип керування себе цілком виправдовує.

Для роботи крокового двигуна у LPT порт потрібно подати певну послідовність управляючих імпульсів на виходи даних, які через спеціальний драйвер з'єднані з двигуном [98]. Драйвер забезпечує оптичну розв'язку сигналів LPT порту від силової частини двигуна. На рис. 2.10 наведено електричну принципову схему управління роботою крокового двигуна за

допомогою паралельного LPT порту комп'ютера. Приклад послідовності подачі управляючих імпульсів для обертання двигуна у один бік наведено у таблиці 2.1.

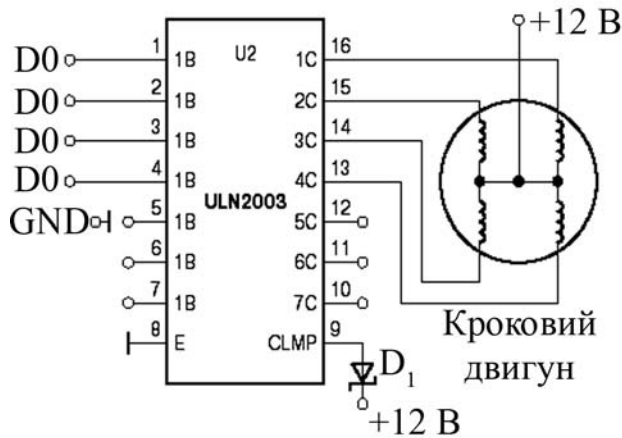


Рис. 2.10 Електрична принципова схема управління роботою крокового двигуна [98]

Таблиця 2.1

Послідовності подачі управляючих імпульсів для обертання двигуна

№ кроку	D0	D1	D2	D3
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

#### 2.1.4. Обладнання для дослідження тензорезистивних властивостей

Велика увага, що приділяється проблемам дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів, пов'язана з можливим подальшим використанням їх при розробці та створенні надчутливих тензодатчиків мікроелектронної апаратури. Датчики, що створюються на базі тонкоплівкових матеріалів, займають свою чітко визначену нішу у різноманітті матеріалів для створення чутливих елементів тензорезисторів: вони хоча і поступаються напівпровідниковим у величинах КТ, але поряд з цим у значній мірі випереджають за даним параметром масивні та товстоплівкові матеріали, маючи при цьому високу стабільність до температури.

Відповідно до цього виникла необхідність з якісно нового методичного підходу підійти до вирішення даної проблеми. Рішенням даної задачі стала розробка автоматизованої системи дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів, у якій було застосовано якісно новий рівень фіксації та обробки даних з використанням сучасних технологій автоматизації наукових досліджень [38, 96, 99-101]. Також необхідність створення даної системи була

пов'язана з рядом інших недоліків, які неможливо було усунути без автоматизації експериментального процесу:

- неможливість отримання динамічних тензорезистивних характеристик у „ручному режимі” з різними швидкостями деформації;
- необхідність отримання великої кількості експериментальних точок (значення опору зразка  $R$  і повздовжньої деформації  $\varepsilon_l$ ), збільшення точності позиціонування положення мікрогвинта і визначення деформації;
- необхідність проведення великої кількості деформаційних циклів „навантаження – зняття навантаження” з метою вивчення ресурсу роботи чутливих елементів тензодатчиків;
- необхідність поряд з процесом деформації зразка проводити паралельно дослідження його структурного стану.

Оснoву розробленої автоматизованої системи складає: 8-канальний 16-бітний сігма-дельта АЦП ADAM-4018 (за допомогою якого по чотириточковій схемі вимірюється опір зразка); релейний модуль ADAM-4068 (подає управляючу напругу на електродвигун); перетворювач інтерфейсів USB→RS232/422/485 ADAM-4561; асинхронний конденсаторний електродвигун типу Д-219П1У3 та веб-камера Creative Labs з роздільними здатностями 640x480 при 10 кадрах/с та 320x240 пікселів при 30 кадрах/с. Управління ходом експерименту та обробка результатів (побудова графіків, таблиць) здійснюється за допомогою програмного забезпечення розробленого у середовищі LabVIEW 8.50 з використанням модуля машинного зору LabVIEW Vision Development Module 8.2.

Головна задача при написанні програми для дослідження тензорезистивних властивостей полягала в тому, щоб за допомогою технології машинного зору в процесі проведення експерименту контролювати положення поділок мікрогвинта. Для вирішення її і розробки відповідного апаратно-програмного комплексу нами була задіяна система програмування LabVIEW з використанням модуля машинного зору Vision Development Module.

Зняття показів з мікрогвинта здійснюється за допомогою web-камери, сигнал з якої передається у комп'ютер через універсальний USB-порт. У результаті було отримано потокове online-зображення мікрогвинта. Відповідно до задачі було розроблено систему розпізнавання поділок мікрогвинта для розрахунку його зміщення, а відповідно і деформації зразка.

У нашій програмі система розпізнавання складається з трьох можливих варіантів, які необхідно враховувати для коректного підрахунку величини деформації. Розглянемо більш детально ці випадки.

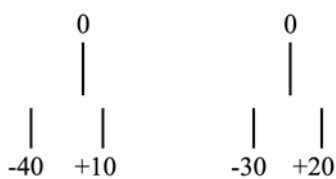


Рис. 2.11. Перший варіант розпізнавання поділок мікрогвинта

У першому варіанті (рис. 2.11) система розпізнавання отримала назву „ближньої поділки” і її суть роботи полягає у наступному: за допомогою функцій LabVIEW отримуються координати головної поділки, які вважаються за початок системи координат. Відносно цієї поділки розглядаються координати решти поділок на мікрогвинті. Отримане відео з web-камери розглядається програмою як послідовність кадрів (камера знімає відео з частотою 10 кадрів за секунду при роздільній здатності 640x480 пікселів). Отриманий масив координат сортується за зменшенням, тобто отримуються координати двох поділок по осі X, що найближче розташовані до головної поділки – початку координат. Якщо, наприклад, перші дві поділки мали координати -40 та +10, а у наступному кадрі мікрогвинт повернувся і координати змінилися на -30 та +20, то з цього можна зробити висновок, що обертання відбувається вправо. Далі за допомогою процедур IMAQ Match Pattern та IMAQ Setup Match Pattern за координатами поділок визначається на скільки обернувся мікрогвинт і, відповідно, розраховується деформація зразка. Піктограми цих функцій наведені на рис. 2.12. IMAQ Setup Match Pattern задає основні параметри для функції IMAQ Match Pattern, тобто мінімальний контраст зображення, режими співпадання, точність, кут повороту тощо.

IMAQ Match Pattern проводить опрацювання основних параметрів: координати області пошуку зразка, з яким проводиться порівняння і аналіз; визначення кількості правильних запитів.

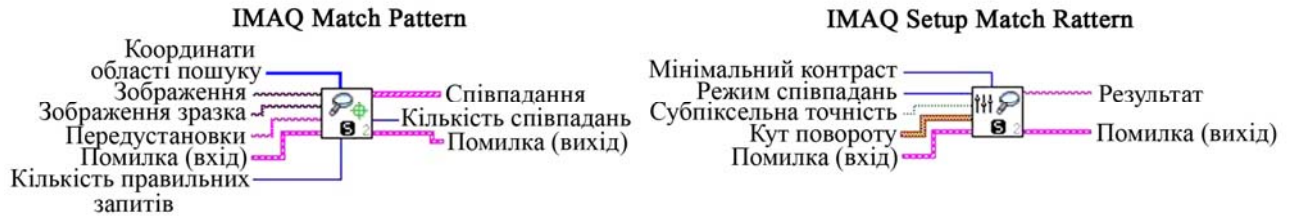


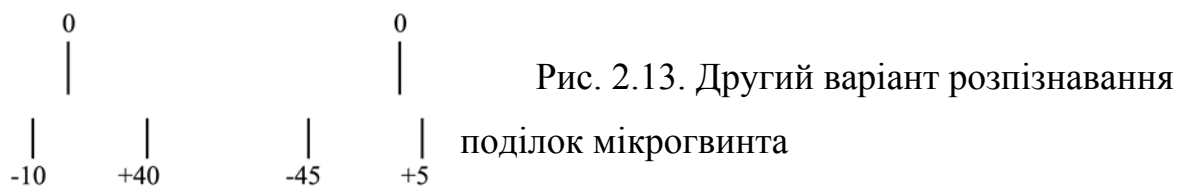
Рис. 2.12. Піктограми функцій IMAQ Match Pattern та IMAQ Setup Match Pattern

Величину деформації можна розраховувати за співвідношенням:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{(l_{\text{п}} + k \cdot 0,02) - l_{\text{п}}}{l_{\text{п}}} \cdot 100\%,$$

де  $k$  – кількість поділок, на яку повернувся барабан мікрогвинта (ціна однієї поділки становить 0,02 мм).

Другий варіант (рис. 2.13) більш складний.



Нехай отримані координати ближніх поділок такі: -10 та +40. У наступному кадрі координати змінилися на -45 та +5. У цьому випадку виникає протиріччя, тобто можливі два варіанти: якщо мікрогвинт обертався вліво, то ближня поділка з координатою -10 по осі X змінилась на -45 (пройшла 35 точок за 1 кадр) і „перескочила” головну поділку з координатою 0. Перш за все, при розпізнаванні необхідно перевіряти, чи змінила знак координата поділки найближчої до головної поділки. Якщо змінила, то тоді це другий варіант розпізнавання і розглядається саме він, а не



інший. Отримується величина зміщення поділки шляхом віднімання від координати ближньої поділки другого кадру координати ближньої поділки першого кадру.

Якщо ближня поділка змінює знак на протилежний і поділки знаходяться приблизно на однаковій відстані від головної (як на рисунку), тобто у першому кадрі координати -27 та +23, а у наступному -20 та +30, то можемо зробити висновок, що гвинт обертається вправо і зміщення можна визначити віднявши від координати другої ближньої поділки на другому кадрі координату першої ближньої поділки першого кадру (рис. 2.14).

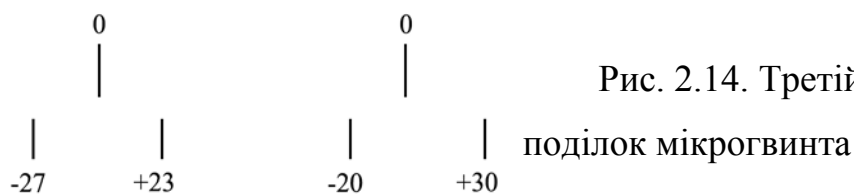


Рис. 2.14. Третій варіант розпізнавання

поділок мікрогвинта

Зміщення може відбуватися максимум на 50 % від відстані між двома ближніми поділками. У протилежному випадку буде спостерігатися похибка у визначенні координат поділки і, відповідно до цього, система розпізнавання поділок має обмеження по швидкості обертання двигуна (не більше ніж 2 поділки за секунду).

На програмному рівні обробка зображень відбувається за допомогою функцій LabVIEW. Перша задає параметри на знаходження зразка (IMAQ Setup Match Pattern), а інша знаходить по зразку поділки (IMAQ Match Pattern) і далі за допомогою стандартних функцій визначаються їх координати [93]. Структурна схема автоматизованої системи дослідження тензоефекту та інтерфейс розробленого програмного забезпечення наведено на рис. 2.15.

При дослідженні тензоефекту підкладка із системою контактів і зразком одним кінцем фіксувалася консольно, а другим – кріпилася до штоку мікрогвинта (ціна поділки – 0,02 мм), який через редуктор приєднується до електродвигуна, напрям обертання якого задається сигналом з релейного модуля ADAM-4068. Web-камера розміщується біля мікрогвинта і фіксує його зображення із частотою 10 кадрів/с. Автоматизована система дозволяє вивчати

тензоефект у динамічному або статичному режимі зі швидкістю деформації від 0 до 0,1 %/с у інтервалах пружної ( $\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-1\%$ ) або пластичної деформації ( $\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 1-2\%$ ) зразків. Деформація зразків у інтервалі  $\Delta\varepsilon_{\ell 2}$  здійснювалася лише після VII-го деформаційного циклу в інтервалі  $\Delta\varepsilon_{\ell 1}$ . Крім цього режими роботи системи дозволяють вивчати ресурс роботи плівкових зразків як можливих чутливих елементів тензодатчиків при різній кількості деформаційних циклів „навантаження-зняття навантаження” (до 35 таких циклів). З метою стабілізації мікропластичних процесів через інтервал  $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0,05\%$  здійснювалася зупинка на 10 с.

На рис. 2.16 наведено приклад деформаційних залежностей для плівкової системи Cu(20)/Cr(15)/П при величині деформації  $\Delta\varepsilon_{\ell}$  до 1 (а) та до 2 % (б) (на вставках показано графіки залежності опору  $R$  та значення миттєвого  $\gamma_{\ell m}$  і середнього  $\bar{\gamma}_{\ell}$  коефіцієнта тензочутливості).

З графіків видно, що при великій кількості деформаційних циклів починає спостерігатися своєрідна стабілізація мікропластичних процесів (ефект непружності полікристалів [100]), що дозволяє провести певну аналогію з термостабілізацією резистивних властивостей плівкових матеріалів. Цикли VIII-XI (рис. 2.7 а) ілюструють залежності  $\Delta R/R_{\text{п}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$  отримані при різних швидкостях деформації зразка (1 % за  $\tau_{\text{д}} = 140, 67, 30$  та 20 с відповідно), дозволяють зробити висновок про слабку залежність значення середнього коефіцієнта тензочутливості  $\bar{\gamma}_{\ell}$  від швидкості деформації:  $\bar{\gamma}_{\ell} \cong 2,3$  при  $\tau_{\text{д}} = 140$  с та 2,5 при  $\tau_{\text{д}} = 20$  с.

При зміні величини деформації від 1 до 2 % (рис. 2.16 б) спостерігається різке підвищення величини опору, а, відповідно, величини  $\bar{\gamma}_{\ell}$  ( $\bar{\gamma}_{\ell} = 17,9$ ), що можна пояснити включенням більш високоенергетичних процесів у плівці і переходом від пружної або квазіпружної деформації до пластичної та можливим мікророзтріскуванням плівки Cr.

Оскільки тензоефект доцільно вивчати лише при умові структурної суцільності зразків, то у процесі експерименту нами, як і у [88], контролювався структурний стан плівкових систем за допомогою фотоелемента, яким



Рис. 2.15. Структурна схема автоматизованої системи дослідження тензоефекту (а) та інтерфейс програмного забезпечення (б)

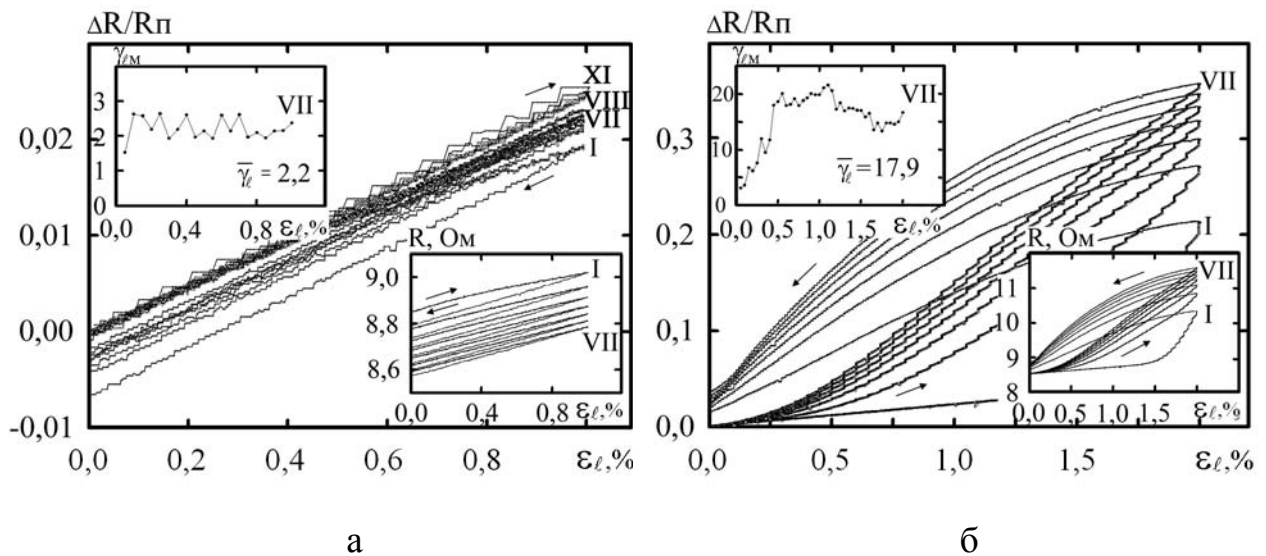


Рис. 2.16. Залежність  $\Delta R/R_{\Pi}$ ,  $R$  і  $\gamma_{лм}$  від  $\epsilon_l$  для плівкової системи Cu(20)/Cr(15)/Π у інтервалі деформацій  $\Delta\epsilon_{l1} = 0-1\%$  (а) та  $\Delta\epsilon_{l2} = 1-2\%$  (б). I-XI – номери деформаційних циклів „навантаження – зняття навантаження”

реєструється відносна інтенсивність ( $I$ ) світлових променів, які проходять через систему плівка/підкладка (реєструється напруга  $U$  на р-п-переході фотодіода, яка пропорційна  $I$ ). В області пружної деформації залежність  $I$  від  $\varepsilon_\ell$  має лінійний характер і при переході до пластичної деформації відбувається незначна зміна кутового коефіцієнту.

Коли у зразках з'являються мікротріщини (їх можна спостерігати у растровому або тунельному мікроскопі), вказана залежність відхиляється від лінійної. Крім цього, зміна електричного опору  $R$  і залежності миттєвого коефіцієнту повздовжньої тензочутливості  $\gamma_{\ell m} = \frac{1}{R_i} \frac{\Delta R_i}{\Delta \varepsilon_{\ell i}}$  ( $i$ - номер інтервалу  $\Delta \varepsilon_\ell$ ) від  $\varepsilon_\ell$  корелюють із типом деформації.

Як відомо з даних [102], підключення фотодіоду у генераторному режимі не дає можливості отримати лінійної характеристики напруги  $U$  від інтенсивності світлового потоку, що падає на кристал. З цією метою нами була використана схема включення фотодіоду у так званому фотодіодному режимі (рис. 2.17), яка дає можливість лінеаризувати дану залежність. На підтвердження працездатності даної схеми нами була виконана перевірка роботи фотодіоду у даному режимі. На рис. 2.18 наведена залежність напруги  $U$  від кількості шарів плівки полістиролу складених одна на одну.

Майже лінійний характер даної характеристики виключає вірогідність невірною трактування отриманих даних про прозорість плівки і служить підтвердженням лінійності зміни величини напруги  $U$  від інтенсивності світлового потоку (тим паче, що на практиці зміна  $U$  від  $\varepsilon_\ell$  для різних плівкових систем не перевищувала одиниць мВ). На рис. 2.19 наведено приклад деформаційної залежності у вигляді графіка напруги  $U$  на р-п-переході фотодіода як функції деформації  $\varepsilon_\ell$  для підкладки полістиролу без плівки (так званий холостий хід). Відсутність зміни інтенсивності напруги  $U$  від  $\varepsilon_\ell$  підтверджує відсутність впливу підкладки полістиролу на отримані нами оптичні характеристики. На рис. 2.20 наведено приклади деформаційних

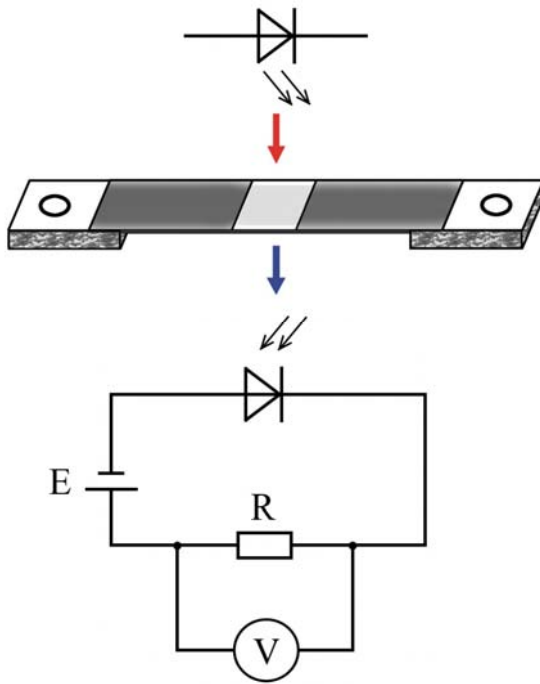


Рис. 2.17. Схема включення фотодіоду у фотодіодному режимі

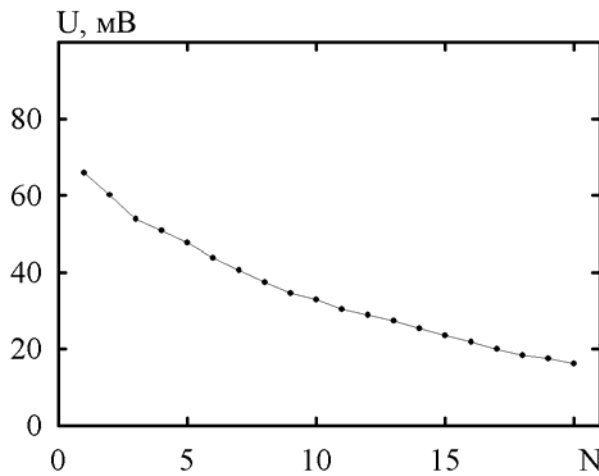


Рис. 2.18. Залежність напруги  $U$  від кількості шарів плівки полістиролу

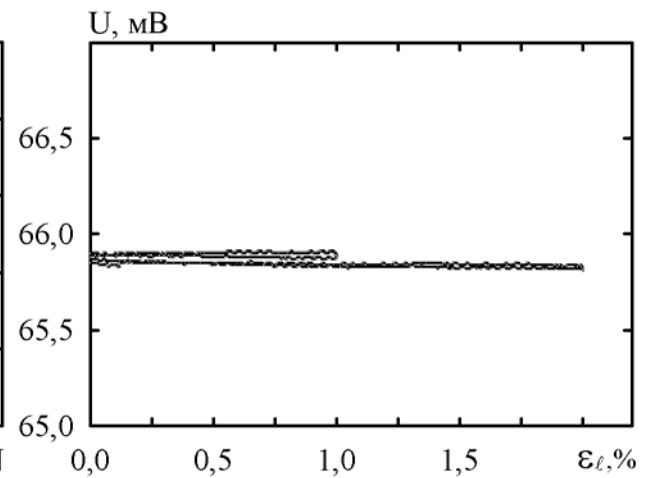


Рис. 2.19. Залежність напруги  $U$  на р-n-переході фотодіоду від  $\epsilon_l$  для підкладки полістиролу без плівки при величинах деформації до 1 та 2 %

залежностей  $\Delta R/R_{\text{п}}$ ,  $R$ ,  $\Delta U/U_{\text{п}}$  та  $U$  для двох інтервалів  $\Delta \varepsilon_{\ell}$ .

Лінійний характер залежностей  $\Delta R/R_{\text{п}}$  та  $R$  від  $\varepsilon_{\ell}$  у інтервалі до 1 % для II-VII деформаційних циклів можна пояснити пружною (до  $\varepsilon_{\ell} \cong 0,25\%$ ) або квазіпружною (в інтервалі  $\varepsilon_{\ell} \cong 0,25-0,90\%$ ) деформацією плівки Cr. Різка відмінність I-го деформаційного циклу від подальших нами пояснюється протіканням різних релаксаційних процесів (частковий поворот зерен, мікропластична деформація, перерозподіл та рух дефектів кристалічної будови та чужерідних атомів тощо). При збільшенні повздовжньої деформації до 2 % (рис. 2.20 б) ми переходимо в область пластичної деформації, про що свідчить нелінійність залежностей  $\Delta R/R_{\text{п}}$  та  $R$  від  $\varepsilon_{\ell}$ . Разом з тим відмітимо, що залежності  $\Delta U/U_{\text{п}}$ ,  $U$  від  $\varepsilon_{\ell}$  мають лінійний характер, що свідчить про збереження цілісності плівки (диференційна залежність  $\Delta U_i/U_i$  від  $\varepsilon_{\ell i}$  має вигляд горизонтальної лінії, що також підтверджує висновок про відсутність мікро- і макротріщин у плівковому зразку).

## 2.2. Методи дослідження кристалічної структури і фазового складу

Електронномікроскопічні та електронографічні дослідження мали на меті контроль фазового складу (встановлення типу та параметра решітки матеріалу, міжплощинних відстаней), визначення розмірів та концентрації кристалітів у плівкових матеріалах. Вони проводилися за допомогою просвічуючого електронного мікроскопу ПЕМ-125К. Дослідження структури зразків у режимі ПЕМ проводилося при збільшеннях  $(50-200) \cdot 10^3$  крат. Електронограми досліджуваних плівкових матеріалів розшифровувалися за стандартною методикою з використанням еталону з плівки Al. За допомогою еталонного зразка визначали сталу приладу за стандартною формулою, яка пов'язує між собою діаметри кілець і відповідні їм міжплощинні відстані:

$$C = D_{hkl} \cdot d_{hkl},$$

де  $d_{hkl}$  та  $D_{hkl}$  – міжплощинні відстані та діаметри кілець еталонного зразка.

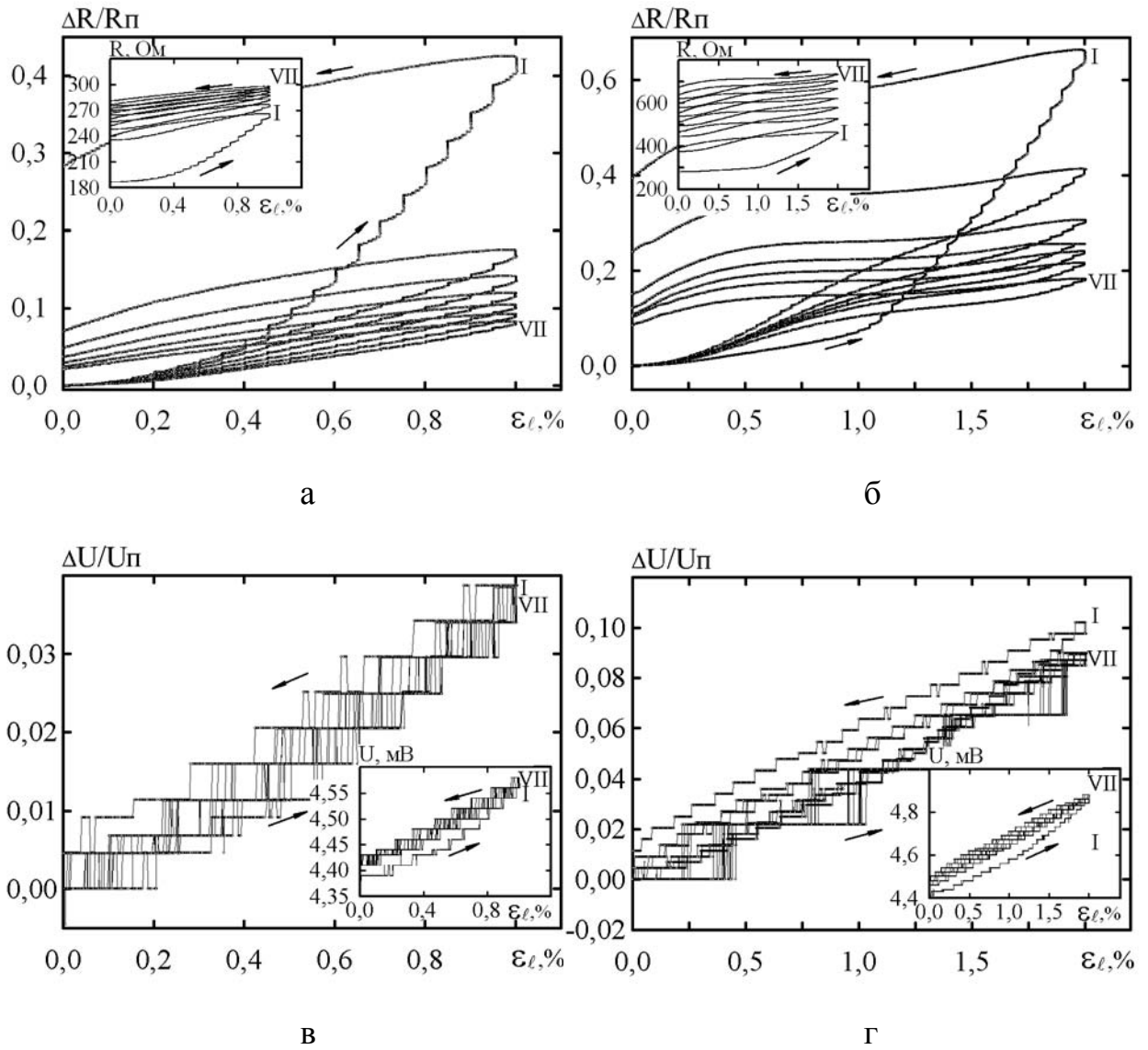


Рис. 2.20. Залежність  $\Delta R/R_\Pi$ ,  $R$  (а, б) та  $\Delta U/U_\Pi$ ,  $U$  на р-п-переході фотодіоду (в, г) від  $\varepsilon_\ell$  для плівки Cr(30)/П

Розрахунок міжплощинних відстаней для досліджуваного зразка та визначення параметру ОЦК і ГЦК решіток проводився за формулами:

$$d_{hkl} = \frac{C}{D_{hkl}} \text{ і } a_{hkl} = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}.$$

Точність розрахунку міжплощинних відстаней за такою методикою складає  $\pm 0,001$  нм.

## Висновки до Розділу 2

1. У відповідності з напрямом досліджень були розроблені такі методи отримання плівкових систем, контролю їх товщини і структурного стану та вимірювання тензорезистивних властивостей:

- вакуумна пошарова конденсація плівкових зразків на полістиролові підкладки зі спеціально сформованими контактами;
- автоматизована система дослідження тензорезистивних властивостей чутливих елементів тензорезисторів, яка дозволяє проводити велику кількість деформаційних циклів „навантаження – зняття навантаження” у статичному і динамічному режимі роботи та вивчати ресурс їх роботи; змінювати швидкість деформації у діапазоні від 0 до 0,1 %/с; отримувати до  $10^6$  експериментальних точок, що підвищує точність отримуваних результатів;
- комп'ютерна програма для оброблення результатів безпосередньо у процесі виконання експериментів.

2. Для контролю структурного стану і фазового складу плівкових зразків досить ефективними методами можуть бути такі:

- оптична система контролю стану поверхні плівки і можливості утворення у ній мікро- та макротріщин;
- методи електронної мікроскопії та електроннографії для проведення досліджень кристалічної структури і фазового складу.

3. Вказані методи дозволяють провести повний цикл досліджень фізичних процесів у двошарових плівкових системах Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації.



## РОЗДІЛ 3

**ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ  
НА ОСНОВІ Cu I Cr ЯК ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕНЗОДАТЧИКІВ**

**3.1. Тензочутливість одношарових плівок Cu і Cr в області пружної і пластичної деформації**

**3.1.1. Експериментальні результати**

Хоча основна увага у даній дисертаційній роботі приділена тензорезистивним властивостям двошарових плівок Cu/Cr/П та Fe/Cr/П, нами також було досліджено ці властивості в одношарових плівках Cu, Cr і Fe, оскільки для порівняння експериментальних результатів для Cu/Cr/П і Fe/Cr/П із розрахунковими на основі феноменологічних моделей необхідно знати величину питомого опору і КТ для плівок Cu, Cr та Fe [103].

На рис. 3.1 наведені залежності величини опору та питомого опору від товщини для нетермостабілізованих плівок Cr. Плівки Cr було отримано нами шляхом термічного випаровування з вольфрамового випарника зі швидкістю конденсації 7-10 нм/с з використанням автоматизованої системи вакуумної конденсації. При таких досить високих швидкостях конденсації плівки Cr

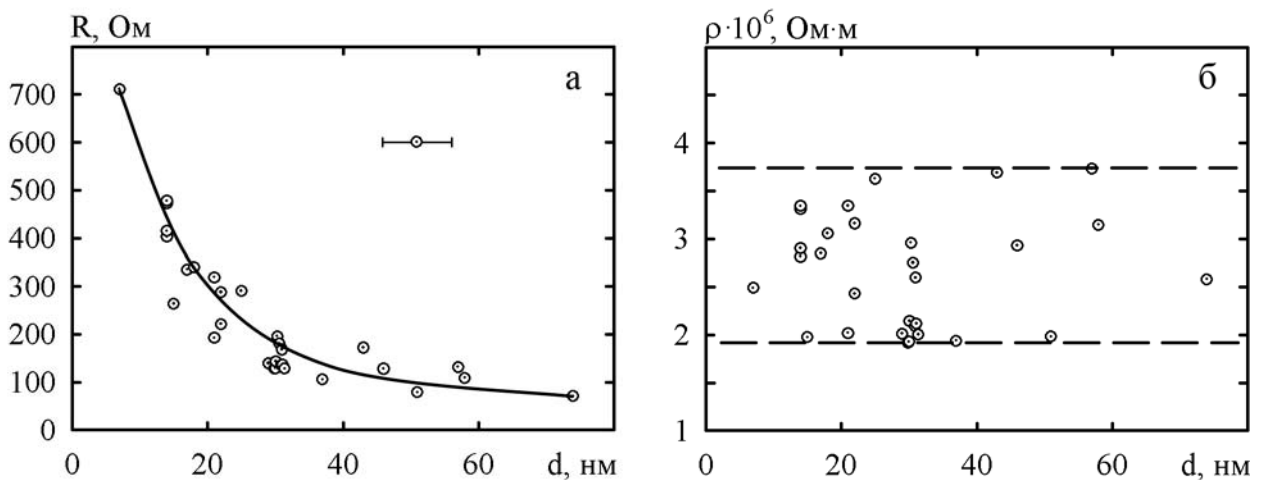


Рис. 3.1. Залежність опору  $R$  (а) та питомого опору  $\rho$  (б) від товщини  $d$  для нетермостабілізованих плівок Cr

мають полікристалічну структуру і очікувані значення питомого опору.

Акцентуємо увагу, що у нетермостабілізованих плівках не завжди вдається отримати розмірну залежність  $\rho$  від  $d$ , оскільки невідпалені плівки Cr сильнодисперсні і немоноблочні за товщиною. У цьому випадку великий внесок у загальну величину  $\rho$  складає зерномежовий питомий опір  $\rho_{gb}$  [104], а не поверхневий  $\rho_d$ , який пов'язаний із розсіюванням електронів провідності на зовнішніх поверхнях плівки. Особливо підкреслимо, що цей механізм і обумовлює розмірну залежність  $\rho$  від  $d$ , у той час як  $\rho_{gb}$  лише задає рівень залежності відносно осі ординат (див., наприклад, [55]). Хоча, якщо перебудувати залежність рис. 3.1 б у координатах  $\rho - L$ , то вона буде мати монотонний характер із ознаками розмірної залежності. У термостабілізованих плівках, коли відбулися процеси рекристалізації, зерномежове розсіювання електронів починає відігравати значно меншу роль у порівнянні із поверхневим, що спричиняє нормальну залежність  $\rho$  від  $d$ . Як буде показано нижче, ознаки цієї залежності проявляють себе навіть у нетермостабілізованих, але більш крупнодисперсних плівках Cu. Відмітимо також, що наші дослідження тензоефекту проводились на полістироловій підкладці, що не дозволяє здійснити високотемпературну термостабілізацію. Таким чином, двошарові зразки були досить високодисперсні, а це означає, що у них досить ефективно зерномежове розсіювання електронів, що спричиняє відносно велике значення складової КТ, пов'язаної із цим механізмом.

Дані результати підтверджуються електроннографічними дослідженнями й аналізом електрофізичних властивостей (питомим опором) сконденсованих плівок та систем на їх основі. Результати проведення електронно-мікроскопічних досліджень одношарових плівок Cr (електронограма та мікроструктура) наведені на рис. 3.2. Відповідно до отриманої електронограми було встановлено тип кристалічної решітки, а також розраховано її параметр та міжплощинні відстані. Ці дані говорять про те, що плівки Cr мають ОЦК решітку, інколи із слідами оксиду  $Cr_3O$ . Дані розрахунків наведені у таблиці 3.1.

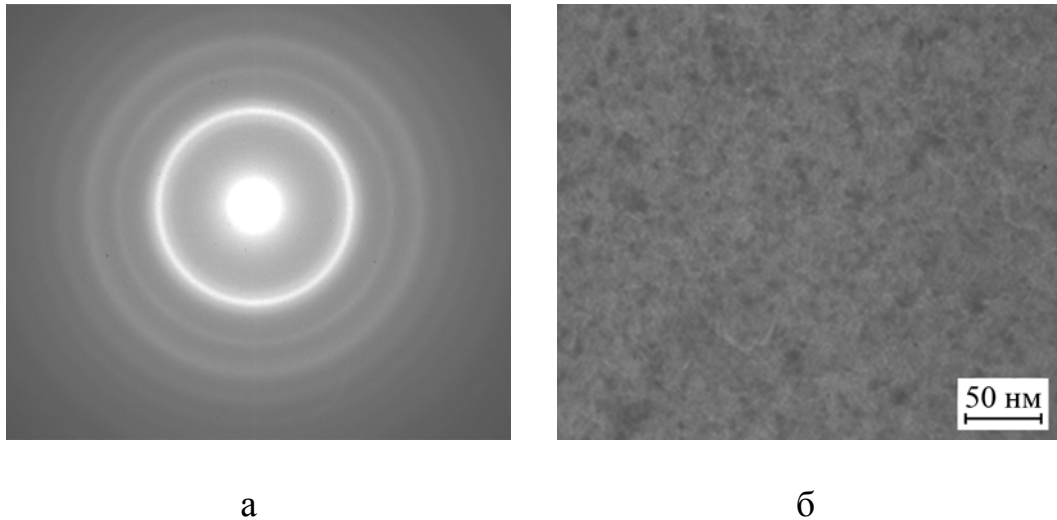


Рис. 3.2. Електронограма (а) та кристалічна структура (б) одношарової плівки Cr(30)

Тензорезистивні властивості плівок Cr досліджувалися за методикою описаною у Розділі 2. На рис. 3.3 наведено приклад деформаційних залежностей відносної зміни опору  $\Delta R/R_{\text{п}}$  та опору  $R$  (а, б), відносної зміни напруги  $\Delta U/U_{\text{п}}$  та напруги  $U$  на р-п-переході фотодіода (в, г), а також  $\Delta R/R_{\text{п}}$  та  $R$  від деформації  $\varepsilon_{\ell}$  при дослідженні тензорезистивних властивостей на атмосфері (д) для плівки Cr(30)/П у інтервалі деформацій  $\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-1\%$  та  $\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 0-2\%$ .

Оскільки тензоефект доцільно вивчати лише за умови структурної цілісності зразка, то нами здійснювався контроль структурного стану плівки у процесі експерименту за методикою, описаною у роботі [12]. Більш досконалий варіант цієї методики описаний нами у Розділі 2. Як відмічалось, суть її полягає у реєстрації відносної інтенсивності ( $I$ ) світлових променів, що пройшли через систему зразок/П за допомогою фотоелемента (вимірювалась напруга  $U \sim I$  на р-п-переході фотодіода). Як було показано у [12] залежність  $I$  від  $\varepsilon_{\ell}$  має лінійний характер в області пружної або квазіпружної деформації і змінює кут при переході до пластичної деформації. На рис. 3.3 в, г наведені приклади деформаційних залежностей  $R$ ,  $\Delta R/R_{\text{п}}$  та  $U$ ,  $\Delta U/U_{\text{п}}$  для двох інтервалів  $\Delta\varepsilon_{\ell}$ .

Таблиця 3.1

## Розшифрування електронограми від плівки Cr(30)

№	I, в.о.	$d_{hkl}$ , нм	hkl	a, нм	Фазовий склад
1	Д.С.	0,205	111	0,290	ОЦК-Cr
2	сер.	0,144	200	0,288	"-"
3	сер.	0,117	211	0,288	"-"
4	сл.	0,101	220	0,287	"-"
5	сл.	0,091	310	0,287	"-"
$\bar{a}(\text{Cr}) = 0,288 \text{ нм}; \bar{a}_0(\text{Cr}) = 0,288 \text{ нм}$					

Різка відмінність I-го деформаційного циклу „навантаження – зняття навантаження” у діапазоні деформацій  $\Delta\varepsilon_\ell = 0-1 \%$  від подальших пояснюється протіканням різних релаксаційних процесів (частковий поворот зерен, мікропластична деформація, перерозподіл і рух дефектів кристалічної будови та іноридних атомів тощо). На подальших циклах спостерігається певна стабілізація тензорезистивних властивостей плівки Cr. Хоча величина КТ із збільшенням числа циклів зменшується, але має місце тенденція до стабілізації КТ і повторюваності результатів.

Значний інтерес при дослідженні тензорезистивних властивостей становить саме I-й цикл, оскільки при його реалізації проявляється механізм переходу від пружної до пластичної деформації. На рис. 3.4 наведено перші деформаційні цикли для плівок Cr різної товщини, деформація яких відбувалася у діапазоні  $\Delta\varepsilon_\ell = 0-1 \%$ . На наведених графіках можна бачити перехід пружна-пластична деформація. При цьому величина деформації переходу залежить від товщини плівки, зменшуючись з товщиною. Про перехід між типами деформації свідчить не тільки зміна кута нахилу деформаційної залежності, а й поява сходинок. Вони з'являються в області пластичної деформації під час зупинок мікрогвинта на кожній поділці (через  $0,05 \%$

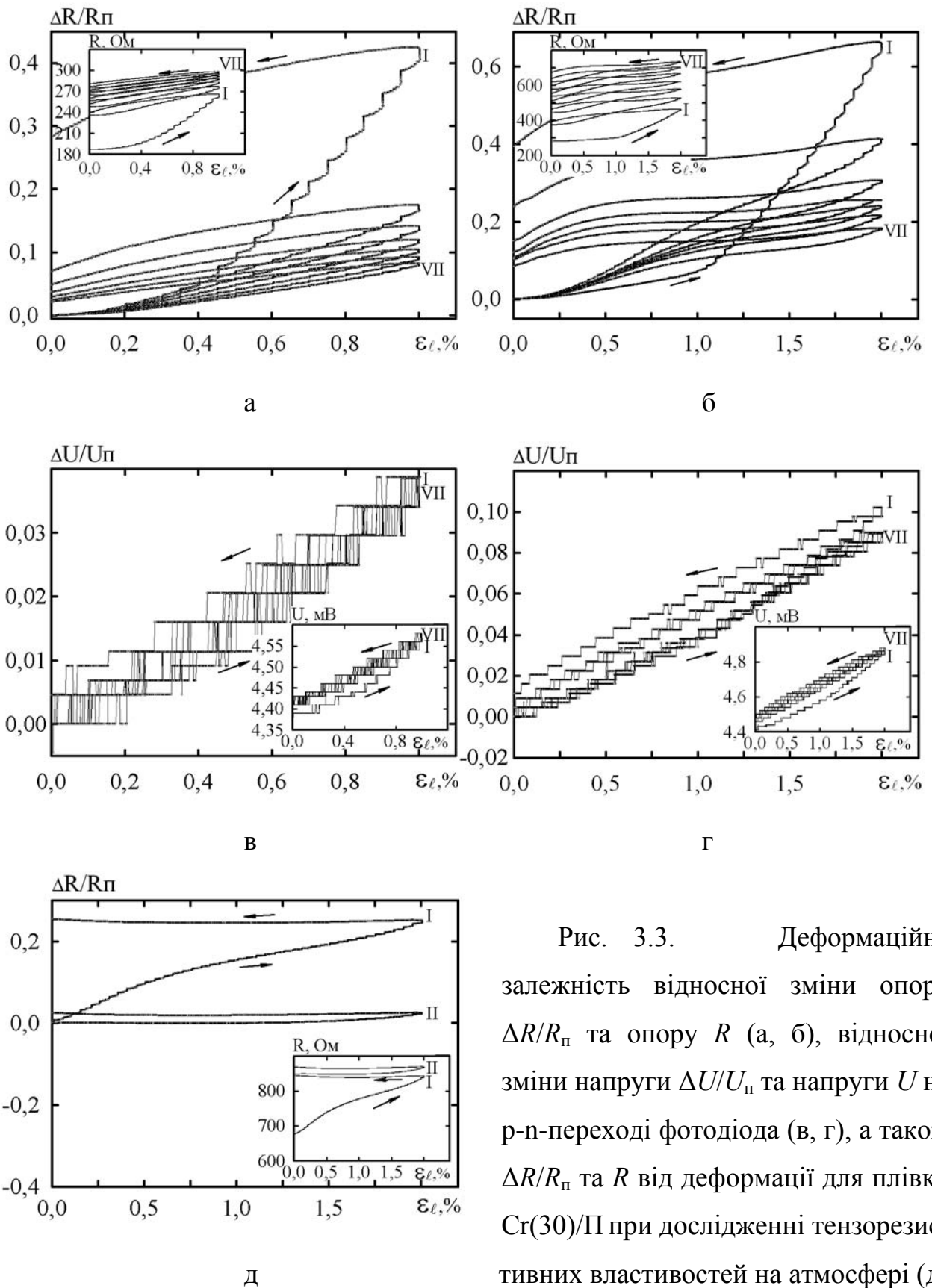


Рис. 3.3. Деформаційна залежність відносної зміни опору  $\Delta R/R_{\Pi}$  та опору  $R$  (а, б), відносної зміни напруги  $\Delta U/U_{\Pi}$  та напруги  $U$  на р-п-переході фотодіода (в, г), а також  $\Delta R/R_{\Pi}$  та  $R$  від деформації для плівки Cr(30)/Π при дослідженні тензорезистивних властивостей на атмосфері (д)

деформації) на 10 с і відсутні в області пружної деформації. Зростання опору плівки у статичному режимі деформації можна пояснити проходженням процесів мікропластичної деформації у плівковому зразку.

У таблиці 3.2 наведено узагальнюючі дані відносно межі переходу пружна-пластична деформація ( $\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$ ) для плівки Cr, а також дані стосовно зміни величини КТ при різних значеннях деформації. Для порівняння можна навести дані авторів [37, 88] у яких  $\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$  при дослідженні одношарових плівок Cu(1 мкм), Cu(0,2 мкм), Al(1 мкм) та Cr(36 нм) відповідно складала значення 0,10, 0,20, 0,15 та 0,65 % повздовжньої деформації.

Таблиця 3.2

Розмірна залежність тензорезистивних характеристик плівки Cr

$d$ , нм	$\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$	$\bar{\gamma}_{\ell}$ при $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0-0,2\%$	$\bar{\gamma}_{\ell}$ при $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0-0,3\%$	$\bar{\gamma}_{\ell}$ при $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0-0,4\%$	$\bar{\gamma}_{\ell}$ при $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0-0,5\%$	$\bar{\gamma}_{\ell}$ при $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0-1\%$
Cr(30)	0,20	5,8	9,0	14,5	19,6	42,3
Cr(50)	0,15	14,2	20,1	23,9	28,3	44,6
Cr(75)	0,10	20,4	25,7	31,3	35,3	47,5

Як можна бачити з даних таблиці 3.2 межа переходу пружна-пластична деформація зменшується при збільшенні товщини, а відповідно це викликає певні труднощі при інтерпретації отриманих результатів, оскільки на величину  $\bar{\gamma}_{\ell}$  починає впливати фактор, який раніше не брався до уваги (а саме межа переходу пружна-пластична деформація). І тому  $\bar{\gamma}_{\ell}$  при певній величині деформації вже не може без урахування величини переходу пружна-пластична деформація виступати у ролі узагальнюючої характеристики тензорезистивних властивостей матеріалу. Відповідно до цього більш коректним буде порівняння  $\bar{\gamma}_{\ell}$  для областей пружної деформації, а також  $\bar{\gamma}_{\ell}$  при загальній деформації у 1 та 2 %. Це дозволить дати узагальнену характеристику

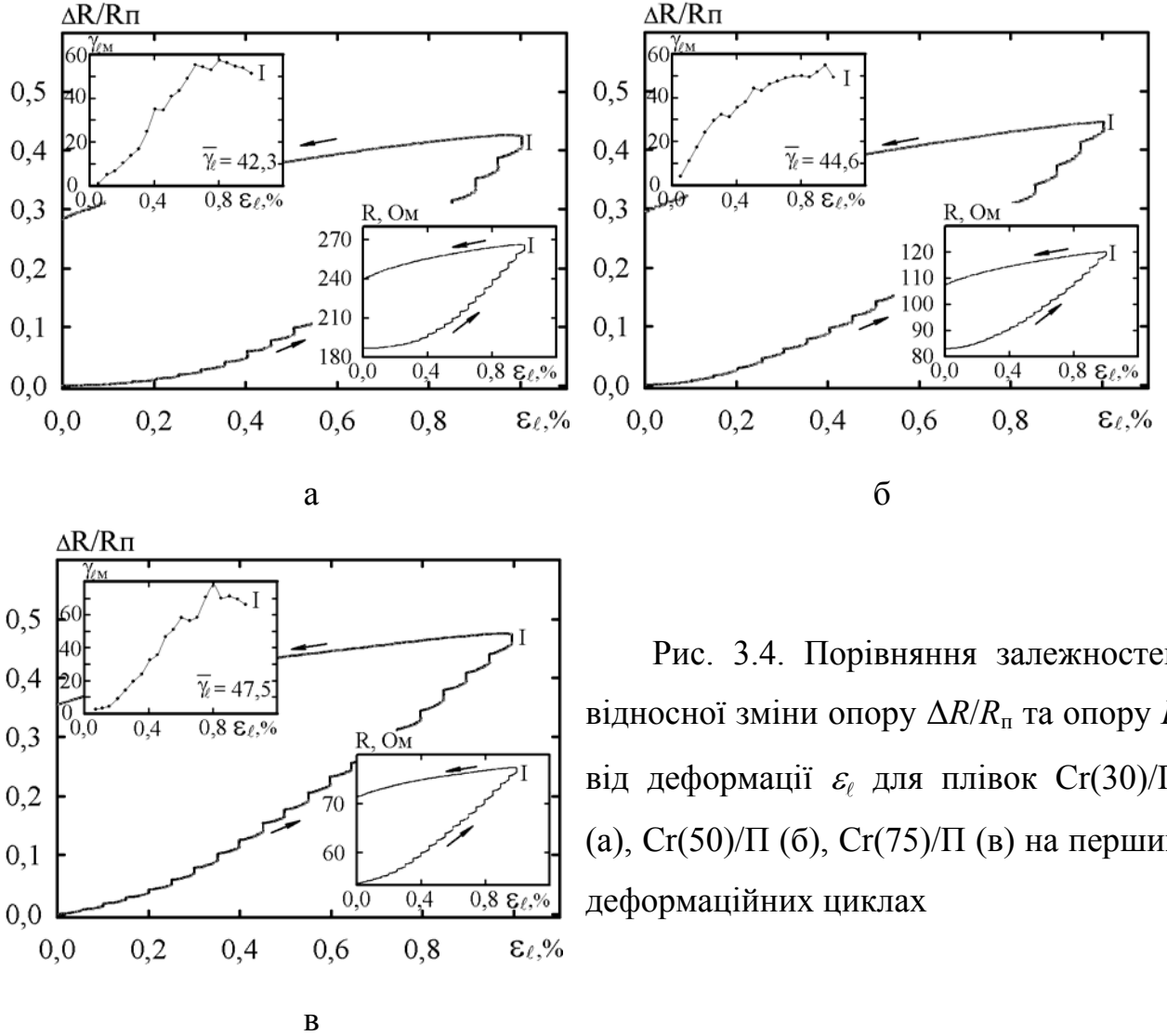


Рис. 3.4. Порівняння залежностей відносної зміни опору  $\Delta R/R_{\Pi}$  та опору  $R$  від деформації  $\varepsilon_{\ell}$  для плівок Cr(30)/П (а), Cr(50)/П (б), Cr(75)/П (в) на перших деформаційних циклах

тензорезистивним властивостям плівкової системи, а також дозволить провести коректне порівняння з розрахунковими даними на основі феноменологічної моделі.

На рис. 3.3 а, б лінійний характер залежності  $R$  та  $\Delta R/R_{\text{п}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$  у інтервалі до 1 % для II-VII-го деформаційних циклів можна пояснити пружною (до  $\varepsilon_{\ell} \cong 0,25$  %) або квазіпружною (в інтервалі  $\varepsilon_{\ell} = 0,25-0,90$  %) деформацією плівки Ст. При збільшенні повздовжньої деформації до 2 % (рис. 3.3 б) ми переходимо в область пластичної деформації, про що можна стверджувати виходячи з нелінійності залежності  $R$  та  $\Delta R/R_{\text{п}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$ . Разом з цим відмітимо, що залежності  $U$  та  $\Delta U/U_{\text{п}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$  (рис. 3.3 в, д) мають лінійний характер, що говорить про збереження структурної цілісності плівки (диференційна залежність  $\Delta U_i/U_i$  від  $\varepsilon_{\ell i}$  має вигляд горизонтальної лінії, що також підтверджує висновок про відсутність мікро- і макротріщин у плівковому зразку). Збільшення інтенсивності світла, що пройшло через систему плівка/П при збільшенні деформації, можна пояснити виходячи з даних роботи [105], у якій методом електронної мікроскопії був вивчений механізм повздовжньої деформації до 5% хімічно осаджених плівок Al товщиною 2 мкм і середнім розміром зерен від 1,1 (щойно осаджених) до 2,3 мкм (після відпалювання до 720 К). Авторами [105] було встановлено, виходячи з діаграм напруження-деформація, що механічні властивості масивних і плівкових зразків суттєво відрізняються. Так, при граничному значенні пружної деформації плівок Al  $\varepsilon_{\ell} \cong 0,15$  % у плівках має місце висока межа текучості – 92-125 МПа у порівнянні з 10 МПа у масивних зразках. Крім того у плівках спостерігається низька пластичність. Ці результати пояснюються локальним зменшенням товщини окремих зерен та їх меж у результаті переміщення дислокацій у об'ємі зерен. У роботі [88] на графіку залежності напруги  $U$  на фотодіоді від деформації  $\varepsilon_{\ell}$  для плівки Ст(38) куту нахилу залежності змінюються при 0,65 та 7 %. Після першої зміни кута нахилу залежність залишається лінійною, і ця зміна пояснюється переходом від



пружної до пластичної деформації. Після 7% залежність відхиляється від лінійності і це свідчить про розтріскування плівки.

На рис. 3.3 д наведена залежність  $R$ ,  $\Delta R/R_{\text{п}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$ , яка отримана на атмосфері для одношарової плівки Cr(30)/П. Виходячи з цих залежностей, можна стверджувати, що на атмосфері плівковий чутливий елемент тензодатчика без додаткового захисту втрачає свої тензорезистивні властивості (ресурс роботи) і перестає реагувати на зовнішню деформацію у межах відпрацьованого на попередніх циклах діапазону деформацій. Ця властивість негативно впливає на можливість застосування даної плівки без додаткового захисту як чутливого елемента тензодатчика, але разом з тим відкриває можливість для створення нових приладів, у яких важливою характеристикою буде служити здатність резистора зберігати своє номінальне значення опору при деформаціях у межах певного діапазону (антитензорезистори).

Плівки Cu було отримано нами шляхом термічного випаровування з вольфрамового човника за методикою, аналогічною при отриманні плівок Cr. Швидкість конденсації складала 3-7 нм/с. На рис. 3.5 наведено розмірну залежність величини опору і питомого опору для плівок Cu від товщини. Раніше відмічалось, що у цьому випадку кристалічна структура нетермостабілізованих плівок більш досконала, що дозволяє фіксувати розмірну залежність не тільки опору, але і питомого опору.

Типовий мікрознімок, відповідна дифракційна картина та її розшифрування наведені на рис. 3.6 та у таблиці 3.3.

На рис. 3.7 наведено деформаційні залежності  $R$ ,  $\Delta R/R_{\text{п}}$  та  $U$ ,  $\Delta U/U_{\text{п}}$  для двох інтервалів  $\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-1\%$  та  $\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 0-2\%$  для одношарових плівок Cu(20)/П та Cu(40)/П.

В одношарових плівках Cu на відміну від одношарових плівок Cr (а також, як буде показано у Розділі 4, плівок Fe) спостерігається незначне розходження значень величини КТ для першого та подальших циклів (не більше 20%). Також слід зазначити, що середнє значення  $\bar{\gamma}_{\ell}$  в одношарових плівках Cu збільшується з циклами, зберігаючи тенденцію до стабілізації величини.

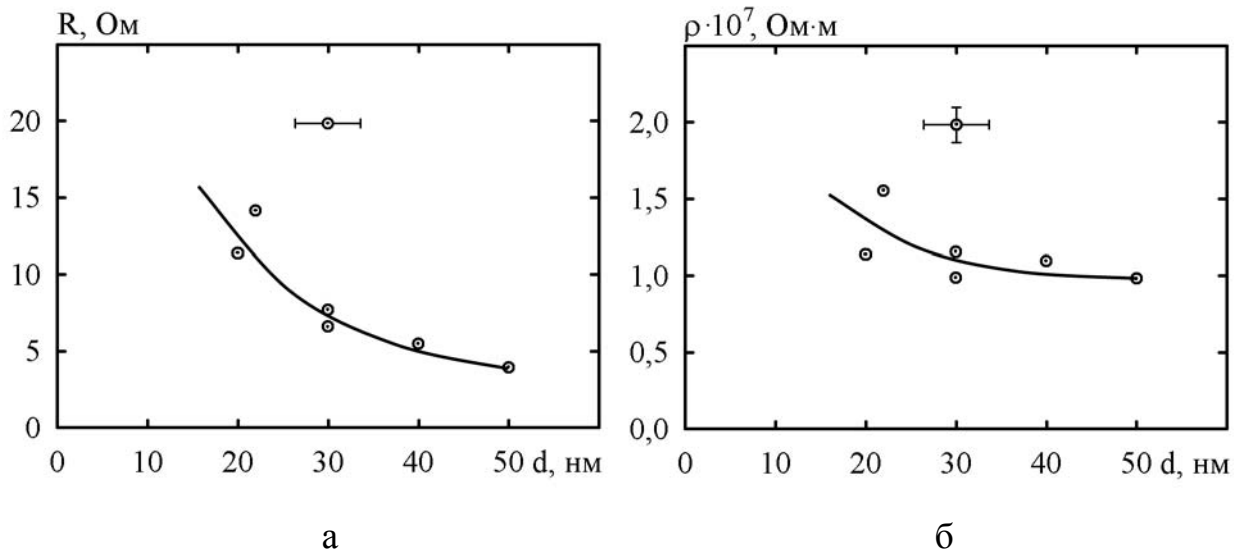
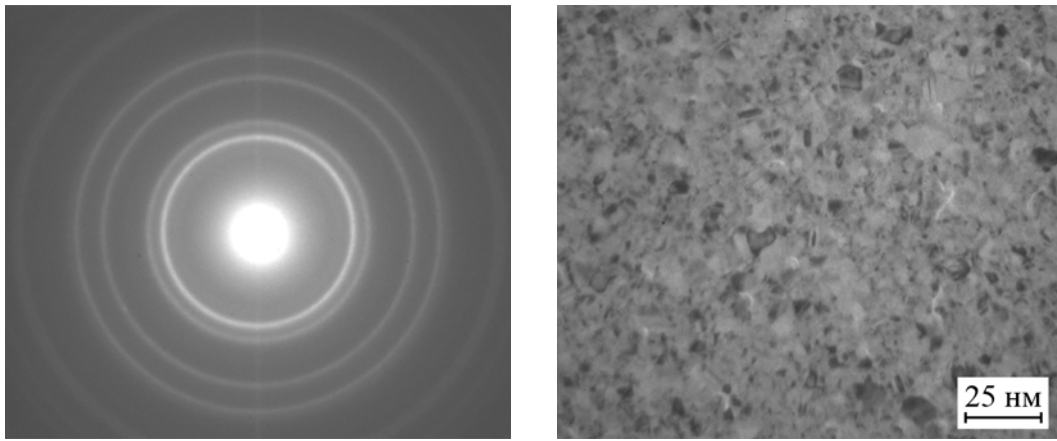


Рис. 3.5. Залежність опору  $R$  (а) та питомого опору  $\rho$  (б) від товщини  $d$  для нетермостабілізованих плівок Cu

Цикли VIII-XI (рис. 3.7 а) ілюструють залежності  $\Delta R/R_{\text{п}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$ , отримані при різних швидкостях деформації зразка (1 % за  $\tau_{\text{д}} = 133, 55, 24$  та 14 с відповідно), і дозволяють зробити висновок про слабку залежність значення середнього коефіцієнта тензочутливості  $\bar{\gamma}_{\ell}$  від швидкості деформації:  $\bar{\gamma}_{\ell}$  відповідно склала 2,7, 2,8, 2,8 та 3,0.

Недоліком застосування одношарових плівок Cu як чутливих елементів тензодатчиків може бути відносно невисоке значення  $\bar{\gamma}_{\ell}$  (від 2 до 5 одиниць) та широкий інтервал переходу від пружної/квазіпружної до пластичної деформації. Підтвердженням цього висновку можуть служити графіки залежності відносної зміни напруги  $\Delta U/U_{\text{п}}$  та напруги  $U$  на р-n-переході фотодіода від деформації  $\varepsilon_{\ell}$  (рис. 3.7). Їх лінійність і сталість при збільшенні деформації можна трактувати як відсутність процесів локального зменшення товщини окремих зерен та їх меж у результаті переміщення дислокацій у об'ємі зерен, що мало місце в одношарових плівках Cr.

У таблиці 3.4 наведено дані значення  $\bar{\gamma}_{\ell}$  для різних деформаційних циклів при  $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0\text{-}1\%$  для одношарових плівок Cr і Cu.



а

б

Рис. 3.6. Електронограма (а) та кристалічна структура (б) одношарової плівки Cu(20)

Таблиця 3.3

Розшифрування електронограми від плівки Cu(20)

№	I, в.о.	$d_{hkl}$ , нм	hkl	a, нм	Фазовий склад
1	Д.С.	0,208	111	0,360	ГЦК-Cu
2	сер.	0,180	200	0,360	-"-
3	сер.	0,127	220	0,361	-"-
4	сер.	0,108	311	0,360	-"-
5	сл.	0,090	400	0,360	-"-
6	сл.	0,083	331	0,361	-"-
7	сл.	0,081	420	0,361	-"-
$\bar{a}(\text{Cu}) = 0,360 \text{ нм}; \bar{a}_0(\text{Cu}) = 0,361 \text{ нм}$					

Таблиця 3.4

Значення  $\bar{\gamma}_\ell$  для різних деформаційних циклів при  $\Delta\varepsilon_\ell = 1\%$ 

Плівка	I	II	III	IV	V	VI	VII
Cu(20)/П	1,5	2,3	2,4	2,5	2,6	2,6	2,6
Cu(30)/П	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1
Cu(40)/П	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,5	1,5
Cr(30)/П	42,3	17,5	14,1	11,9	10,4	9,2	8,2
Cr(50)/П	44,6	18,3	15,2	13,6	12,4	11,4	10,7
Cr(75)/П	47,5	19,8	16,9	15,6	14,8	14,0	13,3

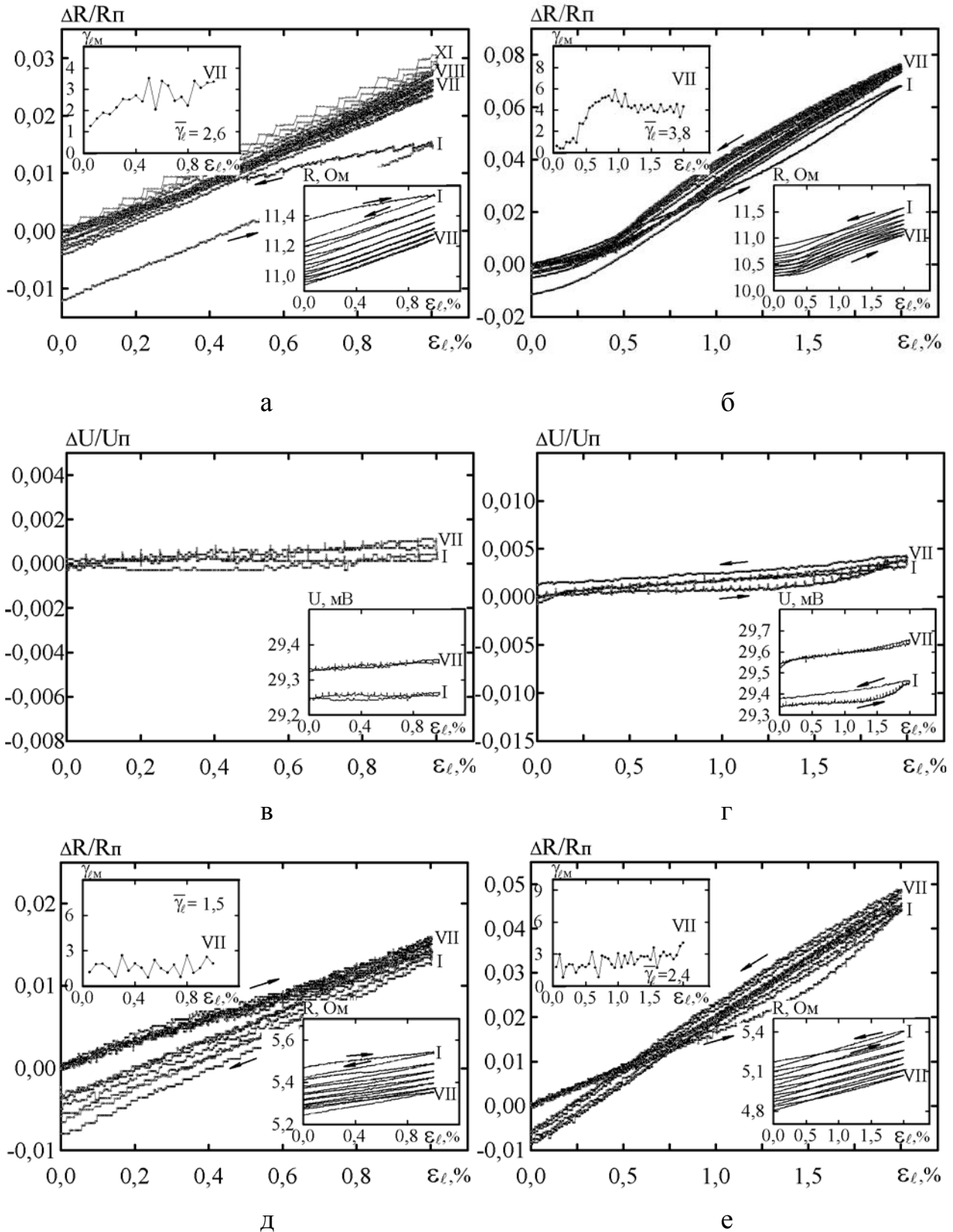


Рис. 3.7. Залежність відносної зміни опору  $\Delta R/R_{\Pi}$ , опору  $R$  та миттєвого значення КТ  $\gamma_{\ell M}$  (а, б, д, е), відносної зміни напруги  $\Delta U/U_{\Pi}$  та напруги  $U$  на р-n-переході фотодіода (в, г) від  $\epsilon_{\ell}$  для плівки Cu(20)/П (а-г) та Cu(40)/П (д-е)

### 3.1.2. Деякі особливості деформаційної залежності тензорезистивних параметрів та чутливості до деформації

Отримані експериментальні дані для одношарових плівок Cu та Cr дозволяють здійснити розрахунок дуже важливих тензорезистивних характеристик. Мова йде про деформаційні коефіцієнти  $\eta_{\lambda_0\ell}$  і  $\eta_{\lambda_g\ell}$  середньої довжини вільного пробігу (СДВП), зміни СДВП при деформації  $\Delta\lambda_0$  ( $\lambda_0$  – СДВП в об'ємі масивного зразка) і  $\Delta\lambda_g$  ( $\lambda_g$  – СДВП, яка лімітується межами зерна), а також чутливість до деформації  $dR/d\varepsilon$  [106].

Не дивлячись на те, що теоретичні основи тензочутливості в області пружної деформації ( $\varepsilon_\ell \leq 0,6\%$ ) були закладені ще у роботі [21], деякі проблеми залишаються невирішеними, оскільки спостерігається значна неузгодженість результатів різних авторів. Крім того, ефект тензочутливості залишається маловивченим у області пластичних деформацій як тонких плівок, так і дротів [12]. Найбільш незрозумілою проблемою залишається питання про величину і знак так званого деформаційного коефіцієнта питомого опору

$$\gamma_\ell^p = \frac{d \ln \rho}{de_\ell} = \frac{d\rho}{\rho_\pi de_\ell}, \quad (3.1)$$

де індекс  $\ell$  означає повздовжню деформацію зразка;

$e$  – так звана інженерна деформація, яка пов'язана з істинною деформацією співвідношенням  $e = \ln(1 + \varepsilon)$ .

Між середніми коефіцієнтами тензочутливості  $\bar{\gamma}_\ell$  і  $\bar{\gamma}_\ell^p$  існує просте співвідношення [21]:

$$\bar{\gamma}_\ell = \bar{\gamma}_\ell^p + 1 + 2\mu, \quad (3.2)$$

Оскільки у класичному наближенні  $\rho \sim (\lambda_0 \cdot n)^{-1}$ , де  $\lambda_0$  – середня довжина вільного пробігу електронів у об'ємі зразка, а  $n$  – їх концентрація, то  $\gamma_\ell^p$  для повздовжньої деформації можна записати так [21]:

$$\bar{\gamma}_\ell^p = -\frac{d\lambda_0}{\lambda_0 d\varepsilon_\ell} - \frac{dn}{nd\varepsilon_\ell} = \eta_{\lambda_0\ell} + \eta_{n\ell}, \quad (3.3)$$

де  $\eta_n$  – деформаційний коефіцієнт концентрації електронів  $n$ , який можна представити таким же чином як і  $\eta_{\lambda_0\ell} = -\frac{d \ln \lambda_0}{d\varepsilon_\ell}$ , тобто  $\eta_{n\ell} = -\frac{d \ln n}{d\varepsilon_\ell}$ .

Враховуючи, що  $n = 2\pi k$  ( $k$  – хвильове число) і  $k \approx (1 - \alpha\varepsilon_\ell)$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт у лінійному розкладенні хвильового числа за деформацією, при відносно малих значеннях  $\varepsilon_\ell$  можна записати [21]:

$$\ln k \cong \ln(1 - \alpha\varepsilon_\ell) = -\alpha\varepsilon_\ell, \text{ або}$$

$$\eta_{n\ell} \cong \alpha \cong \begin{cases} -1, \text{ якщо при деформації } dn > 0, \\ +1, \text{ якщо при деформації } dn < 0. \end{cases}$$

Таким чином, співвідношення для деформаційного коефіцієнта СДВП можна представити так:

$$\bar{\gamma}_\ell^p \cong -\frac{d \ln \lambda_0}{d\varepsilon_\ell} + \alpha, \quad (3.4)$$

де  $\eta_{\lambda_0\ell} < 0$  у випадку, коли при деформації збільшується СДВП ( $d\lambda_0 > 0$  – електрон прискорюється) і  $\eta_{\lambda_0\ell} > 0$ , коли СДВП зменшується ( $d\lambda_0 < 0$  – електрон гальмується), при умові  $\alpha = +1$ , що є найбільш ймовірним.

Із формули (3.4) витікає, що у залежності від знака  $\eta_{\lambda_0\ell}$  і  $\alpha$  значення  $\bar{\gamma}_\ell^p$  може бути більше або менше нуля.

Враховуючи означення  $\eta_{\lambda_0\ell}$ , зміну величини СДВП при деформації можна визначити за формулою:

$$\Delta\lambda_0 = -\eta_{\lambda_0\ell} \lambda_0 \Delta\varepsilon_\ell. \quad (3.5)$$

Аналогічні міркування можна провести і стосовно  $\eta_{\lambda_g\ell}$  та  $\lambda_g$ .

При проведенні розрахунків коефіцієнтів  $\eta_{\lambda_0\ell}$  і  $\eta_{\lambda_g\ell}$  ми приймаємо величину  $\alpha$  в (3.4) рівною +1, а для розрахунку  $\Delta\lambda_0$  та  $\Delta\lambda_g$  користуємося даними для  $\lambda_0$ , представленими у роботі [17], у якій деформація плівок здійснювалася в інтервалі  $\Delta\varepsilon_\ell = 0-1$  %. Результати розрахунків наведені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

## Тензорезистивні характеристики плівок Cr і Cu

Плівка	$\lambda_0/\lambda_g$ ( $\varepsilon_\ell = 0$ %) [17]	$\lambda_0/\lambda_g$ ( $\varepsilon_\ell = 1$ %) [17]	$\eta_{\lambda_0\ell}, \eta_{\lambda_g\ell}$	$\Delta\lambda_0/\Delta\lambda_g$ , нм
Cr(30)/П	$\frac{62,7}{16,3}$	$\frac{68,4}{17,8}$	5,6	-3,8/-1,0
Cr(50)/П			8,1	-5,5/-1,4
Cr(75)/П			10,7	-7,3/-1,9
Cu(20)/П	$\frac{119,5}{28,7}$	$\frac{119,2}{28,6}$	-0,1	0,1/0,03
Cu(30)/П			-0,6	0,7/0,17
Cu(40)/П			-1,2	1,4/0,3
Cu(1,2·10 <sup>5</sup> )			-1,6	2,0/-

Проведений у [17] аналіз показав, що величина і знак  $\Delta\lambda_0$  визначаються конкурентною дією у крайньому випадку трьох факторів: об'ємне, зерномежове і поверхневе розсіювання. Ці ж автори отримали для тонких плівок деяких металів, здеформованих до 1 %, що  $\Delta\lambda_0 = +5-6$  нм і  $\eta_{\lambda_0} = -(3-4)$  (Cr і Sc) та  $\Delta\lambda_0 = -0,4$  нм і  $\eta_{\lambda_0} = +0,3$  (Cu), що за знаком відрізняється від отриманих нами розрахункових даних. Дану невідповідність можна пояснити відмінністю в отриманих експериментальних даних для величини  $\bar{\gamma}_\ell$ . У наших експериментальних дослідженнях значення  $\bar{\gamma}_\ell$  для плівок Cu товщинами 20; 30 та 40 нм на VII-му деформаційному циклі відповідно склало 2,6; 2,1 та 1,5 одиниць, а для плівок Cr з товщинами 30; 50 та 75 нм – 8,2; 10,7 та 13,3 одиниць.

Окрім визначення параметрів  $\eta_{\lambda_0\ell}$ ,  $\eta_{\lambda_g\ell}$ ,  $\Delta\lambda_0$  і  $\Delta\lambda_g$  стосовно плівкових матеріалів нами додатково були проведені спеціальні дослідження на тонких металевих дротах, що дало можливість розширити розуміння деформаційного впливу на величини  $\eta_{\lambda_0\ell}$  і  $\Delta\lambda_0$ . Експериментальні та розрахункові дані для дротів Cu діаметром  $6\cdot 10^{-2}$ ,  $12\cdot 10^{-2}$  та  $28\cdot 10^{-2}$  мм наведені на рис. 3.8. Як можна бачити з графіків залежності відносної зміни опору  $\Delta R/R_{\Pi}$  та  $\bar{\gamma}_\ell^p$  від деформації  $\varepsilon_\ell$  експериментальне значення величини  $\bar{\gamma}_\ell$  для дротів Cu складає величину порядку одиниці, що у свою чергу і обумовило мінусові значення  $\bar{\gamma}_\ell^p$  і  $\eta_{\lambda_0\ell}$  та додатні  $\Delta\lambda_0$ .

Крім проаналізованої вище проблеми, у полі зору дослідників (наприклад, [22]) знаходиться також питання про можливу величину  $\gamma_\ell$  і  $\mu$  в області пластичної деформації. Якісний аналіз [22] вказує на те, що у цьому випадку величина  $\gamma_\ell$  визначається тільки геометричними факторами (кількісна характеристика  $\varepsilon_\ell = \frac{\Delta\ell}{\ell_{\Pi}}$ ), оскільки при пластичній деформації відбувається лише перегрупування кристалів, а деформація в об'ємі зерна відсутня (з цієї причини  $\gamma_\ell^p = 0$ , хоча зерномежове розсіювання електронів [17] повинно давати значний внесок у величину  $\rho$ ). Якщо виходити з міркувань [22], то  $\gamma_\ell^p = 0$ , а  $\mu = 0,5$  і тоді, у відповідності зі співвідношенням (3.2),  $\gamma_\ell \approx 2$  для усіх металів. Отримані нами експериментальні результати не підтверджують якісних міркувань [22]. Відмітимо також, що при розрахунках  $\gamma_\ell^p$  необхідно враховувати зміну довжини і діаметру зразків.

Також однією з основних характеристик роботи тензодатчика може виступати його чутливість до деформації ( $S=dR/d\varepsilon$ ) у залежності від типу деформації. Результати розрахунків чутливості плівки в області пружної і пластичної деформації наведені у таблиці 3.6.



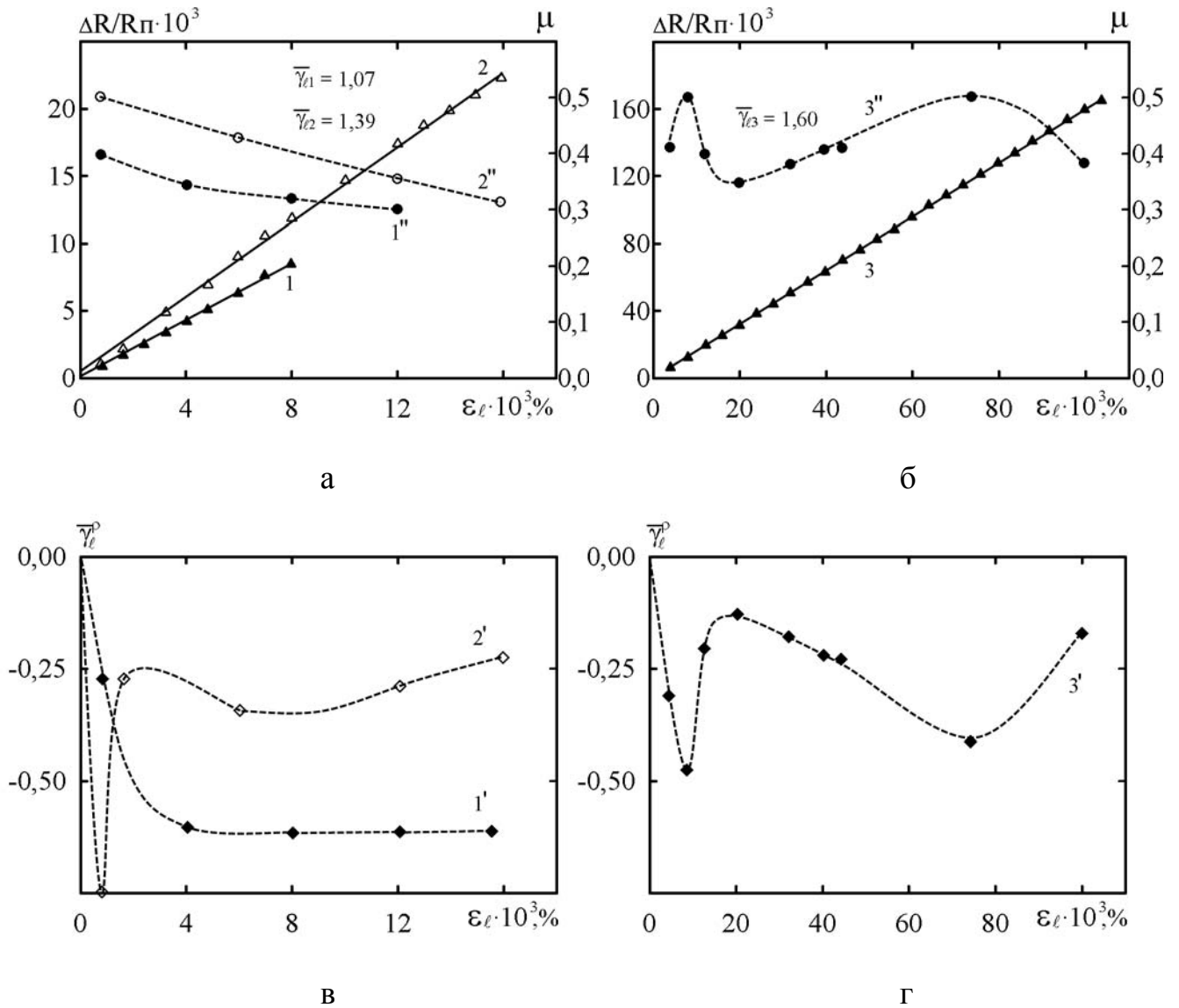


Рис. 3.8. Залежність відносної зміни опору  $\Delta R/R_{\pi}$  (1-3),  $\bar{\gamma}_{\ell}^p$  (1'-3') та розрахункової на основі (3.2) величини  $\mu$  (1''-3'') для дротів Cu [106]. Діаметр, мм:  $6 \cdot 10^{-2}$  (1),  $12 \cdot 10^{-2}$  (2) (а, в) та  $28 \cdot 10^{-2}$  (3) (б, г)

Таблиця 3.6

## Чутливість до деформації плівок Cr і Cu

Плівка	$\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$	$S_{\text{пр}} = \left( \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon_{\ell}} \right)_{\text{пр}}$ Ом/%	$S_{\text{пласт}} = \left( \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon_{\ell}} \right)_{\text{пл}}$ Ом/%	$\left( \frac{S}{R} \right)_{\text{пр}}$	$\left( \frac{S}{R} \right)_{\text{пл}}$	$\frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{пр}}}$	$\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{пр}}}$
Cr(30)/П	0,20	16,3	28,7	8,7	15,2	1,8	1,0
Cr(50)/П	0,15	11,5	24,5	13,8	29,1	2,1	1,0
Cr(75)/П	0,10	8,8	18,8	17,3	38,2	2,3	1,0
Cu(20)/П	>2	0,18	-	2,6	-	-	-
Cu(30)/П		0,16	-	2,2	-	-	-
Cu(40)/П		0,10	-	1,8	-	-	-

При проведенні розрахунків на графіках залежності опору  $R$  від деформації  $\varepsilon_{\ell}$  визначалася межа переходу пружна-пластична деформація. Від цієї межі відкладалися відрізки величиною 0,2 % в області пружної і пластичної деформації і у межах цих інтервалів проводився розрахунок чутливості для двох областей деформації.

Порівняння величин  $(S/R)_{\text{пр}}$  і  $(S/R)_{\text{пл}}$  дають можливість зробити висновок, що збільшення  $\gamma_{\text{ем}}$  (як і  $\bar{\gamma}_{\ell}$ ) відбувається за рахунок збільшення чутливості до деформації плівки при переході від пружної до пластичної деформації. Відношення чутливостей в області пластичної і пружної деформації  $S_{\text{пл}}/S_{\text{пр}}$  являє собою величину, що характеризує, до якої міри змінився кут нахилу залежності  $R$  від  $\varepsilon_{\ell}$  при зміні типу деформації. Як можна бачити, для одношарових плівок Cr величина  $S_{\text{пл}}/S_{\text{пр}}$  зростає з товщиною, тобто залежність  $R$  від  $\varepsilon_{\ell}$  після переходу пружна-пластична деформація у такому випадку йде більш круто. Розрахунки чутливості в області пластичної деформації для плівок Cu відсутні з тієї причини, що межа переходу квазіпружна-пластична деформація для цих плівок знаходиться за межами 2 %, вище яких наші дослідження тензорезистивних властивостей не проводилися.

## 3.2. Тензочутливість дво- і багат шарових плівок на основі Cu і Cr в області пружної і пластичної деформації

### 3.2.1. Експериментальні результати

Тонкоплівкові зразки Cu/Cr було отримано в результаті почергової конденсації шарів за методикою описаною для одношарових плівок Cu та Cr з витримкою у 15 хв. Аналогічно одношаровим були проведені електронномікроскопічні дослідження. Їх результати наведено на рис. 3.9 та у таблиці 3.7.

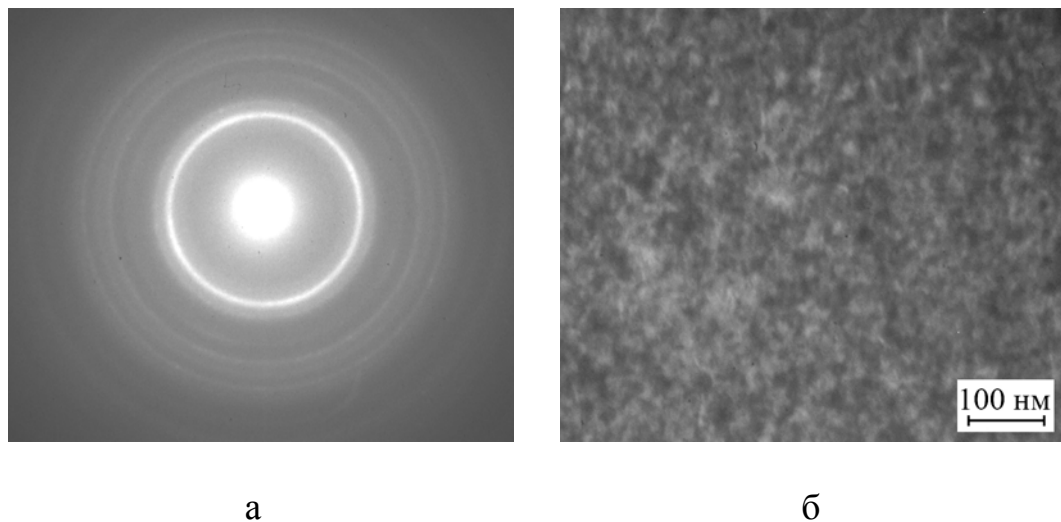


Рис. 3.9. Електронограма (а) та кристалічна структура (б) від двошарової плівки Cu(55)/Cr(30)

Дослідження тензорезистивних властивостей дво- та багат шарових плівок на основі системи Cu/Cr проводилися в діапазоні повздовжньої деформації  $\Delta \varepsilon_\ell$  до 1 та 2 % [107-111]. На рис. 3.10 та 3.11 наведені деформаційні залежності для двох плівкових систем Cu(20)/Cr(15)/П та Cu(20)/Cr(30)/П. Виходячи з наведених на рис. 3.10 та 3.11 типових залежностей для системи Cu/Cr можна зробити відповідний висновок, що лінійний характер залежностей  $R$  і  $\Delta R/R_0$  від  $\varepsilon_\ell$  для I-VII-го деформаційних циклів (рис. 3.10 а) та I-го циклу при деформації до 0,5 % (рис 3.11 а) можна пов'язати із пружною деформацією.

Таблиця 3.7

Розшифрування електронограми для плівки Cu(55)/Cr(30)

№	I, в.о.	$d_{hkl}$ , нм	hkl	a, нм	Фазовий склад
1	Д.С.	0,208	111	0,361	Cu
2	Д.С.	0,205	110	0,289	Cr
3	сер.	0,180	200	0,361	Cu
4	сер.	0,144	200	0,287	Cr
5	сер.	0,127	220	0,360	Cu
6	сер.	0,174	211	0,288	Cr
7	сер.	0,108	311	0,360	Cu
8	сл.	0,091	310	0,287	Cr

$\bar{a}$  (Cu) = 0,361 нм;  $a_0$  (Cu) = 0,361 нм;  
 $\bar{a}$  (Cr) = 0,288 нм;  $a_0$  (Cr) = 0,288 нм;

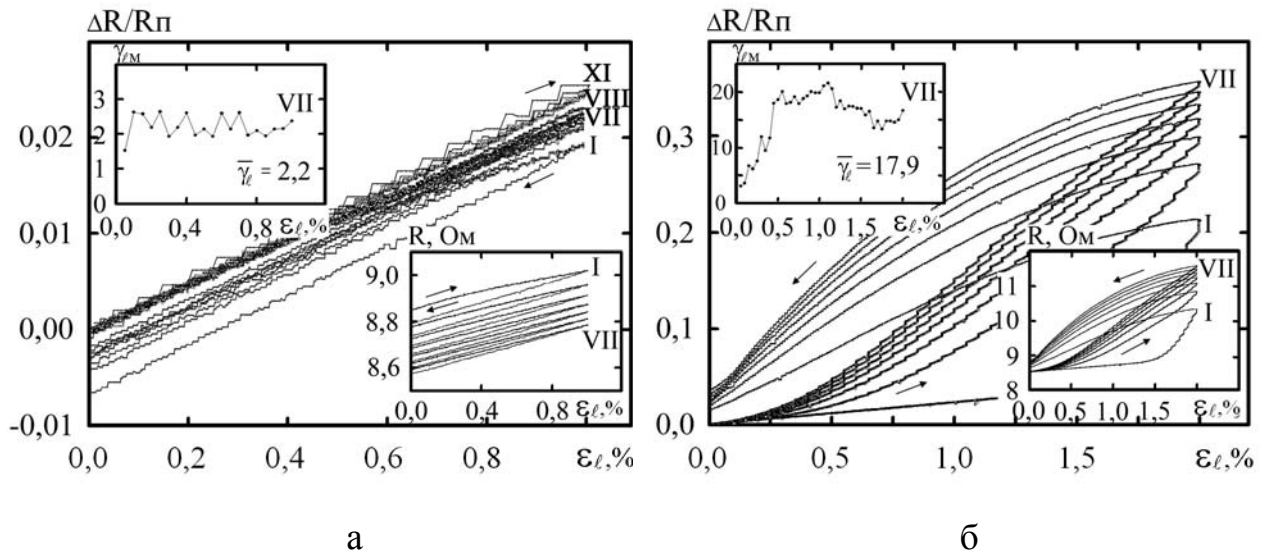


Рис. 3.10. Залежність  $\Delta R/R_{\pi}$ ,  $R$  і  $\gamma_{m}$  від  $\varepsilon_{\ell}$  для плівкової системи Cu(20)/Cr(15)/Π

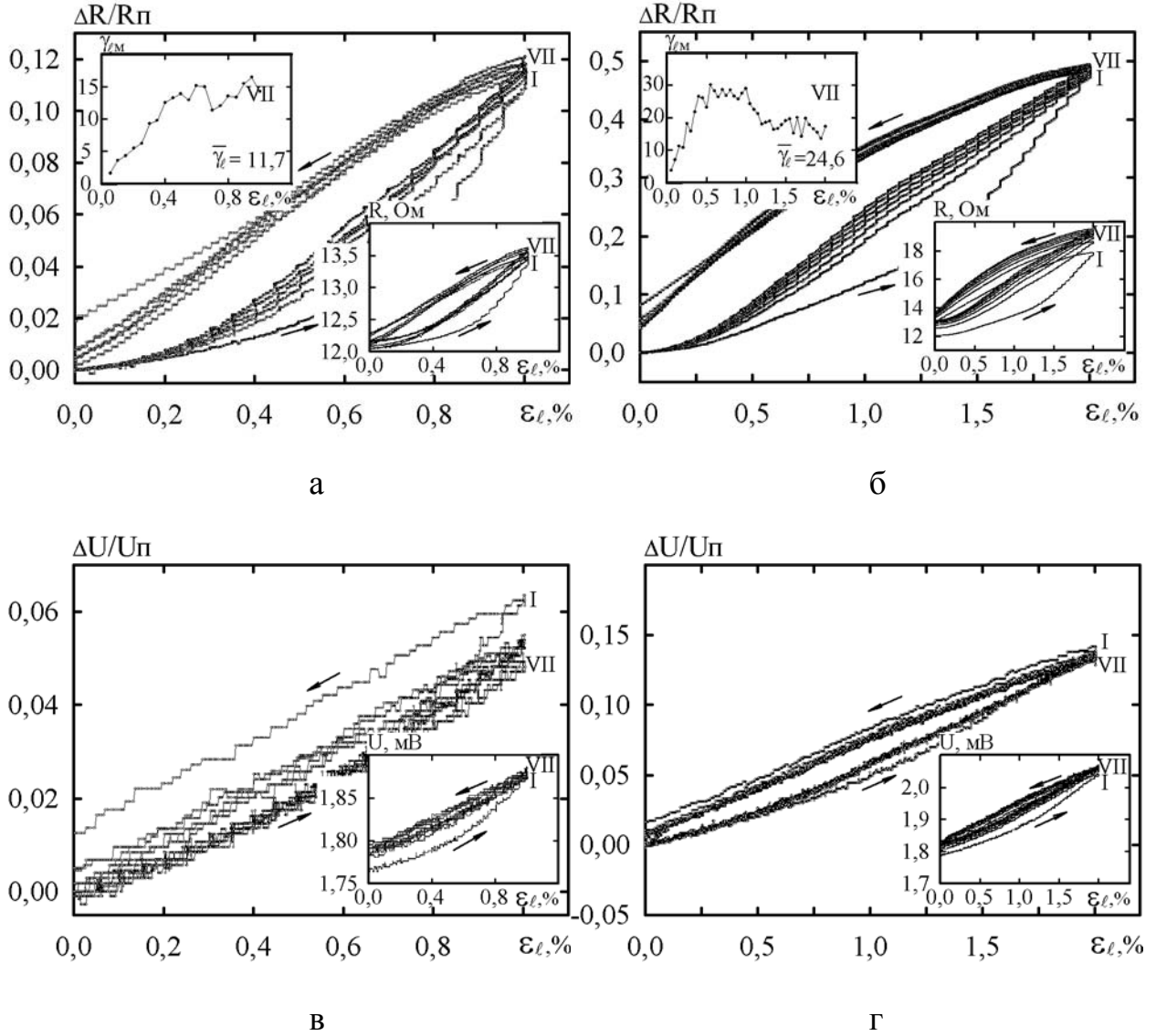


Рис. 3.11. Залежність  $\Delta R/R_{\Pi}$ ,  $R$  і  $\gamma_{\ell M}$  (а, б) та  $\Delta U/U_{\Pi}$  і  $U$  (в, г) від  $\varepsilon_{\ell}$  для плівкової системи  $\text{Cu}(20)/\text{Cr}(30)/\Pi$

Про перехід до пластичної деформації можна зробити висновок на основі появи нелінійності на залежностях  $R$ ,  $\Delta R/R_{\text{п}}$  і  $\gamma_{\text{лм}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$ . При цьому переході спостерігається різке підвищення величини середнього коефіцієнту тензочутливості з 2,2 до 17,9 (рис. 3.10), та з 2,5 при  $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0,5\%$  (рис. 3.11 а) до 24,6 при  $\Delta\varepsilon_{\ell} = 2\%$  (рис. 3.2 б). Також слід зазначити, що при переході пружна-пластична деформація починає спостерігатися поява немонотонності характеру залежностей миттєвого коефіцієнта тензочутливості  $\gamma_{\text{лм}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$ .

Межа переходу від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації може змінюватися у межах від 0,4 до 1,5 % у залежності від товщини плівки Cr у даній плівковій системі. Значення величини цього переходу зменшується зі збільшенням товщини шару Cr, тобто при збільшенні концентрації атомів Cr у плівковій системі. У таблиці 3.8 наведено значення величини деформації, при якій відбувається перехід пружна-пластична деформація, у залежності від концентрації атомів Cr у двошаровій плівці Cu/Cr. При розрахунку концентрації атомів Cr нами була використана формула (1.3)

Таблиця 3.8

Залежність інтервалу межі переходу пружна-пластична деформація і пружних модулів від концентрації атомів Cr у двошаровій плівці Cu/Cr

Плівкова система	$c_1$ , ат. %	$\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$ , %	$\mu_{\text{Cu/Cr}}$	$E_{\text{Cu/Cr}}$ , ГПа
Cu(20)/Cr(5)/П	20	1,30	0,34	152
Cu(40)/Cr(10)/П	23	1,20	0,34	156
Cu(25)/Cr(15)/П	36	0,85	0,33	171
Cu(20)/Cr(15)/П	41	0,75	0,33	177
Cu(20)/Cr(20)/П	50	0,60	0,33	187
Cu(20)/Cr(30)/П	59	0,50	0,32	197
Cu(20)/Cr(35)/П	63	0,45	0,32	202
Cu(20)/Cr(45)/П	69	0,40	0,32	209

Результати стосовно межі переходу, наведені у таблиці 3.8, можна пояснити концентраційною залежністю коефіцієнта Пуассона і модуля Юнга,

які можна представити у вигляді статистично зважених співвідношень:

$$\mu_{\text{Cu/Cr}} = c_1\mu_1 + c_2\mu_2 \text{ та } E_{\text{Cu/Cr}} = c_1E_2 + c_2E_2,$$

де  $c_1$  і  $c_2$  – концентрації атомів Cr і Cu відповідно.

Розрахункові дані для  $\mu_{\text{Cu/Cr}}$  і  $E_{\text{Cu/Cr}}$  вказують на добру кореляцію між концентрацією атомів і величинами  $\mu_{\text{Cu/Cr}}$  і  $E_{\text{Cu/Cr}}$ .

Відмінність I-го деформаційного циклу від інших (рис. 3.10 б та 3.11 б) (хоча слід відзначити, що ця відмінність не настільки велика для даної плівкової системи у порівнянні з відмінністю I-го і подальших циклів для плівок Fe, Cr, а також плівкових систем на основі Fe/Cr) нами пояснюється протіканням різних релаксаційних процесів (ефектом локальної непружності (мікропластична деформація), частковим розворотом зерен, рухливістю дефектів кристалічної будови тощо).

Цикли VIII-XI (рис. 3.10 а), які ілюструють залежності  $\Delta R/R_{\text{п}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$ , отримані при різних швидкостях деформації зразка (1 % за  $\tau_{\text{д}} = 140, 67, 30$  та  $20$  с відповідно), дозволяють зробити висновок про слабку залежність значення середнього коефіцієнта тензочутливості  $\bar{\gamma}_{\ell}$  від швидкості деформації:  $\bar{\gamma}_{\ell} \cong 2,3$  при  $\tau_{\text{д}} = 140$  с та  $2,5$  при  $\tau_{\text{д}} = 20$  с, що пов'язано із однаковим характером деформаційно-контрольованих процесів релаксації при низьких чи високих швидкостях деформації.

Дослідження багатошарових плівкових систем на основі плівок Cr та Cu, вносить свої корективи у характер тензорезистивних властивостей. З одного боку, збільшується товщина плівкової системи, що повинно викликати зменшення величини середнього коефіцієнту тензочутливості, у відповідності з розмірними залежностями для плівкових матеріалів, з іншого боку, значну роль відіграє додаткове розсіювання електронів на межах поділу шарів, що призводить до збільшення його величини.

### 3.2.2. Особливості деформаційних залежностей

До особливостей деформаційних залежностей плівкової системи Cu/Cr можна віднести те, що I-й деформаційний цикл у переважній більшості відрізняється від подальших циклів (значення  $\bar{\gamma}_\ell$  менше, ніж при наступних циклах), надалі спостерігається стабілізація мікропластичних процесів і деформаційні криві майже повторюють одна одну (тут можна провести певну аналогію зі стабілізацією мікропластичних процесів).

У порівнянні з одношаровими плівками Fe, Cr та двошаровими на основі Fe/Cr відмінність  $\bar{\gamma}_\ell$  для I-го деформаційного цикла від подальших не перевищує 20 %.

На рис. 3.13 наведено розмірні залежності  $\bar{\gamma}_\ell$  від товщини одного із шарів при фіксованій другого для двошарових плівок Cu/Cr/П.

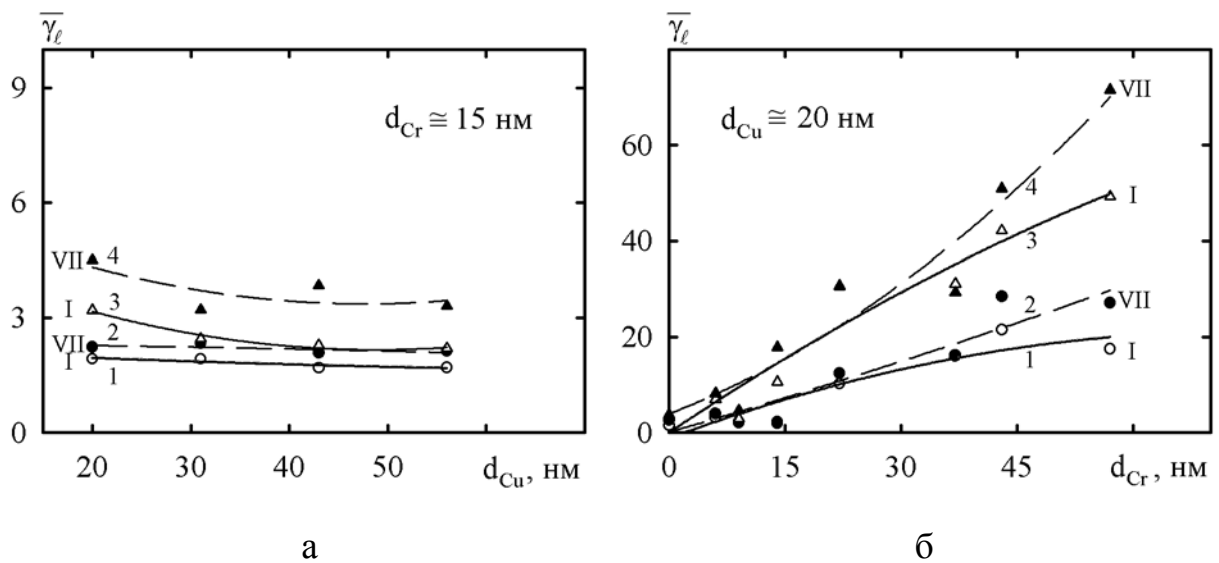


Рис. 3.13. Розмірні залежності  $\bar{\gamma}_\ell$  для плівкових систем Cu( $d$ )/Cr(15)/П (а) та Cu(20)/Cr( $d$ )/П (б):  $\Delta\epsilon_\ell = 0-1\%$  (1, 2);  $\Delta\epsilon_\ell = 0-2\%$  (3, 4); I, VII – номери деформаційних циклів

У таблиці 3.9 наведено дані розрахунків деформаційної чутливості в області пружної і пластичної деформації для плівки Cu/Cr.



При дослідженні тензорезистивних властивостей плівкової системи Cu/Cr в області пластичної деформації слід відмітити, що зворотні цикли йдуть вище прямих і при поверненні плівки у початковий стан ( $\Delta\varepsilon_\ell = 0\%$ ) спостерігається гістерезис залежності. Саме з метою релаксації тензорезистивних властивостей після кожного циклу деформації, перед початком кожного наступного циклу плівка витримувалася у недеформованому стані 4 хв., що було достатньо для повернення плівки у початковий стан.

Таблиця 3.9

## Чутливість до деформації плівок Cu/Cr/П

Плівка	$S_{\text{пр}} = \left( \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon_\ell} \right)_{\text{пр}}$ Ом/%	$S_{\text{пласт}} = \left( \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon_\ell} \right)_{\text{пл}}$ Ом/%	$\left( \frac{S}{R} \right)_{\text{пр}}$	$\left( \frac{S}{R} \right)_{\text{пл}}$	$\frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{пр}}}$	$\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{пр}}}$
Cu(20)/Cr(20)/П	0,6	0,9	6,5	10,4	1,6	1,0
Cu(20)/Cr(30)/П	0,6	1,3	4,9	10,5	2,2	1,0
Cu(20)/Cr(35)/П	0,9	1,9	8,5	16,5	2	1,1
Cu(20)/Cr(45)/П	2,2	2,2	19,0	18,2	1,0	1,1

У зв'язку з тим, що  $\bar{\gamma}_\ell$  в області пластичної деформації має відносно велике значення, ми акцентуємо увагу на деякому протиріччі даного результату з висновком автора [22]. Так, використовуючи співвідношення (1.5) для коефіцієнта повздовжньої тензочутливості масивного тензорезистора та припускаючи, що у цьому випадку має місце зерномежове ковзання, у [22] робиться висновок про рівність нулю першого доданку, а оскільки при пластичній деформації  $\mu \cong 0,5$ , то  $\bar{\gamma}_{0\ell} \cong 2$ . Із отриманих нами даних для плівкових зразків витікає висновок про великий внесок (більше 10 одиниць) зерномежового розсіювання електронів у загальну величину тензочутливості. Це пояснюється значним зерномежовим розсіянням електронів у процесі деформації зразка, оскільки плівкові зразки мають нанокристалічну будову. Наведені на рис. 3.13 розмірні залежності  $\bar{\gamma}_\ell$  від товщини одного із шарів при

фіксованій другого вказують на те, що співвідношення  $\bar{\gamma}_\ell \cong 2$  скоріш за все має місце в області пружної деформації, хоча це випадкове співпадання і воно не пов'язано із фізикою процесу. Результати, отримані в області пружної деформації, непогано співвідносяться з розрахунковими на основі так званої феноменологічної моделі для плівкової системи типу біпластина (співвідношення (1.3)). Результати розрахунків і їх порівняння з експериментальними даними наведено на рис. 3.14.

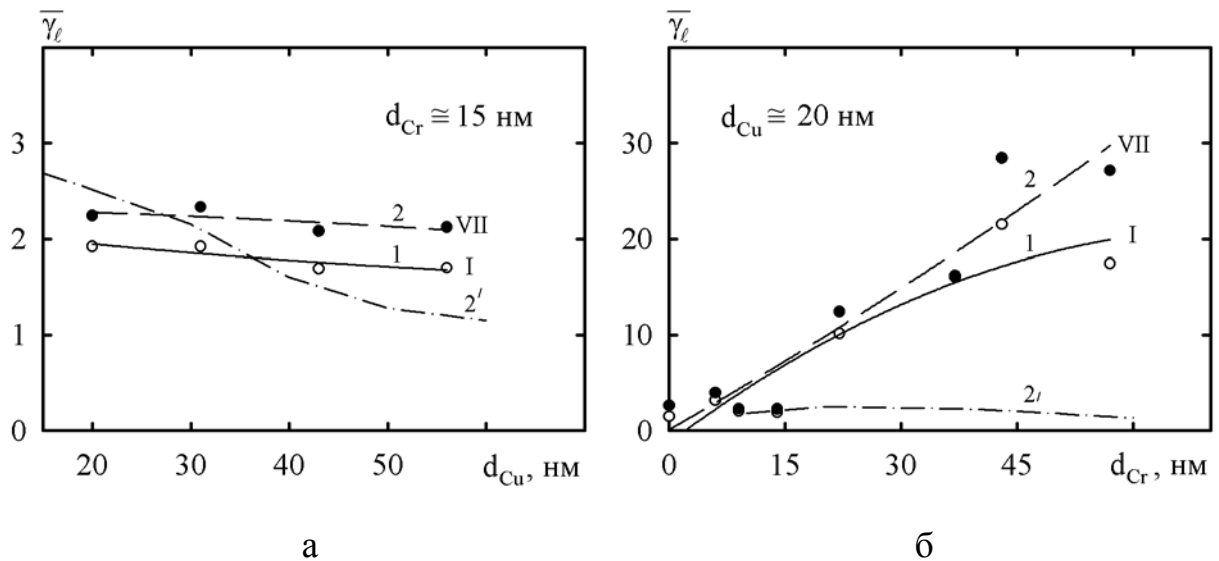


Рис. 3.14. Порівняння експериментально отриманих значень  $\bar{\gamma}_\ell$  для плівкових систем  $\text{Cu}(d)/\text{Cr}(15)/\text{П}$  (а) та  $\text{Cu}(20)/\text{Cr}(d)/\text{П}$  (б) при  $\Delta\varepsilon_\ell = 0-1\%$  з розрахованими на основі формули (1.3) (крива 2')

### 3.2.3. Розрахунок параметрів електроперенесення для двошарової плівкової системи $\text{Cu}/\text{Cr}$

На основі експериментально отриманих для недеформованих і деформованих в області пружної деформації значень питомого опору двошарової плівки  $\rho$  і його залежності від товщини  $d$  нами вперше був розрахований ефективний коефіцієнт зерномежового розсіювання електронів  $R$  для двошарової плівкової системи  $\text{Cu}/\text{Cr}$ . Суть даної методики полягає у наступному.

Основне співвідношення роботи [112] у вигляді:

$$\rho_f \cong \rho_\infty + \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{1-R} \cdot \frac{\rho_\infty \lambda_g}{L} + \frac{3}{8} (1-t) \frac{\rho_\infty \lambda_g}{d_1 + d_2},$$

де  $t$  – параметр за своїм фізичним змістом подібний до  $R$  і, виходячи із загальних міркувань, повинен бути приблизно рівний йому;

$\rho_\infty = \lim_{(d_1+d_2) \rightarrow \infty} \rho$ , а  $\lambda_g$  – усереднена по двошаровій системі середня довжина

вільного пробігу електрона, яка лімітується межами зерен, можна представити так:

$$\rho_f \cdot (d_1 + d_2) \cong \left[ \rho_\infty + \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{1-R} \cdot \frac{\rho_\infty \lambda_g}{L} \right] \cdot (d_1 + d_2) + \frac{3}{8} (1-R) \rho_\infty \lambda_g. \quad (3.6)$$

Для проведення розрахунків були використані експериментальні дані залежності питомого опору від загальної товщини плівкової системи Cu/Cr (при цьому товщина плівки Cr була фіксована, а Cu – змінна). На їх основі будувалося дві залежності:  $\rho$  від  $1/(d_1 + d_2)$  та  $\rho \cdot (d_1 + d_2)$  від  $(d_1 + d_2)$ , з яких були отримані величини  $\rho_\infty$  і  $A$ , що відповідно дорівнюють:  $\rho_\infty = 1,3 \cdot 10^{-8}$  Ом·м і  $A = \frac{3}{8} (1-R) \rho_\infty \lambda_g = 45,2 \cdot 10^{-16}$  Ом·м, а також  $\rho_\infty + \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{1-R} \cdot \frac{\rho_\infty \lambda_g}{L} = 1,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

Із цих співвідношень можна виразити  $\rho_\infty \lambda_g$  через  $A$ :  $\rho_\infty \lambda_g = A \frac{8}{3} (1-R)^{-1}$ ,

і, підставляючи його у (3.6), отримати залежність розрахункового питомого опору ( $\rho_{\text{роз}}$ ) плівкової системи від величини параметра  $R$ :

$$\rho_f (d_1 + d_2) \cong \left[ \rho_\infty + \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{1-R} \cdot \frac{8A}{3(1-R)L} \right] (d_1 + d_2) + A, \quad (3.6')$$

$$\rho_{\text{роз}} \cong \rho_\infty + \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{1-R} \cdot \frac{8A}{3(1-R)L} + \frac{A}{(d_1 + d_2)}.$$

Параметр  $R$  визначався методом підбору при умові рівності значень  $\rho_{\text{роз}}$  та експериментального значення питомого опору ( $\rho_{\text{екс}}$ ) для плівкових систем Cu/Cr/П різної товщини. Результати розрахунків наведені у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Значення параметра  $R$  для плівкових систем Cu/Cr різної товщини

Система	$\rho_{\text{екс}} \cdot 10^8$ , Ом·м ( $\varepsilon_{\ell} = 0 \%$ )	$\rho_{\text{екс}} \cdot 10^8$ , Ом·м ( $\varepsilon_{\ell} = 1 \%$ )	$R$ ( $\varepsilon_{\ell} = 0 \%$ )	$R$ ( $\varepsilon_{\ell} = 1 \%$ )
Cu(15)/Cr(15)/П	18,0	18,3	0,15	0,16
Cu(20)/Cr(15)/П	15,1	15,3	0,13	0,14
Cu(35)/Cr(15)/П	10,2	10,5	0,09	0,10
Cu(45)/Cr(15)/П	9,5	9,6	0,09	0,09
Cu(55)/Cr(15)/П	8,2	8,3	0,08	0,08

При розрахунках використовувалися значення середнього розміру кристалітів одношарових плівок  $L_1 = 25$  (Cu) та  $L_2 = 17$  (Cr) нм, а для плівкової системи Cu/Cr/П визначалися за статистично зваженим співвідношенням 
$$L = \frac{d_1}{d_1 + d_2} L_1 + \frac{d_2}{d_1 + d_2} L_2.$$
 Як можна бачити з таблиці 3.10 значення ефективного коефіцієнту  $R$  при збільшенні товщини плівки Cu (і, як наслідок цього, зменшенні питомого опору плівкової системи) зменшується в одних і тих же межах: від 0,15 до 0,08 для недеформованих та від 0,16 до 0,08 для zdeформованих плівок. Таке незначне збільшення величини  $R$  у zdeформованих зразках можна пояснити відносно малим збільшенням ширини меж зерен ( $\Delta L \sim 10^{-2}$  нм), що не впливає на їх прозорість.

### 3.2.4. Можливість застосування дво- і багатошарових плівкових систем Cu/Cr як чутливих елементів тензодатчиків

Плівкова система на основі Cu/Cr може виступати як можливий кандидат для створення на її основі чутливих елементів надточних тензодатчиків. До її переваг можна віднести доволі високі значення середнього коефіцієнту тензочутливості, які у деяких випадках можуть досягати значень у 30 і більше одиниць при деформації до 2 %. У порівнянні з іншими плівковими зразками (наприклад Fe/П, Cr/П, Fe/Cr/П) спостерігається стабільність значень  $\bar{\gamma}_\ell$  у залежності від кількості циклів деформації, що у свою чергу позитивно впливає на ресурс роботи датчика. У порівнянні з одношаровою плівкою Cu (де спостерігається подібна стабільність) плівкова система Cu/Cr виграє за рахунок підвищення значень величини  $\bar{\gamma}_\ell$ . Також необхідно зазначити, що чутливі елементи у вигляді дво- або багатошарових на основі Cu та Cr мають високу температурну стабільність з точки зору фазових перетворень. У плівковій системі Cu/Cr до 900 К майже повністю відсутня взаємна розчинність атомів, що гарантує стабільність характеристик тензорезистора і збільшення значень  $\bar{\gamma}_\ell$  у результаті інтерфейсного розсіювання електронів. Крім того, використання плівки Cr як нижнього шару дозволяє забезпечити задовільну адгезію тензодатчика до діелектричної підкладки. У контексті сказаного необхідно також акцентувати увагу на обмеженості дифузійних процесів у таких чутливих елементів (більш детально див. [53]). Обмежена взаємна розчинність атомів Cu і Cr сприяє збільшенню ресурсу роботи датчика в області як кімнатних, так і підвищених (середніх) температур. Можливим обмеженням температурного інтервалу функціонування датчика можуть виступати процеси окислення обох складових плівок. У той же час наявність стабільного інтерфейсу сприяє ефективному міжшаровому розсіюванню електронів і, як наслідок цього, збільшенню величини  $\gamma_\ell$ . Підтвердженням цих висновків можуть служити результати, наведені у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11

Значення  $\bar{\gamma}_\ell$  для різних деформаційних циклів при  $\Delta\varepsilon_\ell = 1\%$   
та порівняння його із  $\bar{\gamma}_\ell$  плівок Cu і Cr

Двошарова система	Загальна товщина, нм	Значення $\bar{\gamma}_\ell$ для різних деформаційних циклів при $\Delta\varepsilon_\ell = 1\%$							$\frac{\bar{\gamma}_\ell^{Cu}}{\bar{\gamma}_\ell}$	$\frac{\bar{\gamma}_\ell^{Cr}}{\bar{\gamma}_\ell}$
		I	II	III	IV	V	VI	VII		
Cu(20)/Cr(15)/П	35	1,9	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	1,2	–
Cu(20)/Cr(20)/П	40	10,2	10,5	11,1	11,4	11,9	12,2	12,4	0,2	–
Cu(20)/Cr(30)/П	50	11,3	11,3	11,8	12,1	11,4	11,6	11,7	0,2	0,7
Cu(20)/Cr(35)/П	55	16,2	15,5	16,0	16,3	16,3	16,3	16,1	0,2	–
Cu(20)/Cr(45)/П	65	21,5	24,7	25,5	26,3	27,1	27,8	28,5	0,1	–

Необхідно відмітити такі особливості цих результатів. По-перше, при зростанні величини загальної товщини не спостерігається тенденція до зменшення  $\bar{\gamma}_\ell$ , оскільки, у цьому випадку зростає товщина чутливого шару Cr, у якому, як можна бачити з таблиць 3.4 та 3.6 при збільшенні товщини зростає чутливість до деформації і величина  $\bar{\gamma}_\ell$ . Розрахунки за співвідношенням феноменологічної моделі, що застосовано для випадку пружної деформації, добре узгоджуються з експериментальними даними. Крім того, як видно із таблиці 3.11, має місце також кореляція між  $\bar{\gamma}_\ell$  і концентрацією атомів (по аналогії з даними таблиці 3.8).

По-друге, порівняння  $\bar{\gamma}_\ell$  для двошарової системи із  $\bar{\gamma}_\ell^{Cu}$  або  $\bar{\gamma}_\ell^{Cr}$  вказує однозначно, що у загальну величину  $\bar{\gamma}_\ell$  значно більший внесок дає шар Cr у порівнянні із шаром Cu. І, нарешті, той факт, що величина  $\frac{\bar{\gamma}_\ell^{Me}}{\bar{\gamma}_\ell}$  (Me = Cu, Cr) у більшості випадків менше одиниці підтверджує висновок багатьох робіт, зокрема [113], про значний внесок інтерфейсного розсіювання у загальну величину  $\bar{\gamma}_\ell$ .

### Висновки до Розділу 3

1. При переході від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації спостерігається зміна характеру залежності відносної зміни опору плівки від деформації, що проявляється у її нелінійності та появі гістерезису.

2. Величина КТ у плівках Cr при I-му деформаційному циклі завжди більша від КТ при наступних циклах, хоча ця особливість з точністю до навпаки проявляється в одношарових плівках Cu та двошарових плівкових системах Cu/Cr; межа переходу від пружної до пластичної деформації залежить від загальної товщини плівкової системи, зменшуючись від 1,3 до 0,4 % при збільшенні товщини шару Cr від 6 до 43 нм.

3. Експериментальні результати, що відповідають області пружної деформації, задовільно узгоджуються з феноменологічною теоретичною моделлю для плівкової системи типу біпластина (відповідність складає 15 %), що пояснюється адекватністю теоретичної моделі і структурно-фазового складу плівок Cu/Cr.

4. Швидкість деформації системи Cu/Cr у межах від 140 до 20 с<sup>-1</sup> не впливає на величину середнього коефіцієнта тензочутливості (зміна знаходиться у межах від 2,3 до 2,5 одиниць), що пов'язано з однаковим характером деформаційно-контрольованих процесів релаксації при низьких чи високих швидкостях деформації.

5. Значне зростання величини  $\gamma_e$  (як і  $\bar{\gamma}_e$ ) при переході від пружної до пластичної деформації обумовлене різним ступенем чутливості при різних типах деформації; відношення  $S_{пр}/S_{пл}$  складає від 0,12 до 1,0 у залежності від загальної товщини плівки та концентрації у ній атомів Cr.

**РОЗДІЛ 4**

**ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ  
НА ОСНОВІ  $\alpha$ -Fe I Cr ЯК ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕНЗОДАТЧИКІВ**

**4.1. Тензочутливість одношарових плівок  $\alpha$ -Fe**

Як і у випадку плівок Cu і Cr, нами були проведені експериментальні дослідження тензорезистивних властивостей одношарових плівок Fe [38, 101], експериментальні дані для яких були використані для проведення теоретичних розрахунків величини КТ на основі феноменологічної моделі для плівкових сплавів. Плівки  $\alpha$ -Fe отримувалися шляхом термічного випаровування з вольфрамового дроту за методикою, аналогічною розглянутій вище при отриманні одношарових плівок Cr та Cu, зі швидкістю конденсації 10-15 нм/с. На рис. 4.1 наведено розмірну залежність величини опору і питомого опору плівки від товщини нетермостабілізованих плівок  $\alpha$ -Fe.

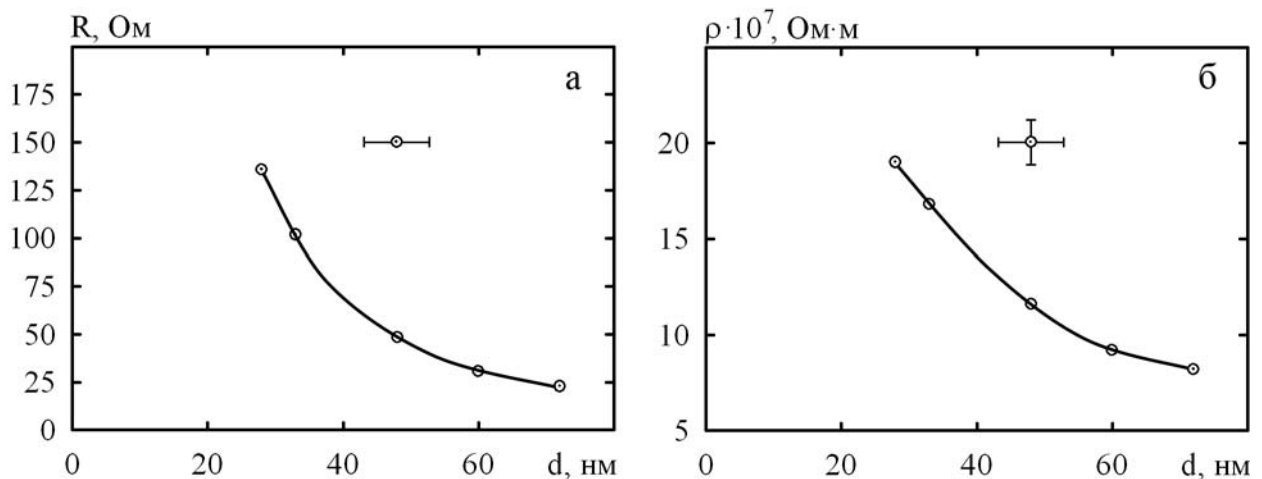


Рис. 4.1. Залежність опору  $R$  (а) та питомого опору  $\rho$  (б) від товщини  $d$  для нетермостабілізованих плівок Fe

З розмірних залежностей  $R$  та  $\rho$  від  $d$  для плівок  $\alpha$ -Fe можна зробити висновок, як і у випадку одношарових плівок Cu, про відносно більшу досконалість кристалічної структури нетермостабілізованих плівок  $\alpha$ -Fe у



порівнянні з одношаровими плівками Cr, що і дає можливість фіксувати розмірну залежність не тільки опору, але і питомого опору. Про це також говорять дані електронно-мікроскопічних досліджень, які представлені типовим мікрознімком, дифракційною картиною та її розшифруванням на рис. 4.2 і у таблиці 4.2.

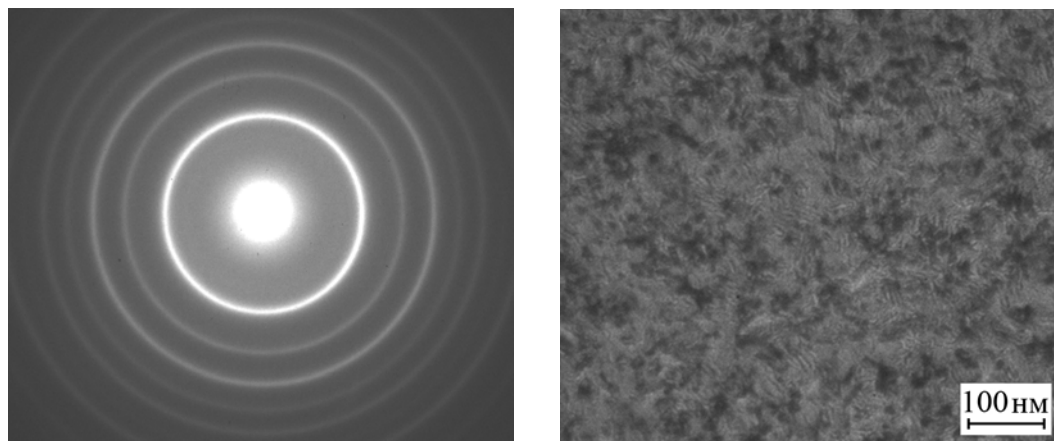
З метою детального вивчення процесів переходу між різними типами деформації нами було проведено дослідження залежності  $R$ ,  $\Delta R/R_n$ ,  $U$ ,  $\Delta U/U_n$  і  $\gamma_{\ell m}$  від  $\varepsilon_{\ell}$  для плівки  $\alpha$ -Fe при поступовому нарощенні деформації з кроком  $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0,25\%$  по три деформаційних цикли у кожному інтервалі деформації (рис. 4.3.). У таблиці 4.1 наведено залежність значень величини  $\gamma_{\ell}$  від номера деформаційного циклу та величини  $\Delta\varepsilon_{\ell}$ .

Таблиця 4.1

Залежність величини  $\bar{\gamma}_{\ell}$  від номера деформаційного циклу для плівки Fe(50)/П при різних значеннях діапазону деформації  $\Delta\varepsilon_{\ell}$

N <sub>дц</sub>	$\Delta\varepsilon_{\ell}, \%$							
	0-0,25	0-0,5	0-0,75	0-1	0-1,25	0-1,5	0-1,75	0-2
I	5,5	8,6	11,5	13,4	14,1	14,9	14,4	13,8
II	3,3	5,2	7,6	10,3	12,0	12,8	13,0	12,5
III	3,0	4,6	7,0	9,6	11,0	11,9	12,1	11,6

Відповідно можна зробити висновок, що лінійність деформаційної залежності  $\Delta R/R_n$  від  $\varepsilon_{\ell}$  і відсутність сходинок на першому деформаційному циклі спостерігається лише до величини деформації  $\varepsilon_{\ell} \cong 0,15\%$ . Саме ця величина і визначається нами як межа переходу від пружної до пластичної деформації. Подібний характер першого деформаційного циклу, що спостерігається при наступному нарощенні деформації, не можна вважати за початкову межу переходу, виходячи з того, що плівка вже мала певну деформаційну історію. Зміна кута нахилу на перших деформаційних циклах при нарощенні деформації пояснюється протіканням нових більш



а

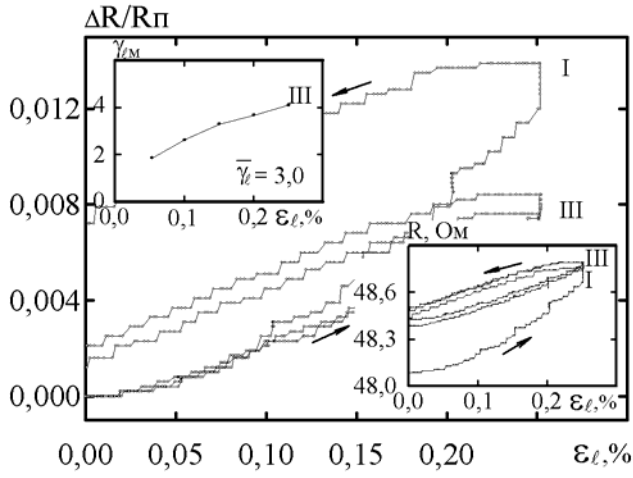
б

Рис. 4.2. Електронограма (а) та кристалічна структура (б) одношарової плівки Fe(50)

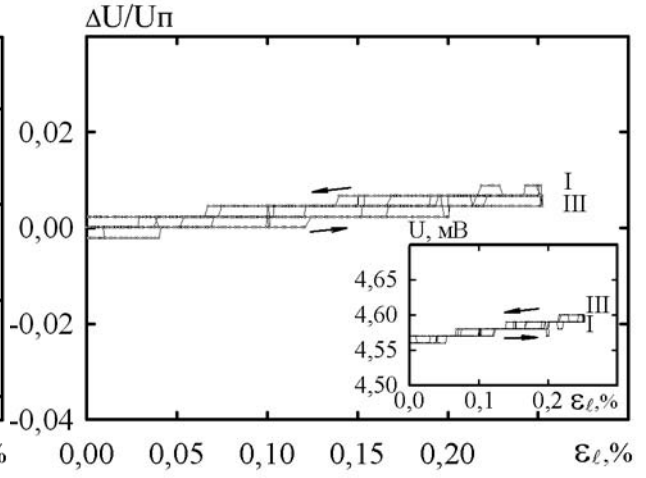
Таблиця 4.2

Розшифрування електронограми від плівки Fe(50)

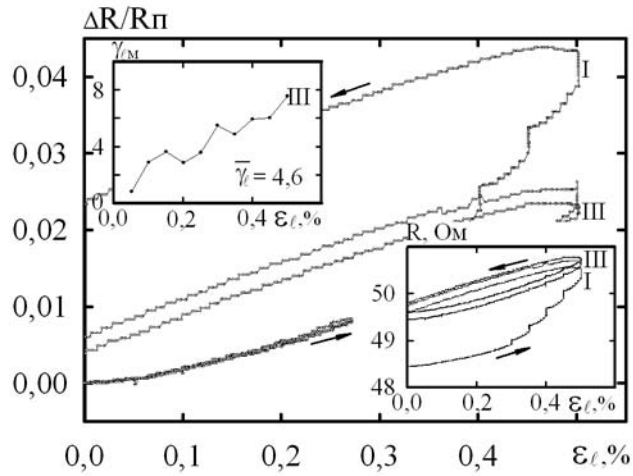
№	I, в.о.	$d_{hkl}$ , нм	hkl	a, нм	Фазовий склад
1	Д.С.	0,203	110	0,287	$\alpha$ -Fe
2	сер.	0,144	200	0,288	-"-
3	сер.	0,117	211	0,287	-"-
4	сл.	0,101	220	0,286	-"-
5	сл.	0,091	310	0,288	-"-
6	сл.	0,083	222	0,287	-"-
7	сл.	0,077	321	0,288	-"-
$\bar{a}$ (Fe) = 0,287 нм; $a_0$ (Fe) = 0,287 нм					



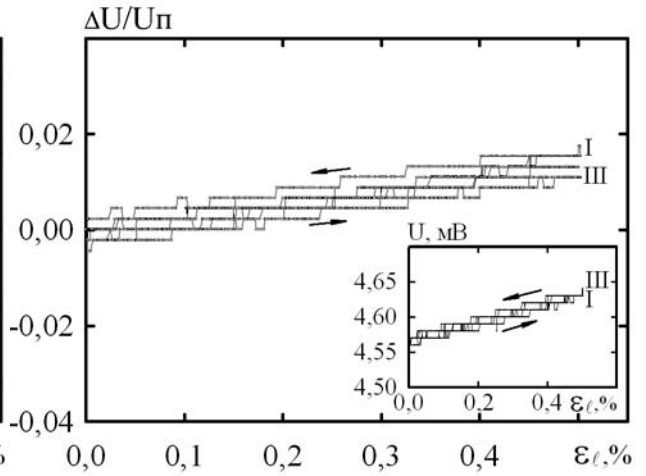
a



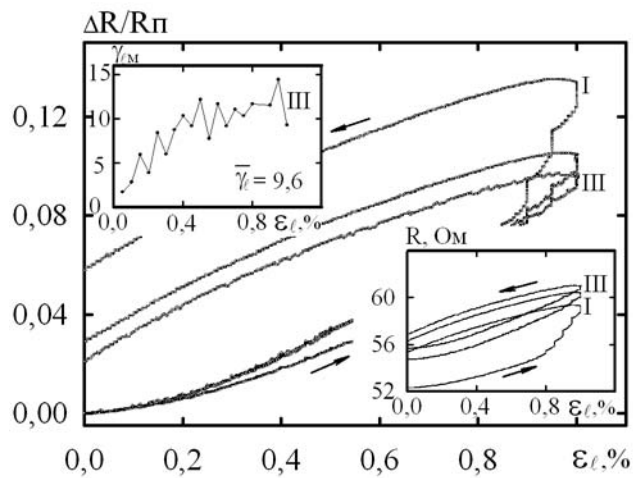
e



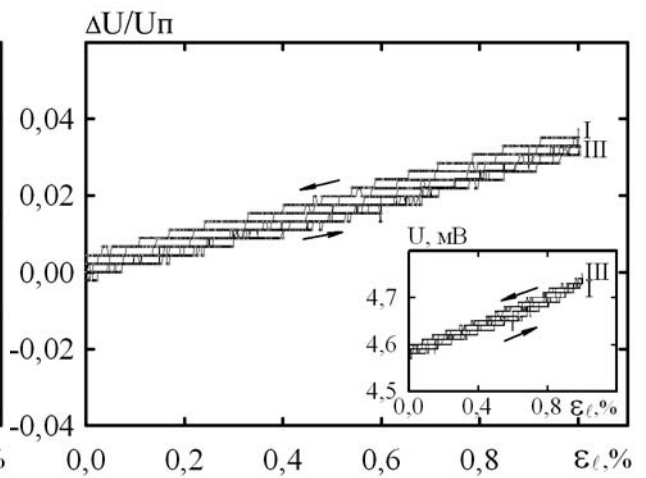
б



е



в



ж

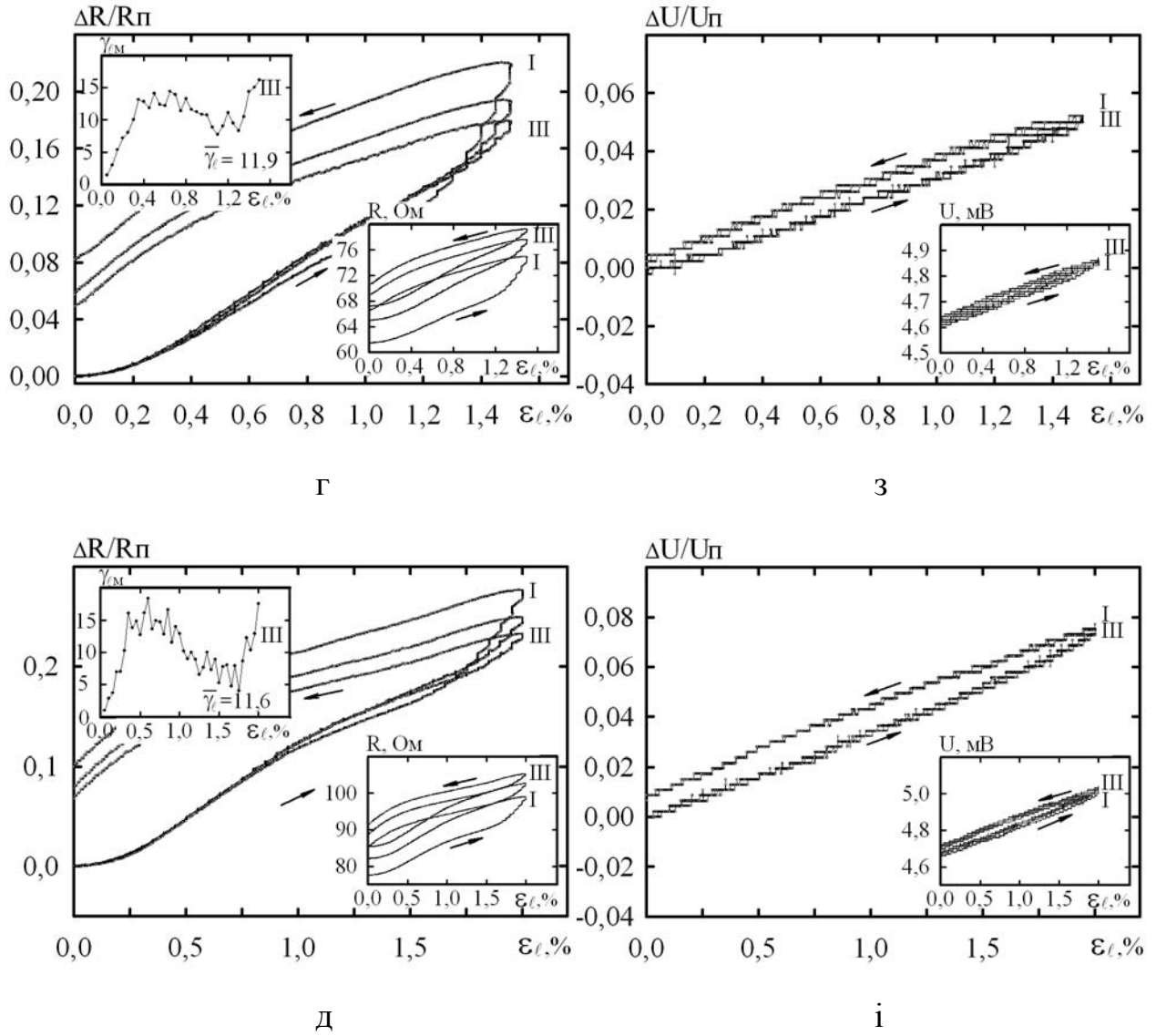


Рис. 4.3. Залежність  $R$ ,  $\Delta R/R_{\Pi}$  і  $\gamma_{\ell M}$  (а-д) та  $U$  і  $\Delta U/U_{\Pi}$  (е-і) від  $\varepsilon_{\ell}$  для плівки Fe(50)/Π

високоенергетичних релаксаційних процесів (ефектом локальної непружності (мікропластична деформація) при деформації, частковим розворотом зерен, рухливістю дефектів кристалічної будови тощо). Підтвердженням цього висновку може служити лінійність залежності  $\gamma_{\text{ем}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$ , що наведена на рис. 4.3 а, при деформації у інтервалі  $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0-0,25\%$  і відсутність її у діапазоні більш високих деформацій, а також порівняно невеликі значення величини  $\bar{\gamma}_{\ell}$  у даному діапазоні деформації.

Поступове нарощення деформації дало можливість вперше спостерігати таку особливість. Значення  $\bar{\gamma}_{\ell}$  на перших деформаційних циклах зростає в інтервалі деформацій  $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0-1,5\%$ , після чого відбувається його стабілізація з наступним зменшенням  $\bar{\gamma}_{\ell}$  навіть при переході до більш високих деформацій. При цьому відмінність I-го деформаційного циклу від подальших стала значно менш вираженою. Це можна пояснити прискореним спрацюванням ресурсу роботи плівкової системи при такому режимі деформації. У той же час залежності  $U$  і  $\Delta U/U_{\text{п}}$  мають лінійний характер, що говорить про відсутність мікро- та макротріщин у плівкових зразках (диференційна залежність  $\Delta U_i/U_i$  від  $\varepsilon_{\ell i}$  має вигляд горизонтальної лінії, що також підтверджує висновок про збереження структурної суцільності зразків).

У таблиці 4.3 наведено значення  $\bar{\gamma}_{\ell}$  для різних деформаційних циклів у діапазоні деформації  $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0-1\%$  для одношарових плівок  $\alpha$ -Fe різної товщини.

Таблиця 4.3

Значення  $\bar{\gamma}_{\ell}$  для різних деформаційних циклів при  $\Delta\varepsilon_{\ell} = 1\%$

Плівка	I	II	III	IV	V	VI	VII
Fe(50)/П*	13,4	10,3	9,6	-	-	-	-
Fe(20)/П	40,2	19,7	17,8	16,2	14,8	13,9	13,2
Fe(35)/П	35,4	18,0	16,2	15,1	13,9	13,3	12,9
Fe(60)/П	31,5	16,2	14,9	14,2	13,2	12,8	12,5
Fe(100)/П	23,5	13,5	13,0	12,6	12,3	12,1	12,0

Відмітимо, що деформація плівки Fe(50)/П\* відбувалася сходинкоподібно з кроком деформації у 0,25 % і тому значення  $\bar{\gamma}_\ell$  від номера деформаційного циклу не можуть порівнюватися з відповідними значеннями для інших плівок Fe.

Тензорезистивні властивості одношарових плівок Fe мають багато спільного з розглянутими у Розділі 3 одношаровими плівками Cr. По-перше, – це стабільно високі значення  $\bar{\gamma}_\ell$  (від 31 для I-го деформаційного циклу до 12 для VII-го); по-друге, – значення  $\bar{\gamma}_\ell$  для перших деформаційних циклів у всіх випадках вищі, ніж для подальших з тенденцією до стабілізації значень  $\bar{\gamma}_\ell$  та повторюваності зовнішнього вигляду деформаційних кривих. У таблиці 4.4 наведені результати розрахунків чутливості до деформації в області пружної та пластичної деформації для одношарової плівки Fe та порівняння між собою чутливості і опору до і після пластичної деформації.

Таблиця 4.4

## Чутливість до деформації плівок Fe/П

Плівка	$\varepsilon_\ell^{\text{пер}}$	$S_{\text{пр}} = \left( \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon_\ell} \right)_{\text{пр}}$ , Ом/%	$S_{\text{пл}} = \left( \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon_\ell} \right)_{\text{пл}}$ , Ом/%	$\left( \frac{S}{R} \right)_{\text{пр}}$	$\left( \frac{S}{R} \right)_{\text{пл}}$	$\frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{пр}}}$	$\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{пр}}}$
Fe(20)/П	0,10	1,6	64,3	0,8	33,4	39,7	1,0
Fe(35)/П	0,10	1,7	31,6	1,2	30,4	18,8	1,0
Fe(50)/П	0,15	1,9	-	4,0	-	-	-
Fe(60)/П	0,30	2,5	6,9	9,3	25,3	2,8	1,1
Fe(100)/П	0,40	4,9	7,0	15,6	21,5	1,4	1,1

Стосовно даних, наведених у таблиці 4.4, можна зробити висновок, що на відміну від одношарових плівок Cr значення  $(S/R)_{\text{пл}}$  з ростом товщини плівки зменшується, що пов'язано з оберненою залежністю зміни величини  $\varepsilon_\ell^{\text{пер}}$  від товщини плівки Fe.

## 4.2. Тензочутливість дво- і багатошарових плівок на основі Fe і Cr в області пружної і пластичної деформації

### 4.2.1. Експериментальні результати

Зразки Fe/Cr, як і Cu/Cr, отримувалися почерговою конденсацією шарів з витримкою у 15 хвилин після отримання першого шару. Результати проведення електронно-мікроскопічних досліджень для даної плівкової системи наведені на рис. 4.4 і у таблиці 4.5. Структурно-фазовий стан двошарових плівок Fe/Cr відповідає твердому розчину ( $\alpha$ -Fe, Cr) з параметром решітки 0,289 нм.

З метою вивчення тензорезистивних властивостей даної плівкової системи було проведено серію експериментів, у яких дослідження проводилися у статичному та динамічному режимах деформації зразка, а також у режимі поступового нарощення деформації [110, 111, 114, 115]. На рис. 4.5 та 4.6 наведені деформаційні залежності для двох плівкових систем Fe(20)/Cr(30)/П та Fe(70)/Cr(20)/П, нарощення деформації у яких відбувалося різним чином (у першому випадку стрибкоподібно по сім деформаційних циклів у діапазонах деформації  $\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-1\%$  та  $\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 0-2\%$ , а у другому випадку – поступово до величини деформації  $\varepsilon_{\ell} = 2\%$  при нарощенні деформації з кроком  $\Delta\varepsilon_{\ell} = 0,25\%$  по три деформаційних цикли у кожному інтервалі). У таблиці 4.6 наведено залежність значень величини  $\bar{\gamma}_{\ell}$  від номера деформаційного циклу та величини  $\Delta\varepsilon_{\ell}$  для плівкової системи Fe(70)/Cr(20)/П. Деформація плівки з різними швидкостями, як і у попередніх випадках, показала слабку залежність значення  $\bar{\gamma}_{\ell}$  від швидкості деформації (рис. 4.7). Значення  $\bar{\gamma}_{\ell}$  складають 28,2; 26,8; 26,4 та 25,6 при часі деформації  $\tau_d$  відповідно рівному 113; 47; 20 та 11 с.

Якісною характеристикою пластичної деформації плівкових зразків може служити усереднена по усьому інтервалу деформації величина  $\bar{\gamma}_{\ell}$ . Узагальнені дані для  $\bar{\gamma}_{\ell}$  наведені у таблицях 4.7 та 4.8. На основі цих даних можна зробити наступні висновки. Розрахункові дані величини КТ, отримані на основі

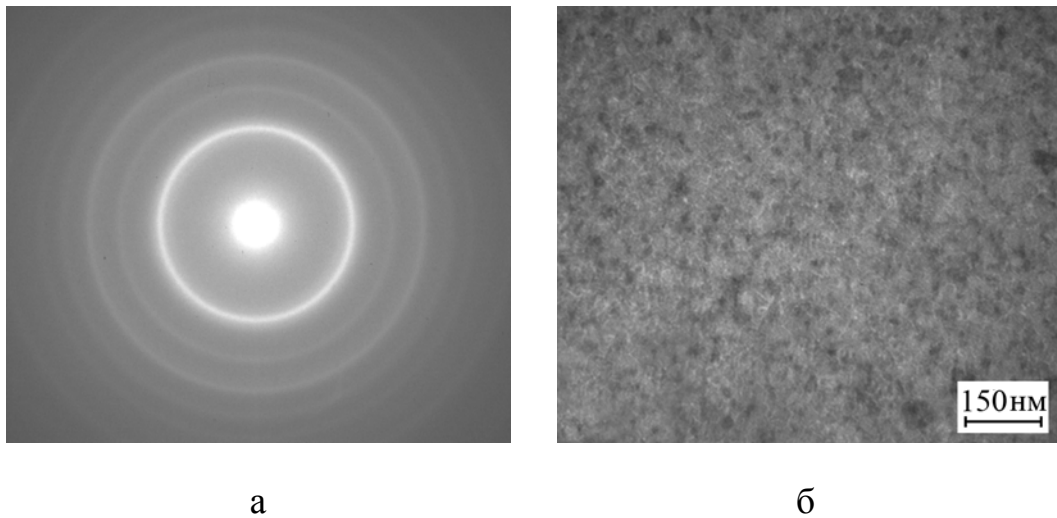


Рис. 4.4. Електронограма (а) та кристалічна структура (б) плівкової системи Fe(20)/Cr(30)

Таблиця 4.5

Розшифрування електронограми від плівкової системи Fe(20)/Cr(30)

№	I, в.о.	$d_{hkl}$ , нм	hkl	a, нм	Фазовий склад
1	Д.С.	0,205	110	0,289	т.р. ( $\alpha$ -Fe,Cr)
2	сер.	0,145	200	0,290	-"-
3	сер.	0,118	211	0,289	-"-
4	сл.	0,102	220	0,288	-"-
5	сл.	0,091	310	0,288	-"-
7	сл.	0,077	321	0,289	-"-
$\bar{a}$ ( $\alpha$ -Fe,Cr) = 0,289 нм; $a_0$ (Fe) = 0,287 нм; $a_0$ (Cr) = 0,288 нм					



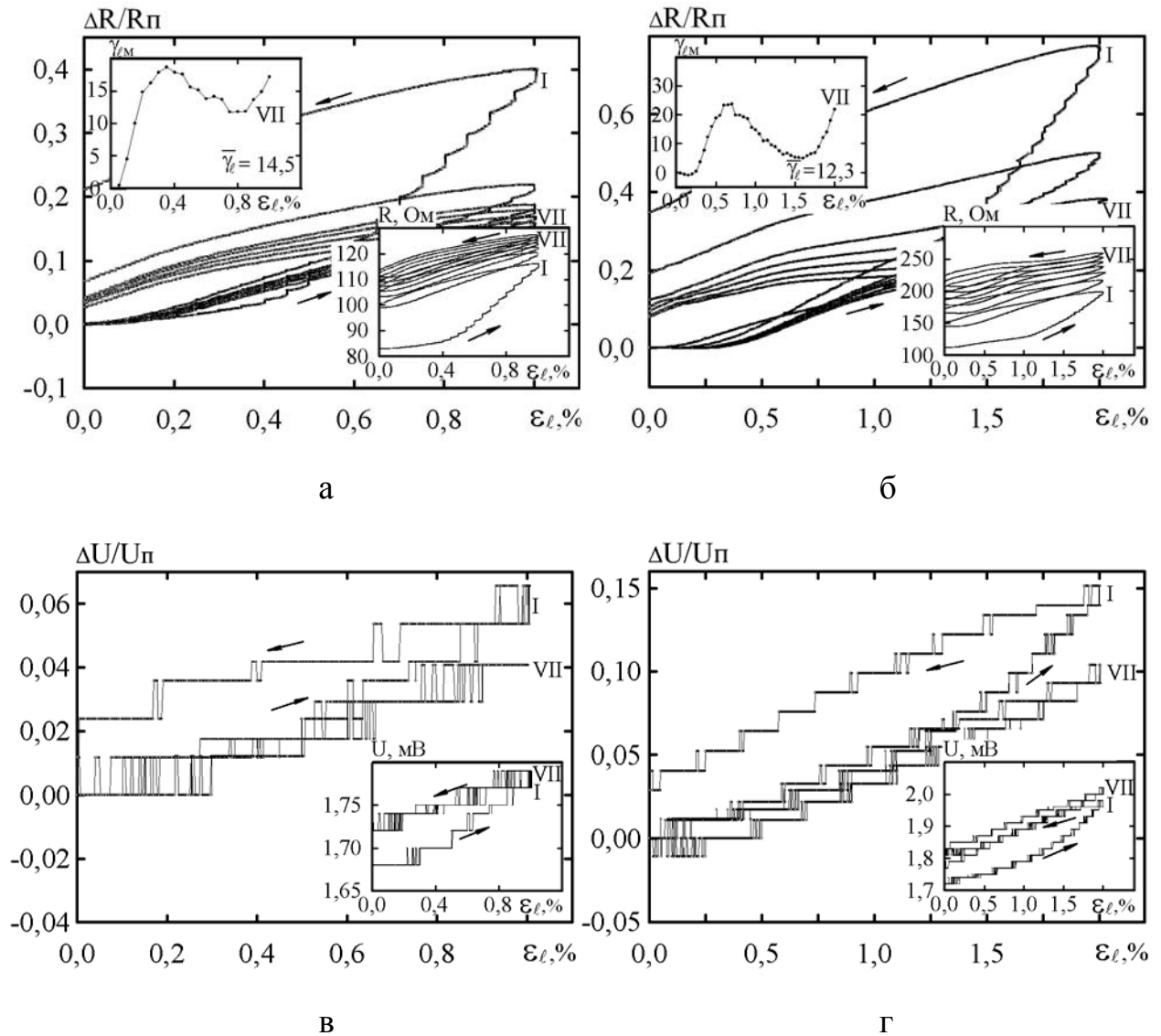


Рис. 4.5. Залежність  $R$ ,  $\Delta R/R_{\Pi}$  і  $\gamma_{\ell M}$  (а, б) та  $U$  і  $\Delta U/U_{\Pi}$  (в, г) від  $\varepsilon_{\ell}$  для плівкової системи Fe(20)/Cr(30)/Π при  $\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-1\%$  (а, в) і  $\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 0-2\%$  (б, г)

Таблиця 4.6

Залежність значень  $\bar{\gamma}_\ell$  від номера деформаційного циклу для плівкової системи Fe(70)/Cr(20)/П при різних значеннях діапазону деформації  $\Delta\varepsilon_\ell$

N <sub>ДЦ</sub>	$\Delta\varepsilon_\ell$						
	0-0,25%	0-0,5%	0-0,75%	0-1%	0-1,25%	0-1,5%	0-2%
I	11,82	23,26	24,43	23,83	23,15	25,09	30,42
II	4,98	12,00	17,14	19,62	-	-	19,96
III	4,69	10,53	16,22	18,87	-	-	15,29

феноменологічної моделі для плівкової системи типу біпластина, у випадку системи Fe/Cr/П дають узгодження не краще 30-40 %, що ще раз підтверджує, що дана система не задовольняє умові двошаровості і представляє собою одношарову гомогенну плівку твердого розчину ( $\alpha$ -Fe, Cr). Як результат цього, експериментальні результати для КТ значно краще (з точністю 15-20 %) узгоджуються із співвідношенням 1.2 для плівкового сплаву. Це говорить про недоцільність переходу до багатошарових плівкових систем із фрагментом Fe/Cr з точки зору підвищення величини КТ за рахунок розсіювання електронів на межах поділу, оскільки зі збільшенням загальної товщини плівкової системи у вигляді т.р. величина  $\gamma_\ell$  буде зменшуватися.

Межа переходу від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації для плівкової системи Fe/Cr, на відміну від двошарових плівкових зразків Cu/Cr, знаходиться у значно вужчому діапазоні деформацій від 0,15 до 0,4 % і збільшується зі збільшенням концентрації атомів Cr у плівковій системі. У таблиці 4.9 наведено значення величини деформації, при якій відбувається перехід пружна-пластична деформація, у залежності від концентрації атомів Cr у плівковій системі Fe/Cr.

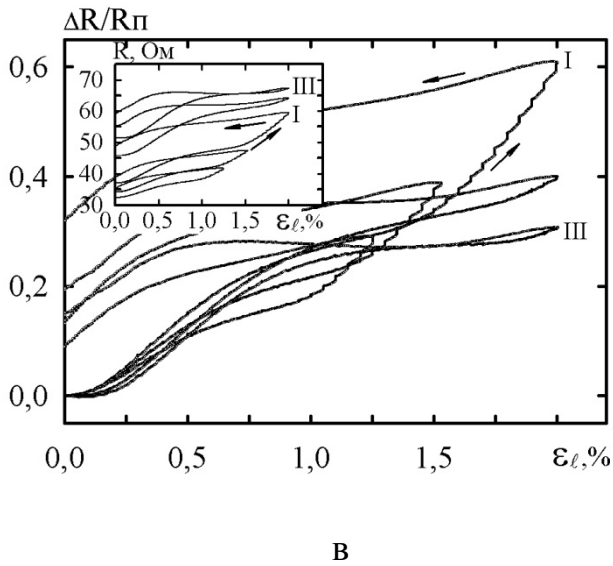
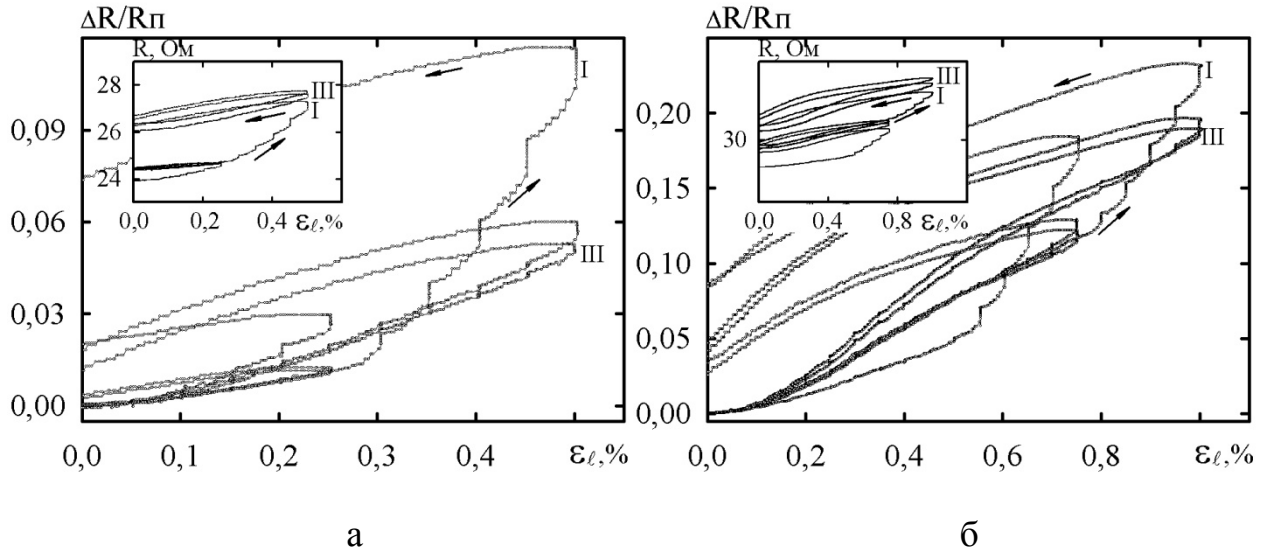


Рис. 4.6. Залежність  $\Delta R/R_{\pi}$  та  $R$  від  $\varepsilon_{\ell}$  по три деформаційні цикли для кожного з діапазонів деформації  $\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-0,25\%$ ;  $\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 0-0,5\%$  (а);  $\Delta\varepsilon_{\ell 3} = 0-0,75\%$ ;  $\Delta\varepsilon_{\ell 4} = 0-1\%$  (б) та  $\Delta\varepsilon_{\ell 7} = 0-2\%$  (в), а також по одному циклу для  $\Delta\varepsilon_{\ell 5} = 0-1,25\%$  та  $\Delta\varepsilon_{\ell 6} = 0-1,5\%$  (в) для плівкової системи Fe(70)/Cr(20)/Π

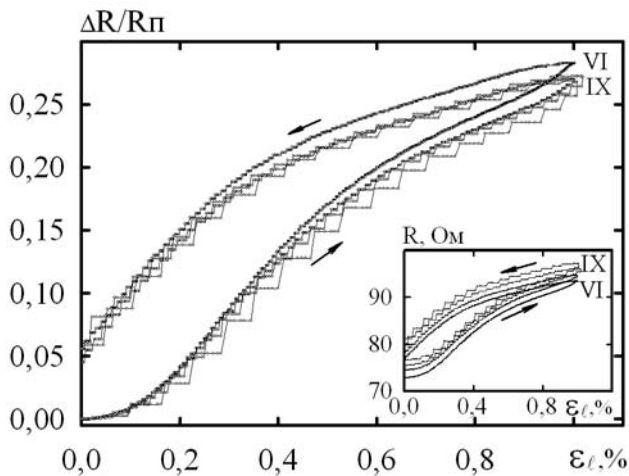


Рис. 4.7. Залежність  $\Delta R/R_{\pi}$  та  $R$  від  $\varepsilon_{\ell}$  для плівкової системи Fe(40)/Cr(30)/Π при  $\tau_{д}$  відповідно рівному 113; 47; 20 11 с

Таблиця 4.7

Порівняння значень  $\bar{\gamma}_\ell$  для плівкових систем Cu/Cr/П та Fe/Cr/П при I-му (чисельник) та VII-му (знаменник) деформаційних циклах

Плівкова система	Загальна товщина d, нм	Інтервал деформації	
		$\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-1 \%$	$\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 1-2 \%$
Cu(20)/Cr(5)	25	3,1/3,9	7,0/8,2
Cu(20)/Cr(10)	30	2,0/2,3	2,9/4,6
Cu(20)/Cr(15)	35	1,9/2,2	10,6/17,9
Cu(20)/Cr(20)	40	10,2/12,4	30,5/30,7
Cu(20)/Cr(30)	50	11,3/11,7	24,2/24,6
Cu(20)/Cr(35)	55	16,2/16,0	31,1/29,3
Cu(20)/Cr(45)	65	21,5/28,4	42,2/50,9
Fe(15)/Cr(20)	35	41,7/16,5	–
Fe(20)/Cr(30)	50	39,7/14,5	39,0/12,3
Fe(45)/Cr(30)	75	31,2/14,7	34,4/11,2
Fe(50)/Cr(30)	80	28,9/13,9	27,8/8,7

Таблиця 4.8

Значення  $\bar{\gamma}_\ell$  для різних деформаційних циклів при  $\Delta\varepsilon_\ell = 1 \%$  та порівняння його із  $\bar{\gamma}_\ell$  плівок Fe і Cr

Двошарова система	Загальна товщина, нм	Значення $\bar{\gamma}_\ell$ для різних деформаційних циклів при $\Delta\varepsilon_\ell = 1 \%$							$\frac{\bar{\gamma}_\ell^{Fe}}{\bar{\gamma}_\ell}$	$\frac{\bar{\gamma}_\ell^{Cr}}{\bar{\gamma}_\ell}$
		I	II	III	IV	V	VI	VII		
Fe(20)/Cr(30)/П	50	39,7	21,8	18,6	17,7	16,7	15,8	14,5	0,9	0,6
Fe(45)/Cr(30)/П	75	31,2	17,3	16,5	16,0	15,5	15,0	14,7	0,9	0,6
Fe(50)/Cr(30)/П	80	28,9	15,8	15,1	14,8	14,4	14,1	13,9	0,9	0,6

Таблиця 4.9

Залежність інтервалу межі переходу пружна-пластична деформація від концентрації атомів Cr у двошаровій плівці Fe/Cr

Плівкова система	$c_1$ , ат. %	$\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$ , %	$\mu_{\text{Fe/Cr}}$	$E_{\text{Fe/Cr}}$ , ГПа
Fe(70)/Cr(20)/П	0,23	0,15	0,3	219
Fe(50)/Cr(30)/П	0,37	0,25	0,3	224
Fe(45)/Cr(30)/П	0,40	0,30	0,3	225
Fe(40)/Cr(30)/П	0,43	0,30	0,3	226
Fe(20)/Cr(30)/П	0,59	0,40	0,3	231

#### 4.2.2. Особливості деформаційних залежностей і „правило важеля”

До особливостей деформаційних залежностей плівкової системи Fe/Cr можна віднести те, що I деформаційний цикл у переважній більшості відрізняється від подальших циклів (значення  $\bar{\gamma}_{\ell}$  більше, ніж на наступних циклах), надалі спостерігається стабілізація мікропластичних процесів з поступовим зменшенням величини КТ і деформаційні криві майже повторюють одна одну. Відмінність у величині КТ I циклу і подальших може складати до 50 %.

При дослідженні тензорезистивних властивостей плівкової системи Fe/Cr в області пластичної деформації слід відмітити, що обернені цикли йдуть вище прямих і при поверненні плівки у початковий стан ( $\varepsilon_{\ell} = 0$  %) спостерігається гістерезис залежності  $\Delta R/R_{\text{п}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$ . Саме з метою релаксації тензорезистивних властивостей плівки після кожного циклу деформації плівка перед початком кожного наступного циклу витримувалася у недеформованому стані 4 хв., що з наших спостережень було достатньо для повернення плівки у початковий стан.

Застосування „правила важеля” (формули 4.1 та 4.2), що використовувалося у роботі [116] для теоретичного розрахунку тензочутливості двошарової плівки Ni-Co, на прикладі двошарових плівок Fe/Cr та Cu/Cr дало наступні результати, які наведені у таблиці 4.10.

$$\gamma_{\ell} = c_1 \gamma_{\ell 1} + c_2 \gamma_{\ell 2}, \quad (4.1)$$

$$\gamma_{\ell} = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \gamma_{\ell 1} + \frac{d_2}{d_1 + d_2} \gamma_{\ell 2}. \quad (4.2)$$

Формула 4.1 використовувалася для теоретичного розрахунку величини  $\bar{\gamma}_{\ell}$  у випадку плівкового сплаву Fe/Cr, а формула 4.2 у випадку плівкової системи Cu/Cr. Теоретичний розрахунок величини  $\bar{\gamma}_{\ell}$  проводився з використанням експериментальних результатів  $\bar{\gamma}_{\ell}$  отриманих для одношарових плівок Fe, Cr та Cu. Новизна даного теоретичного дослідження полягає у тому, що поряд з порівнянням величини  $\bar{\gamma}_{\ell}$  для кожного деформаційного циклу було також проведено порівняння експериментальних та розрахункових значень для областей пружної та пластичної деформації.

З результатів, наведених у таблиці 4.10, можна зробити наступний висновок щодо узгодженості експериментальних та розрахункових значень величини  $\bar{\gamma}_{\ell}$  для двошарових плівок Fe/Cr та Cu/Cr. У випадку плівок Fe/Cr розбіжність експериментальних та розрахункових значень склала в середньому 26 %, у той час як для плівок Cu/Cr вона склала 50 %. Значно більше розходження експериментальних та розрахункових даних для плівкової системи Cu/Cr у порівнянні з Fe/Cr пов'язано значною відмінністю зовнішнього вигляду деформаційних залежностей  $R$ ,  $\Delta R/R_{\text{п}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$  для двошарових плівок Cu/Cr і одношарових плівок Cr. У першому випадку не спостерігається значної відмінності першого деформаційного циклу від подальших з тенденцією до зростання та стабілізації значень величини  $\bar{\gamma}_{\ell}$  з ростом деформаційних циклів, у той час як у другому випадку значення  $\bar{\gamma}_{\ell}$  у одношарових плівках Cr значно розходяться для I-го та подальших деформаційних циклів з тенденцією до зменшення значень  $\bar{\gamma}_{\ell}$  з ростом числа деформаційних циклів. Також другою причиною такого розходження експериментальних та розрахункових результатів є значна відмінність у величині значень  $\bar{\gamma}_{\ell}$  для двошарових плівок

Таблиця 4.10

Порівняння експериментальних та розрахункових значень  $\bar{\gamma}_l$  для двошарових плівок Fe/Cr та Cu/Cr з використанням „правила важеля”

N <sub>ДЦ</sub>	Fe(20)/Cr(30)		$\frac{\gamma_{\text{роз}} - \gamma_{\text{екс}}}{\gamma_{\text{екс}}}$	Fe(45)/Cr(30)		$\frac{\gamma_{\text{роз}} - \gamma_{\text{екс}}}{\gamma_{\text{екс}}}$	Cu(20)/Cr(30)		$\frac{\gamma_{\text{роз}} - \gamma_{\text{екс}}}{\gamma_{\text{екс}}}$	Cu(35)/Cr(55)		$\frac{\gamma_{\text{роз}} - \gamma_{\text{екс}}}{\gamma_{\text{екс}}}$
	екс	роз		екс	роз		екс	роз		екс	роз	
I	39,7	41,4	4,5	31,2	36,9	18,5	11,3	26,3	133,2	26,2	28,8	9,9
II	21,8	18,4	-15,7	17,3	17,3	-0,5	11,3	11,5	1,8	33,0	12,3	-62,9
III	18,6	15,6	-16,3	16,5	15,0	-9,0	11,8	9,5	-19,4	35,4	10,3	-70,8
IV	17,7	13,6	-23,2	16,0	13,6	-15,0	12,1	8,2	-31,6	37,4	9,3	-75,1
V	16,7	12,1	-27,4	15,5	12,3	-20,5	11,4	7,3	-36,1	39,0	8,6	-78,0
VI	15,8	11,1	-29,9	15,0	11,5	-23,0	11,6	6,6	-43,0	40,5	7,9	-80,4
VII	14,8	10,2	-31,0	14,7	11,0	-25,4	11,7	6,0	-48,7	41,8	7,5	-82,1
I <sup>HP</sup>	13,2	3,9	-70,2	15,3	5,5	-63,7	4,9	4,7	-5,1	14,2	5,9	-58,7
I <sup>HP</sup>	44,5	27,0	-39,2	44,1	25,9	-41,2	10,5	14,9	42,8	23,0	20,0	-12,9

Cu/Cr та одношарових Cu: у перших ця величина порядку десяти, а для других – одиниці. Порівняння експериментальних та розрахункових результатів величини  $\bar{\gamma}_\ell$  у плівках Cu/Cr та Fe/Cr для областей пружної і пластичної деформації також дало значну розбіжність експериментальних та розрахункових результатів.

Відповідно можна зробити висновок, що застосування „правила важеля” у значно більшій мірі підходить для плівок Fe/Cr, у яких розбіжність експериментальних та розрахункових значень склала в середньому 26 %, ніж для плівок Cu/Cr, для яких розбіжність склала у середньому 50 %.

#### 4.2.3. Особливості деформаційної залежності тензорезистивних параметрів та чутливості до деформації

Отримані експериментальні дані для двошарових плівок Fe/Cr дали можливість провести розрахунок, як і у Розділі 3, таких тензорезистивних характеристик, як СДВП в об’ємі масивного зразка; СДВП, яка лімітується межами зерна та її зміна при деформації; деформаційний коефіцієнт СДВП; коефіцієнти розсіювання  $R$  та проходження  $r$  електронами межі зерен, а також чутливість до деформації у залежності від концентрації атомів Cr в області як пружної, так і пластичної деформації. Розрахунок проводився на основі лінеаризованого співвідношення Тельє, Тоссе і Пішар [1]. Дане співвідношення дозволяє одержати параметри електроперенесення ( $\eta_{\lambda_{g\ell}}$  та  $\lambda_0$ ), якщо експериментальні результати побудувати у спрямляючих координатах  $\bar{\gamma}_\ell d$  від  $d$ :

$$\bar{\gamma}_\ell d \cong (\eta_{\lambda_{g\ell}} + 1)f(\alpha)d - \lambda_0(1 - p)[(\eta_{\lambda_{g\ell}} + 1)f(\alpha)H(\alpha) - (1 - \mu')U(\alpha)],$$

де  $H(\alpha)$  та  $U(\alpha)$  – відомі і протабульовані функції ( $H(0) = 0,370$  і  $H(10) = 0,022$ , та  $U(0) = 0,400$  і  $U(5) = 0,0045$ );



$\mu'$  – зведений коефіцієнт Пуассона  $\mu' = \mu_s(1 - \mu_s)(1 - \mu_f)^{-1}$  ( $\mu(\text{Fe}) = 0,3$ ;  $\mu(\text{Cr}) = 0,3$ ;  $\mu_s = 0,4$ );

$f(\alpha)$  – функція зерномежового розсіювання  $f(\alpha) = \rho_0 / \rho_\infty$  ( $\rho_0(\text{Fe}) = 0,098$ ;  $\rho_0(\text{Cr}) = 0,129 \cdot 10^{-6}$  Ом·м).

Виходячи з даних роботи [117], в якій протабульовані функції, можна визначити параметр  $\alpha$  і, відповідно, значення функцій  $H(\alpha)$  та  $U(\alpha)$ .

Побудовою експериментальної залежності  $\bar{\gamma}_\ell$  для плівкової системи Fe/Cr від загальної товщини системи ( $d_1 + d_2$ ) у спрямляючих координатах  $\bar{\gamma}_\ell d$  від  $d$  за тангенсом кута нахилу кривої визначався параметр  $\eta_{\lambda_{g\ell}}$  зі співвідношення

$$\eta_{\lambda_{g\ell}} = \frac{\text{tg} \varphi}{f(\alpha)} - 1, \text{ а за відрізком, що відсікає пряма по осі ординат, визначалася}$$

величина  $\lambda_0(1-p)$  виходячи зі співвідношення:

$$\lambda_0(1-p) = \frac{B}{(\eta_{\lambda_{g\ell}} + 1)f(\alpha)H(\alpha) - (1 - \mu')U(\alpha)}.$$

При дифузному наближенні коефіцієнт розсіювання електронів на поверхнях плівки може бути прийнятий рівним нулю. Значення  $\rho_\infty$  для одношарових плівок Fe і Cr та для плівкової системи Fe/Cr визначається екстраполяцією  $1/d \rightarrow 0$  ( $\rho_\infty(\text{Fe}) = 0,1 \cdot 10^{-6}$ ;  $\rho_\infty(\text{Cr}) = 0,5 \cdot 10^{-6}$  та  $\rho_\infty(\text{Fe/Cr}) = 0,25 \cdot 10^{-6}$  Ом·м). Розрахунок величин  $\rho_\infty(\text{Fe/Cr})$ ,  $\mu_f$  для плівкової системи Fe/Cr визначався за співвідношеннями:

$$\rho_\infty(\text{Fe/Cr}) = c(\text{Cr})\rho_\infty(\text{Cr}) + [(1 - c(\text{Cr}))\rho_\infty(\text{Fe})],$$

$$\mu(\text{Fe/Cr}) = c(\text{Cr})\mu(\text{Cr}) + [(1 - c(\text{Cr}))\mu(\text{Fe})].$$

Величина СДВП у об'ємі зерна  $\lambda_g$ , а також її зміна при деформації  $\Delta\lambda_g$  визначалися за співвідношеннями:

$$\lambda_g = \lambda_0(1-p)f(\alpha) \text{ та } \Delta\lambda_g = -\lambda_g\eta_{\lambda_g\ell}\Delta\varepsilon_\ell.$$

З метою порівняння тензорезистивних характеристик плівкової системи Fe/Cr в областях пружної та пластичної деформації будувалися залежності  $\bar{\gamma}_\ell$  від  $(d_1+d_2)$ , кожна з яких відповідає своїй області деформації (для області пружної деформації  $B = 960$ ,  $\text{tg}\varphi = 30,6$ , а пластичної –  $B = 2650$ ,  $\text{tg}\varphi = 90,03$ ). Розрахунок величини  $\bar{\gamma}_\ell$  проводився для областей пружної і пластичної деформації, при цьому розрахунковий діапазон  $\Delta\varepsilon_\ell$  складав по 0,2 % вліво і вправо від межі переходу  $\varepsilon_\ell^{\text{пер}}$ . При цьому слід відмітити, що у відповідності із роботою [22] величина коефіцієнта Пуассона для плівки в області пластичної деформації бралася рівною 0,5.

Коефіцієнти розсіювання та проходження електронів на межах зерен визначались за формулами:

$$\alpha = \frac{\lambda_g}{L} \frac{R}{1-R} \text{ та } \frac{R}{1-R} \cong 0,97 \ln\left(\frac{1}{r}\right)$$

для середнього розміру зерна плівкової системи Fe/Cr  $L \cong 30$  нм.

Результати розрахунку параметрів  $f(\alpha)$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda_0(1-p)$ ,  $\lambda_g$ ,  $\Delta\lambda_g$ ,  $\eta_{\lambda_g\ell}$ ,  $R$  та  $r$  у залежності від концентрації атомів Cr для областей пружної та пластичної деформації наведено у таблицях 4.11-4.14 (без врахування залежності  $\rho_\infty(\text{Fe/Cr})$  від концентрації таблиці 4.11 та 4.12 та з її врахуванням таблиці 4.13 та 4.14). Із отриманих даних витікає, що при переході від пружної до пластичної деформації параметри  $\lambda_0(1-p)$ ,  $\lambda_g$  та  $r$  зменшуються, у той час як параметри  $\Delta\lambda_g$ ,  $\eta_{\lambda_g\ell}$  і  $R$  збільшуються, що пояснюється впливом зміни чутливості до деформації і збільшенням ролі зерномежового і об'ємного розсіювання електронів, та зменшенням прозорості меж зерен.

Таблиця 4.11

Розрахункова залежність параметрів  $f(\alpha)$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda_0(1-p)$ ,  $\lambda_g$ ,  $\Delta\lambda_g$ ,  $\eta_{\lambda_g \ell}$ ,  $R$  і  $r$  від  $c(\text{Cr})$  в області пружної деформації для плівкової системи Fe/Cr

$c(\text{Cr})$	$f(\alpha)$	$\alpha$	$\lambda_0(1-p)$	$\lambda_g$ , нМ	$\Delta\lambda_g$ , нМ	$\eta_{\lambda_g \ell}$	$H(\alpha)$	$U(\alpha)$	$R$	$r$
0,0	0,4	1,1	97,1	38,1	-5,9	77,0	0,33	0,31	0,47	0,40
0,1	0,4	1,1	96,6	39,0	-5,8	74,6	0,33	0,32	0,45	0,43
0,2	0,4	1,0	95,7	39,9	-5,8	72,3	0,34	0,32	0,43	0,46
0,3	0,4	1,0	95,4	41,0	-5,8	70,2	0,34	0,32	0,41	0,48
0,4	0,4	0,9	94,6	41,8	-5,7	68,2	0,34	0,33	0,39	0,51
0,5	0,5	0,9	94,3	42,8	-5,7	66,3	0,34	0,33	0,38	0,54
0,6	0,5	0,8	93,8	43,7	-5,6	64,5	0,34	0,34	0,36	0,56
0,7	0,5	0,8	93,5	44,8	-5,6	62,8	0,34	0,34	0,34	0,59
0,8	0,5	0,7	93,3	45,8	-5,6	61,2	0,34	0,34	0,32	0,61
0,9	0,5	0,7	93,0	46,8	-5,6	59,7	0,35	0,34	0,31	0,63
1,0	0,5	0,7	92,7	47,9	-5,6	58,2	0,35	0,35	0,29	0,65

Таблиця 4.12

Розрахункова залежність параметрів  $f(\alpha)$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda_0(1-p)$ ,  $\lambda_g$ ,  $\Delta\lambda_g$ ,  $\eta_{\lambda_g \ell}$ ,  $R$  і  $r$  від  $c(\text{Cr})$  в області пластичної деформації для плівкової системи Fe/Cr

$c(\text{Cr})$	$f(\alpha)$	$\alpha$	$\lambda_0(1-p)$	$\lambda_g$ , нМ	$\Delta\lambda_g$ , нМ	$\eta_{\lambda_g \ell}$	$H(\alpha)$	$U(\alpha)$	$R$	$r$
0,0	0,4	1,1	89,7	35,1	-16,1	228,7	0,33	0,31	0,49	0,37
0,1	0,4	1,1	89,1	36,0	-16,0	221,6	0,33	0,32	0,47	0,40
0,2	0,4	1,0	88,3	36,8	-15,8	215,0	0,34	0,32	0,45	0,43
0,3	0,4	1,0	88,1	37,8	-15,8	208,8	0,34	0,32	0,43	0,45
0,4	0,4	0,9	87,3	38,6	-15,6	202,9	0,34	0,33	0,41	0,48
0,5	0,5	0,9	87,0	39,5	-15,6	197,3	0,34	0,33	0,39	0,51
0,6	0,5	0,8	86,5	40,4	-15,5	192,0	0,34	0,34	0,38	0,54
0,7	0,5	0,8	86,3	41,3	-15,5	187,0	0,34	0,34	0,36	0,56
0,8	0,5	0,7	86,0	42,3	-15,4	182,3	0,34	0,34	0,34	0,58
0,9	0,5	0,7	85,8	43,2	-15,4	177,8	0,35	0,34	0,33	0,61
1,0	0,5	0,7	85,5	44,1	-15,3	173,5	0,35	0,35	0,31	0,63

Таблиця 4.13

Розрахункова залежність параметрів  $f(\alpha)$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda_0(1-p)$ ,  $\lambda_g$ ,  $\Delta\lambda_g$ ,  $\eta_{\lambda_g l}$ ,  $R$  і  $r$  від  $c(\text{Cr})$  в області пружної деформації для плівкової системи Fe/Cr

$c(\text{Cr})$	$f(\alpha)$	$\alpha$	$\lambda_0(1-p)$	$\lambda_g$ , нМ	$\Delta\lambda_g$ , нМ	$\eta_{\lambda_g l}$	$H(\alpha)$	$U(\alpha)$	$R$	$r$
0,1	0,7	0,3	89,0	64,3	-5,3	41,3	0,36	0,38	0,1	0,9
0,2	0,6	0,5	91,2	52,8	-5,5	51,8	0,35	0,36	0,1	0,9
0,3	0,5	0,8	93,3	45,5	-5,6	61,7	0,34	0,34	0,2	0,8
0,4	0,4	1,0	95,7	40,6	-5,8	71,0	0,34	0,32	0,3	0,7
0,5	0,4	1,2	97,7	37,0	-5,9	79,8	0,33	0,30	0,3	0,6
0,6	0,3	1,4	99,8	34,2	-6,0	88,1	0,32	0,29	0,4	0,5
0,7	0,3	1,6	101,6	32,0	-6,2	96,1	0,32	0,27	0,4	0,5
0,8	0,3	1,8	103,8	30,4	-6,3	103,6	0,31	0,26	0,5	0,4
0,9	0,3	1,9	105,7	28,9	-6,4	110,7	0,30	0,25	0,5	0,4
1,0	0,3	2,1	106,5	27,5	-6,5	117,5	0,30	0,23	0,5	0,3

Таблиця 4.14

Розрахункова залежність параметрів  $f(\alpha)$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda_0(1-p)$ ,  $\lambda_g$ ,  $\Delta\lambda_g$ ,  $\eta_{\lambda_g l}$ ,  $R$  і  $r$  від  $c(\text{Cr})$  в області пластичної деформації для плівкової системи Fe/Cr

$c(\text{Cr})$	$f(\alpha)$	$\alpha$	$\lambda_0(1-p)$	$\lambda_g$ , нМ	$\Delta\lambda_g$ , нМ	$\eta_{\lambda_g l}$	$H(\alpha)$	$U(\alpha)$	$R$	$r$
0,1	0,7	0,3	82,0	59,2	-14,7	123,7	0,36	0,38	0,1	0,9
0,2	0,6	0,5	84,1	48,7	-15,1	154,5	0,35	0,36	0,1	0,9
0,3	0,5	0,8	86,0	42,0	-15,4	183,6	0,34	0,34	0,2	0,8
0,4	0,4	1,0	88,3	37,5	-15,8	211,0	0,34	0,32	0,3	0,7
0,5	0,4	1,2	90,2	34,1	-16,2	237,0	0,33	0,30	0,4	0,6
0,6	0,3	1,4	92,2	31,6	-16,5	261,5	0,32	0,29	0,4	0,5
0,7	0,3	1,6	93,9	29,6	-16,9	284,8	0,32	0,27	0,5	0,4
0,8	0,3	1,8	96,0	28,1	-17,2	306,9	0,31	0,26	0,5	0,4
0,9	0,3	1,9	97,8	26,8	-17,6	327,9	0,30	0,25	0,5	0,3
1,0	0,3	2,1	98,5	25,4	-17,7	348,0	0,30	0,23	0,6	0,3

По аналогії з пунктом 3.1.2 була розрахована чутливість до деформації плівкової системи Fe/Cr в області пружної та пластичної деформації. Результати розрахунків наведені у таблиці 4.15.

Таблиця 4.15

## Чутливість до деформації плівок Fe/Cr/П

Плівка	$S_{\text{пр}} = \left( \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon_{\ell}} \right)_{\text{пр}}$ Ом/%	$S_{\text{пласт}} = \left( \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon_{\ell}} \right)_{\text{пл}}$ Ом/%	$\left( \frac{S}{R} \right)_{\text{пр}}$	$\left( \frac{S}{R} \right)_{\text{пл}}$	$\frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{пр}}}$	$\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{пр}}}$
Fe(70)/Cr(20)/П	2,0	-	7,5	-	-	-
Fe(50)/Cr(30)/П	5,2	16,2	14,5	44,0	3,1	1,1
Fe(40)/Cr(30)/П	7,9	22,5	16,0	44,1	2,8	1,1
Fe(20)/Cr(30)/П	14,6	38,3	17,5	44,5	2,6	1,1

#### 4.2.4. Можливість застосування дво- і багатошарових плівкових систем Cu/Cr як чутливих елементів тензодатчиків

Плівкова система на основі Fe/Cr може виступати як ефективний матеріал для створення на її основі чутливих елементів тензодатчиків. До її переваг можна віднести доволі високі значення середнього коефіцієнту тензочутливості, які у деяких випадках можуть досягати значень у 50 і більше одиниць при деформації до 2 % (це також перевага даної плівкової системи у порівнянні з системою Cu/Cr). Перевага також полягає у тому, що у ній вже у процесі конденсації утворюється гранульований твердий розчин ( $\alpha$ -Fe, Cr), який може бути стабільним до 1800 К [118]. Одним із шляхів збільшення величини  $\gamma_{\ell}$  у даному випадку може бути перехід до плівкових систем, у яких реалізується стан зі спін-залежним розсіюванням електронів і зміна  $\gamma_{\ell}$  відбувається на основі зміни при деформації магнітоопору із ознаками чи наявністю гігантського магнітного опору. Окрім зазначеного, використання як

нижнього шару плівки Cr (як і у системі Cu/Cr) дозволяє забезпечити високу адгезію чутливого елемента тензодатчика до діелектричної підкладки.

Наведені результати дозволяють зробити висновок про можливість використання плівкових систем на основі  $\alpha$ -Fe і Cr як чутливих елементів тензодатчиків з великим ресурсом роботи при тензометрії в області пружної деформації при відносно високих температурах. Порівнюючи наші дані з даними роботи [119], у якій проводилося дослідження тензорезистивних властивостей полікристалічних плівок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})\text{Te}_3$  при статичних та циклічних деформаціях, відповідно до залежності величини  $\bar{\gamma}_\ell$  від номера деформаційного циклу, можна зробити висновок, що тензодатчики з чутливим елементом на основі Fe/Cr можуть бути застосовані як датчики накопичення втомлюваності конструкцій при тензометрії.

Також, якщо порівнювати величини  $\gamma_\ell$  вказаної плівкової системи з іншими плівковими матеріалами, що пропонуються авторами [42, 44-47, 120, 121] як чутливі елементи тензодатчиків, то в окремих випадках плівкова система Fe/Cr має перевагу з точки зору величини  $\bar{\gamma}_\ell$ . Так у плівках оксинітридів Ta, що розглядається у роботі [45] як високотемпературний датчик  $\bar{\gamma}_\ell \cong 3,0-3,5$  одиниць; у алмазних полікристалічних плівках [42]  $\bar{\gamma}_\ell \cong 40-50$  одиниць; у плівках  $\text{TaN}_x$  ( $x = 0,04-0,20$ )  $\bar{\gamma}_\ell$  змінюється від 3,4 ( $x \cong 0,04$ ) до 6 ( $x \cong 0,12$ ) одиниць, а при відпалюванні плівки  $\text{TaN}_{0,08}$  від 870 К до 1270 К  $\bar{\gamma}_\ell$  зменшується від 4,3 до 4,1 одиниць [44], що до певної міри відповідає нашим даним, отриманим в області пружної деформації.

### 4.3. Узагальнення експериментальних результатів для плівкових систем Cu/Cr і $\alpha$ -Fe/Cr

На завершення огляду експериментальних даних дослідження тензорезистивних властивостей одношарових плівок Cu, Cr і Fe та двошарових Cu/Cr і Fe/Cr хотілося б провести узагальнення отриманих результатів.

1. Характер деформаційних залежностей опору  $R$  та відносної зміни опору  $\Delta R/R_{\Pi}$  від деформації  $\varepsilon_{\ell}$  для одношарової плівки Cu та двошарової Cu/Cr відповідає типу деформаційної залежності наведеної на рис. 4.8 а. Даний тип залежності характеризується монотонним зростанням середнього значення величини КТ із ростом числа деформаційних циклів і відсутністю різкої відмінності I-го деформаційного циклу від подальших. У випадку одношарових плівок Fe і Cr та двошарової плівки Fe/Cr характер деформаційних залежностей відповідає типу залежності наведеному на рис 4.8 б і характеризується різкою (до 50 %) відмінністю I-го деформаційного циклу від подальших з монотонним зменшенням величини КТ з ростом числа деформаційних циклів .

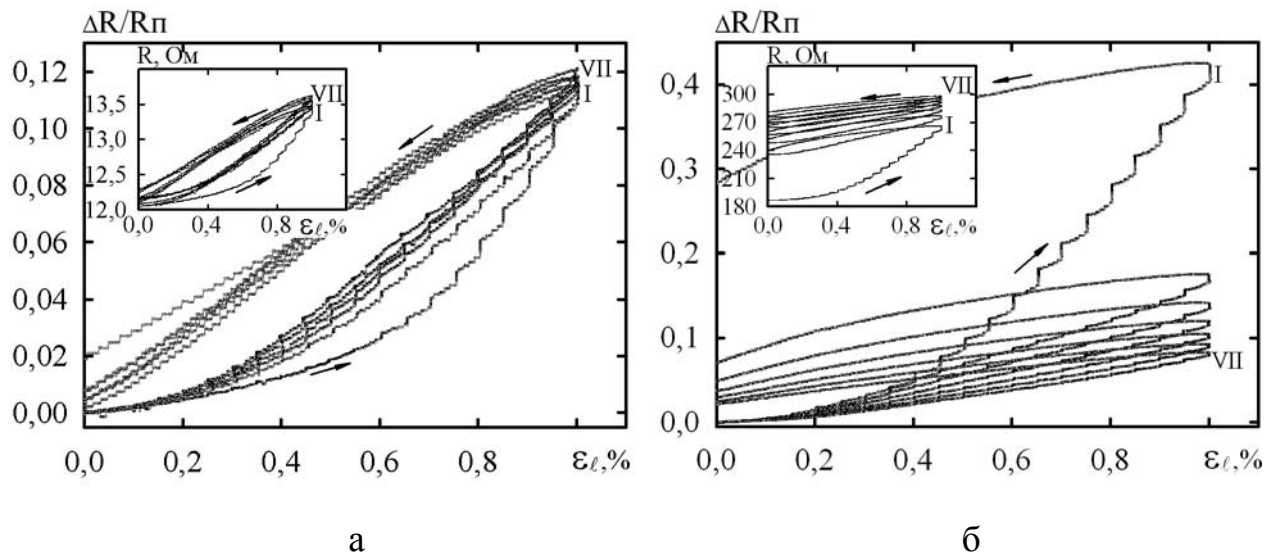


Рис. 4.8. Типовий вигляд деформаційних залежностей  $R$  та  $\Delta R/R_{\Pi}$  від  $\varepsilon_{\ell}$ , що відповідає плівкам Cu і Cu/Cr (а) та Fe, Cr і Fe/Cr (б)

2. Значення середньої величини КТ для одношарових плівок Cu знаходяться у межах від 1,5–1,3 для I-го до 2,6–1,4 для VII-го деформаційного циклу. При цьому, величина КТ зменшується з ростом товщини плівки. Для плівок Cr середній КТ знаходиться у межах від 42,3–47,5 до 8,2–13,3, з ростом товщини КТ зростає. Для плівок Fe середнє КТ у межах від 40,2–23,5 до 13,2–12,0, з ростом товщини КТ зменшується. Для двошарових плівок Cu/Cr КТ у більшості випадків знаходиться у межах від 10,2–21,5 до 12,4–28,5, величина КТ залежить від концентрації атомів Cr у загальній товщині плівкової системи і збільшується з ростом  $c(\text{Cr})$  при фіксованому значенні товщини шару Cu. Для двошарових плівок Fe/Cr КТ знаходиться у межах від 39,7–28,9 до 14,5–13,9, величина КТ залежить від концентрації атомів Fe у загальній товщині плівкової системи і зменшується з ростом концентрації атомів Fe при фіксованому значенні товщини шару Cr.

3. Величина деформації, при якій спостерігається перехід пружна-пластична деформація у одношарових плівках Cr знаходиться у межах від 0,2 до 0,1 % і зменшується з ростом товщини, а для одношарових плівок Fe від 0,1 до 0,4 % і зростає з ростом товщини плівки. Для двошарових плівок Cu/Cr межа переходу знаходиться у межах від 1,3 до 0,4 % і зменшується зі збільшенням  $c(\text{Cr})$ , а для двошарових плівок Fe/Cr від 0,15 до 0,40 і зростає зі збільшенням  $c(\text{Cr})$ . Для одношарових плівок Cu межа переходу знаходиться у діапазоні деформацій, що перевищує 2 %.

При цьому необхідно відмітити, що збільшення величини деформації, при якій відбувається перехід пружна-пластична деформація, впливає на середнє значення величини КТ при деформації у межах  $\Delta\varepsilon_\ell = 0-1\%$  і призводить до його зменшення.

4. У всіх випадках деформація плівкових зразків на атмосфері призводила до результату, наведеного на рис 4.9.



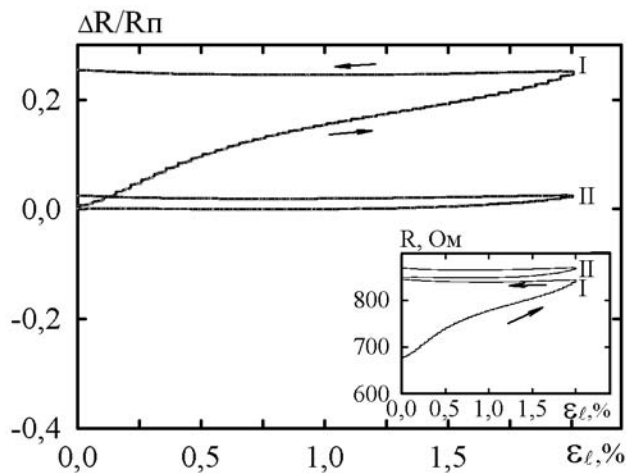


Рис. 4.9. Деформаційна залежність відносної зміни опору  $\Delta R/R_{\pi}$  та опору  $R$  від  $\varepsilon_{\ell}$ , отримана при дослідженні тензорезистивних властивостей на атмосфері

При цьому на I-му деформаційному циклі при нарощуванні деформації залежність повторювала попередні цикли деформації здійснені у вакуумі але обернений цикл йшов горизонтально без повернення тензорезистивних властивостей плівки у попередній стан. На наступних циклах величина КТ спадала до нуля і практично не реагувала на нарощення деформації.

5. Швидкість деформації зразка для усіх плівок виявила мінімальний вплив на значення величини КТ, а його відмінність для різних швидкостей деформації у межах 5 %, скоріш за все, може бути пояснена монотонною зміною величини КТ (зростанням або спаданням) з ростом числа деформаційних циклів.

6. Контроль структурної цілості плівкових зразків при деформації за допомогою світлового променя в усіх випадках давав або горизонтальну (для плівок Cu) або лінійну залежність  $U$  і  $\Delta U/U_{\pi}$  (в, г) від  $\varepsilon_{\ell}$ .

7. Поступове нарощення деформації з кроком у 0,25 % сприяло прискореному спрацюванню ресурсу плівкового тензодатчика.

#### Висновки до Розділу 4

1. При переході від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації спостерігається зміна характеру залежності відносної зміни опору плівки від деформації, що проявляється у нелінійній залежності  $\Delta R/R_{\pi}$  від  $\varepsilon_{\ell}$  та появі гістерезису.

2. Плівки Fe та Fe/Cr/P як чутливі елементи тензодатчиків мають стабільно високі значення  $\bar{\gamma}_\ell$  (від 40 для I-го деформаційного циклу до 14 для VII-го); значення  $\bar{\gamma}_\ell$  для перших деформаційних циклів у всіх випадках вищі, ніж для подальших з тенденцією до стабілізації значень  $\bar{\gamma}_\ell$  та повторюваності зовнішнього вигляду деформаційних кривих.

3. Поступове збільшення деформації з кроком 0,25 % дає величину КТ, близьку до величини КТ для плівки, одразу деформованої до 1 % або до 2 %, процес деформації якої вже стабілізувався, але разом з тим спостерігається пришвидшення спрацювання ресурсу її роботи, що говорить про однаковий характер релаксаційних процесів при двох способах деформації.

4. Експериментальні результати для КТ, що відповідають області пружної деформації, задовільно узгоджуються із теоретичним співвідношенням для плівкових сплавів.

5. Швидкість деформації у незначній мірі впливає на величину середнього коефіцієнта тензочутливості; так, при збільшенні  $\Delta\varepsilon_\ell/\Delta\tau_d$  у 100 разів величина КТ змінилась на 9 %.

6. У рамках відомих теоретичних моделей вперше здійснено розрахунок для плівок т.р. ( $\alpha$ -Fe, Cr), основних параметрів електроперенесення ( $\lambda_0$ ,  $\lambda_g$ ,  $\Delta\lambda_g$  і  $\eta_{\lambda_{g\ell}}$  та величин  $R$  і  $r$ ) в області пружної і пластичної деформації; отримано, що при переході від пружної до пластичної деформації параметри  $\lambda_0(1-p)$ ,  $\lambda_g$  та  $r$  зменшуються, у той час як параметри  $\Delta\lambda_g$ ,  $\eta_{\lambda_{0\ell}}$  і  $R$  збільшуються, що можна пояснити суттєвою зміною чутливості до деформації і збільшенням ролі зерномежового і об'ємного розсіювання електронів, а також зменшенням прозорості меж зерен.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вивчені фізичні процеси і особливості ефекту тензочутливості у двошарових плівкових системах Cu/Cr і Fe/Cr як чутливих елементів тензодатчиків, фазовий склад яких відповідає ОЦК Cr + ГЦК Cu (біпластина) та ОЦК твердий розчин ( $\alpha$ -Fe, Cr), в області пружної і пластичної деформації та отримані такі наукові і практичні результати:

1. Розроблена методика отримання та дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів за допомогою автоматизованої системи проведення експерименту, що може знайти подальше використання у варіанті віддаленої фізичної лабораторії.

2. Дослідження ефекту тензочутливості дозволили встановити таке:

- при переході від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації спостерігається зміна характеру залежності відносної зміни опору плівки від деформації; це проявляється у нелінійній залежності  $\Delta R/R_0$  від  $\epsilon$ , появи гістерезису та сходинок, що пояснюється зміною умов розсіювання електронів в об'ємі і на межах зерен, характеру деформації та зменшенням прозорості меж зерен;
- на значення величини деформації, при якій відбувається перехід від пружної до пластичної деформації у плівкових системах Cu/Cr та Fe/Cr, у значній мірі впливає концентрація атомів Cr, тобто загальна товщина плівкової системи;
- у плівках Cr, Fe та Fe/Cr величина КТ при I-му деформаційному циклі завжди більша від КТ при наступних циклах (але ця особливість з точністю до навпаки проявляється в одношарових плівках Cu та двошарових плівкових системах Cu/Cr), що можна пояснити дуже відмінною величиною чутливості до деформації плівок Cr, Fe і Cu; різним типом і концентрацією дефектів у них;
- значення середньої величини КТ для одношарових плівок Cu знаходяться у межах від 1,5–1,3 для I-го до 2,6–1,4 для VII-го деформаційного циклу, а для плівок Fe – від 40,2–23,5 до 13,2–12,0 і зменшуються з ростом товщини плівки, у той час як для плівок Cr середній КТ знаходиться у межах від 42,3–47,5 до

8,2–13,3 і з ростом товщини КТ зростає. Для двошарових плівок Cu/Cr КТ у більшості випадків знаходиться у межах від 10,2–21,5 до 12,4–28,5, величина КТ залежить від концентрації атомів Cr у загальній товщині плівкової системи і збільшується з ростом  $c(\text{Cr})$  при фіксованому значенні товщини шару Cu, а для двошарових плівок Fe/Cr – від 39,7–28,9 до 14,5–13,9 і залежить від концентрації атомів Fe у загальній товщині плівкової системи, зменшуючись з ростом концентрації атомів Fe при фіксованому значенні товщини шару Cr;

- величина деформації, при якій спостерігається перехід пружна-пластична деформація, у одношарових плівках Cr знаходиться у межах від 0,2 до 0,1 % і зменшується з ростом товщини, а для одношарових плівок Fe – від 0,1 до 0,4 % і зростає з ростом товщини плівки; для двошарових плівок Cu/Cr межа переходу знаходиться у межах від 1,3 до 0,4 % і зменшується зі збільшенням  $c(\text{Cr})$ , а для двошарових плівок Fe/Cr – від 0,15 до 0,40 і зростає зі збільшенням  $c(\text{Cr})$ . Для одношарових плівок Cu знаходиться у діапазоні деформацій, що перевищує 2 %;

- поступове збільшення деформації з кроком 0,25 % дає величину КТ, близьку до величини КТ для плівки, одразу деформованої до 1 % або до 2 %, процес деформації якої вже стабілізувався, але разом з тим спостерігається пришвидшення спрацювання ресурсу її роботи, що говорить про однаковий характер релаксаційних процесів при двох способах деформації;

- значне зростання величини  $\gamma_\ell$  (як і  $\bar{\gamma}_\ell$ ) при переході від пружної до пластичної деформації обумовлене різним ступенем чутливості при різних типах деформації; відношення  $S_{\text{пр}}/S_{\text{пл}}$  складає від 2 до 35 у залежності від загальної товщини плівки та концентрації у ній атомів Cr;

- швидкість деформації у межах від 140 до 20  $\text{с}^{-1}$  для усіх плівок виявила мінімальний вплив на значення величини КТ, а його відмінність для різних швидкостей деформації у межах 5 %, швидше за все, може бути пояснена монотонною зміною величини КТ (зростанням або спаданням) з ростом числа деформаційних циклів.

3. Робота чутливого елемента тензодатчика на атмосфері без додаткового захисту призводить до пришвидшення втрати його тензорезистивних властивостей;

- контроль структурної цілості плівкових зразків при деформації за допомогою світлового променя в усіх випадках давав або горизонтальну (для плівок Cu) або лінійну залежність  $U$  і  $\Delta U/U_{\text{п}}$  від  $\varepsilon_{\ell}$ .

4. На основі співвідношень для феноменологічної моделі КТ проведено порівняння експериментальних та розрахункових даних і встановлено, що експериментальні результати, що відповідають області пружної деформації, задовільно узгоджуються з феноменологічними теоретичними моделями для плівкової системи типу біпластина (Cu/Cr) та плівкового сплаву (т.р. ( $\alpha$ -Fe, Cr)), що пояснюється адекватністю теоретичних моделей і структурно-фазового складу плівок Cu/Cr і Fe/Cr.

5. Вивчено вплив деформації на величину таких параметрів електроперенесення як  $\lambda_0(1-p)$ ,  $\lambda_g$ ,  $\Delta\lambda_g$ ,  $\eta_{\lambda_g\ell}$ ,  $R$  і  $r$ , і зроблено висновок, що при переході від пружної до пластичної деформації параметри  $\lambda_0(1-p)$ ,  $\lambda_g$  та  $r$  зменшуються, у той час як параметри  $\Delta\lambda_g$ ,  $\eta_{\lambda_g\ell}$  і  $R$  збільшуються, що можна пояснити суттєвою зміною чутливості до деформації і збільшенням ролі зерномежового і об'ємного розсіювання електронів, а також зменшенням прозорості меж зерен.

## ПРИМІТКИ

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у співавторстві з Проценком І.Ю., Чешко І.В., Синашенко О.В., Проценком С.І. та Однодворець Л.В.

Проценко І.Ю. – запропонував тематику роботи; вніс визначний внесок у постановку усіх вирішених задач, приймав участь у обговоренні результатів та підготовці статей. Проценко С.І. – вніс значний внесок у розробку методики досліджень та реалізацію апаратно-програмного комплексу отримання та дослідження тензорезистивних властивостей тонких металевих плівок. Однодворець Л.В. – приймала участь у обговоренні результатів досліджень. Чешко І.В. та Синашенко О.В. допомагали при проведенні експериментальних досліджень.

Вважаю приємним своїм обов'язком висловити щиру подяку науковому керівнику Заслуженому діячу науки і техніки України, д-ру фіз.-мат. наук, проф. Проценку І.Ю. за вибір тематики, зацікавленість до роботи, постійну допомогу та підтримку. Також хочу подякувати канд. фіз.-мат. наук, доц. Проценку С.І. за консультації у постановці методики виконання експерименту, активну участь у обговоренні результатів, незмінний оптимізм та дружню підтримку. Я також виражаю щиру подяку всьому колективу кафедри прикладної фізики за моральну підтримку та активне обговорення результатів дисертаційної роботи на наукових семінарах.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Tellier C. R. Size effects in thin films / C. R. Tellier, A. J. Tosser. – Amsterdam-Oxford-New York: ESPS, 1982. – 309 p.
2. Шпак А. П. Кластерные и наноструктурные материалы / [А. П. Шпак, Ю. А. Куницкий, В. Л. Карбовский] – Киев: Академперіодика, 2001. – 587 с.
3. Шпак А. П. Введение в физику ультрадисперсных сред / [А. П. Шпак, В. В. Погосов, Ю. А. Куницкий] – Киев: Академперіодика, 2006, – 424 с.
4. Багмут А. Г. Формирование, естественное старение и отжиг аморфных и кристаллических лазерных конденсатов золота / А. Г. Багмут // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. – 2008. – № 6. – С. 65–79.
5. Азаренков Н. А. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии: Учебное пособие / [Н. А. Азаренков, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Л. В. Маликов, П. В. Турбин] – Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. – 209 с.
6. Bagmut A. G. Characterization of nanocrystals in laser condensates deposited through vanadium evaporation in an oxygen atmosphere / A. G. Bagmut, V. A. Zhuchkov, V. Yu. Kolosov, V. M. Kosevich, D. V. Melnichenko // Crystallography Reports. – 2006. – V. 51, Suppl. 1. – P. S150–S157.
7. Khater F. Temperature coefficient of the strain coefficient of electrical resistivity of double-layer thin metallic films / F. Khater, M. El-Hiti // phys. stat. sol. (a). – 1988. – V. 109, № 2. – P. 517–523.
8. Семенько М. П. Тензорезистивні ефекти в аморфних металевих сплавах / [М. П. Семенько, М. І. Захаренко, Ю. А. Куницький, А. П. Шпак] – Київ, 2009. – 74 с.
9. Захаренко М. І. Кореляції між електричним опором, його температурним коефіцієнтом та коефіцієнтом тензоопору в аморфних металевих стопах / М. І. Захаренко, М. П. Семенько // Металлофиз. новейшие технол. – 2008. – Т. 30, № 2. – С. 205–217.

10. Warkusz F. Electrical and mechanical properties of thin metal films: size effects / F. Warkusz // *Progr. Surface Sci.* – 1980. – V. 10, № 3. – P.287–382.
11. Кузьменко А. И. Эффект тензочувствительности в двухслойных пленках переходных металлов / А. И. Кузьменко, С. В. Петренко, И. Е. Проценко // *ВАНТ. Серия : Ядерно-физические исследования.* – 1990. – Вып. 2. – С. 87–89.
12. Забіла Є. О. Методика вивчення тензорезистивних властивостей плівок хрому при відносно малих і великих деформаціях / Є. О. Забіла, І. Ю. Проценко // *УФЖ.* – 2005. – Т. 50, № 7. – С. 729–736.
13. Вплив деформації та термообробки на електрофізичні властивості багат шарових плівкових систем / Д. Великодний, І. Пазуха, С. Проценко, І. Чешко // *Міжнародна конференція студентів і молодих науковців ЕВРИКА-2006.*– Львів: ЛНУ, 2006. – С. А39.
14. Однодворець Л. В. Кінетичні явища в багат шарових плівкових конденсатах на основі Cr, Co, Ni та Ge: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. ф.-м. наук: спец. 01.04.07 „фізика твердого тіла” / Л. В. Однодворець. – Суми, 1996. – 25 с.
15. Проценко С. І. Вплив температурної і деформаційної залежності параметрів електроперенесення на електрофізичні властивості багат шарових плівок на основі Cr, Cu і Sc(Co): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. ф.-м. наук: спец. 01.04.07 „фізика твердого тіла” / С. І. Проценко. – Харків, 2004. – 21 с.
16. Черноус А. М. Розмірні ефекти в електрофізичних властивостях нанокристалічних плівкових систем в умовах взаємної дифузії та фазоутворення: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. ф.-м. наук: спец. 01.04.07 „фізика твердого тіла” / А. М. Черноус. – Суми, 2006. – 37 с.
17. Проценко С. І. Дослідження і прогнозування тензорезистивних властивостей плівкових систем на основі Cr, Cu і Sc / С. І. Проценко, А. М. Черноус // *Металлофиз. новейшие технол.* – 2003. – Т. 25, № 5. – С. 587–601.



18. Dekhtyaruk L. Conductivity and temperature coefficient of resistance of multilayer polycrystalline films / L. Dekhtyaruk, I. Protsenko, A. Chornous [et al.] // *Cryst. Res. Technol.* – 2006. – V. 41, № 4. – P. 388–399;  
15а. Дехтярук Л. В. Эффект тензочувствительности в поликристаллических многослойных структурах общего типа – / Л. В. Дехтярук, С. И. Проценко, А. Н. Черноус // *Тонкие пленки в оптике и электронике: XV-й международный симпозиум.* – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2003. – С. 185–188.
19. Дехтярук Л. В. Транспортні розмірні ефекти у двошарових полікристалічних плівках / Л. В. Дехтярук, І. Ю. Проценко, А. М. Черноус // *Успехи физ. мет.* – 2007 – Т. 8, № 1. – С. 21-64.
20. Проценко С. І. Структурно-фазовий стан, стабільність інтерфейсів та електрофізичні властивості двошарових плівкових систем / С. І. Проценко, І. В. Чешко, Д. В. Великодний, О. П. Синашенко, Л. В. Однорець, І. М. Пазуха, І. Ю. Проценко // *Успехи физ. мет.* – 2007. – Т. 8, № 4. – С. 247–278.
21. Kuczynski G. C. Effect of elastic strain on the electrical resistance of metals / G. C. Kuczynski // *Phys. Rev.* – 1954. – V. 94, № 1. – P. 61–64.
22. Клокова Н. П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки / Н. П. Клокова. – Москва: Машиностроение, 1990. – 224 с.
23. Chiriac H. Ni-Ag thin films as strain-sensitive materials for piezoresistive sensors / H. Chiriac, M. Urse, F. Rusu [et al.] // *Sens. Actuat. A.* – 1999. – V. 76. – P. 376–380.
24. Lasyuchenko O. Microscopic theory of tensosensibility of multilayer polycrystalline films / O. Lasyuchenko, L. Odnodvoretz, I. Protsenko // *Cryst. Res. Technol.* – 2000. - V. 35, № 3. – P. 329–332.
25. Rajanna K. Strain sensitivity and temperature behavior of invar alloy films / K. Rajanna, M. M. Nayak // *Mater. Sci. Eng. B.* – 2000. – V. 77, № 3 – P. 288-292.
26. Kazi I. H. The electromechanical behavior of nichrome (80/20 wt.%) film / I. H. Kazi, P. M. Wild, T. N. Moore [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2003. – V. 433. – P. 337-343.

27. Jen S. U. Piezoresistance and electrical resistivity of Pd, Au, and Cu films / S. U. Jen, C. C. Yu, C. H. Liu [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2003. – V. 434, № 1. – P. 316–322.
28. Jen S. U. Piezoresistance characteristics of some magnetic and non-magnetic metal films / S. U. Jen, T. C. Wu, C. H. Liu // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2003. – V. 256, № 1. – P. 54–62.
29. Hrovat M. The influence of firing temperature on the electrical and microstructural characteristics of thick-film resistors for strain gauge applications / M. Hrovat, A. Bencan, D. Belavic [et al.] // *Sens. Actuat. A*. – 2003. – V. 103. – P. 341–352.
30. Hrovat M. Thick-film resistors on various substrates as sensing elements for strain-gauge applications / M. Hrovat, A. Bencan, D. Belavic [et al.] // *Sens. Actuat. A*. – 2003. – V. 107, № 3. – P. 261–272.
31. Забіла Є.О. Особливості тензочутливості в плівкових металах при великих статичних і динамічних деформаціях / Є. О. Забіла, І. В. Коплик, І. Ю. Проценко // *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка*. – 2003. – №10(56). – С. 63–70.
32. Finot M. Small and large deformation of thick and thin film multilayers: effects of layer geometry, plasticity and compositional gradients / M. Finot, S. Suresh // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1996. – V. 44, №5. – P. 683–721.
33. Ishida A. Stress-strain curves of sputtered thin films of Ti-Ni / A. Ishida, A. Takei, M. Sato [et al.] // *Thin Solid Films*. – 1996. – V. 281–282, № 1–2. – P. 337–339.
34. Coupeau C. Atomic force microscopy of in situ deformed nickel thin films / C. Coupeau, J. F. Naud, F. Cleymand [et al.] // *Thin Solid Films*. – 1999. – V. 353, № 1. – P. 194–200.
35. Huang H. Tensile testing of free-standing Cu, Ag and Al thin films and Ag/Cu multilayers / H. Huang, F. Spaepen // *Acta Mater.* – 2000. – V. 48. – P. 3261–3269.
36. Emery R. D. Tensile behavior of free-standing gold films. Part I. Coarse-grained films / R. D. Emery, G. L. Povirk // *Acta Mater.* – 2003. – V. 51. – P. 2067–2078.

37. Espinosa H. D. Plasticity size effects in free-standing submicron polycrystalline FCC films subjected to pure tension / H. D. Espinosa, B. C. Prorok, B. Peng // *J. Mech. Phys. Solids*. – 2004. – № 52. – P. 667–689.
38. Великодний Д. В. Тензорезистивні властивості двошарових плівкових систем Cu/Cr і Fe/Cr / Д. В. Великодний, С. І. Проценко, І. Ю. Проценко // *Металлофиз. новейшие технол.* – 2008. – Т. 30, № 12. – С. 1659–1666.
39. Однодворець Л. В. Ефект тензочутливості в металевих плівкових матеріалах / Л. В. Однодворець, С. І. Проценко, А. М. Чорноус, І. Ю. Проценко // *Успехи физ. мет.* – 2007. – Т. 8, № 2. – С. 109–156.
40. Deguchi M. Piezoresistive property of CVD diamond films / M. Deguchi, N. Hase, M. Kitabatake [et al.] // *Diamond Relat. Mater.* – 1997. – V. 6, № 2-4. – P. 367–373.
41. Gluche P. Application of highly oriented, planar diamond (HOD) films of high mechanical strength in sensor technologies / P. Gluche, M. Adamschik, A. Vescan [et al.] // *Diamond Relat. Mater.* – 1998. – V. 7, № 6. – P. 779–782.
42. Yamamoto A. Piezoresistive effect of CDV polycrystalline diamond films / A. Yamamoto, T. Tsutsumoto // *Diamond Relat. Mater.* – 2004. – V. 13. – P. 863–866.
43. Tang Y. Study of polycrystalline diamond piezoresistive position sensors for application in cochlear implant probe / Y. Tang, D. M. Aslam, J. Wang [et al.] // *Diamond Relat. Mater.* – 2006. – V. 15. – P. 199-202.
44. Alpuim P. Piezoresistive properties of nanocrystalline silicon thin films deposited on plastic substrates by Hot-Wire Chemical Vapor Deposition / P. Alpuim, M. Andrade, V. Sencadas [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2007. – V. 515, № 19. – P. 7658-7661.
45. Ayerdi I. Characterization of tantalum oxynitride thin films as high-temperature strain gauges / I. Ayerdi, E. Castano, A. Garcia-Alonso, F. J. Gracia // *Sens. Actuators A*. – 1995. – V. 46–47. – P. 218–221.
46. Chung G.-S. Characteristics of tantalum nitride thin film strain gauges for harsh environments / G.-S. Chung // *Sens. Actuators A*. – 2007. – V. 135. – P. 355–359.

47. Fu B. Tantalum nitride/copper nanocomposite with zero temperature coefficient of resistance / B. Fu, L. Gao // Scripta Mater. – 2006. – V. 55, № 6. – P. 521–524.
48. Aliyev M. I. Strain gauges of GaSbFeGa<sub>1.3</sub> eutectic composites / M. I. Aliyev, A. A. Khalilova, D. H. Arasly [et al.] // J. Appl. Phys. A. – 2004. – V. 79, № 8. – P. 2075–2078.
49. Cao J. Electromechanical Properties of Metallic, Quasimetallic, and Semiconducting Carbon Nanotubes under Stretching / J. Cao, Q. Wang, H. Dai // Phys. Rev. Lett. – 2003. – V. 90, № 15. – P. 157601-157604.
50. Dohn S. Multi-walled carbon nanotubes integrated in microcantilevers for application of tensile strain / S. Dohn, J. Kjelstrup-Hansen, D. N. Madsen [et al.] // Ultramicroscopy. – 2005. – V. 105. – P. 209–214.
51. Ханова Г. В. Розробка фізико-технологічних основ одержання плівок сульфіда самарію для тензорезисторів і дослідження їх параметрів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. ф.-м. наук: спец. 01.04.01 „фізика приладів, елементів і систем” / Г. В. Ханова. – Київ, 2000. – 15 с.
52. СМС –Тензо // <http://tenzo-sms.ru>.
53. Структура, дифузійні процеси і магніторезистивні та електрофізичні властивості плівкових матеріалів / [Проценко С. І., Чешко І. В., Однодворець Л. В., Пазуха І. М.]. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 197 с.
54. Дехтярук Л. В. Методика оцінки внеску інтерфейсного розсіювання на межі поділу шарів у величину питомого опору і термічного коефіцієнту опору плівок / Л. В. Дехтярук, І. М. Пазуха, І. Ю. Проценко // УФЖ. – 2006. – С. 729–733.
55. Проценко І. Ю. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості) / [І. Ю. Проценко, В. А. Саєнко.] – Суми: Вид-во СумДУ, 2002. – 187 с.
56. Однодворець Л. В. Электрофизические свойства двухслойных пленок Cu/Cr в условиях взаимной диффузии атомов / Л. В. Однодворець, С. И. Проценко, А. И. Салтыкова // Металлофиз. новейшие технол. – 1999. – Т. 21, № 8. – С. 71–74.

57. Baibich M. N. Magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr giant magnetic superlattices / M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 1998. – V. 61. – P. 2472–2475.
58. Конева Н. А. Физические причины высокой прочности ультразернистых материалов / Н. А. Конева, А. Н. Жданов, Э. В. Козлов // *Изв. РАН. Серия физическая.* – 2006. – Т. 70, № 4. – С. 577–580.
59. Бібик В. В. Дифузійні процеси в нанокристалічних двошарових плівкових системах на основі металів / В. В. Бібик, Т. М. Гричановська, М. Маршалек [та ін.] // *Металлофиз. новейшие технол.* – 2006. – Т. 28, № 6. – С. 707–715.
60. Библик В. В. Фазообразование и электрофизические свойства двух- и трехслойных пленок на основе переходных и благородных металлов / В. В. Библик Т. М. Гричановская, Л. В. Ордворец, И. В. Чешко, И. Е. Проценко // *Тонкие пленки в оптике и наноэлектронике: XVIII-й международный симпозиум.* – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. – С. 134–145.
61. Ласюченко О. Б. Фізичні процеси у тензодатчику на основі металеві плівки / О. Б. Ласюченко, І. Ю. Проценко, В. А. Хворост // *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка.* – 2001. – № 3(24)–4(25). – С. 58–66.
62. Бібик В. В. Дослідження методом ВІМС взаємної дифузії атомів у тонко плівковій системі Fe/Cr / В. В. Бібик, Л. В. Ордворець, І. О. Шпетний // *Вісник СумДУ.* – 2006. – № 9(93). – С. 31–94.
63. Волошко С. М. Исследование взаимной диффузии в тонкопленочной системе Cr-Cu-Ni-Au методом электронной оже-спектоскопии / С. М. Волошко, С. И. Сидоренко, И. Н. Макеева // *Металлофиз. новейшие технол.* – 1994. – Т. 16, № 10. – С. 61–68.
64. Parker R. L. Electrical resistance-strain characteristics of thin evaporated metal films / R. L. Parker, A. Krinsky // *J. Appl. Phys.* – 1963. – V. 34, № 9. – P. 2700–2708.
65. Licznarski B. W. Properties of discontinuous gold thin films deposited on a silicon substrate / B. W. Licznarski, A. Seweryn // *Int. J. Electronics.* – 1992. – V. 73, № 5. – P. 919–922.

66. Broitman E. Ion-plated discontinuous thin strain gauges / E. Broitman, R. Zimmerman // *Thin Solid Films*. – 1998. – V. 317. – P. 440–442.
67. Wang D. P. Electrical resistance of island-containing thin metal interconnects on polymer substrates under high strain / D. P. Wang, F. Y. Biga, A. Zaslavsky [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2005. – V. 98. – P. 086107-1–086107-3.
68. Witt G. R. The electromechanical properties of thin films and the thin films strain gauge / G. R. Witt // *Thin Solid Films*. – 1974. – V. 22. – P. 133–156.
69. Martin L. S. Thin film sensors for surface measurements / L. S. Martin, L. C. Wrbanek, G. C. Fralick // *Cleveland, Ohio, 2001*. – P. 1–7.
70. Angadi M. A. Longitudinal and transverse strain sensitivity of nichrome films / M. A. Angadi, R. Whiting // *Mater. Sci. Engin. B*. – 1990. – V. 7. – P. L1–L4.
71. Kayser P. High-temperature thin-film strain gauges / P. Kayser, J. C. Godefroy, L. Leca // *Sens. Actuat. A*. – 1993. – V. 37–38. – P. 328–332.
72. Li D. Giant stress-impedance effect in amorphous and thermally annealed  $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$  ribbons / D. Li, Z. Lu, S. Zhou // *Sens. Actuat. A*. – 2003. – V. 109. – P. 68–71.
73. Schultes G. Strain sensitivity of  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TiSi}_2$ ,  $\text{TaSi}_2$  and  $\text{WSi}_2$  thin films as possible candidates for high temperature strain gauges / G. Schultes, M. Schmitt, D. Goettel [et al.] // *Sens. Actuat. A*. – 2006. – V. 126. – P. 287–291.
74. Tankiewicz S. New thick-film material for piezoresistive sensors / S. Tankiewicz, B. Morten, M. Prudenziati [et al.] // *Sens. Actuat. A*. – 2001. – V. 95. – P. 39–45.
75. Arshak K. Fabrication of a thin-film strain-gauge transducer using  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-V}_2\text{O}_5$  / K. Arshak, R. Perrem // *Sens. Actuat. A*. – 1993. – V. 36. – P. 73–76.
76. Гричановська Т. М. Електропровідність і тензочутливість плівкових оксидів металів / Т. М. Гричановська, В. А. Соломаха, А. М. Чорноус // *Електронна техніка та сучасні інформаційні технології : 1-а науково-технічної конференції з міжнародною участю: мат. котнф.* – Кременчук: ІЕНТ, 2004. – С. 46–47.

77. Gregory O. J. An apparent n to p transition in reactively sputtered indium-tin-oxide high temperature strain gages / O. J. Gregory, Q. Luo, J. M. Bienkiewicz [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2002. – V. 405. – P. 263–269.
78. Arshak A. Investigation of TiO<sub>2</sub> thick film capacitors for use as strain gauge sensors / A. Arshak, K. Arshak, D. Morris [et al.] // *Sens. Actuat. A*. – 2005. – V. 122. – P. 242–249.
79. Li J. Interdigital capacitive strain gauge fabricated by direct-write thermal spray and ultrafast laser micromachining / J. Li, J. P. Longtin, S. Tankiewicz [et al.] // *Sens. Actuat. A*. – 2007. – V. 133, № 1. – P. 1–8.
80. Lichtenwalner D. J. Flexible thin film temperature and strain sensor array utilizing a novel sensing concept / D. J. Lichtenwalner, A. E. Hydrick, A. I. Kingon // *Sens. Actuat. A*. – 2007. – V. 135, № 2. – P. 593–597.
81. Hrovat M. Characterization of thick resistor series for strain sensors / M. Hrovat, D. Belavic, Z. Samardzija // *J. Europ. Ceram. Soc.* – 2001. – V. 21. – P. 2001–2004.
82. Hrovat M. A characterisation of thick film resistors for strain gauge applications / M. Hrovat, D. Belavic, Z. Samardzija [et al.] // *J. Mater. Sci.* – 2001. – V. 36. – P. 2679–2689.
83. Cao G. Strain sensing of carbon nanotubes: Numerical analysis of the vibrational frequency of deformed single-wall carbon nanotubes / G. Cao, X. Chen, J. W. Kysar // *Phys. Rev. B*. – 2005. – V. 72. – P. 195412-1–195412-6.
84. Belavic D. Vertical thick-film resistors as load sensors / D. Belavic, M. Hrovat, M. Pavlin // *J. Europ. Cer. Soc.* – 2001. – V. 21. – P. 1989–1992.
85. Loffler F. Manganin thin film sensor for force sensing / F. Loffler, C. Siewert, C. Ascher // *Sur. Coating Technol.* – 2003. – V. 174–175. – P. 1287–1292.
86. Stephen R. J. Thin-film strain gauge sensors for ion thrust measurement / R. J. Stephen, K. Rajanna, V. Dhar [et al.] // *IEEE Sens. Journal*. – 2004. – V. 4, № 3. – P. 373–377.
87. Amor A. V. A magnetoelastic microtransformer – based misrostrain gauge / A. V. Amor, T. Budde, H. H. Gatzzen // *Sens. Actuat. A*. – 2006. – V. 129. – P. 41–44.

88. Забіла Є.О. Фізико-механічні процеси у тонкоплівковому тензорезисторі / Забіла Є. О., Проценко І. Ю. // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2005. – № 4(76). – С. 108–124.
89. Industrial PC to you. Устройства удаленного и распределенного сбора данных и управлени // <http://www.ipc2u.ru/catalog/Q/Q4/11115.html>.
90. Мищенко С. В. Автоматизация измерений, контроля и испытаний / [С. В. Мищенко, А. Г. Дивин, В. М. Жилкин, С. В. Пономарев, А. Д. Свириденко.]. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007. – 116 с.
91. Асинхронные двигатели: методы подключения расчет // [http://www.eprivod.ru/public\\_async.htm](http://www.eprivod.ru/public_async.htm).
92. Трэвис Дж. LabVIEW для всех / [Дж. Трэвис, Дж. Кринг] – Москва: ДМК, 2008 – 880 с.
93. Блюм П. LabVIEW: стиль программирования / П. Блюм. – Москва: ДМК, 2009. – 400 с.
94. Великодний Д. В. Застосування програмно-апаратних засобів у фізичному експерименті / Д. В. Великодний, С. І. Проценко // Науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету Сумського державного університету, 18-29 кв. 2005 р. : тези доп. – Суми: СумДУ, 2005. – С. 133.
95. Великодний Д. В. Автоматизована система вакуумного наплення / Д. В. Великодний // Науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету Сумського державного університету, 21-24 кв. 2008 р. : тези доп. – Суми: СумДУ, 2008. – С. 130–131.
96. Великодний Д. В. Тензоэффект в двухслойных пленках Cu/Cr и Fe/Cr / Д. В. Великодний, С. И. Проценко, И. Е. Проценко // ФИП. – 2008. – Т. 6, № 1-2. – С. 37–42.
97. Ценцера О. О. Автоматизована система вакуумної конденсації плівок / О. О. Ценцера, Д. В. Великодний // Науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету електроніки



- та інформаційних технологій Сумського державного університету, 21-24 кв. 2009 р. : Мат. конф. – Суми: СумДУ, 2009. – С. 54.
98. Derhgawen A. Computer controlled stepper motor // <http://blogs.msdn.com/coding4fun/archive/2007/11/02/5848155.aspx>.
99. Великодний Д. В. Автоматизация процесса исследования тензорезистивных свойств тонкопленочных материалов / Д. В. Великодний, С. И. Проценко // Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития: II-я международная научная конференция, 2-5 окт. 2007 г. : мат. конф. – Харьков-Туапсе: ХНУРЕ, 2007. – С. 164-165.
100. Великодний Д. В. Тензорезистивные свойства двухслойных пленок Cu/Cr в области пластической деформации / Д. В. Великодний, А. И. Кучма, С. И. Проценко // Тонкие пленки в оптике, наноптонике и нанoeлектронике : XIX-й международного симпозиум : Мат. симпоз. – Харьков: ХФТИ, 2007. – С. 124–126.
101. Protsenko S. I. Electrophysical properties of Cu/Cr and Fe/Cr film systems within elastic and plastic deformation range / S. I. Protsenko, D. V. Velykodnyi, V. A. Kheraj, M. S. Desai, C. J. Panchal, I. Yu. Protsenko // J. Mater. Sci. – 2009. – V. 44, № 18. – P. 4905-4910.
102. Новиков А. В. Основы физики полупроводниковых приборов // [http://avnsite.narod.ru/physic/pp/teor\\_p10](http://avnsite.narod.ru/physic/pp/teor_p10).
103. Великодний Д. В. Тензорезистивные свойства многослойных пленок на основе хрома и железа или никеля и ванадия / Д. В. Великодний, Т. М. Гричановская, Л. В. Ордодворец, Ч. Панчал, И. Е. Проценко // ФММН-2008: Международная научная конференция Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур, 8-10 окт. 2008 г. : сб. науч. трудов. – Харьков: НФТЦ МОН и НАН Украины, 2008. – С. 90-92.

104. Проценко С. И. Методика разделения вклада зернограничного и поверхностного рассеяния в величину удельного сопротивления и ТКС металлических пленок / С. И. Проценко, А. Н. Черноус // ВАНТ. Серия Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 1999. – Вып. 2(10). – С. 107–109.
105. Lee H.-J. Tensile failure by grain thinning in micromachined aluminum thin films / H.-J. Lee, P. Zhang, J. C. Bravman // J. Appl. Phys. – 2003. – V. 93, № 3. – P. 1443–1451.
106. Бурик І. П. Деякі особливості тензорезистивного ефекту в металевих дріотах при їх пластичній деформації / І. П. Бурик, Д. В. Великодний, Л. В. Олгодворець, І. Ю. Проценко, Н. І. Шумакова // ФХТТ. – 2006. – Т. 7, № 2. – С. 241–244.
107. Великодний Д. В. Тензочутливість металевих плівок: теоретичні моделі, експериментальні результати, застосування (огляд) / Д. В. Великодний, Т. М. Гричановська, Л. В. Олгодворець, І. Ю. Проценко, С. І. Проценко // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2007. – № 1. – С. 5–51.
108. Великодний Д. В. Особливості тензорезистивних властивостей нанорозмірних плівок Cu/Cr при великій кількості деформаційних циклів / Д. В. Великодний, М. Г. Демиденко, С. І. Проценко // Фізичні явища в твердих тілах: матеріали 8-ї Міжнародної конференції, 11-13 гр. 2007 р. : мат. конф. – Харків: ХНУ ім. В.Н.Каразіна, 2007. – С. 72.
109. Великодний Д. В. Тензорезистивні властивості двошарових плівок Cu/Cr в області пружної і пластичної деформації / Д. В. Великодний, І. Ю. Проценко // НАНСИС 2007: нанорозмірні системи будова-властивості-технології, 21-23 лист. 2007 р. : тези конф. – Київ: НАН України, 2007. – С. 389.

110. Великодний Д. В. Тензорезистивные свойства пленочных систем Cu/Cr и Fe/Cr в области упругой и пластической деформации / Д. В. Великодний, Н. И. Шумакова, В. В. Спильнык, И. Е. Проценко // Современные информационные и электронные технологии: 9-я Международная научно-практическая конференция, 19-23 мая 2008 г. : науч. труды. – Одесса: ОНПУ, 2008. – С. 145.
111. Білінський Є. А. Тензорезистивні властивості двошарових плівок Cu/Cr і Fe/Cr / Є. А. Білінський, Д. В. Великодний, Н. І. Шумакова // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.: 12-й Міжнародний молодіжний форум, 1-3 кв. 2008 р. : зб. мат. форуму Ч.1. – Харків: ХНУРЕ, 2008. – С. 271.
112. de Vries J. W. Influence of interface scattering on the resistance of polycrystalline Au/Pd multilayered thin films / J. W. de Vries, F. J. A. Broeder / J. Phys. F: Met. Phys. – 1988. – V. 18, № 12. – P. 2635–2674.
113. Пазуха І. М. Фізичні процеси в чутливих елементах датчиків температури, деформації і тиску: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. ф.-м. наук: спец. 01.04.01 „фізика приладів, елементів і систем” / І. М. Пазуха. – Суми, 2009. – 24 с.
114. Великодний Д. Тензоефект в плівках Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації / Д. Великодний, Н. Шумакова // ЕВРИКА-2008: міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики, 19-21 тр. 2008 р. : тези доп. – Львів: ЛНУ, 2008. – С. С4.
115. Odnodvoretz L. Electrophysical properties of Ni/V and Cr/Fe multilayer films / L. Odnodvoretz, S. Protsenko, O. Synashenko, D. Velykodnyi, I. Protsenko // Cryst. Res. Technol. – 2009. – V. 44, № 1, 1-6. – P. 74–81.
116. Kravchenko V. A. Structure and electrophysical properties of Ni-Co alloy films within 300-1300 K temperature range / V. A. Kravchenko, V. B. Loboda, I. Yu. Protsenko, A. I. Saltykova // Functional materials – 1999. – V. 6, № 5. – P. 892–896.

117. Лобода В. Б. Исследование электрических свойств тонких пленок хрома и скандия / В. Б. Лобода, И. Е. Проценко, В. Г. Шамомя // УФЖ. – 1982. – № 9. – С. 1343–1349.
118. Лякишева Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем Т. 2 / Под ред. Лякишева Н. П. – Москва: Машиностроение, 1997. – 1024 с.
119. Султонов Ш. Д. Влияние циклических деформаций на электрофизические характеристики поликристаллических пленок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  / Ш. Д. Султонов, Н. Х. Юлдашев // ФИП. – 2009. – Т. 7, № 1-2. – С. 99–103.
120. Rieger G. GMR Sensors for contactless position detection / G. Rieger, K. Ludwig, J. Hauch, W. Clemens // Sens. Actuat. A. – 2001. – V. 91. – P. 7–11.
121. Dokupil S. Positive/negative magnetostrictive GMR trilayer systems as strain gauges / S. Dokupil, M.-T. Bootsmann, S. Stein, M. Lohndorf [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2005. – № 290-291. – P. 795–799.