

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,  
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра  
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕНЗОМЕТРІЇ**

Магістрант гр. ЕПм-82

М. М. Харченко

Науковий керівник,  
д-р фіз.-мат. наук, професор

І. Ю. Проценко

Завідувач кафедри ЕЗПФ  
д-р фіз.-мат. наук, професор

І. Ю. Проценко

Суми – 2019

## РЕФЕРАТ

Мета роботи полягає у освоєнні експериментальних і теоретичних основ тензометрії.

При виконанні роботи використовувалися методи термовакuumного випарування і тензометрії та прилади (вакуумна установка типу ВУП-5М, прилад УТ 39А).

У кваліфікаційній роботі розглянуті питання щодо явища тензочутливості, яке широко застосовується при тензометрії деформацій різного типу. На тензорезистивному ефекті в масивних і плівкових матеріалах побудовані датчики деформації (тензодатчики). Коефіцієнт тензочутливості металевих тензодатчиків має величину від 1 до 10 одиниць.

У результаті проведених досліджень встановлено, що коефіцієнти поздовжньої тензочутливості при деформації тонких одношарових плівок Cu та Ag (одержаних методом термічного випарування у вакуумній установці ВУП-5М) на розтяг до 1% становлять відповідно  $KT_H = 25,9$  та  $KT_{3H} = 25,2$  при  $\Delta\varepsilon_{l1} = (0-1) \%$ . при  $\Delta\varepsilon_{l1} = (0-1) \%$  (для Cu) і  $KT = 1,8$  при  $\Delta\varepsilon_{l1} = (0-1) \%$  та  $KT = 3,0$  при  $\Delta\varepsilon_{l2} = (0-2) \%$  (для Ag).

Робота викладена на 33 сторінках, у тому числі включає 15 рисунків, 3 таблиці, список цитованої літератури із 13 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ТЕНЗОЧУТЛИВІСТЬ, ТЕНЗОМЕТРІЯ, ТЕНЗОДАТЧИК, КОЕФІЦІЄНТ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ, ТОНКА ПЛІВКА.

## ЗМІСТ

	С.
<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1 ТЕНЗОЧУТЛИВІСТЬ У ТОНКИХ ПЛІВКАХ</b> .....	6
1.1. Явище тензочутливості .....	7
1.2. Коефіцієнти тензочутливості одно- і багатошарових плівок .....	11
1.2.1. Коефіцієнти тензочутливості одношарових плівок .....	11
1.2.2 Коефіцієнти тензочутливості багатошарових плівок .....	19
<b>РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕНЗОЧУТЛИ-</b> <b>ВОСТІ</b> .....	22
2.1. Особливості розрахунків коефіцієнтів тензочутливості .....	22
2.2. Експериментальне обладнання для вимірювання коефіцієнтів тензочутливо- сті .....	25
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	31
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	32

## ВСТУП

Тензорезистивний ефект — це фізичний ефект, пов'язаний зі зміною електричного опору матеріалів під впливом їх деформації. Одним з основних параметрів тензоефекта є коефіцієнт тензочутливості, який використовується для кількісної оцінки тензорезистивного ефекту. Цей коефіцієнт визначається як відносна зміна опору від деформації.

Явище тензочутливості використовується при створенні датчиків сили, тиску (у тому числі для роботи у рідких і газових середовищах, в умовах підвищеної вологості, при наявності вібрації, ударів, перевантажень і т. д), акселерометрів (сенсорів вимірювання прискорення), датчиків переміщення і т.д. У перерахованих датчиках сигнал формується за рахунок деформації тензорезистивного перетворювача електронної схеми, в результаті тензорезистивного ефекту опір резисторів, які входять в дану схему, змінюється і в залежності від типу датчика з'являється електричний сигнал пропорційний вимірюваній величині. Інше використання даного фізичного ефекту, це термокомпенсація температурного коефіцієнта опору (ТКО) в прецизійних металлофольгових резисторах. У цих резисторах тензорезистивний ефект виникає через різницю температурних коефіцієнтів розширення підкладки і резистивної фольги, що дозволяє за рахунок підбору матеріалів компенсувати ТКО вихідного резистивного матеріалу [1-4].

Теоретичні дослідження розмірного ефекту (PE) в тензочутливості одношарових металевих плівок Ф. Варкуша і К. Тельє, К. Пішар та А. Тоссе і порівняння їх результатів з експериментом показало добре узгодження. PE в тензочутливості двота багатшарових плівкових системах описують моделі Р. Дімміха, Ф. Катера і М. Ель-Гіті, напівфеноменологічна та ін., побудовані на основі теорії Майадаса і Шатцкеса [5].

Метою роботи є освоєння експериментальних і теоретичних основ тензометрії.

## РОЗДІЛ 1

### ТЕНЗОЧУТЛИВІСТЬ У ТОНКИХ ПЛІВКАХ

#### 1.1. Явище тензочутливості

Тензометрія — це сукупність експериментальних методів визначення напружено-деформованого стану матеріалу елементів конструкції. Методи тензометрії засновані на вивченні та вимірюванні деформації. Вони поділяються на рентгенівські методи; поляризаційно-оптичні методи; метод муарових смуг; метод крихких покриттів; метод гальванічних покриттів; методи, що засновані на масштабному перетворенні деформацій поверхні об'єкта за допомогою тензометрів та тензоперетворювачів (з використанням механічних, оптичних, струнних (акустичних) та електричних тензометрів) [6].

Тензорезистивний ефект (тензоефект) – це властивість твердих матеріалів змінювати при деформації свій електричний опір. При цьому вважається, що опір провідника або напівпровідника залежить (при незмінному об'ємі) від його довжини. На цьому ефекті заснований принцип дії тензорезистора [6].

У плівкових матеріалах значний внесок у величину коефіцієнта тензочутливості дає зерномежове розсіювання електронів, що обумовлює величину коефіцієнта поздовжньої тензочутливості ( $\gamma_l$ ) до декількох десятків одиниць. Цей механізм розсіювання приводить до зменшення середньої довжини вільного пробігу ( $\lambda_0$ ) і відповідне її збільшення за рахунок збільшення розмірів кристалітів [7].

Як було сказано вище, тензоефект застосовується в ряді сенсорів та інших пристроїв (мікрофонів, гідрофонів, і т.п.). Характерною рисою сучасної плівкової сенсорики є використання багатокomпонентних тензорезисторів. Їх особливістю є багатofункціональність та можливість застосування в різних видах конструкцій (рис.1.1). Прикладом таких пристроїв є терморезистори на основі  $\text{Pd}_{0,87}\text{Cr}_{0,13}$  (рис. 1.2), які є стабільними і високотемпературними, оскільки в інтервалі температур 300—1320 К  $\gamma_l$  зменшується лише на 22%, тобто  $\beta_{\gamma_l} = -2,1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  [8].

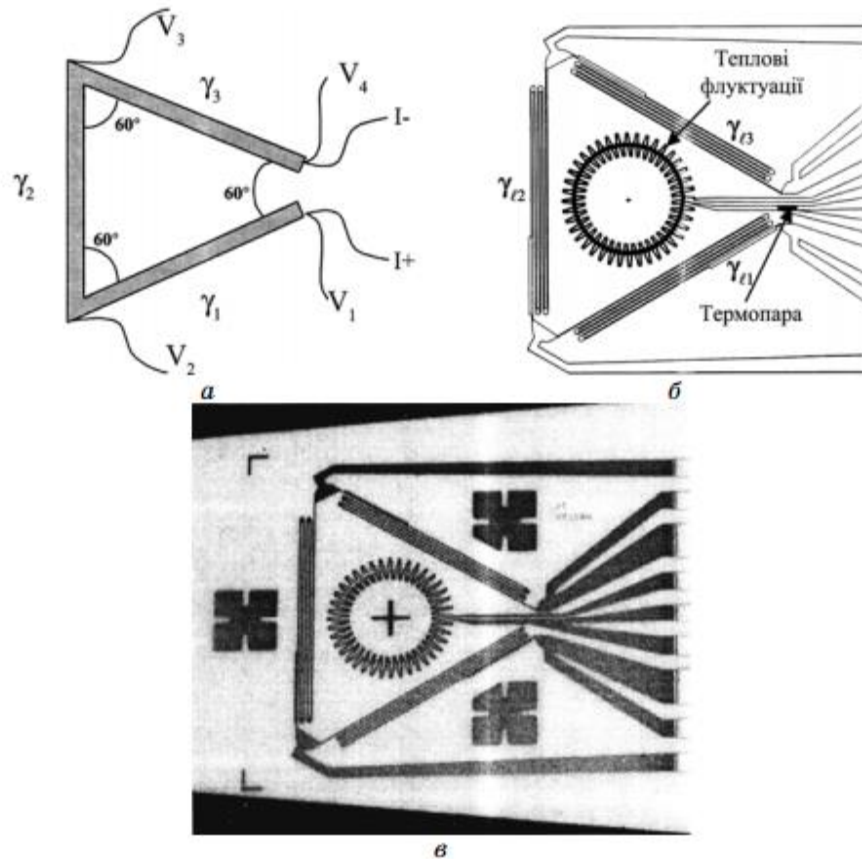


Рис. 1.1. Концепція (а), схема (б) і зовнішній вигляд (в) багатofункціонального сенсора [8]

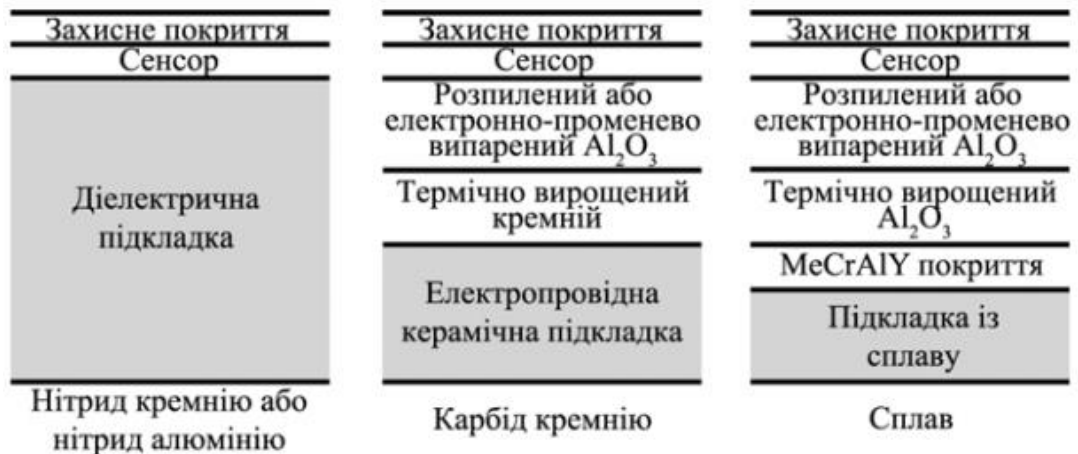


Рис. 1.2. Схематичне зображення тонкоплівкових сенсорів на різних підкладках (Me: Fe, Co або Ni) [8]

Хоча металеві плівкові тензорезистори є термічно стабільними, вони мають відносно мале значення  $\gamma_1$  і широкий температурний інтервал. Тому більш перспективними є сенсори на основі композиційних плівкових матеріалів, що позбавлені цього недоліку. Для створення високотемпературних тензорезисторів (до 600 К) можна застосувати плівки  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TiSi}_2$ ,  $\text{TaSi}_2$  та  $\text{WSi}_2$  (хоча вони мають малий коефіцієнт  $\gamma_1$ ) (таблиця 1.1). Принципова схема такого тензодавача представлена на рис. 1.3. [8].

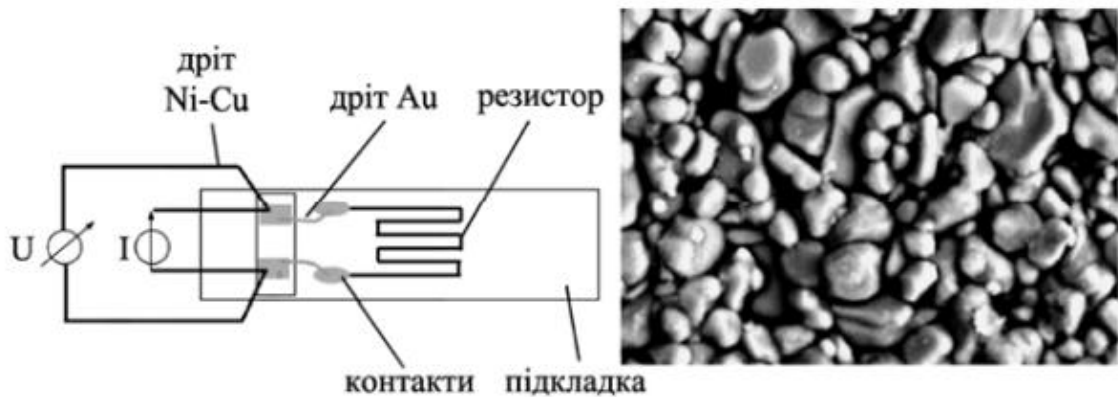


Рис. 1.3. Схематична будова тензодавача на основі плівки  $\text{TiB}_2$ . На вставці: РЕМ зображення мікроструктури плівки [8]

Таблиця 1.1

### Термо- і тензорезистивні властивості плівок на основі Ti і B та Ti, Ta, W і Si [8]

Плівка	$d$ , нм	$R_{\square}$ , Ом	$\rho \cdot 10^6$ , Ом·м	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	$\gamma_1$ (П-Si)	$\gamma_1$ (П-кера- міка)
$\text{TiB}_2$	140	4,2	0,6	-0,5	1,4	0,7
$\text{TiSi}_2$	170	190,0	32,0	-27,0	1,1	0,7
$\text{TaSi}_2$	340	20,0	6,8	-26,0	1,5	–
$\text{WSi}_2$	720	4,0	2,9	-45,0	2,2	2,0

Узагальнену інформацію про властивості товстоплівкових тензорезисторів наведено у таблицях 1.2 і 1.3 [8]. Ілюстрація впливу термообробки ( $T_{обр}$ ) на термо- і тензорезистивні параметри представлена в таблиці 1.3.

Таблиця 1.2

## Тензометричні параметри товстоплівкових резисторів [8]

Резистор	Провідна фаза	Головні елементи	Інші елементи	$\gamma_1$	$\gamma_t / \gamma_1$
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	Mn, Zr, 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> + P	Si, Pb, Al	Ca	16,0	0,81

За допомогою вертикального товстоплівкового тензорезистора на основі ZrSiO<sub>4</sub> з домішками Si та Zr можна провести вимірювання баричного коефіцієнта опору  $\gamma_p = R^{-1}dR / dp$  і перпендикулярних деформацій. Тензорезистор на основі плівки манганіну можна застосувати для вимірювання на основі співвідношення для  $\gamma_p$  всестороннього тиску. Тензорезистор на основі плівкового стопу Pt—W можна використовувати для вимірювання тиску плазми у вакуумній камері. Інверсний магнетострикційний ефект Віларі можна використати для вимірювання сили, тиску та видовження [8].

Чутливим елементом сенсора є мікротрансформатор, який виготовлений із плівки магнетоеластичного сплаву Ni<sub>0,45</sub>Fe<sub>0,55</sub> і має O-подібну форму (рис. 1.4).



Таблиця 1.3

Температурна залежність  $\beta$  і  $\gamma_l$  для товстоплівкових резисторів [8]

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)	$\gamma_l$
8039	1020	-5	72	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

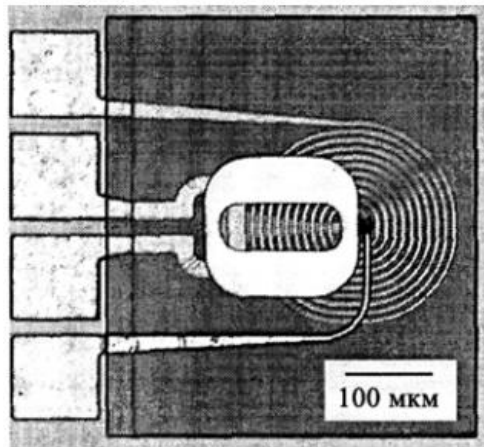


Рис. 1.4. Зовнішній вигляд сенсора на основі мікротрансформатора [8]

## 1.2. Коефіцієнти тензочутливості одно- і багат шарових плівок

### 1.2.1. Коефіцієнти тензочутливості одно шарових плівок

Електрофізичні властивості (ЕФВ) плівкових матеріалів (питомий опір, термічний коефіцієнт опору, коефіцієнти тензочутливості) суттєво відрізняються від аналогічних для масивних зразків, що пов'язано з їх товщиною, кристалічною будовою, елементним складом, концентрацією і типом дефектів та ін.

ЕФВ дуже чутливі до зміни товщини плівки і розміру кристалітів, концентрації домішкових атомів і дефектів кристалічної будови, дії зовнішніх полів (деформація, напруження магнетного поля, температура та ін.). Вплив вказаних факторів обумовлюють ряд структурних, розмірних фазових і концентраційних ефектів. Розмірні ефекти (РЕ) в тензочутливості одно- і багат шарових плівок додатково класифікуються на зовнішній (розсіювання носіїв електричного струму на зовнішніх поверхнях плівки та інтерфейсах) і внутрішній РЕ (розсіювання носіїв на межах зерен). Ефект тензочутливості виникає при стисненні чи розтягу масивного або плівкового провідника. Суть фізичних процесів при тензоефекті зводиться до змін на мікроскопічному рівні (зменшення або збільшення параметра ґратки) або макроскопічному і мікроскопічному рівні на межі зерен або інтерфейсу (поворот і зміна розмірів зерен, поява локалізованих енергетичних рівнів, зміна концентрації і типу дефектів, залежність від деформації коефіцієнтів дзеркальності, розсіювання (проходження) межі зерен та проходження інтерфейсу [8-10].

Досліджуючи коефіцієнти тензочутливості одно шарових плівок, спочатку розглянемо теоретичні відомості про зовнішній розмірний ефект.

Зокрема, теоретична модель З. Мейксіна і Р. Худзинські базувалася на відомій теорії РЕ в електропровідності монокристалічних пластин Фукса — Зондгеймера.

У роботах [8-10] було проаналізовано п'ять різних інтервалів товщин та структурного стану плівок :

а – товсті плівки (товщина  $d > 600$  нм);

б – однорідні суцільні плівки ( $20 \text{ нм} < d < 600 \text{ нм}$ );

в – тонкі плівки з ниткоподібною структурою ( $10 \text{ нм} < d < 20 \text{ нм}$ );

г – плівки з острівцями, які контактують ( $d = 10 \text{ нм}$ );

д – несучільні тунельно-зв'язані острівцеві плівки ( $d < 10 \text{ нм}$ ).

Найбільший інтерес мають перші два випадки. У випадку (а) розглянуто фактично масивні зразки і тому співвідношення для коефіцієнта повздожньої тензочутливості  $\gamma_l$  одержується на основі таких формул :

$$R = \rho \frac{l}{ad}, \quad \ln R = \ln \rho + \ln l - \ln a - \ln d,$$

$$\gamma_l = \frac{d \ln R}{d \varepsilon_l} = \frac{d \ln \rho}{d \varepsilon_l} + 1 + 2\mu, \quad (1.1)$$

де  $R, \rho$  – опір і питомий опір;

$l, a$  – довжина і ширина зразка;

$d \varepsilon_l = d \ln l \equiv dl/l$  – повздожня деформація;

$\frac{d \ln \rho}{d \varepsilon_l} = \gamma_l^p$  – коефіцієнт повздожньої тензочутливості, виражений через

питомий опір;

$$\mu = -\frac{d \ln a}{d \ln l} \cong -\frac{d \ln d}{d \ln l} \text{ – коефіцієнт Пуассона.}$$

Ферміївське хвильове число  $k'$  для електрона при відносно малих деформаціях може бути представлено у вигляді

$$k' \cong (1 - \beta \varepsilon_l) \text{ або } \ln k' \cong -\beta \varepsilon_l,$$

де  $\beta$  – коефіцієнт у лінійному розкладенні  $k'$  по  $\varepsilon_l$ .

Таким чином, співвідношення для  $\gamma_l^p$  можна подати у вигляді

$$\gamma_l^p \cong -\frac{d \ln \lambda_0}{d \varepsilon_l} + \beta, \quad (1.2)$$

де  $\beta \cong -1$ , якщо при деформації  $dn > 0$  (стиснення зразка або збільшення числа зіткнень електронів при його розтяганні), або  $\beta \cong +1$ , якщо при деформації  $dn < 0$  (розтяг зразка або зменшення числа зіткнень при його стисненні);

$\eta_{\lambda_{ol}} < 0$ , коли при деформації збільшується СДВП ( $d\lambda_0 > 0$  – електрон прискорюється), і  $\eta_{\lambda_{ol}} > 0$ , коли при деформації зменшується СДВП ( $d\lambda_0 < 0$ ).

У випадках (в і г) було одержано наступні співвідношення [8-10] :

$$\gamma_l = \gamma_{ol} - \frac{P(k)}{Q(k)} (\eta_{\lambda_{ol}} - \mu) \text{ — випадок (в),}$$

$$\text{де } P(k) = 1 - \frac{3}{4}(0,56 + \ln k^{-1})k - \frac{6}{15}k^2; \quad Q(k) = 1 - \frac{3}{8}(1,06 + \ln k^{-1})k - \frac{2}{15}k^2;$$

$$k = D / \lambda_0 \text{ (} D \text{ — діаметр нитки);}$$

$$\text{або } \gamma_l = \gamma_{ol} - (\eta_{\lambda_{ol}} - \mu) \text{ — граничний випадок (в) при } P(k) \text{ і } Q(k) \rightarrow 1,$$

$$\gamma_l = \gamma_{ol} - (1 + \eta_{\lambda_{ol}}) \text{ — випадок (г).}$$

Як і в попередньому випадку (а),  $\gamma_l < \gamma_{l0}$ . Лише в острівцевих плівках, де має місце тунельний механізм провідності  $\gamma_l > \gamma_{l0}$ .

Ці результати визвали сумнів у багатьох дослідників, і тому із паралельним накопиченням експериментальних результатів постійно вівся пошук більш коректних теоретичних моделей для тензочутливості одношарових плівок. В серії своїх робіт К. Тельє, А. Тоссе і К. Пішар (ТТП) вперше врахували внутрішній розмірний ефект

А. Маядаса і М. Шатцкеса (МШ) [8-10]. Запропоновані ними модель ефективної СДВП, лінеаризоване співвідношення і тривимірна модель дозволяють не тільки якісно проаналізувати основні закономірності зовнішнього і внутрішнього розмірних ефектів (РЕ), але і здійснити розрахунок основних параметрів електропровідності і тензочутливості. Розглянемо основні співвідношення, запропоновані ТТП. У випадку полікристалічних плівок модель ефективної СДВП не накладає певних обмежень на співвідношення між  $\lambda_0$  і середнім розміром кристалітів ( $L$ ), але не лінеаризується, і не дозволяє вести розрахунок параметрів тензочутливості. Виходячи із співвідношення МШ для питомої провідності ( $\sigma$ )

$$\sigma = \sigma_0 [f(\alpha) - A(k, p, \alpha)], \quad (1.3)$$

де  $f(\alpha) = 1 - (3/2)\alpha + 3\alpha^2 - 3\alpha^3 \ln(1 + 3\alpha^{-1})$  – функція зерномежевого розсіювання електронів ( $\alpha = \frac{\lambda_0 R}{L(1-R)}$ ,  $R$  – коефіцієнт розсіювання електрона на межі зерна);  $p$  – коефіцієнт дзеркальності зовнішніх поверхонь плівки [8-10].

Певним етапом у розвитку уявлень про РЕ в тензочутливості є модель, яка одержала назву лінеаризованого співвідношення ТТП :

$$\gamma_l = (\eta_{\lambda_{0l}} + 1)f(\alpha) - \lambda_0(1-p)[(\eta_{\lambda_{0l}} + 1)f(\alpha)H(\alpha) - (1-\mu)U(\alpha)] \cdot d^{-1}, \quad (1.4)$$

де  $H(\alpha)$  і  $U(\alpha)$  – відомі й протабульовані функції. Оскільки залежність (1.4) має вигляд  $y = a - (b/x)$ , то при  $\eta_{\lambda_{0l}} > 0$  перший доданок  $\gamma_l = (\eta_{\lambda_{0l}} + 1)f(\alpha)$  виступає як асимптотика для фуксівської залежності. При виконанні нерівності  $\eta_{\lambda_{0l}} < 0$  співвідношення (1.4) буде представляти собою Маядасову залежність з тією ж асимптотикою [8-10].

Розглянемо експериментальні результати визначення коефіцієнтів тензочутливості одношарових плівок на прикладі Au, Pd, Pt, Co, Al, Ni, Sb, Te, константану,  $\beta$ -Та, Au—SiO<sub>2</sub> та Cr—SiO<sub>2</sub>. Не дивлячись на те, що в цих роботах встановлювалася кореляція між  $\gamma_l$  і  $R$ , одержані результати (рис. 1.5 та рис. 1.6) з точки зору РЕ мають

Маядасівський характер. Аналогічні дані одержано і для плівок пермалою. Вивчення Маядасівського РЕ в тензочутливості було здійснено на прикладі плівок Cr, Mo, W і Nb, Ni і Co, Cu, Co і Cr, Cr, Sc і Cu (деякі залежності із цих робіт наведено на рис. 1.7). Рисунок ілюструє залежність  $\gamma_l$  від числа деформаційних циклів (після 3 — 4 циклу релаксаційні процеси стабілізуються і величина  $\gamma_l$  приймає стале значення). На цьому рисунку і далі величина  $\Delta R/R$  є відношенням зміни опору при деформації до його початкового значення  $R$  при  $\varepsilon_l = 0\%$ . Залежності, подібні представленим на рис. 1.8, мають місце в плівкових стопах та напівпровідникових плівках. Також аналогічні результати одержані на прикладі плівкових стопів Ni—Co [8-10].

Аналіз отриманих результатів дозволяє одержати правило адитивності для величини  $\gamma_l$  :

$$\gamma_l = \gamma_{ol} \frac{\rho_0}{\rho} + \gamma_{gbl} \frac{\rho_{gb}}{\rho} + \gamma_{dl} \frac{\rho_d}{\rho},$$

де  $\frac{\rho_0}{\rho}$ ,  $\frac{\rho_{gb}}{\rho}$ ,  $\frac{\rho_d}{\rho}$  — статистичні ваги внесків у тензочутливість, пов'язаних з об'ємним ( $\gamma_{ol}$ ), зерномежовим ( $\gamma_{gbl}$ ) і поверхневим ( $\gamma_{dl}$ ) розсіюванням електронів;

$$\gamma_{gbl} = \frac{(\gamma_{gl}\rho_g - \gamma_{ol}\rho_0)}{\rho_{gb}}; \rho_g = \rho_0 + \rho_{gb} - \text{питомий опір, який пов'язаний із об'ємним і}$$

зерномежовим розсіюванням;

$$\gamma_{dl} = \frac{(\gamma_l\rho - \gamma_{gl}\rho_g)}{\rho d}.$$

Поряд з вказаними трьома внесками у величину  $\gamma_l$  велику роль відіграють так звані деформаційні ефекти, суть яких полягає в тому, що не лише СДВП, але і коефіцієнти  $p$  і  $r$  (а в багатошарових плівкових системах і  $Q$  — коефіцієнт проходження межі поділу шарів (інтерфейсу)) залежать від деформації. Кількісними характеристиками цих ефектів є деформаційні коефіцієнти :

$$\eta_{\lambda_0 l} = -\frac{d \ln \lambda_0}{d \varepsilon_l}, \quad \eta_{pl} = -\frac{d \ln p}{d \varepsilon_l}, \quad \eta_{rl} = -\frac{d \ln r}{d \varepsilon_l} \quad \text{та} \quad \eta_{Ql} = -\frac{d \ln Q}{d \varepsilon_l}$$

та похідні

$$\frac{d \ln k}{d \ln p} = \frac{p}{k} \frac{dk}{dp}, \quad \frac{d \ln m}{d \ln r} = \frac{r}{m} \frac{dm}{dr} \quad \text{та} \quad \frac{d \ln k}{d \ln Q} = \frac{Q}{k} \frac{dk}{dQ}.$$

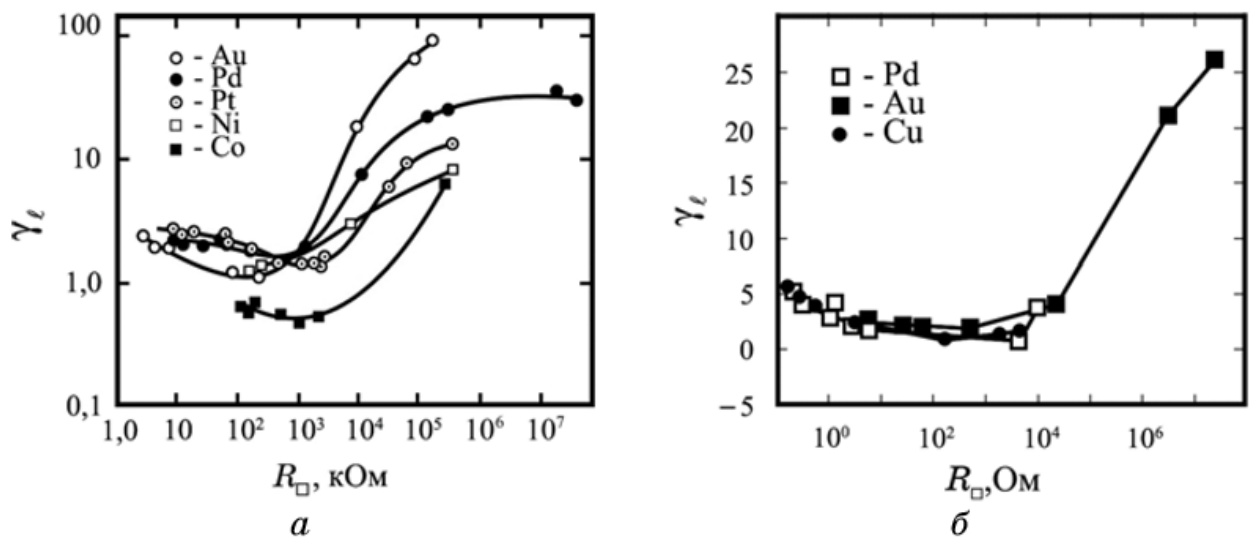


Рис. 1.5. Залежність  $\gamma_l$  від  $R_{\square}$ : а – плівки різних металів; б – плівки  $\beta$ Ta

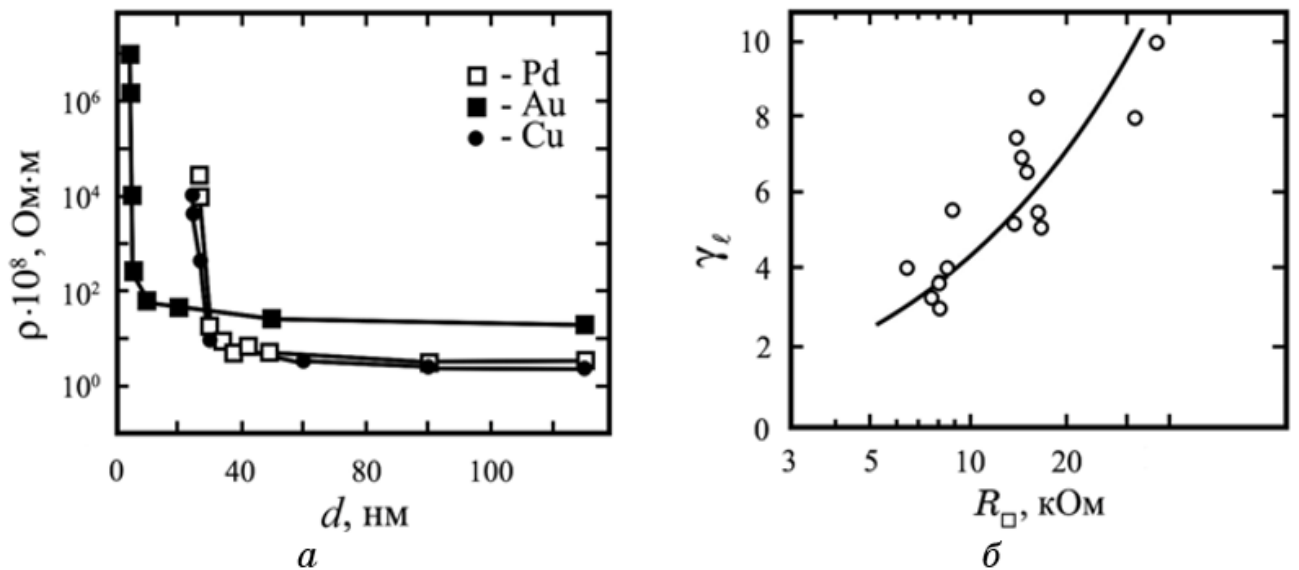


Рис. 1.6. Залежність  $\rho$  від  $d$  (а) і  $\gamma_l$  від  $R_{\square}$  (б) [8-10]

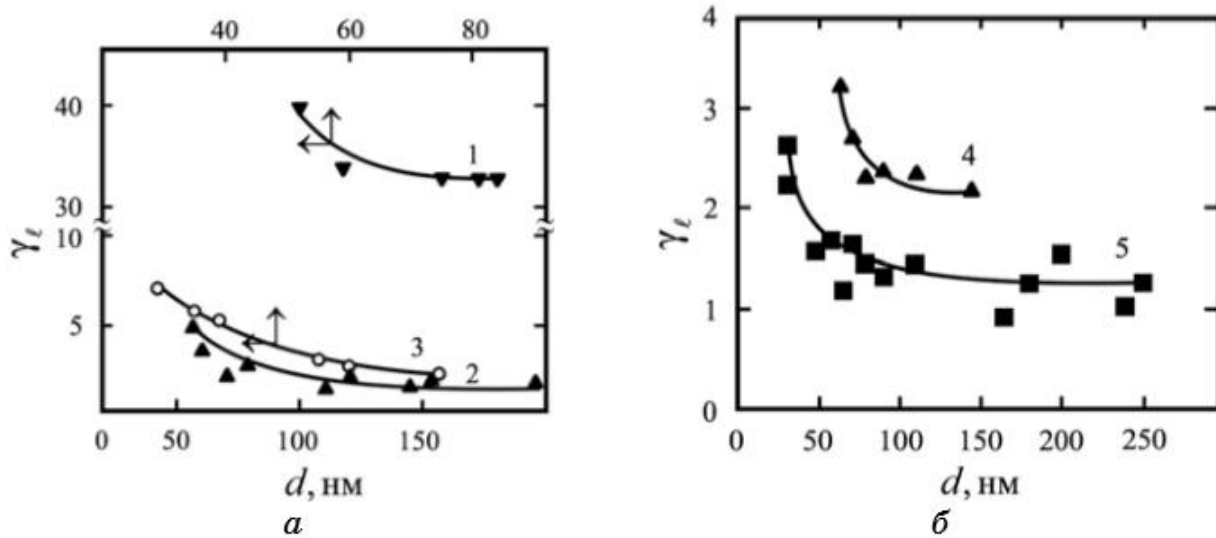


Рис. 1.7. Розмірна залежність  $\gamma_l$  для плівок W (1), Cr (2, 3), Cu (4) і Sc (5) [8-10]



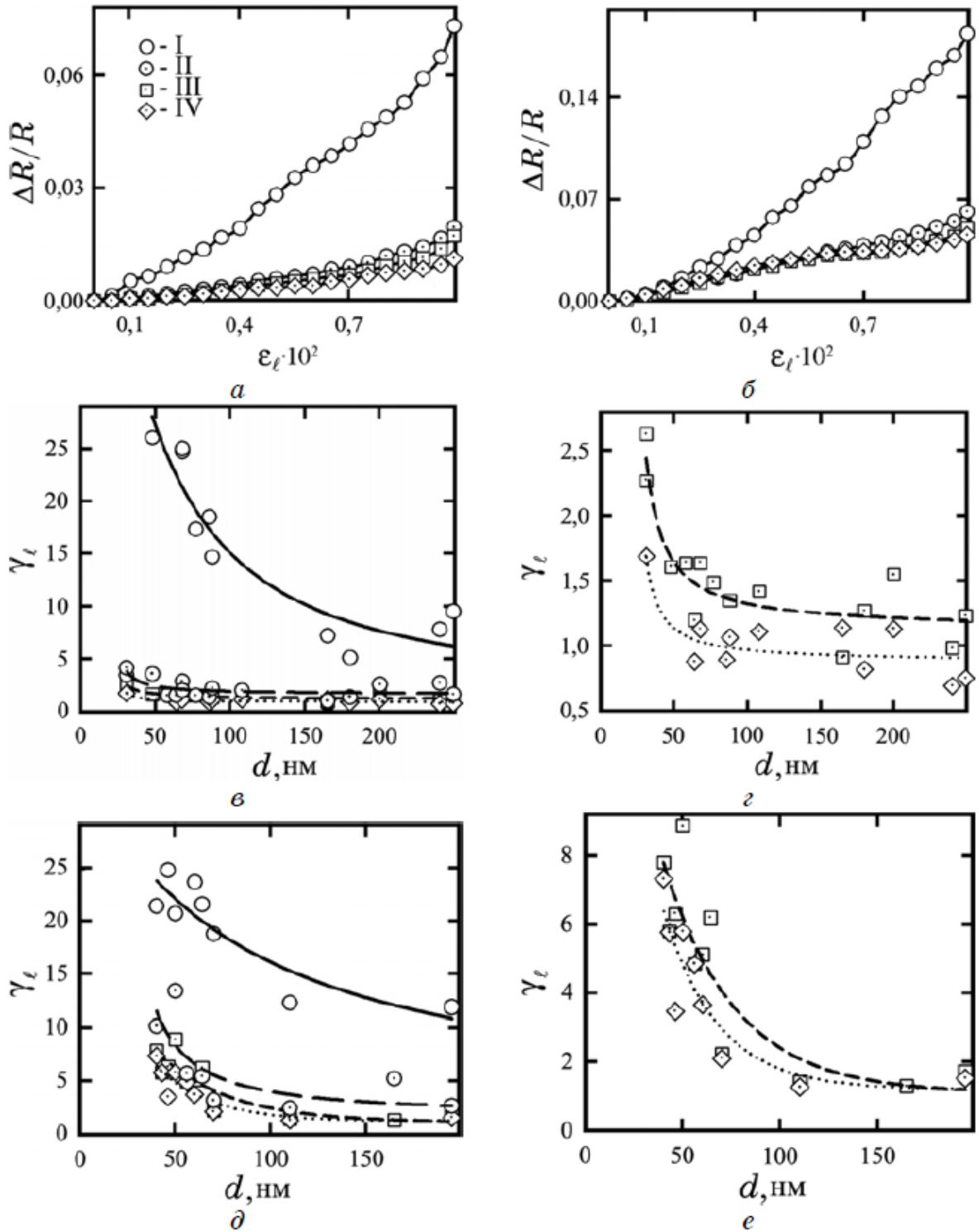


Рис. 1.8. Приклади деформаційних залежностей для плівок Sc (*a*) і Cr (*б*) та розмірні залежності  $\gamma_l$  для плівок Sc (*в*, *г*) і Cr (*д*, *е*) [8-10]

## 1.2.2 Коефіцієнти тензочутливості багат шарових плівок

Систематичні теоретичні дослідження РЕ в електрофізичних властивостях двошарових плівкових систем були започатковані у роботах Ф. Варкуша, Р. Дімміха, Ф. Катера і М. Ель-Гіті та ін. [8-10].

Розглянемо результати, які пов'язані із дослідженням тензорезистивних властивостей плівкових систем на основі Cu і Cr за межами пружної деформації ( $\epsilon_l > 1\%$ ).

Були проведені дослідження залежності електричного опору двошарових плівок при сумарній динамічній або статичній деформації до 2%, яка досягалася послідовним навантаженням плівкового зразка на полістироловій підкладці в інтервалах  $\Delta\epsilon_{l1} = 0 — 0,5\%$ ,  $\Delta\epsilon_{l2} = 0,5 — 1,0\%$ ,  $\Delta\epsilon_{l3} = 1,0 — 1,5\%$  та  $\Delta\epsilon_{l4} = 1,5 — 2,0\%$ . Перші п'ять прямих деформаційних циклів реалізовувалися в статичнодеформаційному режимі, коли через кожні  $\Delta\epsilon_l = 0,05\%$  здійснювалася зупинка на 10 с; інші деформаційні циклі, як і усі обернені, проводилися лише в динамічному режимі. Така методика деформації дозволяє провести стабілізацію мікропластичних процесів.

На основі цих деформаційних залежностей був здійснений розрахунок величини середнього ( $\gamma$ ) і миттєвого ( $\gamma_{l_{\text{мит}}}$ ) коефіцієнтів тензочутливості. Були досліджені наступні нанорозмірні зразки: Cu(10,7)/Cr(5,3)/П, Cu(11,9)/Cr(13,4)/П, Cu(9,7)/Cr(23,2)/П, Cu(20,2)/Cr(26)/П та Cu(26)/Cr(13,6)/П.

На рисунку 1.9 представлено типові результати для двох плівкових систем Cu/Cr/П. Зміна характеру залежностей R і  $\Delta R/R$  від  $\epsilon_l$  при збільшенні  $\epsilon_l$  від 1,5% до 2% може говорити про перехід від квазіпружної до пластичної деформації. При збільшенні загальної товщини плівкової системи гістерезис і нелінійність проявляються значно сильніше (рис. 1.9 в, г), що фіксується у різних значеннях миттєвого ( $\gamma_{l_{\text{мит}}}$ ) і середнього ( $\gamma_l$ ) коефіцієнтів повздовжньої тензочутливості [8-10].

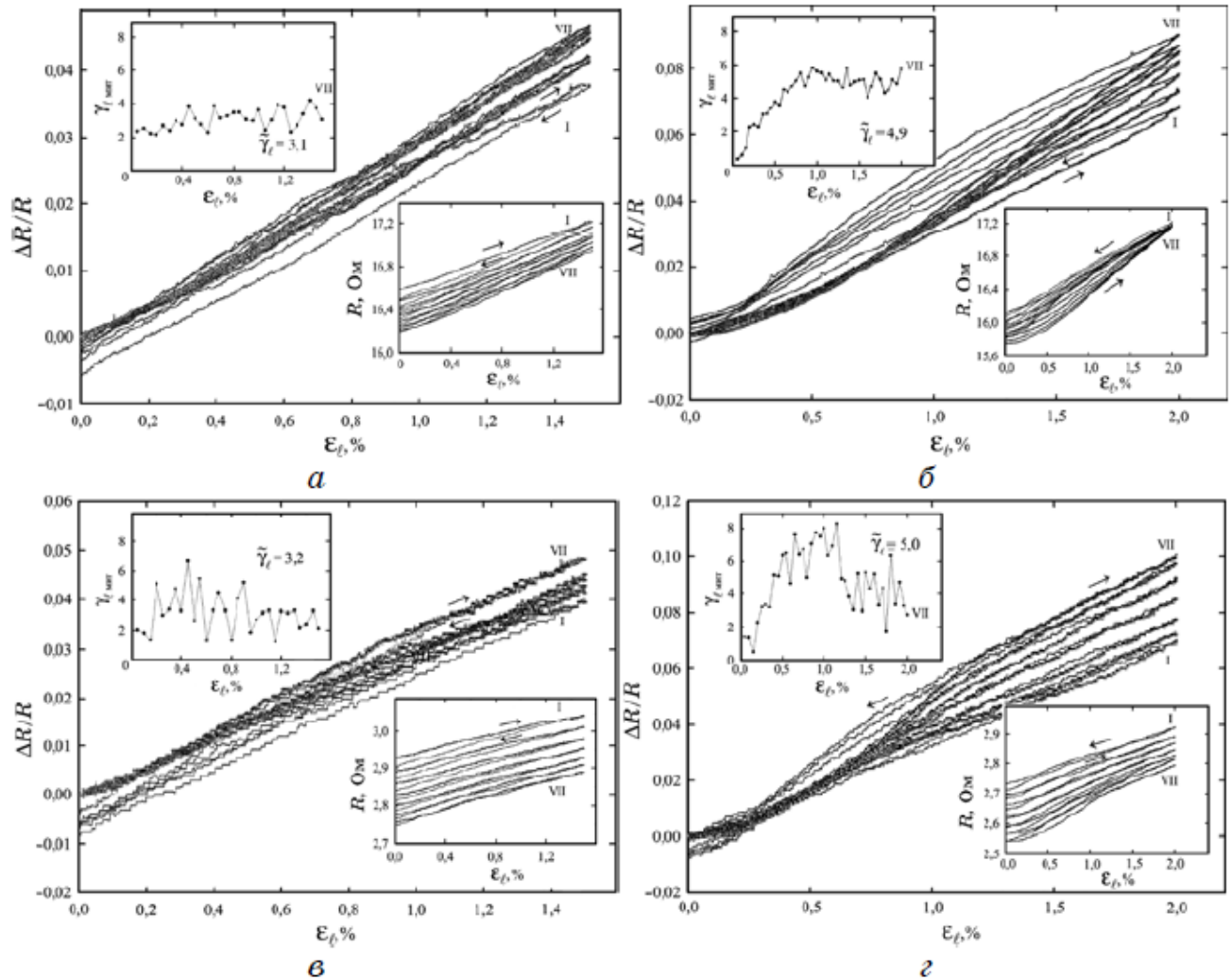


Рис. 1.9. Деформаційні залежності для різних циклів «розтяг—стискання» : а, б – система Cu(10,7)/Cr(5,3)/П; в, г – система Cu(9,7)/Cr(23)/П (нумери циклів вказано римськими цифрами). На вставках – залежності  $R$  і  $\gamma_{lmax}$  від  $\varepsilon_l$  [8-10]

Найбільш малозрозумілим у дослідженнях тензоефекту залишається питання про температурну залежність коефіцієнтів тензочутливості ( $\gamma_l$  і  $\gamma_t$ ), хоча воно завжди було актуальним з точки зору тензометрії. Вперше відповідний теоретичний аналіз і порівняння із експериментальними даними для одношарових плівок здійснили Б. Верма і Г. Юретчке та Дж. Вітт і Т. Коутс. Суть аналізу полягає в одержанні співвідношення для термічного  $\beta_{\gamma_l}$  (ТК КТ) і подальшому його спрощенні [8-10].

Названі автори виходили із означення  $\beta_{\gamma_l}$  у вигляді:

$$\beta_{\gamma_l} = \frac{1}{\frac{1}{R} \left( \frac{\partial R}{\partial \varepsilon_l} \right)_T} \left[ \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial \varepsilon_l} \right)_T \right]_{\varepsilon_l} = -\beta + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\partial R}{\partial \varepsilon_l} \right)_T. \quad (1.5)$$

Виходячи із того, що для плівок Ag і  $\beta$ -Та множник  $\frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\partial R}{\partial \varepsilon_l} \right)_T \cong 0$ , було одержано співвідношення :

$$\beta_{\gamma_l} \cong -\beta \quad (1.5')$$

Зроблено висновок, що в металевих плівках, для яких  $\beta > 0$ ,  $\gamma_l$  повинно зменшуватися із зростанням температури. Аналогічним є висновок про двошарові плівкові системи. Поряд з цим було одержали більш точну формулу для ТК КТ:

$$\beta_{\gamma_l} = \frac{\gamma_l - 1 - 2\mu_f}{\gamma_l} \left( -\beta + \frac{1}{\gamma_l - 1 - 2\mu_f} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial T} \right), \quad (3.2)$$

яка за умови  $\gamma_l \gg 1$  спрощується до виду:

$$\beta_{\gamma_l} = -\beta + \frac{1}{\gamma_l \rho} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial T}, \quad (3.2')$$

Другий доданок в (3.2') може бути такого ж порядку як і  $\beta$  (наприклад, при  $\gamma_l \sim 1$ ,  $\rho \sim 10^{-6} - 10^{-7}$  Ом·м і  $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial T} \sim 10^{-9} - 10^{-10}$  Ом·м·К<sup>-1</sup>), і тому виконання співвідношення (3.1') може бути не обов'язковим. Крім того, характер залежності  $\gamma_l$  від  $T$  є лінійним :

$$\gamma_l = C_1 + C_2 T \quad (3.3)$$

де  $C_1$  и  $C_2$  – сталі величини, в той час як відомо, що  $\beta \sim T^{-1}$  [8-10].

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ

#### 2.1. Особливості розрахунків коефіцієнтів тензочутливості

У даному розділі спочатку розглянемо методику вимірювання коефіцієнтів тензочутливості для одношарових плівок на прикладі плівок Cu та Ag товщиною  $d = 36 - 51$  нм, отриманих способом термічного випарування у вакуумі  $1 \cdot 10^{-3}$  Па (установка ВУП-5М) при кімнатній температурі на тефлоновій підкладці з контактними площинками.

Велика кількість теоретичних та експериментальних робіт свідчить про низьку тензочутливість суцільних одношарових плівок металів в області пружної деформації. Однак ситуація змінюється при переході до пластичної деформації.

При повздовжньому видовженні матеріалу його здатність змінювати власний абсолютний ( $R$ ) або питомий ( $\rho$ ) електричний опір характеризується коефіцієнтами повздовжньої тензочутливості  $\gamma_l^R$  або  $\gamma_l^\rho$  відповідно, які визначаються за співвідношеннями :

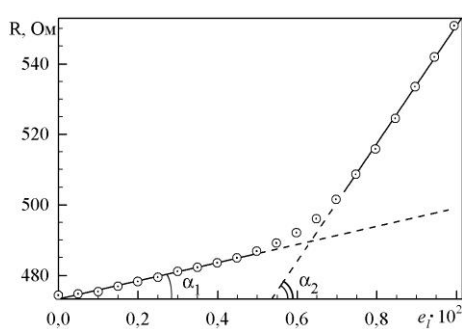
$$\gamma_l^R = \frac{1}{R_{II}} \cdot \frac{\partial R}{\partial \varepsilon_l}, \quad \gamma_l^\rho = \frac{1}{\rho_{II}} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_l}, \quad (2.1)$$

де  $R_{II}, \gamma_{II}$  – відповідно початкові значення абсолютного та питомого електричного опору,  $d\varepsilon_l = \frac{dI}{I_{II}}$  – відносне видовження плівки.

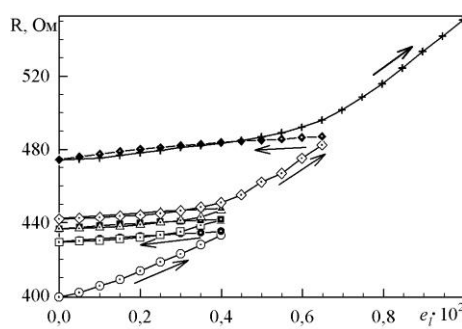
Згідно з даними, наведеними на рис. 2.1 а, початкова ділянка залежності  $R$  від  $\varepsilon_l$  може бути виражена співвідношенням

$$R = R_{II} \cdot \gamma_l^R \cdot \varepsilon_l + R_{II} \quad (2.2)$$

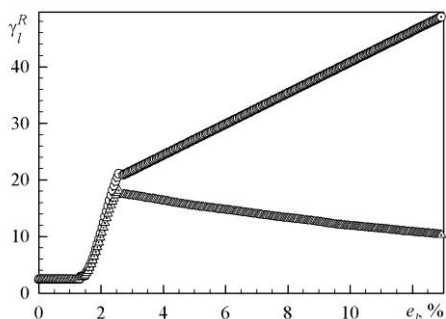
і відповідати пружній або квазіпружній деформації. Із рис. 2.1 б випливає, що інтервал пружної деформації складає величину менше 0,4%. При переході до пластичної деформації експериментальна залежність відхиляється від попередньої лінійної залежності з кутовим коефіцієнтом  $\alpha_1$ . За таких умов  $\operatorname{tg}\alpha = \frac{\partial R}{\partial e_l} = R_0 \cdot \gamma_l^R \neq \text{const}$ , оскільки величина кута  $\alpha$ , а відповідно і коефіцієнта  $\gamma_l^R$  зростає зі збільшенням  $e_l$ . Крім того, при зменшенні  $e_l$  на зворотному циклі величина опору  $R$  плівки не досягає вихідного значення  $R_{II}$  (рис. 2.1 б), що обумовлено її залишковою деформацією [11].



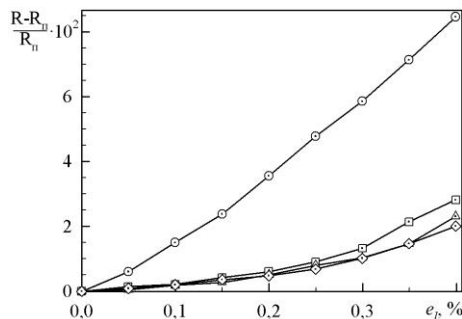
а



б



в



г

Рис. 2.1. Експериментальні залежності опору і коефіцієнтів тензочутливості для плівкової системи Cr(36)/П: а – перехід від пружної до пластичної деформації; б – деформаційні залежності для перших п'яти циклів (○, ● - I; □, ■ - II; ▲, △ - III; ◇, ◆ - IV; + - V); в – залежність середнього (○) та миттєвого (▲) коефіцієнтів тензочутливості від деформації для IX деформаційного циклу; г – відносна зміна опору плівки від деформації (нумерація деформаційних циклів така ж, як на позиції б) [11]

Оскільки після переходу межі квазіпружна-пластична деформація коефіцієнт  $\gamma_l$  не залишається сталим, то для однозначної характеристики властивостей плівок необхідно будувати залежність  $\gamma_l$  від  $e_l$ . На результати визначення коефіцієнтів тензочутливості істотним чином впливає методика обробки експериментальних даних і, зокрема, спосіб визначення похідної  $\frac{\partial R}{\partial e_l}$ . Для визначення похідної  $\frac{\partial R}{\partial e_l}$  та подальшого знаходження коефіцієнтів тензочутливості можна використовувати метод аналітичного диференціювання.

Сутність цього методу полягає в наступному. Спочатку методом найменших квадратів у програмному середовищі Sigma Plot 2002 Version 8.0 знаходився найбільш відповідний аналітичний вираз функції  $R(e_l)$ ; для точного відображення експериментальна крива розбивається на декілька найбільш характерних ділянок з подальшою інтерполяцією кожної поліномом; далі диференціюванням отриманих рівнянь знаходилися похідні  $\frac{\partial R}{\partial \varepsilon_l}$  та згідно з (2.1) визначалися коефіцієнти тензочутливості  $\gamma_l^R$  (рис. 2.1 в).

Величина коефіцієнта  $\gamma_l^R$  при  $e_l < 1,7\%$  майже не змінюється. На межі переходу квазіпружна-пластична деформація чутливість плівки починає зростати. Таку поведінку можна пояснити активацією механізмів пластичної деформації. Зокрема дислокаційний механізм та зерномежове мікроковзання, останнє з яких характерне для нанокристалічного стану, мають призвести до збільшення концентрації дефектів кристалічної структури та зміни умов зерномежового розсіювання електронів провідності, що, в свою чергу, обумовить зростання величини питомого опору матеріалу за рахунок внутрішнього розмірного ефекту. Таке пояснення не суперечить напівфеноменологічній моделі тензочутливості [11].

Розрахунок коефіцієнтів тензочутливості ускладнюється й тим, що з кожним наступним циклом значення початкового опору  $R_n$  зростає, що пов'язано з наявністю залишкової деформації (рис. 2.1 б). На зворотних циклах величина  $\gamma_l^R$  значно менша, ніж на прямих. Зазначена обставина в наших роботах зводилася до мініму-

му шляхом розрахунку миттєвих коефіцієнтів тензочутливості  $\gamma_{l_{мит}}^R$  та  $\gamma_{l_{мит}}^\rho$ , тобто деформаційної чутливості матеріалу відносно не початкового ( $R_п$  або  $\rho_п$ ), як записано в рівняннях (2.1), а поточного миттєвого значення опору відповідно. Для розрахунку повздовжніх миттєвих коефіцієнтів тензочутливості рівняння (2.1) можна записати у вигляді

$$\gamma_{l_{мит}}^R = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln l}, \quad \gamma_{l_{мит}}^\rho = \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln l}. \quad (2.3)$$

## 2.2. Експериментальне обладнання для вимірювання коефіцієнтів тензочутливості

Тепер розглянемо методику отримання зразків і дослідження тензорезистивних властивостей плівок Cu / Cr і Fe / Cr. Вона полягає в наступному. Плівки загальної товщини до 100 нм були одержані методом термічного випаровування в установці ВУП-5М (робочий вакуум  $10^{-3} - 10^{-4}$  Па) на полістиролових підкладках. Низькоомні контакти (опору  $\sim 1$  Ом) формувалися у вигляді сходинок на основі плівок Cr і Cu. Основу автоматизованої системи становить 8-канальний 16-бітний сигма-дельта АЦП ADAM-4018, за допомогою якого по чотирьохточковій схемі вимірювався опір зразків, перетворювач інтерфейсів USB  $\rightarrow$  RS 232 / 422/485 ADAM-4561, асинхронний двигун типу Д-219П1У3 і web-камера Creative Labs з роздільною здатністю 640×480 пікселів. Управління автоматизованим комплексом здійснювалося з комп'ютера під керуванням програми, розробленої в середовищі LabVIEW, з використанням модуля машинного зору LabVIEW Vision Development Module 8.2. Підкладка з системою контактів і зразком одним кінцем фіксувалася консольно, а з іншого - кріпилася до штока мікрогвинта (ціна поділки - 0,02 мм), який через редуктор приєднується до електродвигуна, що обертається в протилежних напрямках, в залежності від керуючих сигналів з релейного модуля ADAM4068. Web-камера розміщується біля мікрогвинта і фіксує його зображення з частотою 10 кадрів / с. Одночасно з процесом розпізнавання поділів мікрогвинта фіксується також опір зразка.

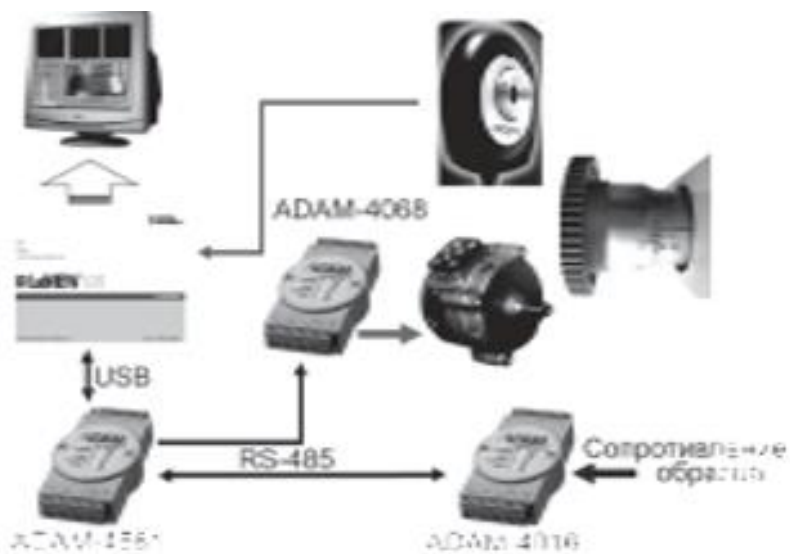


На рис. 2.2 представлена структурна схема автоматизованої системи, яка дозволяє проводити дослідження тензоефекта в динамічному або статичному режимі зі швидкістю деформації від 0 до 0,1% / с в інтервалі  $\varepsilon_1 = 0 - 10\%$ . Режими роботи системи дозволяють також вивчати ресурс роботи плівкових зразків як можливих чутливих елементів тензодатчиків [12].

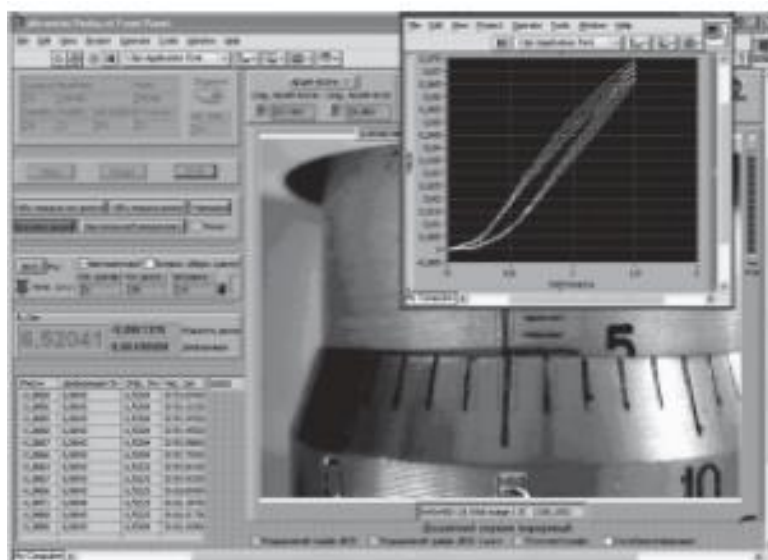
Автоматизовану систему вимірювання можна структурно розділити на наступні складові частини:

- 1) система контролю і виміру товщини конденсованої металеві плівки (включає в себе пластину кварцу, на яку конденсується плівка, зовнішній генератор і частотомір);
- 2) система зворотного зв'язку комп'ютера з вакуумною установкою;
- 3) персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням, розробленим в середовищі програмування LabVIEW [12].

Метою моєї роботи було освоєння методики визначення коефіцієнтів тензочувливості. Експериментальне дослідження деформаційної залежності питомого електричного опору на прикладі одношарової плівки Си я проводив за методикою, описаною вище. Як підкладка, використовував склотекстолітову пластину довжиною 40 мм, товщиною 1 мм і шириною 3 мм з мідними контактними майданчиками. Довжина плівки – 15 мм. Підкладка розташовувалася на деформаційному пристрої (мікрогвинт) (рис. 2.3). Осадження плівки Си здійснювалося термовакuumним методом з вольфрамового випарника в робочому об'ємі установки ВУП-5М. Тиск залишкової атмосфери –  $10^{-3}$  Па, швидкість конденсації – 15 нм/с. Вимірювання електричного опору здійснювалося приладом УТ 39А (точність приладу – 0,05 Ом). Після конденсації стабілізація властивостей відбувалася протягом 15 хвилин. Далі за допомогою деформаційного пристрою здійснювали декілька деформаційних циклів, при цьому вимірюючи електричний опір. Деформація здійснювалася до 1 % (0,015 мм).



а



б

Рис. 2.2 Структурна схема автоматизованої системи дослідження тензоефекту – а та інтерфейс програмного забезпечення – б [12]

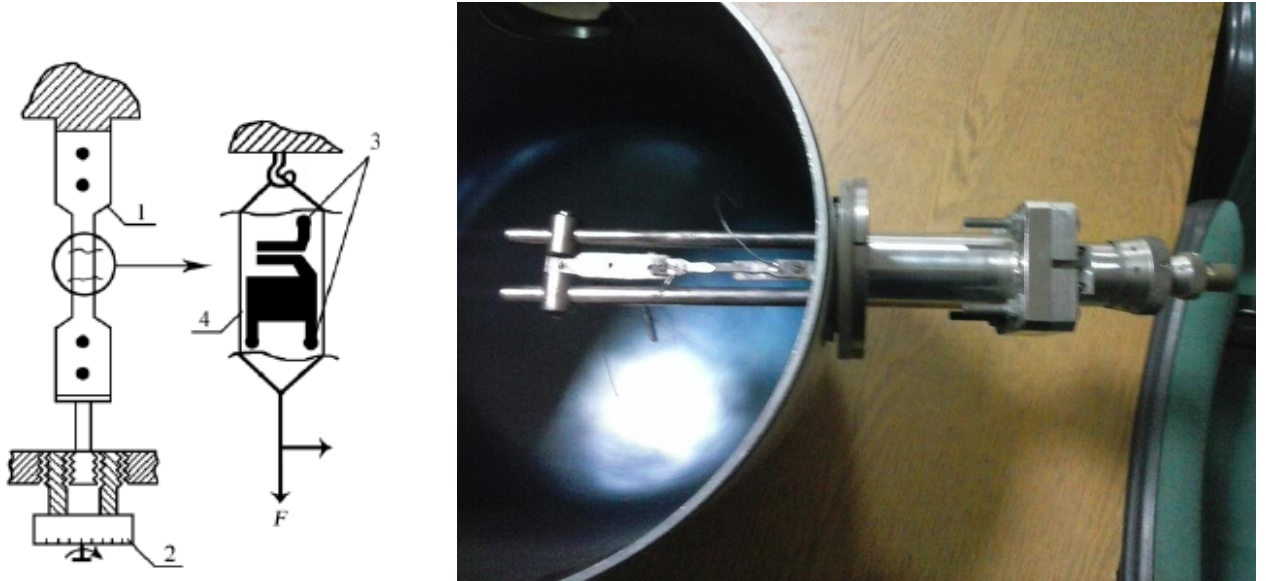


Рис. 2.3. Деформаційний пристрій із закріпленою підкладкою

За вказаною методикою проведено дослідження деформаційних залежностей електричного опору для плівки Cu товщиною 40 нм (рис. 2.4. і 2.5).

R, Ом

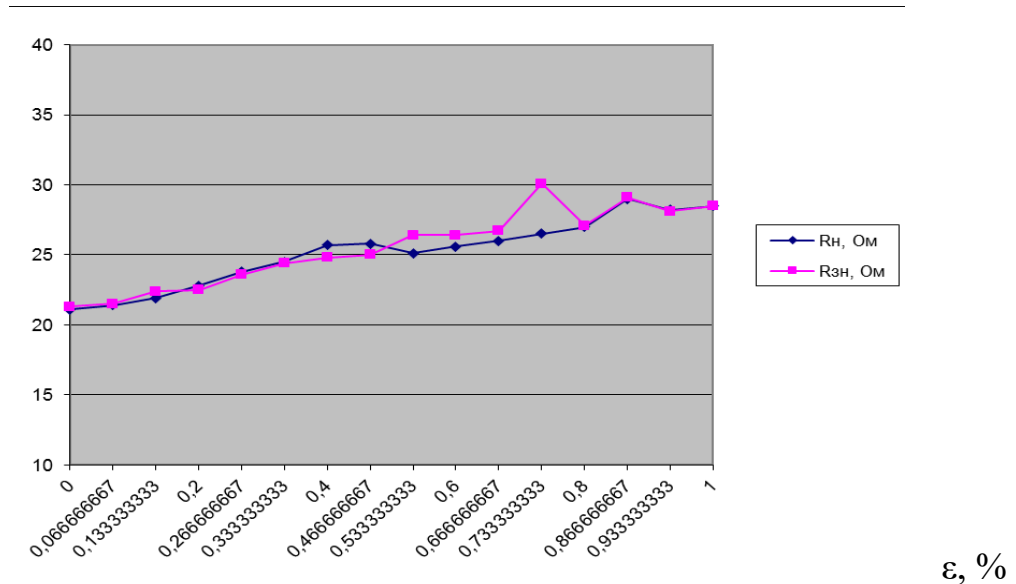


Рис. 2.4. Деформаційні залежності  $\gamma_{LM}$  та  $R$  для плівки Cu(40) при деформації  $\Delta\epsilon_l = 1\%$

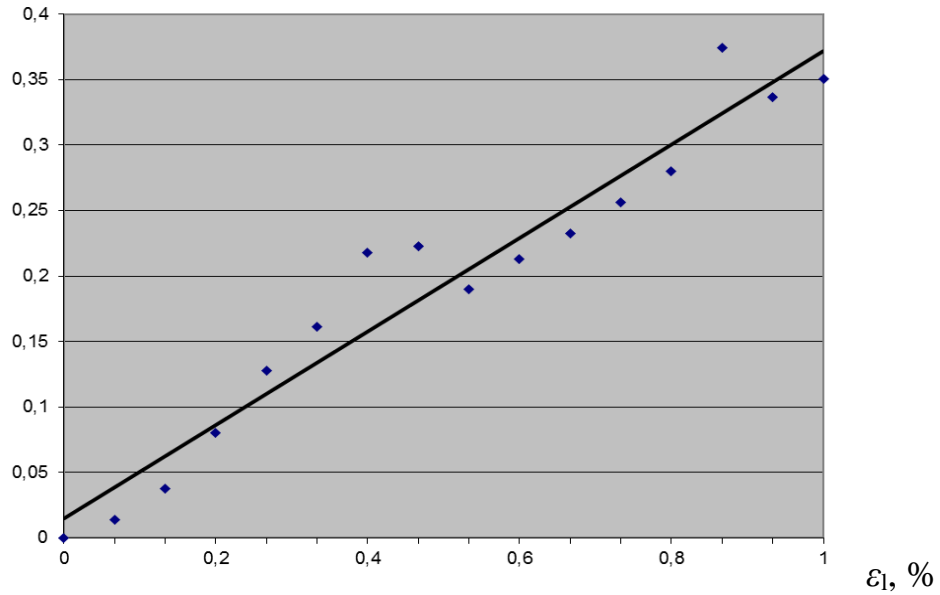
$\Delta R/R_{\pi}$ 

Рис. 2.5. Деформаційні залежності  $\Delta R/R_{\pi}$  для плівки Cu(40 нм) при деформації  $\Delta \varepsilon_l = 1 \%$

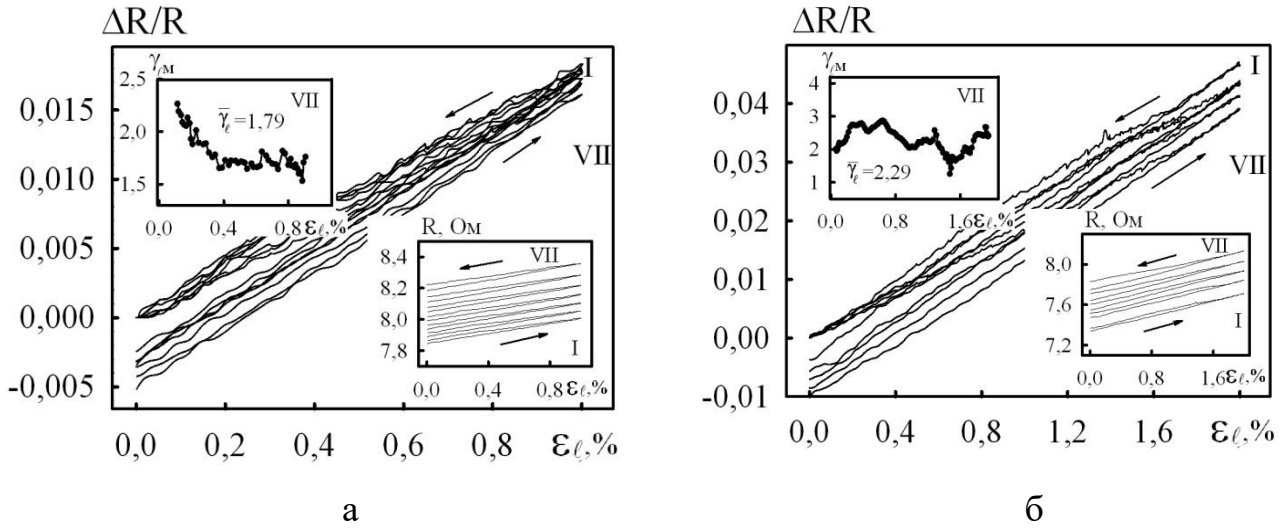


Рис. 2.6. Деформаційні залежності  $\Delta R/R_{\pi}$ ,  $\gamma_{Lm}$  та  $R$  для плівки Ag(60) при деформації  $\Delta \varepsilon_l = 1 \%$  (а) і  $\Delta \varepsilon_l = 2 \%$  (б)

Отримані залежності носять типовий характер для металевих плівкових матеріалів. Розрахунок інтегрального коефіцієнта поздовжньої тензочутливості згідно залежностей на рис. 2.4 і рис. 2.5 дає величини  $KT_n = 25,9$  одиниць та  $KT_{zn} = 25,2$  одиниць при  $\Delta\varepsilon_1 = (0-1)\%$ . (рис. 2.5). Цей результат завищений по відношенню до інших металевих плівок. Можливо у наших експериментах у процесі деформації відбувалося руйнування зразка.

Також розглянемо дослідження деформаційних залежностей електричного опору для плівки Ag (60) (рис. 2.6). Отримані залежності також носять типовий характер для металевих плівкових матеріалів. Розрахунок інтегрального коефіцієнта поздовжньої тензочутливості згідно залежностей на рис.2.6 дає величини  $KT = 1,8$  при  $\Delta\varepsilon_1 = (0-1)\%$  та  $KT = 3,0$  при  $\Delta\varepsilon_2 = (0-2)\%$ . Ці дані теж добре узгоджуються із середніми величинами  $KT$ , отриманими шляхом усереднення миттєвих коефіцієнтів тензочутливості по інтер-валу деформації: 1,8 одиниць у першому випадку і 3,0 одиниць – у другому [13].

## ВИСНОВКИ

1. У результати виконання кваліфікаційної роботи розглянуті питання щодо явища тензочутливості, яке широко застосовується при тензометрії деформацій різного типу. На цьому явищі побудовано ряд датчиків (тензодатчики). Поруч з чутливими елементами масивних тензодатчиків широко використовуються металеві плівкові датчики (термостабільні, з порівняно низьким коефіцієнтом тензочутливості  $\gamma \approx 10$ ).

2. Розглянуто особливості ефекту тензочутливості одношарових плівок. Було встановлено, що для одношарових плівок Cu та Ag коефіцієнт тензочутливості лежить в межах  $\gamma \approx 1,9 - 28,5$ .

3. Розглянута і освоєна методика експериментального дослідження тензорезистивних властивостей тонких металевих плівок, одержаних методом термічного випарування у вакуумній установці ВУП-5М, при деформаціях від 0 до 1% та від 0 до 2%. Методика була апробована на прикладі плівок Cu та Ag. Підтверджені висновки про величини коефіцієнтів поздовжньої тензочутливості для плівок Cu –  $KT_H = 25,9$  одиниць та  $KT_{3H} = 25,2$  одиниць, і та про аномально малу величину інтегрального коефіцієнта поздовжньої тензочутливості для плівок Ag  $KT = 1,8 - 3,0$  одиниць.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Что следует знать о тензорезисторах / В.А. Тесленко. // ПиКАД. – 2006. – № 1. С. 48-52.
2. Чувствительный элемент датчика давления на основе пленок Cr и Cu или Fe / И. М. Пазуха, И. Е. Проценко. // Журнал технической физики. – 2010. – Том 80, вып. 4. – С. 140-144.
3. Layers with the tensoresistive properties and their possible applications in medicine / L.P. Ichkitidze, A.Yu. Gerasimenko, V.M. Podgaetsky, S.V. Selishchev. // Materials Physics and Mechanics Materials Physics and Mechanics. 2018. – V. 37. – P. 153-158.
4. Granular metal-carbon nanocomposites as piezoresistive sensor films – Part 1 / G. Schultes, H. Schmid-Engel, S. Schwebke et all. // J. Sens. Sens. Syst. – 2018. – V. 7. – P. 1-11/
5. Проценко І.Ю. Тонкі металеві плівки (технологія і властивості): навч. посіб. / І.Ю. Проценко, В.А. Саєнко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2002. – 187 с.
6. Мала гірнича енциклопедія [Текст] : в 3 т. / за ред. д-ра техн. наук Білецького В. С. - Донецьк : Донбас, 2004 - 2013.
7. Особенности тензорезистивного эффекта в тонких металлических пленках в области упругой и пластической деформации / І. П. Бурик, Д. В. Великодний, Л.В.Однорець, І. Ю. Проценко, Е.П. Ткач. // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81 Випуск. 2. – С. 75-81.
8. Эффект тензочувливості в металевих плівкових матеріалах / Л.В. Однорець, С.І. Проценко, А.М. Черноус, І.Ю. Проценко. // Успехи физики металлов. – 2007. – Т. 8, № 2. – С. 109-156.
9. Тензочувливість металевих плівок: теоретичні моделі, експериментальні результати, застосування (огляд) / Д.В. Великодний, Л.В. Однорець, Т.М. Гричановська, І.Ю. Проценко, С.І. Проценко. // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2007. – № 1. – С. 1-51.

10. Однодворець Л.В. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів в умовах фазоутворення: монографія / Л.В. Однодворець, С.І. Проценко, А.М. Чорноус; за загальною редакцією проф. І.Ю. Проценка – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 204 с.

11. Фізико-механічні процеси у тонкоплівковому тензорезисторі / Є.О. Забіла, І.Ю. Проценко // Вісник Сумського державного університету. – 2005. – Т. 4 (76). – С.1-14.

12. Тензоефект в двошарових плівках Cu/Cr та Fe/Cr / Д.В. Великодний, С.І. Проценко, І.Ю. Проценко // ФІП. – 2008. – Т. 6, № 1-2. – С. 37-42.

13. Проценко І.Ю. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми): навчальний посібник / І.Ю.Проценко, Л.В.Однодворець. - Суми: Сумський державний університет, 2011. – 231 с.