

PACS numbers: 68.60.Dv, 68.65.Ac, 72.10.Fk, 73.50.Lw, 73.61.At, 85.40

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МІКРОННИХ І НАНОРОЗМІРНИХ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК

**О.П. Ткач, Л.В. Однодворець, С.І. Проценко, Д.В. Великодний,
К.В. Тищенко, І.Ю. Проценко**

Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна
E-mail: protsenko@aph.sumdu.edu.ua

Проаналізовано літературні дані стосовно механічних і тензорезистивних властивостей масивних конденсатів і нанорозмірних плівок при пружній і пластичній деформації. Представлені результати дослідження тензорезистивних властивостей одношарових (Fe, Cr, Pd і Pt) та двошарових (Fe/Cr, Cu/Cr і Pd/Fe) плівок, зокрема залежності величини деформації, при якій відбувається перехід від пружної до пластичної деформації, від товщини.

Ключові слова: МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, МАСИВНІ КОНДЕНСАТИ, НАНОРОЗМІРНІ ПЛІВКИ, ПРУЖНА І ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ.

(Одержано 09.04.2010, у відредагованій формі – 27.04.2010.)

1. ВСТУП

Унікальні фізико-механічні властивості нанокристалічних масивних і нанорозмірних та нанокристалічних плівкових зразків постійно знаходяться в полі зору дослідників. Цьому підвищеному інтересу передували дослідження [1] механічних властивостей ниткоподібних кристалів (т.зв. «вусів»), в яких було виявлено широкий діапазон пружної деформації, яка доходила до декількох відсотків (наприклад, 3,8 % (Cu, Cr) і 4,9 % (Fe)), що перебільшує в декілька сотень разів вказаний діапазон для монокристалів; високу коерцитивну силу, міцність, яка лише на 15 % менше її теоретичної величини.

У процесі дослідження масивних і плівкових нанокристалічних матеріалів велика увага приділялась дослідженню їх механічних властивостей і механізму пластичної деформації [2-12]. Так, у роботах [2-6] було показано, що початкова стадія пластичної деформації масивних нанокристалічних матеріалів обумовлена процесом мікропросковзування по межах зерен і не може бути описана в рамках класичного дислокаційного механізму [3, 4]. В роботах [5, 6] проведені дослідження механізму деформації розтягом масивних зразків Cu (розмір нанозерен 40 ÷ 60 нм) і сплаву Fe_{73,5}CuNb₃Si_{13,5}B₉ (10 нм) безпосередньо в колоні електронного мікроскопу. Зроблено висновок, що у цьому випадку деформація реалізується, головним чином, за рахунок розвороту нанозерен (ротаційні моди деформації) та взаємодії дефектів у межах і примежових зонах. Авторами робіт [7, 8] проведені дослідження методом “in situ” механічних властивостей і механізму деформації на прикладі тонких плівок Al мікронної товщини. Було встановлено, як і в роботах [2-4], що механічні характеристики вільних плівок і масивних зразків значно відрізняються, що пояснюється локальним зменшенням товщини

зерен при виникненні внутрішніх напружень у результаті локалізації дислокацій в їх об'ємі. Автори роботи [13] звернули увагу на суттєву відмінність електрофізичних властивостей нанорозмірних металевих плівок у порівнянні з масивними матеріалами. У роботі [14] проведені вимірювання модуля Юнга для багат шарової плівкової системи на основі двошарових нанорозмірних фрагментів Cu/Ni при їх товщині від 1,6 до 12 нм. Було отримано, що величина модуля Юнга (E) багат шарової системи складає від 1,02 до 1,10 розрахункової величини $E = c_1E_1 + c_2E_2$, де c_1 і c_2 – концентрація атомів Cu і Ni в окремому фрагменті.

2. МЕХАНІЧНІ І ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ КОНДЕНСАТІВ МІКРОННОЇ ТОВЩИНИ І МАСИВНИХ ЗРАЗКІВ

Авторами робіт [10, 11] були отримані діаграми деформації крупнозернистих (розмір зерен більше 1,5 мкм) і дрібнозернистих (менше 0,5 мкм) плівок Au в інтервалі товщин 0,2 ÷ 2 мкм. Встановлено, що в першому випадку механічні властивості не дуже відрізняються від масивних зразків, за винятком низької пластичності плівок. При переході до дрібнозернистих зразків спостерігалася сильна залежність механічних властивостей від швидкості деформації.

Систематичні дослідження розмірного ефекту в пластичності субмікронних (товщина від 0,2 до 1 мкм) плівок Cu, Al та Au представлені в роботі [12]. Отримані діаграми деформації (рис. 1, 2) дозволили авторам визначити модуль Юнга і встановити нові особливості механічних властивостей. Так, наприклад, в плівках Cu при зменшенні товщини від 1 до 0,2 мкм межі текучості збільшуються від 160 до 345 МПа, а в плівках Al товщиною 0,2 мкм не спостерігається пластичність і вони крихко руйнуються при напруженні 375 МПа. Перехід від пружної до пластичної деформації спостерігається при поздовжній деформації $\varepsilon_{lner} \cong 0,25\%$ (плівки Al); $0,1 \div 0,2\%$ (Cu) і $0,05 \div 0,15\%$ (Au), що відповідає аналогічній величині, отриманій авторами [15] на прикладі плівок Pd (рис. 3) товщиною 4 мкм ($\varepsilon_{lner} \cong 0,25\%$) і багат шарової плівкової гетероструктури на основі Mo і Cu з товщиною окремих шарів 15 нм ($\varepsilon_{lner} \cong 0,235\%$). Аналогічні результати на прикладі плівок мікронної товщини також були отримані в роботах авторів [16, 17, 7, 18]. Зокрема, автор [16] на епітаксіальних, полікристалічних орієнтованих і квазіаморфних плівках Au товщиною 50 ÷ 1500 нм вивчав механічні властивості (межа пружності (ε_{nep}) і міцності (σ_m) та модуль Юнга) в залежності від товщини. Було встановлено, що $\varepsilon_{nep} \leq 1\%$, а σ_m і E не мають чіткої кореляції із товщиною плівок, хоча в обох випадках спостерігається загальна тенденція їх зменшення із збільшенням товщини з проходженням залежностей через максимум. Автор відмічає значне збільшення σ_m у порівнянні з масивними зразками: 20 ÷ 48 МПа (плівки); 10 ÷ 15 МПа (відпалені зразки масивного Au) та 20 ÷ 30 МПа («вуси»). У той же час модуль Юнга має дещо зменшену величину у порівнянні з масивними монокристалами: 4 ÷ 8 ГПа (плівки) і 4,2 ÷ 11,4 ГПа (масивні монокристали). Ці висновки концептуально повністю узгоджуються із результатами робіт [19, 20], в яких методом молекулярно – динамічного моделювання вивчалися механічні властивості нанокристалічних Cr і Nb.

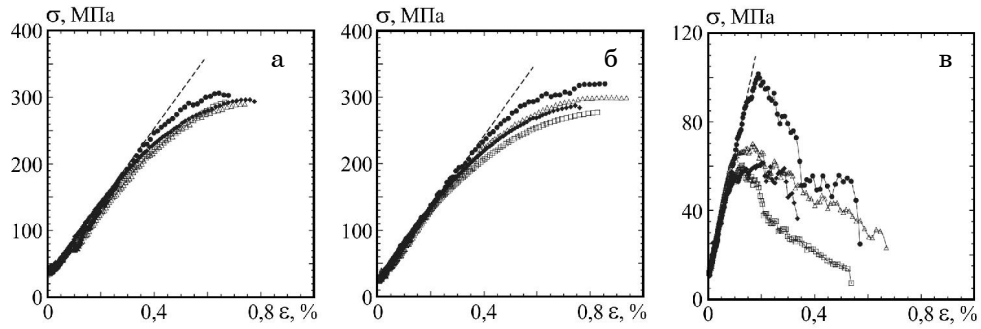


Рис. 1 – Діаграми деформації плівок Au товщиною 0,3 (а); 0,5 (б) і 1,0 мкм (в). Ширина плівок, мкм: 2,5 (•); 5,0 (Δ); 10 (◆) та 20 (□). Із роботи [12]

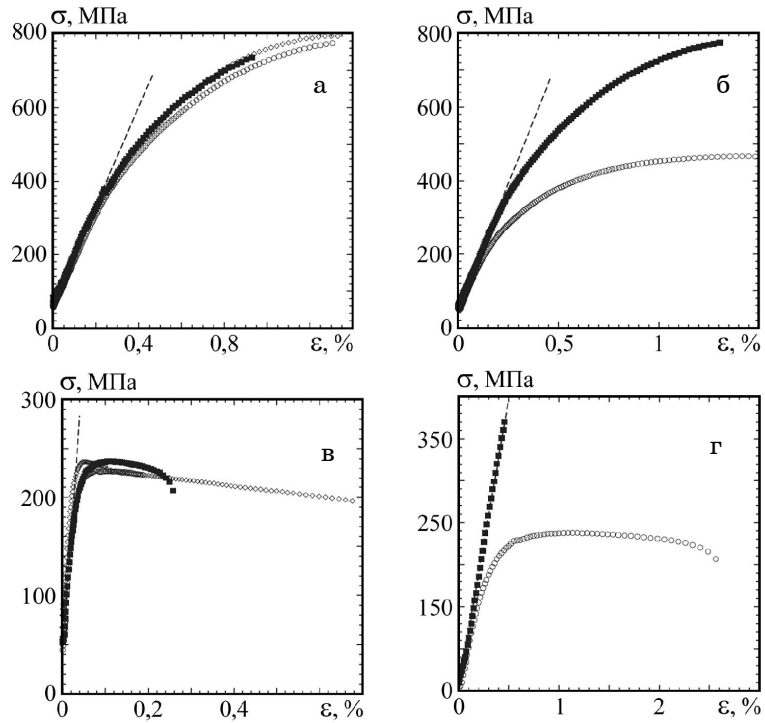


Рис. 2 – Діаграми деформації для плівок Si (а, б) і Al (в, г) товщиною 0,2 (■) і 1,0 (○) мкм. Ширина плівок, мкм: 5 (◇); 10 (■) та 20 (○). Із роботи [12]

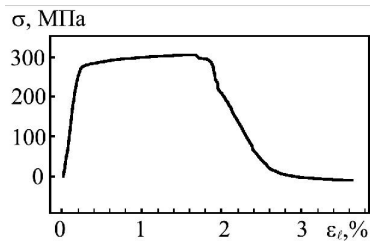


Рис. 3 – Діаграма деформації плівки Pd товщиною 4 мкм. Із роботи [15]

Автори [7, 17] на прикладі плівок Al і Al-1,5 % Ti та Ti-(48-51) % Ni отримали діаграми деформації і встановили, що $\varepsilon_{пер} \cong 0,17$ і $0,30\%$ та $1,0$ і $2,0\%$, відповідно. Автори [18] вивчали залежність величини $\varepsilon_{пер}$ від товщини плівок Cu, отриманих іонним або магнетронним осадженням. Було встановлено, що при іонному осадженні $\varepsilon_{пер} \cong 0,40\%$ при $d \cong 0,5 \div 1,5$ мкм, а при магнетронному осадженні – $\varepsilon_{пер} \cong 0,10 \div 0,3\%$ при $d \cong 1,5 \div 2,5$ мкм.

Аналіз процитованих робіт вказує на те, що основна увага авторів приділяється дослідженню взаємозв'язку між механічними властивостями і структурним станом зразка. При цьому, як і відзначалося нами в роботах [21, 22], практично відсутні дослідження тензорезистивних ефекту в металевих плівках в області великих деформацій (до 2%), яка включає в себе пружну, квазіпружні і пластичну деформацію.

З найбільш загальних міркувань, виходячи зі співвідношення для усередненого у вимірюваних інтервалах деформацій коефіцієнта поздовжньої тензочутливості:

$$\gamma_l = \gamma_l^p + 1 + 2\mu,$$

де $\gamma_l^p = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_l}$, ρ – питомий опір (індекс « ρ » означає, що γ_l

виражається через питомий опір), μ – коефіцієнт Пуасона (при пластичній деформації дорівнює 0,5). Автор [23], в припущенні, що при зерномежовому проковзуванні зерен їх об'ємний опір не змінюється (т. б. $\gamma_l^p \cong 0$), робить висновок, що при пластичній деформації $\gamma_l \cong 2$. Цей результат в якійсь мірі підтверджується у випадку масивних крупнокристалічних зразків. Наприклад, згідно наших даних [24], одержаних на дротах Cu, Ni і Mo (діаметр D від 0,06 до 0,44 мм; довжина від 7 до 50 см), величина $\gamma_l^p \cong - (0,2 \div 0,3)$ при $\mu \cong 0,4 \div 0,5$ (Cu); $(0,25 \div 0,50)$ при $\mu \cong 0,35 \div 0,40$ (Ni) або $\div 0,75$ при $\mu \cong 0,37 \div 0,40$ (Mo), відповідно (на рис. 4, як приклад, наведені дані для тонких дротів Cu), що узгоджується стосовно величини μ із даними [19, 20]. Відмітимо, що розтяг зразків нами продовжувався до розриву дротів, що дозволило визначити деформацію їх руйнування: $\varepsilon_{l_{max}}^{Cu} \cong 0,8\%$ або $1,6\%$ ($D = 0,06$ або $0,12$ мм); $\varepsilon_{l_{max}}^{Ni} \cong 0,5\%$ ($D = 0,44$ мм) і $\varepsilon_{l_{max}}^{Mo} \cong 1,06\%$ ($D = 0,21$ мм).

У плівкових матеріалах значний внесок у величину коефіцієнта тензочутливості дає зерномежове розсіювання електронів (див., наприклад, [22, 25]), що обумовлює величину коефіцієнта γ_l до декількох десятків одиниць [21, 25]. Очевидно, що цей механізм розсіювання, який приводить до зменшення

середньої довжини вільного пробігу, і відповідне її зростання за рахунок збільшення розмірів кристалітів і обумовлюють, як два конкуруючих механізми, результуюче значення $\gamma_l^p < 0$ (дроти Cu і Mo) та $\gamma_l^p > 0$ (дроти Ni).

Виходячи із наведених даних, мету нашої роботи можна сформулювати вивчення особливостей тензоефекту в одношарових (Fe, Cr, Pd і Pt) та двошарових (Fe/Cr, Cu/Cr і Pd/Fe) плівках. Зокрема, отримання тензорезистивним методом залежності величини ε_{lner} від товщини.

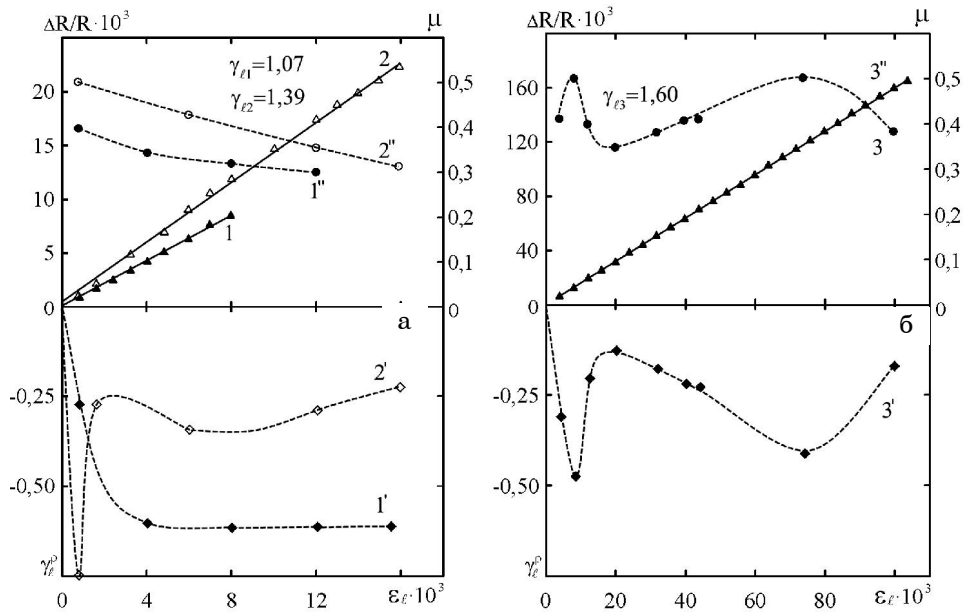


Рис. 4 – Залежність відносної зміни опору $\Delta R/R$ (1-3), γ_l^p (1'-3') та розрахункової μ (1''-3'') для дротів Cu. Діаметр, мм: $6 \cdot 10^{-2}$ (1), $12 \cdot 10^{-2}$ (2) (а) та $28 \cdot 10^{-2}$ (3) (б)

3. КОРЕЛЯЦІЯ МІЖ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВОК ТА ЇХ ПОЗДОВЖНЬОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ

Одно-та двошарові плівки (товщина окремих шарів від 10 до 80 нм) були отримані методом термічного випаровування в камері установки ВУП-5М (тиск залишкових газів $\sim 10^{-4}$ Па) на підкладку з полістиролу і заздалегідь підготовленими контактними майданчиками [21, 25]. Перевага цієї підкладки у порівнянні з підкладками з склотекстоліту, фторопласту або нікелевої фольги, покритої діелектриком, які використовувалися нами раніше, полягає в тому, що вона має пружні властивості в діапазоні деформації до 2 %. Необхідно особливо підкреслити, що висока адгезія металевих плівок до полістиролу призводить до того, що вимірювання тензорезистивних властивостей здійснювалось на системі плівка/підкладка. При цьому, оскільки межа пружності металевих плівок ε_{lner} менше 2 %, то всі вимірювання були проведені в умовах пружно- або пластичнодеформованої плівки та пружнодеформованої підкладки. Необхідно відмітити, що дана методика вимірювання електрофізичних властивостей відносно тонких плівок (до

100 нм) використовується і іншими авторами (див., наприклад, [26]). При визначенні величини $\varepsilon_{lпер}$ непрямым методом (за залежністю опору R від ε_l) ми орієнтувалися на результати робіт [10-15].

Дослідження тензорезистивних властивостей проводилося за допомогою розробленої автоматизованої системи [21, 25], що дало можливість здійснити велику кількість деформаційних циклів "розтяг-стиснення" у статичному і динамічному режимах роботи при швидкості деформації від 0 до 0,1 %/с. Апаратну основу цієї системи становлять частотомір, 8-канальний 16-бітний сигма-дельта АЦП ADAM-4018, за допомогою якого проводиться вимірювання опору зразка; релейний модуль ADAM-4068 – джерело керуючої напруги електродвигуна; перетворювач інтерфейсів USB → RS232/422/485 ADAM-4561; асинхронний конденсаторний електродвигун і веб-камера Creative Labs. Управління експериментом і обробка результатів здійснювалася на основі програмного забезпечення, розробленого в середовищі LabVIEW 8.50 з використанням модуля машинного зору LabVIEW Vision Development Module 8.2.

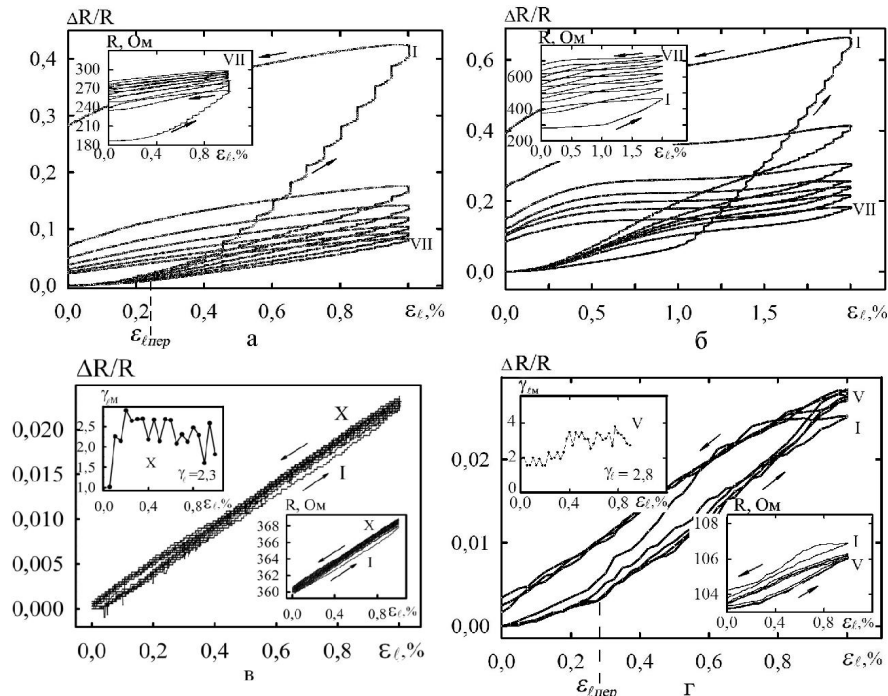


Рис. 5 – Залежності відносної зміни опору ($\Delta R/R$), опору (R) і середнього коефіцієнта тензочутливості (γ_{lm}) від ε_l для плівок Cr (30) (а, б), Pt (38) (в) і Pd (30) (г). У дужках вказана товщина в нм. На вставках – залежність R і γ_{lm} від ε_l для різних деформаційних циклів (позначені римськими цифрами)

Дослідження кристалічної структури і фазового складу проводилися методом просвічуючої електронної мікроскопії та електронографії, згідно яких плівки Cr і Fe мають ОЦК, а Cu, Pd і Pt - ГЦК решітки з параметрами, близькими до величин в масивних зразках. Фазовий склад двошарових плівок Fe/Cr і Pd/Fe відповідає ОЦК або ГЦК твердого

розчину (α -Fe, Cr) та (Pd, Fe), а плівки Cr/Cu - ОЦК Cr + ГЦК Cu (біпластина). Структурний стан плівкових зразків до їх руйнування контролювався оптичним методом за допомогою світло- та фотодіода, які розміщувалися над і під підкладкою, відповідно.

На рис. 5 наведені приклади деформаційних залежностей для одно- і двошарових плівок для двох інтервалів деформації $\Delta\varepsilon_{l1} = (0 \div 1) \%$ та $\Delta\varepsilon_{l2} = (1 \div 2) \%$. Їх характерними особливостями є те, що після переходу від пружної до пластичної деформації при першому деформаційному циклі (наприклад, при $\varepsilon_{lпер} \cong 0,2 \%$ на рис. 5 а) при наступних деформаційних циклах зразок знаходиться в пластичному стані, а зміна $\Delta R/R = [R(\varepsilon_l) - R(0)]/R(0)$ де $R(0)$ – початковий опір (наприклад, при $\varepsilon_l \cong 1,0\%$ на рис. 1 б) обумовлена, на наш погляд, різними механізмами пластичної деформації [4-8, 12], а саме, рухом дислокацій до меж зерен, розворотом і стоншенням зерен та зерномежевим проковзуванням. Відмітимо, що на рис. 5 а, б наведені деформаційні залежності для одного й того ж зразка, який спочатку був деформований протягом семи циклів в інтервалі $\Delta\varepsilon_{l1} = (0 \div 1) \%$, а потім – $\Delta\varepsilon_{l2} = (1 \div 2) \%$.

Необхідно акцентувати увагу на досить широкий інтервал пружної деформації плівок Pt (рис. 5 в). У випадку двошарових плівок (рис.6) результати до великої міри носять аналогічний характер.

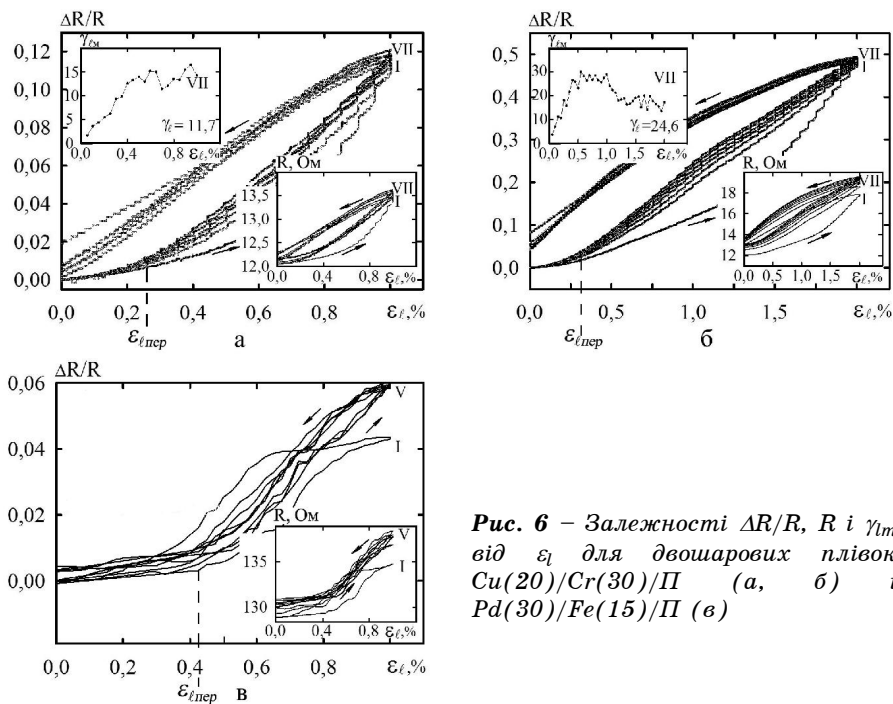


Рис. 6 – Залежності $\Delta R/R$, R і γ_{lm} від ε_l для двошарових плівок Cu(20)/Cr(30)/Π (а, б) і Pd(30)/Fe(15)/Π (в)

На основі одержаних деформаційних залежностей були розраховані усереднені по всьому деформаційному інтервалу значення коефіцієнта тензочутливості γ_l . Узагальнення результатів тензорезистивних досліджень, які узгоджуються із результатами плівок мікронної товщини [12, 15, 16], представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Залежність ε_{lner} від загальної товщини плівок

Плівка Товщина, нм	Cr		Pd		Fe/Cr		Cu/Cr		Pd/Fe
	30	75	18	100	Fe(20)/ Cr(30)	Fe(40)/ Cr(30)	Cu(20)/ Cr(20)	Cu(20)/ Cr(35)	Pd(10)/ Fe(20)
$\varepsilon_{lner}, \%$	0,20	0,10	0,52	0,25	0,40	0,30	0,40	0,25	0,48

Як видно із рисунка 6, величина γ при пластичній деформації має величину декілька десятків одиниць. Відмітимо, що у роботі [26] також отримано, що в області пружної або пластичної деформації плівок Au ($d \cong 100$ нм) $\gamma \cong 1$ або 90 одиниць, відповідно, що узгоджується із нашими результатами і не відповідає загальним міркуванням автора [23].

4. ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних даних вказує на те, що такі механічні характеристики як межа пружності і межа міцності в нанорозмірних і мікронній товщини плівках у декілька разів більші в порівнянні з масивними полікристалами, хоча величина модуля Юнга приблизно однакова.
2. У тонких одно- і двошарових плівках на основі Fe, Cr, Cu і Pd межа пружності $\varepsilon_{lner} \cong 0,2 \div 0,5 \%$, у той час як у плівках Pt – більше 1 %.
3. При пружній деформації нанорозмірних плівок коефіцієнт поздовжньої тензочутливості має величину порядку одиниці, а при пластичній деформації – порядку десятка одиниць.

MECHANICAL PROPERTIES OF MICRON AND NANODIMENTIONAL METAL FILMS

O.P. Tkach, L.V. Odnodvoretz, S.I. Protsenko, D.V. Velykodnyi, K.V. Tyschenko, I.Yu. Protsenko

Sumy State University,
2, Rymsky-Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine
E-mail: protsenko@aph.sumdu.edu.ua

The mechanical and strain resistivity properties data for bulk condensates and nanodimensional films at the elastic and plastic deformation was analyzed. The experimental results of strain resistivity properties of one-layer (Fe, Cr, Pd and Pt) and two-layer (Fe/Cr, Cu/Cr and Pd/Fe) films, in particular, dependence of the deformation at the transition from elastic to plastic deformation from thickness was presented.

Keywords: MECHANICAL PROPERTIES, BULK CONDENSATES, NANODIMENTIONAL FILMS, ELASTIC AND PLASTIC DEFORMATION.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИКРОННЫХ И НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Е.П. Ткач, Л.В. Одноворец, С.И. Проценко, Д.В. Великодний, К.В. Тищенко, И.Е. Проценко

Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007
E-mail: protsenko@aph.sumdu.edu.ua

Проанализированы литературные данные о механических и тензорезистивных свойствах массивных конденсатов и наноразмерных пленок при упругой и пластической деформации. Представлены результаты исследования тензорезистивных свойств однослойных (Fe, Cr, Pd и Pt) и двухслойных (Fe/Cr, Cu/Cr и Pd/Fe) пленок, в частности зависимость величины деформации, при которой происходит переход от упругой к пластической деформации, от толщины.

Ключевые слова: МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МАССИВНЫЕ КОНДЕНСАТЫ, НАНОРАЗМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ, УПРУГАЯ И ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Э.М. Надгорный, *УФН* **77**, №6, 201 (1962) (E.M. Nadgorny, *Sov. Phys. Uspekhi* **5** No3, 462 (1962)).
2. Р.А. Андриевский, А.М. Глезер, *ФММ* **89**, №1, 91 (2000).
3. В.А. Поздняков, А.М. Глезер, *ФТТ* **44**, №4, 705 (2002) (V.A. Pozdnyakov, A.M. Glezer, *Phys. Solid. State* **44** No4, 732 (2002)).
4. А.М. Глезер, *Известия АН. Серия физическая* **67**, №6, 810 (2003).
5. Н.И. Носкова, Е.Г. Волкова, *ФММ* **91**, №6, 100 (2001).
6. Н.И. Носкова, Е.Г. Волкова, *ФММ* **92**, №4, 107 (2001).
7. Н.-J. Lee, G. Cornella, J.C. Bravman, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3415 (2000).
8. Н. Lee, P. Zhang, J.C. Bravman, *J. Appl. Phys.* **93**, 1443 (2003).
9. M. Legros, M. Cabie, D.S. Gianola, *Microsc. Res. Techniq.* **72**, 270 (2009).
10. R.D. Emery, G.L. Povirk, *Acta Mater.* **51**, 2067 (2003).
11. R.D. Emery, G.L. Povirk, *Acta Mater.* **51**, 2079 (2003).
12. H.D. Espinosa, B.C. Prorok, B. Peng, *J. Mech. Phys. Solids* **52**, 667 (2004).
13. Ю.А. Быков, С.Д. Карпухин, Е.И. Газукина, *МТМ* №6, 45 (2000).
14. R.C. Cammarata, T.E. Schlesinger, C. Kim, S.B. Qadri, S. Edelstein, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 1862 (1990).
15. В.М. Иевлев, Е.К. Белоногов, А.А. Максименко, Б.Л. Агапов, В.В. Шкатов, *Деформация и разрушение материалов* (Москва: Изд-во МГИУ: 2006).
16. С.А. Neugebauer, *J. Appl. Phys.* **31**, S152 (1960).
17. A. Ishida, A. Takei, M. Sato, S. Miyazaki, *Thin Solid Films* **281-282**, 337 (1996).
18. D. Ma, K. Xu, J. He, I. Lu, *Surf. Coat. Tech.* **116-119**, 128 (1999).
19. А.П. Шпак, В.В. Огородников, К.В. Малишевский, Ю.А. Куницкий, *Металлофиз. новейшие технол.* **25** №8, 1061 (2003).
20. А.П. Шпак, В.В. Огородников, К.В. Малишевский, Ю.А. Куницкий, *Металлофиз. новейшие технол.* **25** №9, 1201 (2003).
21. S.I. Protsenko, D.V. Velykodnyi, V.A. Kheraj, M.S. Desai, C.J. Panchal, I.Yu. Protsenko, *J. Mater. Sci.* **44**, 4905 (2009).
22. L. Odnodvoretz, S. Protsenko, O. Synashenko, D. Velykodnyi, I. Protsenko, *Cryst. Res. Technol.* **44**, 74 (2009).
23. Н.П. Клокова, *Тензорезисторы* (Москва: Машиностроение: 1990).
24. І.П. Бурик, Д.В. Великодний, Л.В. Оdnодворець, І.Ю. Проценко, Н.І. Шумакова, *ФХТТ* **7** №2, 241 (2006).
25. Д.В. Великодний, С.И. Проценко, И.Е. Проценко, *ФИП* **6** №1-2, 37 (2008).
26. S.P. Lacour, S. Wagner, Z. Huang, Z. Suo, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 2404 (2003).