

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

Особливості тензорезистивних властивостей тонких металевих плівок при пружній і пластичній деформації

Д. В. Великодний, К. В. Тищенко, І. Ю. Проценко

*Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

Представлені результати експериментальних досліджень тензорезистивного ефекту в одношарових плівках і дво- та тришарових плівкових системах на основі Cr і Cu або Fe та Pd і Gd у інтервалах двоохдеформації $\Delta\varepsilon_{l1} = 0-1\%$ і $\Delta\varepsilon_{l2} = 0-2\%$. Проаналізовано залежність межі переходу від пружної до пластичної деформації у досліджуваних плівках від товщини та концентрації компонент у багатшарових плівкових системах. Встановлено, що пластична деформація в одному із шарів плівкової системи може викликати аналогічну деформацію у всій плівковій системі, навіть якщо для інших шарів діапазон деформації ще не досягнув межі переходу пружна/пластична деформація.

The results of experimental studies tensorresistive effect in single-layer films and two- and three-layer film systems based on Cr and Cu or Fe and Pd and Gd in intervals dvoohdeformatsiyi $\Delta\varepsilon_{l1} = 0-1\%$ і $\Delta\varepsilon_{l2} = 0-2\%$. The dependence of limit transition from elastic to plastic deformation in the studied films of thickness and concentration of components in the multilayer film systems found that plastic deformation in one of the film system components can cause a similar deformation in the entire film system, even if other components of the strain range is not reached the limits of the transition elastic/plastic deformation.

Представлены результаты экспериментальных исследований тензорезистивного эффекта в однослойных пленках и двух- и трехслойных пленочных системах на основе Cr и Cu или Fe и Pd и Gd в интервалах двоохдеформации $\Delta\varepsilon_{l1} = 0-1\%$ і $\Delta\varepsilon_{l2} = 0-2\%$. Проанализирована зависимость границы перехода от упругой к пластической деформации в исследуемых пленках от толщины и концентрации компонент в многослойных пленочных системах. Установлено, что пластическая деформация одного из слоев пленочной системы вызывает аналогичную деформацию во всей пленочной системе, даже если для других слоев диапазон деформации еще не достиг границы перехода упругая/пластическая деформация.

Ключові слова: плівкові системи, тензоефект, пружна і пластична деформація, деформація переходу, коефіцієнт тензочутливості.

(Отримано 7 липня 2011 р.)

1. ВСТУП

Значна увага дослідників до тонкоплівкових матеріалів обумовлена можливостями їх практичного застосування для створення чутливих елементів сенсорів неелектричних величин із покращеними характеристиками [1–3]. Дослідження останніх років [4–7] відображають тенденцію пошуку різних матеріалів із покращеними тензорезистивними характеристиками і, зокрема, із підвищеною термостійкістю, більшою величиною коефіцієнта тензочутливості (КТ) і інтервала пружної деформації та лінійністю робочих характеристик. У зв'язку з цим вивчення механічних термо- і тензорезистивних, магніторезистивних, оптичних та ін. властивостей тонких плівок залишаються актуальними і на даний час (див., наприклад, [8], [11–14]). Маловивченими залишаються питання пов'язані з механізмом пластичної деформації та впливом на значення межі переходу від пружної до пластичної деформації таких параметрів як товщина плівок, концентраційні співвідношення компонентів плівкових систем та ступінь дисперсності плівки.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Конденсація плівкових матеріалів Cu, Cr, Gd, Pd та Fe, а також дослідження їх тензорезистивних властивостей проводилося в вакуумній камері установки ВУП-5М (ступінь вакууму $\sim 10^{-4}$ Па) з використанням сучасних засобів автоматизації фізичного експерименту — комп'ютеризованої системи збору даних та управління експериментом, що більш детально описана в роботах [12–14]). Це дало можливість отримати принципово нові експериментальні дані, в тому числі дослідити зміну значень миттєвого ($\gamma_{\ell m} = \frac{1}{R_i} \frac{dR_i}{d\varepsilon_{\ell i}}$) та середнього (γ_{ℓ}) КТ при великій кількості деформаційних циклів. Як відмічалось і в роботах [12, 13] величина γ_{ℓ} залежить від номера циклу «навантаження–зняття навантаження» і, починаючи з V–VII деформаційного циклів виходить на насичення. Саме тому, як найбільш характерні, у роботі наводяться графіки залежності $\gamma_{\ell m}$ від ε_{ℓ} для першого та останнього деформаційних циклів. Кристалічна

структура вивчалася методами електронної мікроскопії та електронографії (прилад ПЕМ-125К).

3. РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Нами проведені дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів на основі Cr і Cu або Fe та Pd і Gd. Структурні дослідження вказують на те, що плівки Cr, Fe і Pd мають кристалічну решітку, яка відповідає масивним зразкам, а плівки Gd малої товщини знаходяться в аморфному стані (*a*-Gd), а відносно товсті — мають двофазний склад *a*-Gd + GdH₂.

Одношарові плівки. На **рисунках 1–3** наведені серії типових деформаційних залежностей для плівок Cr, Gd і Pd, на основі яких проводився розрахунок залежностей γ_ℓ від ε_ℓ для двох інтервалів деформації $\Delta\varepsilon_\ell = 0-1\%$ та $\Delta\varepsilon_\ell = 0-2\%$. Особливість даних залежностей — відмінність I-го деформаційного циклу «навантаження–зняття навантаження» у діапазоні деформацій $\Delta\varepsilon_\ell = 0-1\%$ від подальших, що пояснюється протіканням різних релаксаційних процесів (час-

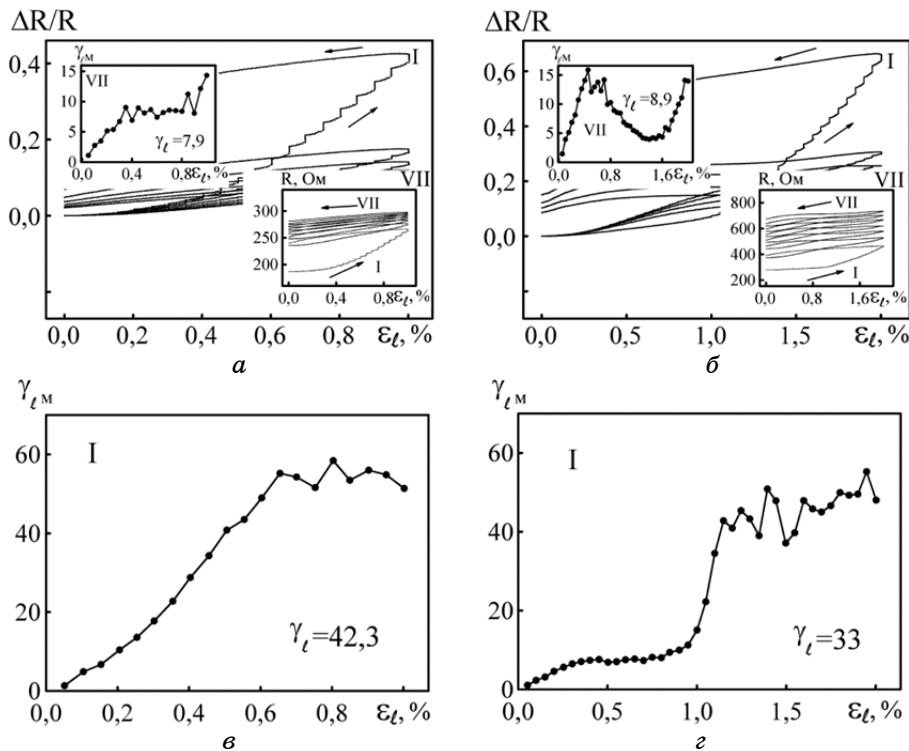


Рис. 1. Залежність $\Delta R/R$, γ_ℓ і R від ε_ℓ для $\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-1\%$ (а, б) і $\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 0-2\%$ (в, г) для плівки Cr(30 нм)/П. Римськими цифрами позначені номери деформаційних циклів.

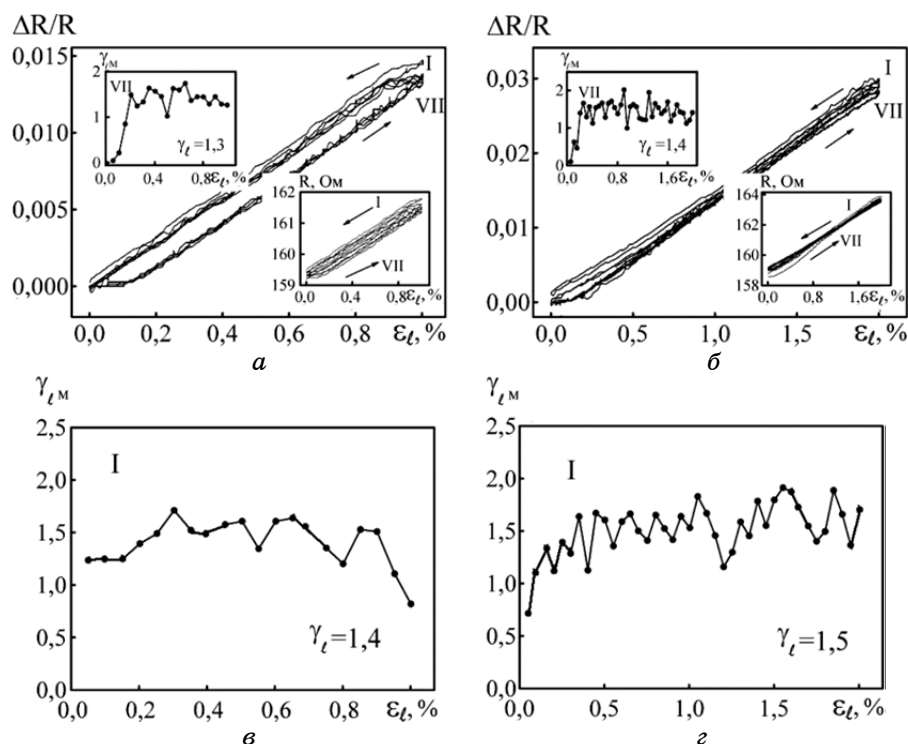


Рис. 2. Залежність $\Delta R/R$, γ_{ℓ} і R від ε_{ℓ} для $\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-1\%$ (а, б) і $\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 0-2\%$ (в, г) для плівки $a\text{-Gd} + \text{GdH}_2(75)/\text{П}$.

тковий поворот зерен, мікропластична деформація, перерозподіл і рух дефектів кристалічної будови та інохідних атомів). При подальших циклах спостерігається певна стабілізація тензорезистивних властивостей плівкових систем.

Значний інтерес при дослідженні тензорезистивних властивостей становить саме I-й деформаційний цикл, оскільки при його реалізації проявляється механізм переходу від пружної до пластичної деформації. 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 та залежності γ_{ℓ} і R від ε_{ℓ} , а й поява сходинки, що з'являються в області пластичної деформації під час зупинок мікрогвинта на кожній поділці (через $0,05\%$ деформації) на 10 с і відсутні в області пружної деформації.

Слід зазначити, що певні труднощі при інтерпретації отриманих результатів пов'язані з тим, що на величину γ_{ℓ} починає впливати фактор, який раніше не брався до уваги, а саме — межа переходу пружна/пластична деформація. І тому γ_{ℓ} при певній величині деформації

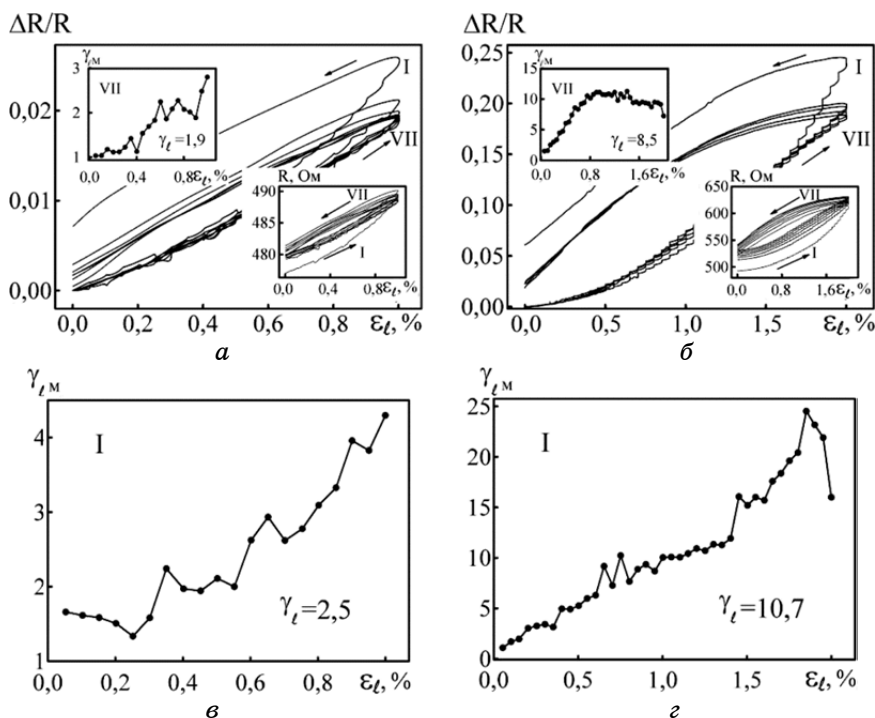


Рис. 3. Залежність $\Delta R/R$, γ_I і R від ε_I для $\Delta\varepsilon_{I1} = 0-1\%$ (а, б) і $\Delta\varepsilon_{I2} = 0-2\%$ (в, г) для плівки Pd(30)/П.

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 γ_I для областей пружної деформації, а також γ_I при загальній деформації $\Delta\varepsilon_I = 0-1\%$ та $\Delta\varepsilon_I = 0-2\%$, що дозволяє дати узагальнену характеристику досліджуваних процесів.

Плівкові системи на основі Cr і Cu або Fe та Pd/Gd/Pd/П. Виходячи з типових залежностей для зазначених плівкових систем, можна зробити відповідний висновок, що діапазон пружної деформації залежить від загальної товщини плівкової системи та зменшується зі збільшенням концентрації атомів плівки з меншою межею пружності.

Наприклад, у плівковій системі Cu/Cr/П (рис. 4) межа переходу від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації може змінюватися у межах від 0,4 до 1,5% у залежності від товщини плівки Cr (хоча зазначимо, що для плівки Cu дана межа переходу знаходиться за межами 2% деформації). Значення величини цього переходу зменшується зі збільшенням товщини шару Cr, що проілюстровано в таблиці 1. У той же час межа переходу до пластичної деформації

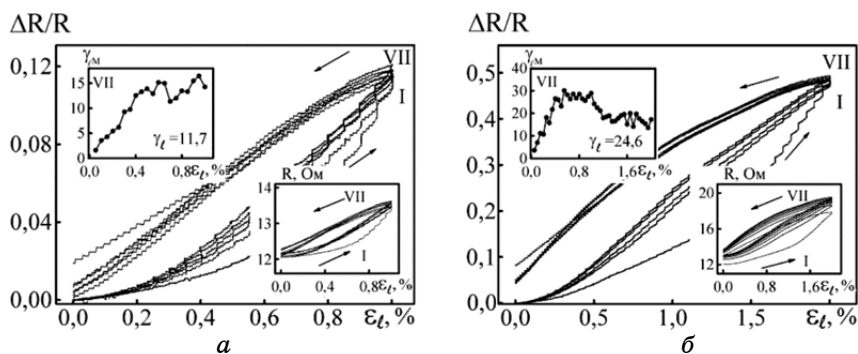


Рис. 4. Залежність $\Delta R/R$, γ_I і R від ε_I для $\Delta\varepsilon_{I1} = 0\text{--}1\%$ (а) і $\Delta\varepsilon_{I2} = 0\text{--}2\%$ (б) для плівки $\text{Cu}(20)/\text{Cr}(30)/\Pi$ ($C_{\text{Cu}} = 59$ ат.%).

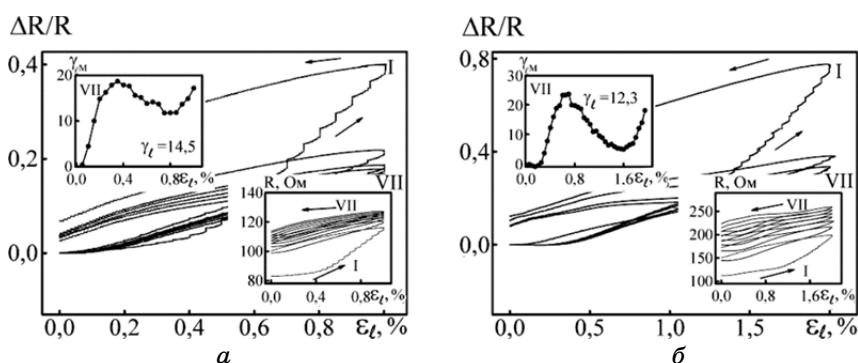


Рис. 5. Залежність $\Delta R/R$, γ_I і R від ε_I для $\Delta\varepsilon_{I1} = 0\text{--}1\%$ (а) і $\Delta\varepsilon_{I2} = 0\text{--}2\%$ (б) для плівки $\text{Fe}(20)/\text{Cr}(30)/\Pi$ ($C_{\text{Fe}} = 59$ ат.%).

для плівкової системи $\text{Fe}/\text{Cr}/\Pi$ (рис. 5) знаходиться у значно вужчому діапазоні деформацій від 0,15 до 0,4% і збільшується зі збільшенням концентрації атомів Cr у плівковій системі (таблиця 2).

До особливостей деформаційних залежностей плівкової системи Cu/Cr можна віднести те, що I-й деформаційний цикл у переважній більшості відрізняється від подальших циклів (значення γ_I 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 Fe/Cr відмінність γ_I для I-го деформаційного циклу від подальших не перевищує 10%.

Розглядаючи плівкову систему $\text{Pd}/\text{Gd}/\text{Pd}/\Pi$ (рис. 6), ми робимо висновок про те, що вона характеризується широким діапазоном

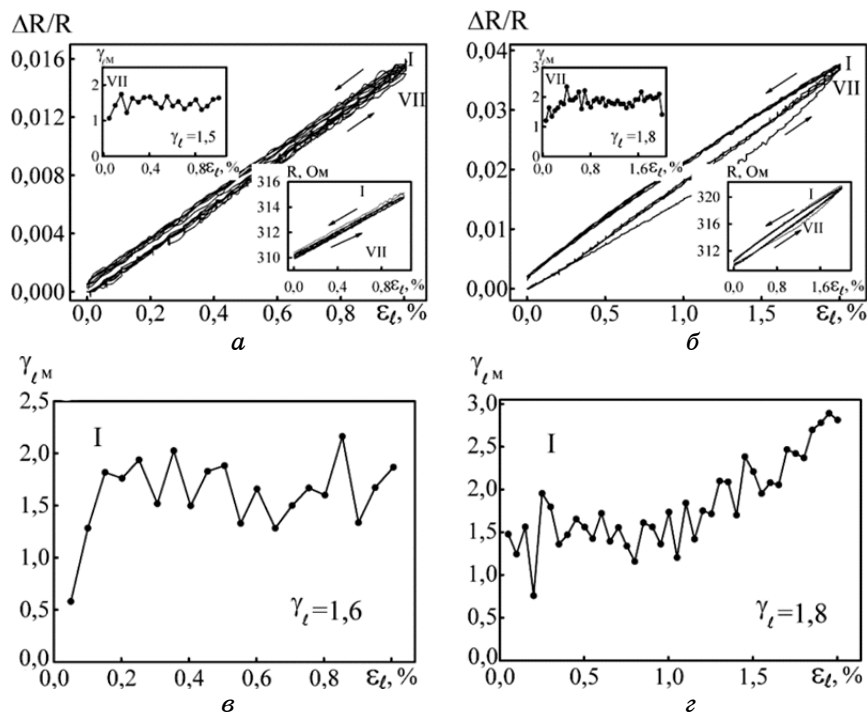


Рис. 6. Залежність $\Delta R/R$, γ_{ℓ} і R від ε_{ℓ} для $\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-1\%$ (а, б) і $\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 0-2\%$ (в, г) для плівки Pd(9)/a-Gd(19)/Pd(4)/Π ($C_{Pd} = 61$ ат.%).

ТАБЛИЦЯ 1. Залежність інтервалу межі переходу пружна/пластична деформація і пружних модулів від концентрації атомів Cr у двошаровій плівці Cu/Cr/Π.

Плівкова система	c_{Cr} , ат.%	$\varepsilon_{\ell}^{пер}$, %
Cu(20)/Cr(5)/Π	20	1,30
Cu(40)/Cr(10)/Π	23	1,20
Cu(25)/Cr(15)/Π	36	0,85
Cu(20)/Cr(15)/Π	41	0,75
Cu(20)/Cr(20)/Π	50	0,60
Cu(20)/Cr(30)/Π	59	0,50
Cu(20)/Cr(35)/Π	63	0,45
Cu(20)/Cr(45)/Π	69	0,40

пружної деформації (більше 2%), подібно до одношарових плівок Gd і Cu. У той же час система має не високі значення γ_{ℓ} (близько 1,5–2 одиниць).

Межа переходу пружна/пластична деформація вносить свої ко-

ТАБЛИЦЯ 2. Залежність інтервалу межі переходу пружна/пластична деформація від концентрації атомів Cr у двошаровій плівці Fe/Cr/П.

Плівкова система	c_{Cr} , ат. %	$\varepsilon_l^{пер}$, %
Fe(70)/Cr(20)/П	0,23	0,15
Fe(50)/Cr(30)/П	0,37	0,25
Fe(45)/Cr(30)/П	0,40	0,30
Fe(40)/Cr(30)/П	0,43	0,30
Fe(20)/Cr(30)/П	0,59	0,40

рективи 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 — перехід до пластичної деформації при менших значеннях ε_l призводить до збільшення середнього значення величини КТ.

Автори виражають подяку студ. З. М. Макусі за допомогу при проведенні експериментів.

Робота виконана в рамках бюджетної тематики при фінансовій підтримці МОНМС України.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. C. P. O. Treutler, *Sens. Actuators A.*, **91**: 2(2001).
2. G. Rieger, K. Ludwig, J. Hauch, W. Clemens, *Sens. Actuators A.*, **91**: 7 (2001).
3. A. V. Amor, T. Budde, H. H. Gatzel, *Sens. Actuators A.*, **129**: 41 (2006).
4. A. Yamamoto, T. Tsutsumoto, *Diamond Relat. Mater.*, **13**: 863 (2004).
5. G.-S. Chung, *Sens. Actuat. A.*, **135**: 355 (2007).
6. B. Fu, L. Gao, *Scripta Mater.*, **55**: 521 (2006).
7. J. Cao, Q. Wang, H. Dai, *Phys. Rev. Lett.*, **90**: 157 (2003).
8. Л. В. Одноворець, С. І. Проценко, А. М. Черноус, І. Ю. Проценко, *Успехи физ. мет.*, **8**, № 2: 109 (2007).
9. H.-J. Lee, P. Zhang, J. C. Bravman., *J. Appl. Phys.*, **93**: 1443 (2003).
10. S. P. Lacour, S. Wagner, Z. Huang, Z. Suo., *Appl. Phys. Lett.*, **82**: 2404 (2003).
11. Є. О. Забіла, І. Ю. Проценко, *УФЖ.*, **50**: 729 (2005).
12. В. Великодний, С. І. Проценко, І. Ю. Проценко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **30**: 1659 (2008).
13. S. I. Protsenko, D. V. Velykodnyi, V. A. Keraj, M. S. Desai, C. J. Panchal, I. Yu. Protsenko, *J. Mater. Sci.*, **44**: 4905 (2009).
14. И. П. Бурый, Д. В. Великодний, Л. В. Одноворець, И. Е. Проценко, Е. П. Ткач, *ЖТФ*, **81**: 331 (2011).