

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТИТАНА, КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ

И.Е. Проценко, А.Н. Черноус, О.В. Шовакопляс
(Сумский государственный университет, г. Сумы)

ВВЕДЕНИЕ

Двухслойные металлические пленки представляют интерес как объекты для исследования закономерностей и явлений, которые слабо проявляются или не характерны однослойным пленочным образцам. К таким явлениям можно отнести размерные эффекты в электропроводности, где, например, наблюдается отличие в характере размерной зависимости температурного коэффициента сопротивления (ТКС). Также в двухслойных пленках возможно образование интерметаллических соединений и наличие диффузионных процессов. Кроме этого, на границах раздела слоев возникают макронапряжения термического происхождения, которые существенно могут влиять на физические свойства пленочных образцов.

Кроме научного интереса, двухслойные пленочные системы являются объектами, которые находят широкое применение во многих областях современной техники.

В данной работе приведены результаты исследования температурных и размерных явлений в двухслойных пленках на основе Ni и Ti, Co и Ti.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Тонкопленочные образцы были получены методом электронно-лучевого испарения в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па при температуре подложки 300 К. В качестве подложек для изучения температурных и размерных эффектов в электропроводности использовались полированные стеклянные пластины с вплавленными молибденовыми стержнями. Для исследования фазового состава

применялись монокристаллы NaCl, сколотые по плоскости (001). Стабилизация электрофизических свойств осуществлялась по схеме: нагрев от 300 до 700 К с последующим охлаждением до 300 К на протяжении 3-4 циклов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фазовый состав. Фазовый состав пленок изучался при помощи электронного микроскопа ЭММА-4 в режиме дифракции. Как показали данные исследования, конденсированные со скоростью $\sim (1...2)$ нм/с пленки титана стабилизируются в гексагональную фазу. Пленки никеля и кобальта стабилизируются в ГЦК и ГП+ следы ГЦК-фазы (фиксируются линии (111) и (200) соответственно. О фазовом составе двухслойных пленок Ti/Ni можно судить из рис. 1 и табл. 1. Результаты показывают, что после отжига параметр кристаллической решетки несколько увеличивается, что обусловлено поглощением пленками газов остаточной атмосферы. Исходя из данных табл. 1, фазовый состав двухслойных пленок можно интерпретировать как ГП-Ti + ГЦК-Ni со следами гексагонального TiNi₃. Так на электронограммах фиксируются линии (02.4) TiNi₃ (неотожженные образцы) и (02.1) TiNi₃ (отожженные образцы), которые не накладываются на другие линии, и линии (11.0) и (03.0) TiNi₃, которые совпадают с линиями (10.0) и (11.0) Ti, что затрудняет правильную интерпретацию фазового состава. Отметим также, что практически все линии TiNi₃ имеют очень близкие или совпадающие с Ti межплоскостные расстояния. Поэтому правильная интерпретация фазового состава возможна

лишь при учете интенсивности линий от Ti и TiNi₃. В отожженных пленках появляется интенсивная линия от плоскости (02.1) TiNi₃. Что касается пленок на основе кобальта и титана, то на электронограммах появляется достаточно интенсивная линия Ti₂Co. Отметим, что в системах на основе Co и Ti, Ti и Ni кроме перечисленных мо-

гут образовываться и следующие фазы: TiCo, TiCo₃, TiNi, Ti₂Ni, Ti₂Ni₃ (см., например, [3, 4]), которые нами не фиксировались. Таким образом, исследуемые пленки имеют фазовый состав в основном соответствующий ГП-Ti+ГЦК-Ni и ГП-Ti+ГП-Co.

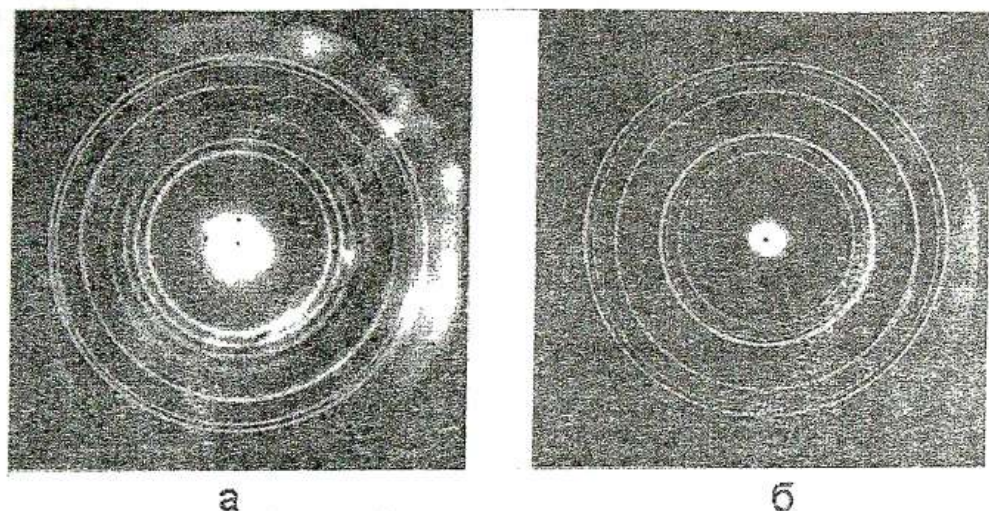


Рис. 1. Электронограммы для неотожженной (а) и отожженной (б) двухслойной пленки Ti/Ni

Таблица 1

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОНОГРАММ ОТ ПЛЕНОК Ti/Ni

	Экспериментальные данные					Табличные данные		
	Ti/Ni неотожжен.		Ti/Ni отожжен.		Фазовый состав	d_{hkl}^{Ti} , нм	d_{hkl}^{Ni} , нм	$d_{hkl}^{TiNi_3}$, нм
	I, отн.	d_{hkl} , нм	I, отн.	d_{hkl} , нм		[1]	[1]	[2]
1	О.С.	0.255	ср.	0.256	10.0	0.254	-	-
					11.0	-	-	0.2551
2	ср.	0.223	сл.	0.226	10.1	0.223	-	0.209
3	ср.	0.203	-	-	111	-	0.2038	0.2077
4	-	-	С.	0.212	02.1	-	-	0.2135
5	оч.сл.	0.176	оч.оч.сл.	0.175	200	-	0.1766	-
6	оч.сл.	0.173	-	-	10.2	0.172	-	0.1727
7	оч.сл.	0.153	-	-	02.4	-	-	0.1513
8	О.С.	0.147	С.	0.148	11.0	0.147	-	-
					03.0	-	-	0.1473
9	оч.сл.	0.131	-	-	10.3	0.133	-	0.1321
10	ср.	0.127	сл.	0.126	20.0	0.1275	-	0.1261
11	ср.	0.122	ср.	0.123	220	-	0.1252	0.1219

О.С. - очень сильная, С. - сильная, ср. - средняя, сл. - слабая, оч.сл. - очень слабая, оч.оч.сл. - очень очень слабая

Температурные зависимости сопротивления и ТКС. Исследование температурной зависимости сопротивления (R) и

ТКС (β) двухслойных пленок на основе Ti и Ni показали, что на зависимости R(T) (T - температура) наблюдаются особенно-

сти в виде изгибов, которые проявляются на зависимости $\beta(T)$ в виде минимумов и максимумов. Имеются особенности вблизи температуры Дебая $T_D^{Ti} = (430...460)K$ и температуры Кюри $T_C^{Ni} = (570...620)K$. Рис.2 иллюстрирует вышесказанное на примере двухслойных пленок Ni/Ti и Ti/Ni.

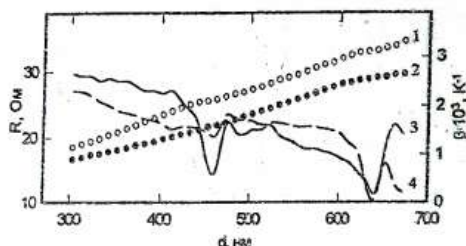


Рис.2. Температурные зависимости сопротивления (кривые 1, 2) и ТКС (кривые 3, 4); 2, 3 - для пленок Ni/Ti ($d_{Ni}=25$ нм, $d_{Ti}=80$ нм), 1, 4 - для пленок Ti/Ni ($d_{Ti}=115$ нм, $d_{Ni}=75$ нм)

Что касается двухслойных пленок на основе Co и Ti (рис.3), то особенности наблюдаются при T_D^{Ti} и температуре $T_C^{Co} = (530...630)K$ [4]. Указанные особенности на температурных зависимостях R и β наблюдаются и в однослойных пленках Ni, Ti и Co [5, 6].

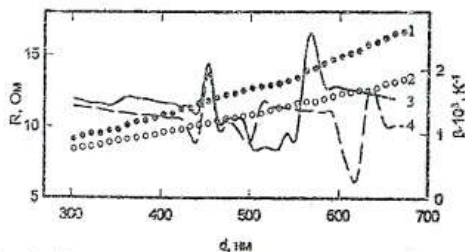


Рис.3. Температурные зависимости сопротивления (кривые 1, 2) и ТКС (кривые 3, 4); 1, 3 - для пленок Ti/Co ($d_{Ti}=40$ нм, $d_{Co}=45$ нм), 2, 4 - для пленок Co/Ti ($d_{Co}=25$ нм, $d_{Ti}=125$ нм)

Что касается характера температурной зависимости сопротивления, необходимо сказать следующее. Зависимость $R(T)$ является линейной во всем интервале температур за исключением окрестности характерных точек. В интервалах $300 K - T_D^{Ti}$, $T_D^{Ti} - T_C^{Co}$ (или T_C^{Ni} в зависимости от рас-

сматриваемой системы) и выше этих температур угловые коэффициенты отличаются незначительно.

Размерная зависимость ТКС. Наряду с температурными эффектами в электропроводности нами были исследованы и размерные. Результаты по размерной зависимости обрабатывались в рамках микроскопической модели Диммиха [7] и в рамках макроскопической модели [8]. Граничное соотношение для ТКС согласно модели Диммиха имеет вид:

$$\beta = \sum_{i=1}^2 A_i \beta_{gi} \left[1 - \frac{d \ln F_i}{d \ln k_i} - \frac{d \ln F_i}{d \ln l_i} \right], \quad (1)$$

где $A_i = \frac{d_i \sigma_{oi} F_i}{\sum_{i=1}^2 d_i \sigma_{oi} F_i}$, $F_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{oi}}$ - функция

Фукса (σ_i , σ_{oi} - удельная проводимость пленки и массивного образца соответственно); $k_i = \frac{d_i}{\lambda_{oi}}$, $l_i = \frac{L_i}{\lambda_{oi}}$ (d_i - толщина пленки, L_i - средний размер кристаллитов, λ_{oi} - средняя длина свободного пробега носителей электрического тока); β_{gi} - асимптотическое значение ТКС при $d_i \rightarrow \infty$.

В рамках макроскопической модели [8] соотношения для ТКС двух- и трехслойных пленок имеют вид:

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 - \frac{d_1 \beta_2 \rho_2 + d_2 \beta_1 \rho_1}{d_1 \rho_2 + d_2 \rho_1}, \quad (2)$$

где ρ_i - удельное сопротивление отдельно взятого слоя.

Расчетные размерные зависимости, выполненные на основе соотношения (2), для двухслойных пленок на основе Ni и Ti, Ti и Co имеют вид, аналогичный приведенным в [9]. Рис.4 иллюстрирует зависимость β от d_2 при $d_1 = \text{const}$ для пленок Co/Ti (кривые 3-5) и Ti/Co (кривые 6-8). На этом же рисунке сплошными линиями с точками представлены экспериментальные размерные зависимости для пленок Co (1) и Ti (2). Согласно расчетным результатам зависимость $\beta(d_2)$ при $d_1 = \text{const}$ отличается от аналогичной для однослойных пленок, в которых ТКС с ростом толщины монотон-

но увеличивается, выходя на асимптотическое значение β_g . В двухслойных пленках имеется и противоположная тенденция. Все зависимости $\beta(d_2)$ начинаются в точках, принадлежащих зависимости $\beta(d_1)$ для базисного слоя, и асимптотически приближаются снизу или сверху (в зависимости от соотношения β_{g1} и β_{g2}) к величине β_g .

Табл.2 позволяет судить о степени соответствия экспериментальных и расчетных данных. Можно указать следующие причины несоответствия экспериментальных и расчетных результатов. Во-первых, процессы взаимной диффузии, которые приводят к изменению коэффициентов прохождения и рассеивания на границах раздела слоев и кристаллитов, а также к образованию интерметаллических соединений. Во-вторых, термические макронапряжения, вследствие действия которых деформируется пленка, что может приво-

дить как к увеличению, так и к уменьшению сопротивления, увеличению или уменьшению ТКС. Рассмотренные выше модели не учитывают указанных явлений.

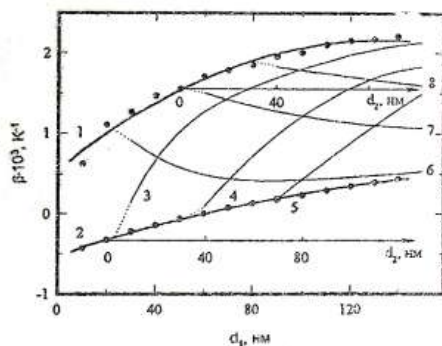


Рис. 4. Зависимость ТКС от толщины двухслойных пленок Co/Ti и Ti/Co: 1, 2 - экспериментальная зависимость $\beta(d_1)$ для пленок Co и Ti; 3 - 5, 6 - 8 - расчетные зависимости $\beta(d_2)$ для пленок Co/Ti, Ti/Co

Таблица 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ТКС

Пленка d , нм	$\beta \cdot 10^3, K^{-1}$			$\Delta S_{\text{роз}}^* 10^{-5}, \text{Па}$
	Экспериментальные данные	Расчетные данные		
		Макроскопическая модель	Модель Диммиха	
Ti(20)/Ni(75)	2,98	3,17	3,89	4,14...5,80
Ti(50)/Ni(175)	2,96	3,05	3,74	
Ti(115)/Ni(75)	2,78	2,83	3,45	
Ni(30)/Ti(15)	2,22	2,49	3,69	2,98...3,89
Ni(30)/Ti(25)	2,15	2,40	3,48	
Ti(35)/Co(45)	2,00	1,21	2,15	0,66...2,48
Ti(40)/Co(45)	1,87	1,17	2,12	
Co(25)/Ti(125)	1,43	0,54	1,01	1,33...2,31
Co(35)/Ti(125)	1,45	0,74	1,36	

* $\Delta S_{\text{роз}}$ - результирующее значение макронапряжений термического происхождения для $\Delta T = 100\text{K}$

ВЫВОДЫ

Выводы к данной работе можно сформулировать следующим образом.

Фазовый состав двухслойных пленок соответствует ГП-Ti + ГЦК-Ni или ГП-Ti + ГП-Co со следами интерметаллических фаз TiNi_3 и Ti_2Co соответственно.

На температурных зависимостях сопротивления и ТКС наблюдаются особенности

при температурах $\Theta_D^{\text{Ti}} = (430...460)\text{K}$, $\Theta_C^{\text{Ni}} = (570...620)\text{K}$ и $\Theta_1^{\text{Co}} = (530...630)\text{K}$.

Несовпадение расчетных и экспериментальных значений ТКС для исследованных пленок можно объяснить диффузионными процессами, образованием интерметаллидов и, частично, действием термических макронапряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электрографический анализ металлов (Приложения). М.: Металлургиздат, 1963.
2. Эндрюс К., Дайсон Д., Киоун С. Электрограммы и их интерпретация. М.: Мир, 1971.
3. Кауфман Л., Бернштейн Х. Расчет диаграмм состояния с помощью ЭВМ. М.: Мир, 1972.
4. Клопов А.А. и др. Эволюция дислокационной структуры и ее связь со стадийностью кривых деформационного упрочнения сплава $Ti_{50}Ni_{47}Fe_3$ // ФММ. 1997. Т. 83. №1. С. 153-160.
5. Проценко И.Е., Смолин М.Д., Шамо-ня В.Г., Яременко А.В. Размерная и температурная зависимость электросопротивления пленок кобальта в области промежуточных температур // УФЖ. Т. 29. №6. С. 920-925.
6. Лобода В.Б., Проценко И.Е., Смолин М.Д., Яременко А.В. Исследование размерных и температурных эффектов в пленках переходных металлов // УФЖ. Т. 30. №3. С. 435-440.
7. Dimmich R. Electrical Conductance and Temperature Coefficient of Double-Layer Films// Thin Solid Films. 1988. Vol. 158. №1. P. 13-24.
8. Chornous A., Odnodvoretz L., Protsenko I. Size Effect in Temperature coefficient of Resistance in Multilayer Films Structure of General Type / Book of Abstracts II International Conference MPSSL'96. Sumy: SSU, 1996. P. 74-75.
9. Проценко І.Ю., Чорноус А.М. Розмірний ефект в електропровідності двохшарових полікристалічних плівок в умовах взаємної дифузії металів // Вісник Сумського університету. 1994. №1. С. 19-25.

Статья поступила:

в редколлегию

21.10.97

в редакцию

25.11.97