

Автор благодарен М. П. Равдель за предоставленные образцы и результаты исследования теплоемкости.

Литература

1. Yoshizawa H., Mitsuda S., Argura H. et al. // J. Phys. Soc. Japan. 1989. **58**. P. 1416.
2. Hirsch J., Galvoille G. // Phys. Rev. 1982. **26**. P. 3816.
3. Ефимова Н.Н., Понков Ю.А., Ткаченко Н.В. // Физ. низ. температур. 1989. **15**. С. 1055.
4. Soubeyronh J.L., Fiorani D., Agostinelli E. et al. // J. de Physique. 1988. **49**. P. 117.
5. Ефимова Н.Н., Ткаченко Н.В., Борисенко А.В. // ФТТ. 1987. **29**. С. 1331.
6. Ефимова Н.Н., Ткаченко Н.В., Боковой И.И. // ФТТ. 1989. **31**. С. 254.
7. Коренблит И.Я., Шендер Е.Ф. // Письма в ЖЭТФ. 1985. **89**. С. 1785.
8. Коренблит И.Я., Федоров Я.В., Хоанг-Зунг. Препринт ЛИЯФ № 1559. Л., 1987.
9. Гоманьков В.И., Равдель М.П., Ногин И.Н. и др. // ФММ. 1977. **47**, №4. С. 735.
10. Власова Е.Н., Равдель М.П., Петрова О.Н. // ДАН СССР. 1977. **237**, №5. С. 1076.
11. Saslov W.M., Parker G. // Phys. Rev. Lett. 1986. **56**. P. 1074.

Поступила в редакцию
04.09.98

УДК 539.23

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК Pd/Fe, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ ПО РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИМ ДАННЫМ

М. В. Старкова, Е. В. Лихущина, С. В. Свешников, А. А. Кацнельсон

(кафедра физики твердого тела)

Проведены рентгенографические исследования тонких многослойных пленок Pd/Fe с фиксированной толщиной слоев Fe (~ 6 Å) и переменной толщиной слоев Pd (от 6 до 40 Å), фиксированной толщиной слоев Pd (~ 30 Å) и переменной толщиной слоев Fe (от 6 до 27 Å), а также образца с равной толщиной слоев Fe и Pd (~ 9 Å). Показано, что при толщине слоев Fe и Pd порядка 6 Å пленки имеют однородную структуру. При увеличении толщины слоев Pd появляется модулированная (квазисинусоидальная) по концентрации компонентов структура. При толщине слоев железа 9 Å и более выделяется модулированная фаза ГЦК-Fe. При толщине слоев палладия 30 Å образуется многослойная структура, когда толщина слоев железа достигает 23 Å.

Как известно, создание материалов со специальными, наперед заданными свойствами — одна из важнейших практических задач. Активно развивающийся синтез тонких пленок стимулирует изучение их физических свойств. Тем более интересно исследование многослойных пленок, физические свойства которых зависят не только от типа напыляемых металлов и толщины слоев, но и от технологических режимов их получения.

В настоящей работе представлены результаты рентгенографических исследований структуры многослойных пленок Pd/Fe, полученных в разряде Пеннинга в атмосфере криптона напылением на стеклянные подложки [1]. Исследовались две серии образцов: 1) с фиксированной толщиной слоев железа (примерно 6 Å) и переменной толщиной слоев палладия (от 6 до 40 Å); 2) с фиксированной толщиной слоев палладия (примерно 30 Å) и переменной толщиной слоев железа (от 6 до 27 Å), а также образец с равной толщиной слоев Pd и Fe ~ 9 Å. Общее число слоев во всех исследованных пленках оставалось постоянным и составляло примерно 100.

Все пленки имели ярко выраженную текстуру в направлении [111].

Структурные исследования проводились на рентгеновском дифрактометре, на монохроматизированном Fe- K_{α} -излучении с кремниевым монохроматором. Для повышения точности определяемых пара-

метров регистрация интенсивности осуществлялась по точкам через $0,1^{\circ}$.

Экспериментальные результаты для серии 1 показали, что в случае примерно одинаковой толщины слоев палладия и железа в пленке (~ 6 Å) на дифрактограммах присутствует только дифракционный максимум (111) фазы PdFe с равным содержанием компонентов. На рис. 1 в качестве иллюстрации приведен фрагмент дифрактограммы образца Pd₆Fe₆ (индексы означают толщину напыляемых слоев в ангстремах).

При увеличении толщины слоев Pd до 12 Å дифракционный максимум, соответствующий линии (111) фазы PdFe, смещается в сторону меньших углов (табл. 1), что может быть связано с увеличением межплоскостного расстояния. Наряду с основным пиком появляются дополнительные максимумы (рис. 2). Положение этих максимумов таково, что они могут быть охарактеризованы только как сателлиты, связанные с появлением модулированной структуры в исследуемых многослойных системах. При дальнейшем увеличении толщины слоев палладия сателлиты присутствуют на всех дифрактограммах образцов серии 1. При толщине слоев палладия 18 Å и более на дифрактограммах появляются также следы рефлексов Pd. Рефлексов, соответствующих ОЦК (параметр решетки $a = 2,866$ Å) и ГЦК ($a = 3,64$ Å) модификациям Fe, в серии 1 обнаружено не было.

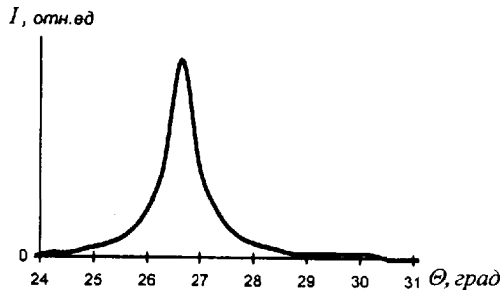


Рис. 1. Фрагмент дифрактограммы образца Pd₆Fe₆

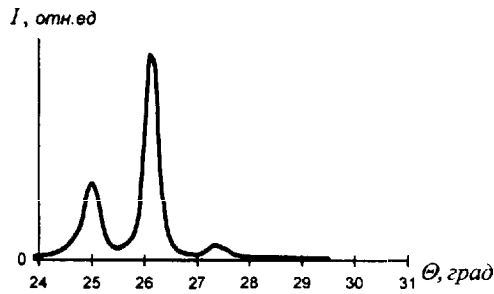


Рис. 2. Фрагмент характерной дифрактограммы образцов с модулированной (квазисинусоидальной) по концентрации компонентом структурой

В табл. 1 представлены экспериментальные данные, полученные для первой серии образцов. Видно, что при увеличении толщины слоев Pd положение сателлитов приближается к положению основного максимума фазы PdFe. В нашем случае внутренний сателлит, дифракционный угол которого ($\theta_{\text{sat.in}}$) был меньше, чем у основного максимума (θ_0), имел большую интенсивность, чем внешний ($\theta_{\text{sat.ex}}$) для всех образцов серии 1 (см. табл. 1), что соответствует синусоидальной модели распределения концентрации компонент [2], поскольку атомные радиусы (r) и функции атомного рассеяния (f) палладия и железа связаны соотношением $r_{\text{Pd}} > r_{\text{Fe}}$ и $f_{\text{Pd}} > f_{\text{Fe}}$.

Т а б л и ц а 1

Экспериментальные данные, полученные для образцов серии 1 при постоянной толщине слоев железа (~6 Å) и изменяющейся толщине слоев палладия (t_{Pd}). Приведены положения дифракционного максимума фазы PdFe и его сателлитов

t_{Pd} , Å	Λ_{exp} , Å	Λ_{tech} , Å	$\theta_{\text{sat.in}}$, град	θ_0 , град	$\theta_{\text{sat.ex}}$, град	$I_{\text{sat.in}} : I_0 : I_{\text{sat.ex}}$	η	ϵ
6		12	—	26,65	—			
9		15	след	26,60	—			
12	24	18	25,13	26,48	след			
15	23	21	24,86	26,35	28,00	0,4 : 1 : 0,05	0,4	0,06
18	26	24	25,00	26,00	27,45	0,4 : 1 : 0,07	0,6	0,09
22	28	28	25,00	26,15	27,35	0,4 : 1 : 0,07	0,6	0,08
30	49	36	25,21	26,04	26,71	0,7 : 1 : 0,12	0,5	0,04
40	50	46	25,18	25,90	26,67	0,6 : 1 : 0,10	0,46	0,04

Изучение серии 2 образцов с фиксированной толщиной слоев палладия (~30 Å) и переменной толщиной слоев железа (от 6 до 27 Å) показало, что когда толщина слоев Fe достигает 9 Å, начинает выделяться ГЦК-фаза железа. Из фрагмента дифрактограммы для образца Pd₃₀Fe₉ (рис. 3) видно, что рефлекс фазы Fe окружен двумя сателлитами, находящимися примерно на таком же угловом расстоянии от него,

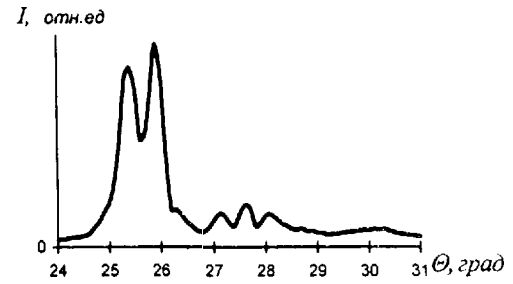


Рис. 3. Фрагмент дифрактограммы образца Pd₃₀Fe₉

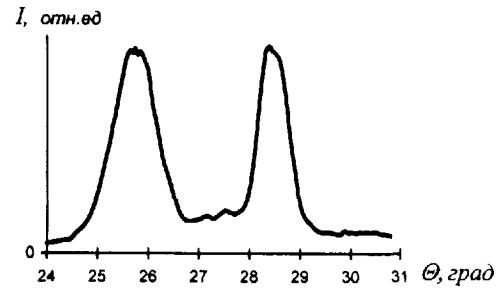


Рис. 4. Фрагмент характерной дифрактограммы образцов с многослойной структурой

что и сателлиты около рефлекса (111) фазы PdFe. На дифрактограмме также присутствует максимум (002) фазы Pd, который очень сильно размыт.

Из экспериментальных данных, полученных для второй серии образцов (табл. 2), видно, что при увеличении толщины слоев Fe (от 14 до 20 Å) дифракционный максимум фазы PdFe смещается в сторону меньших, а максимум фазы Fe — в сторону больших углов. При толщине слоев железа 23 Å характер дифракционной картины меняется. Наблюдаются два дифракционных максимума, сравнимых по интенсивности, которые размыты и не окружены сателлитами (рис. 4). При толщине слоев железа 9 Å интенсивность внутреннего сателлита фазы PdFe возрастает по сравнению с серией 1 и становится сравнимой с интенсивностью основного максимума. При толщине слоев железа 17 Å возрастает и интенсивность внешнего сателлита, при этом сателлиты приближаются к основному максимуму. Интенсивность внутреннего сателлита фазы Fe для всех образцов серии 2 сравнима с интенсивностью внешнего сателлита (табл. 2). У образца с равными толщинами слоев Fe и Pd (~9 Å) на дифрактограмме присутствуют пик PdFe, окруженный сателлитами, и сильно размытые пики Fe и Pd.

Согласно модели модулированных структур [2], сателлиты появляются в точках $h \pm a/\Lambda$ обратного пространства, где h — целое число, Λ — период модуляции, a — параметр решетки. Следовательно, из анализа положения сателлитов по отношению к положению основного максимума можно оценить период модуляции структуры Λ_{exp} . По технологии напыления пленок период модуляции структуры Λ_{tech} определялся как сумма толщин напыляемых слоев Fe и Pd. Полученные экспериментальные данные показывают, что для серии 1 при увеличении толщины напыляемых слоев Pd сателлиты приближаются к основному максимуму, что говорит об увеличении

Экспериментальные данные, полученные для образцов серии 2 при постоянной толщине слоев палладия ($\sim 30 \text{ \AA}$) и изменяющейся толщине слоев железа (t_{Fe}).

t_{Fe} , \AA	Λ_{exp} , \AA	Λ_{tech} , \AA	Фаза PdFe				Фаза Fe			
			$\theta_{\text{sat.in.}}$, град	θ_0 , град	$\theta_{\text{sat.ex.}}$, град	$I_{\text{sat.in.}} : I_0 : I_{\text{sat.ex}}$	$\theta_{\text{sat.in.}}$, град	θ_0 , град	$\theta_{\text{sat.ex.}}$, град	$I_{\text{sat.in.}} : I_0 : I_{\text{sat.ex}}$
6	49	36	25,21	26,04	26,71	0,7 : 1 : 0,12	—	—	—	—
9	78	39	25,38	25,84	26,30	0,9 : 1 : 0,18	27,08	27,62	28,06	0,8 : 1 : 0,8
14	65	44	25,34	25,86	26,45	1 : 1 : 0,13	27,13	27,67	28,25	0,8 : 1 : 0,7
17	85	47	25,30	25,73	26,13	0,9 : 1 : 0,7	27,40	27,80	28,25	0,8 : 1 : 0,7
20	85	50	25,04	25,48	25,90	0,9 : 1 : 0,75	27,68	28,09	28,57	0,9 : 1 : 0,9
23		53		25,58				28,15		
27		57		25,75				28,38		

Приведены положения дифракционного максимума фазы PdFe и его спутников.

периода модуляции структуры. Значения Λ_{exp} и Λ_{tech} для образцов серии 1 близки (см. табл. 1).

Расчет интенсивности рассеяния рентгеновских лучей на модулированных структурах изложен в работе [3]. Согласно данным [3], отношения интенсивностей внутреннего ($I_{\text{sat.in}}$) и внешнего ($I_{\text{sat.ex}}$) спутников к интенсивности основного максимума (I_0) соответственно равны $(1/4)(\Lambda \varepsilon S/d + \eta)^2$ и $(1/4)(\Lambda \varepsilon S/d - \eta)^2$, где ε — амплитуда модуляции межплоскостного расстояния, η — амплитуда модуляции рассеивающей способности, d — межплоскостное расстояние, S — величина вектора рассеяния.

Полученные соотношения интенсивностей для образцов серии 1 позволяют найти две пары значений η и ε , удовлетворяющие экспериментальным данным. Был проведен анализ обеих пар на соответствие допустимым значениям этих параметров. Очевидно, что величина η должна лежать в пределах $\eta \approx (f_{\text{Pd}} - f_{\text{Fe}})/2\bar{f} \approx 0,3-0,4$, поэтому была выбрана та пара, которая соответствовала этим пределам. Сравнение пар значений η и ε , полученных из дифракционного эксперимента и рассчитанных по величинам f_{Pd} и f_{Fe} , a_{Pd} и a_{Fe} , показало, что атомы железа и палладия при напылении перемешиваются вследствие диффузии преимущественно в пограничных слоях Fe и Pd.

Как было отмечено выше, на экспериментальных дифрактограммах образцов серии 2 при толщине слоев Fe от 9 до 20 \AA пик фазы Fe окружают два практически одинаковых по интенсивности и расположенных на одинаковом расстоянии от основного максимума спутника. Такая дифракционная картина может быть реализована в случае, когда в структуре матрицы выделяются отдельные зародыши модулированной структуры типа комплексов Гинье [4]. Структура таких комплексов должна совпадать со структурой матрицы, при этом узлы решетки будут либо обеднены, либо обогащены некоторым компонентом. В нашем случае образуются зародыши модулированной структуры фазы ГЦК-Fe.

При дальнейшем увеличении толщины слоев Fe размеры комплексов Гинье, по-видимому, возрастают. Этот процесс сопровождается уменьшением ко-

личества внедренного в палладий железа, поэтому пик PdFe смещается в сторону меньших углов, т.е. приближается к положению пика фазы Pd, а пик Fe смещается в сторону больших углов, приближаясь к положению пика фазы ГЦК-Fe (рис. 5).

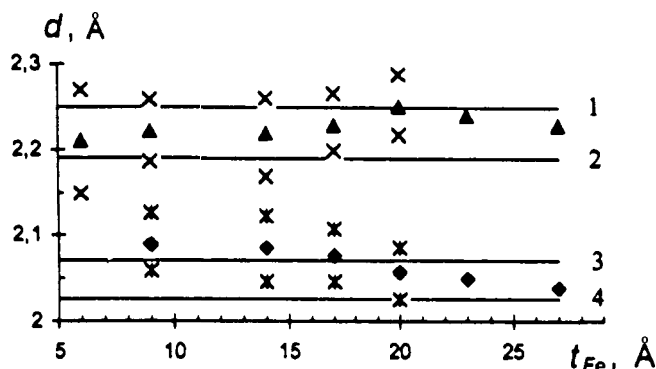


Рис. 5. Зависимость межплоскостных расстояний (d) от толщины слоев железа (t_{Fe}) для серии 2 образцов: треугольники — фаза PdFe; крестики — спутники фазы PdFe; ромбы — фаза Fe; звездочки — спутники фазы Fe. Для сравнения приведены значения межплоскостных расстояний для массивных образцов: 1 — Pd; 2 — PdFe; 3 — Fe (ГЦК); 4 — Fe (ОЦК).

При увеличении толщины слоев Fe до 23 \AA наблюдаются два широких дифракционных максимума. Этот факт можно объяснить образованием структуры, состоящей из областей двух типов: 1) обогащенных палладием и обедненных железом и 2) обогащенных железом и обедненных палладием. Период модуляции увеличился, поэтому спутники приблизились к основному отражению и перестали разрешаться. Исходя из этого можно сделать вывод об образовании двухфазной структуры с чередующимися слоями, т.е. многослойной структуры.

Таким образом, экспериментальные данные показывают, что при малой и равной толщине слоев Pd и Fe образуется однородная структура PdFe. Отсутствие спутников на дифрактограмме позволяет сделать вывод об отсутствии какой-либо модуляции структуры по толщине. При увеличении толщины слоев Pd в пленках наблюдается модулированная структура PdFe с выделением фазы Pd. Увеличение толщины слоев Fe до 9 \AA приводит к выделению ГЦК-фазы Fe. При толщине слоев Fe и Pd более 23 \AA

и 30 Å соответственно можно говорить об образовании многослойной структуры.

Авторы выражают благодарность Г. В. Смирницкой и В. В. Бибикиной за любезно предоставленные образцы.

Литература

1. Рейхрудель Э.М., Смирницкая Г.В. // Итоги науки и техники. Сер. Электроника и ее применение. 1976. 8. С. 43.

2. Иверонова В.И., Ревкевич Г.П. Теория рассеяния рентгеновских лучей. 2-е изд. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978.
3. Гинье А. Рентгенография кристаллов. М.: Физматгиз, 1961.
4. Чуистов К.В. Модулированные структуры в стареющих сплавах. Киев: Наукова думка, 1975.

Поступила в редакцию
16.10.98

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.465.552

О ТУРБУЛЕНТНОМ ПЕРЕНОСЕ ТЕПЛА, ИМПУЛЬСА И ВЗВЕСИ В ПЛОТНОСТНОМ ПОТОКЕ

Б. И. Самолюбов, А. В. Силаев

(кафедра физики моря и вод суши)

Исследуются особенности турбулентной диффузии тепла в суспензионном потоке по данным натуральных измерений и разрабатываются методы ее теоретического описания. Предлагается оригинальный способ расчета вертикального распределения коэффициента турбулентной теплопроводности. При сопоставлении этого распределения с профилями коэффициентов переноса импульса и взвеси выявляются закономерности изменений чисел Прандтля и Шмидта по высоте над уровнем дна. Анализируются механизмы воздействия взвеси на перенос тепла в потоке с внутренней волной. Обнаруженные эффекты описываются полуэмпирической зависимостью числа Прандтля от чисел Ричардсона и Тернера.

Введение

Распространение придонных плотностных взвешенных потоков сопровождается загрязнением воды естественными и техногенными примесями. Загрязнения распространяются в придонных слоях с толщинами от единиц до десятков метров. Прогноз таких процессов включает определение размеров областей загрязнений и зон максимальных концентраций примесей. При разработке методов теоретического описания диффузии примесей в плотностных потоках необходимо учитывать особенности профилей коэффициентов обмена для разных субстанций, переносимых течением. Задача существенно усложняется в случаях сильного воздействия примеси одного типа на перенос другой и особенно при влиянии взвеси на энерго- и теплообмен. Изучению этих эффектов посвящена данная статья.

1. Объект и методика исследований

Исследовалось суспензионное течение малой плотности ($\Delta\rho \leq 3 \cdot 10^{-3}$ г/см³) в Нурекском водохранилище глубиной до 300 м, шириной 0,5 ÷ 5 км и длиной 70 км с уклоном дна $i_s \leq 10^{-2}$ [1]. Толщина потока $z_u = 15 \div 30$ м, скорость \bar{U} до 50 см/с (черта сверху — знак усреднения по высоте z_u), дальность распространения до 30 км. Регистрировались пространственно-временные распределения концентрации S , профили температуры воды T и скорости течения U . Для измерений этих параметров на разрезах вдоль по потоку и на многочасовых станциях применялась специально сконструированная

аппаратура для комплексных градиентных измерений и непрерывного зондирования. Погрешности измерений S , U , T составляли соответственно $(2 \div 5) \cdot 10^{-6}$ г/см³ при $S \leq (0,05 \div 5) \cdot 10^{-3}$ г/см³, $0,02^\circ\text{C}$ при $T = 10\text{--}20^\circ\text{C}$ и 1 см/с при $U = 10 \div 70$ см/с. Длительность одного зондирования с комплексной регистрацией профилей S , T , U в 20-метровом придонном слое составляла 12 мин.

2. Распределения коэффициентов турбулентного обмена

Характерные вертикальные распределения концентрации S , скорости U и температуры T в сформировавшемся придонном плотностном течении, а также профили коэффициентов турбулентного переноса для тепла K_h , импульса K_T и взвеси K_s представлены на рис. 1.

Распределение коэффициента обмена (K_s или K_T) рассчитывалось из полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии, которое записывается в виде

$$\frac{d\varphi}{dt} - \omega_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $\varphi = S, T$; $d\varphi/dt = \partial\varphi/\partial t + u\partial\varphi/\partial x + w\partial\varphi/\partial z$ (в рамках плоской задачи), $\omega_\varphi = \omega_f$ при $\varphi = S$ и $\omega_\varphi = 0$ при $\varphi = T$, $K_\varphi = K_s, K_h$, t — время, x — расстояние вдоль по потоку, z — высота над уровнем дна, $\omega_f = \left(\sum_{i=1}^{\Phi} \omega_{fi} S_i \right) / S$ — средневзвешенная гидравлическая крупность для смеси взвешенных частиц