

Массоперенос в монокристаллах молибдена и карбида кремния при облучении их низкоэнергетическими ионами тлеющего разряда

БАБАД-ЗАХРЯПИН А. А., БОРИСОВ Е. В., САВВАТИМОВА И. Б., СЕНЧУКОВ А. Д.

Как известно [1, 2], обработка в плазме тлеющего разряда существенно увеличивает плотность дефектов дислокационного типа в материале катода. Для построения гипотезы, объясняющей это явление, могут быть использованы экспериментальные результаты обработки в тлеющем разряде металлических фольг. Обработку палладиевой фольги проводили в гелии в нормальной области тлеющего разряда при напряжении горения 300—1000 В и плотности тока 20—60 мА/см² в течение 5 мин — 2 ч. При этом наблюдалось возникновение значительной пористости и увеличение исходной толщины (~100 мкм) фольги на несколько микрон или до десятков микрон. За счет преимущественного набухания поверхностных слоев (рис. 1) с увеличением температуры и дозы ионного облучения возрастает размер пор в фольгах, а плотность уменьшается. При обработке образца меди толщиной 3 мм в среде гелия также происходит насыщение приповерхностного слоя порами на глубину ~80 мкм (рис. 2).

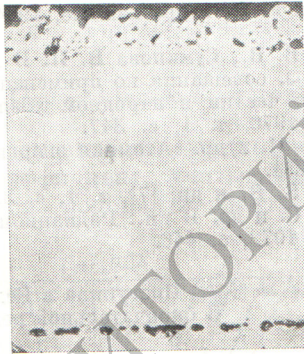


Рис. 1. Сечение фольги палладия, обработанной ионами гелия (400 В, 10^{21} ион/см², 900 °С) (×500)

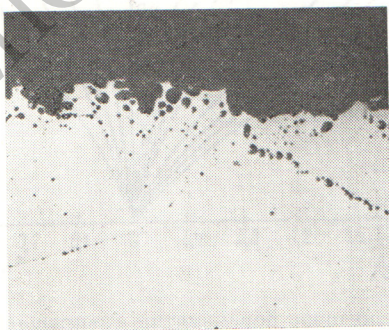


Рис. 2. Сечение медной пластины, обработанной ионами гелия (500 В, 10^{23} ион/см², 900 °С) (×150)

Эти примеры позволяют предположить, что генерирование дефектов в материале катода происходит из-за распухания приповерхностных слоев под влиянием внедряющихся газов. Это распухание приводит к увеличению плотности дефектов дислокационного типа. Например, обработка монокристалла молибдена ионами водорода, гелия и аргона дозой более 10^{19} ион/см² при температуре 1400—1600 °С в 10—100 раз увеличивает плотность дефектов в приповерхностном слое глубиной до 100 мкм (при общей толщине образца 2—3 мм). При дозах более 10^{20} ион/см² увеличение плотности дефектов наблюдается уже во всем объеме обрабатываемого материала (рис. 3).

Дефекты, непрерывно генерируемые при обработке материала ионами плазмы, должны способствовать ускорению массопереноса в материале катода. Для изучения этого эффекта объект располагали на катоде разрядного устройства (рис. 4). Исследовали пластины монокристаллического молибдена толщиной ~2 мм и карбида кремния толщиной ~0,5 мм с нанесенными на них слоями диффузанта. Для выявления влияния дефектов изменение концентрации диффузанта определяли как на участках образцов, подвергавшихся воздействию разряда, так и на участках, защищенных экраном или экранирующим слоем (см. рис. 4, зоны А и Б), а также проводили сравнение

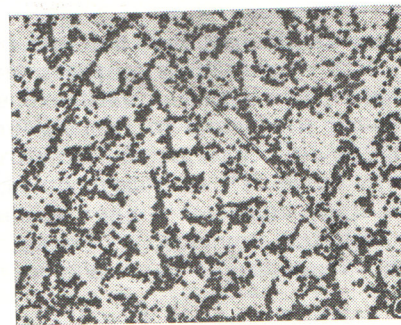
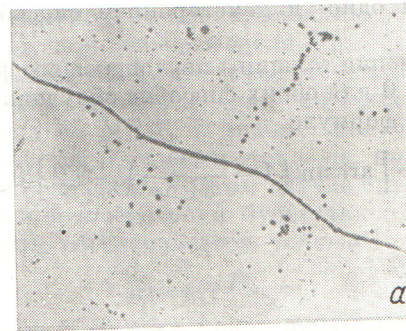
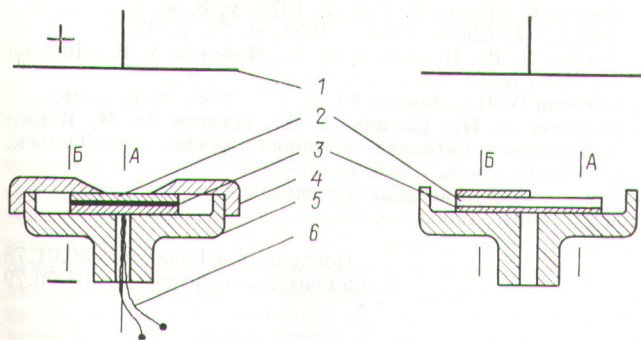
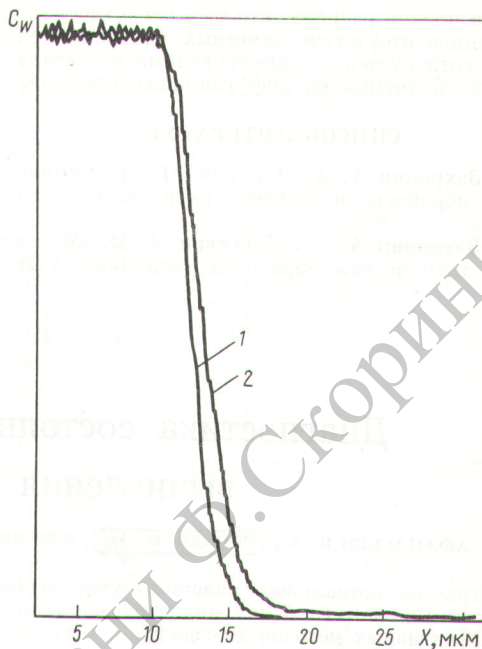


Рис. 3. Микроструктура исходного (а) и обработанного (б) ионами водорода (10^{21} ион/см²; 1500 °С, 500 В) монокристаллического молибдена (×500)



Р и с. 4. Устройство для изучения массопереноса: 1 — анод; 2 — материал, в котором изучается массоперенос; 3 — диффузент; 4 — экран; 5 — катод; 6 — термопара



Р и с. 5. Распределение концентрации диффузанта в матрице после обработки в тлеющем разряде (1) и отжига в вакуумной печи (2)

с изменением концентрации в образце, отжигавшемся в вакуумной печи при тех же температуре и времени. Температуру контролировали оптическим пирометром и W — Термопарой. Распределение концентрации вольфрама в молибдене определяли путем микрорентгеноспектрального анализа (рис. 5). Для остальных материалов применялся метод микроавтордиографии. Коэффициенты диффузии рассчитывали по известным методикам [3—5].

Из данных таблицы следует, что для пары Mo — W значения коэффициентов взаимодиффузии \tilde{D} при большой концентрации (~50%) диффузанта практически одинаковы как при обработке в тлеющем разряде, так и при отжиге в вакуумной печи. При малой концентрации диффузанта ($\leq 3\%$) обработка в разряде примерно в 10 раз увеличивает значения \tilde{D} по сравнению с полученным для экранированных образцов и для образцов, нагревавшихся в вакуумной печи.

Для диффузионных пар, в которых массоперенос изучался методом меченых атомов (Mo — UO₂, Mo — Pm₂O₃,

SiC — ¹⁴C, SiC — Pm₂O₃), значения $a^2 \cdot D_{\text{дисл}}$ (где a — диаметр дислокационной трубки, $D_{\text{дисл}}$ — коэффициент диффузии по дислокациям) для открытых участков в $10-10^4$ раз больше, чем для экранированных. Это свидетельствует об интенсификации массопереноса по дислокациям при непрерывном генерировании структурных

Коэффициенты диффузии в парах Mo—W, Mo—Pm₂O₃, Mo—UO₂, SiC—¹⁴C, SiC—Pm₂O₃

Мат-рица	Диффузент	Температура	Газ	Интенсивность потока ионов, ион/(см ² ×с)	Доза, ион/см ²	Структурное состояние матрицы	Коэффициенты диффузии *						
							Зона анализа	Нагрев в разряде			Нагрев в вакуумной печи		
								\tilde{D}	$D_{\text{об}}$	$a^2 D_{\text{дисл}}$	\tilde{D}	$D_{\text{об}}$	$a^2 D_{\text{дисл}}$
Mo	W	1600	H ₂	$6,2 \cdot 10^{17}$	$3,3 \cdot 10^{23}$	Монокристалл	{ A ⁺ B ⁺ A ⁺⁺ B ⁺⁺	$3,6 \cdot 10^{-14}$ $4,0 \cdot 10^{-14}$ $6,0 \cdot 10^{-13}$ $4,0 \cdot 10^{-14}$			$4,0 \cdot 10^{-14}$		
Mo	Pm ₂ O ₃	1700	H ₂	$6,2 \cdot 10^{17}$	$2,2 \cdot 10^{23}$	Монокристалл Поликристалл	A A	$1,4 \cdot 10^{-10}$ $8,4 \cdot 10^{-11}$			$2,2 \cdot 10^{-11}$ $3,2 \cdot 10^{-11}$		
Mo	UO ₂	1600	H ₂	$6,2 \cdot 10^{17}$	$1,1 \cdot 10^{24}$	Монокристалл	A B		$2,8 \cdot 10^{-13}$ $2,7 \cdot 10^{-13}$	$4,6 \cdot 10^{-18}$ $4,6 \cdot 10^{-20}$		$4 \cdot 10^{-14}$	$1,0 \cdot 10^{-19}$
SiC	¹⁴ C	1450	He	$8,1 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{23}$	Монокристалл	{ A A B	$3,3 \cdot 10^{-11}$ $2,2 \cdot 10^{-10}$ $4,2 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{-15}$ $9,6 \cdot 10^{-15}$ $9,0 \cdot 10^{-15}$		Нет взаимодействия		
SiC	Pm ₂ O ₃	1450	He	$1,3 \cdot 10^{18}$	$4,5 \cdot 10^{22}$	Монокристалл	{ A A B	$2,8 \cdot 10^{-10}$ $3,9 \cdot 10^{-10}$ $3,5 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-16}$ $3,6 \cdot 10^{-16}$ $4,8 \cdot 10^{-20}$		Нет взаимодействия		

* Значения \tilde{D} и $D_{\text{об}}$ даны в см²/с; $a^2 D_{\text{дисл}}$ в см⁴/с; А — зона, подвергавшаяся ионной бомбардировке; Б — заэкранированная зона; + и ++ — для концентрации вольфрама ~ 50 и < 3% соответственно.

дефектов в плазме разряда, что уже отмечалось ранее [6]. Обнаруженное отсутствие заметных изменений объемной диффузии согласуется с существующими представлениями о влиянии облучения на диффузионные процессы [7, 8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабад-Захряпин А. А., Кузнецов Г. Д. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде. М., Атомиздат, 1975.
2. Бабад-Захряпин А. А., Лагуткин М. И. «Металловедение и термическая обработка металлов», 1976, № 7, с. 70.

3. Matano С. «Japan J. Phys.», 1973, v. 8, p. 109.
4. Hall L. «J. Chem. Phys.», 1953, v. 21, p. 87.
5. Павлов П. В., Пантелеев В. А., Майоров А. В. «Физика твердого тела», 1964, т. 6, вып. 2, с. 382.
6. Бутенко О. И., Лахтин Ю. М. [2], 1969, № 6, с. 21.
7. Быстров Л. Н., Иванов Л. И., Платов Ю. М. В кн.: Диффузия в металлах и сплавах. Тула, изд. Тульск. политехн. ин-та, 1968, с. 254.
8. Дамаск А., Динс Дж. Точечные дефекты в металлах. М., «Мир», 1966.

Поступило в Редакцию 30.01.78
В окончательной редакции 04.06.79

УДК 621.039.514

Диагностика состояния реактора БОР-60 методом вычисления баланса реактивности

АФАНАСЬЕВ В. А., ГРЯЗЕВ В. М., ЕФИМОВ В. Н., КЕБАДЗЕ Б. В., КРАСНОЯРОВ Н. В., КАЧАЛИН В. А.

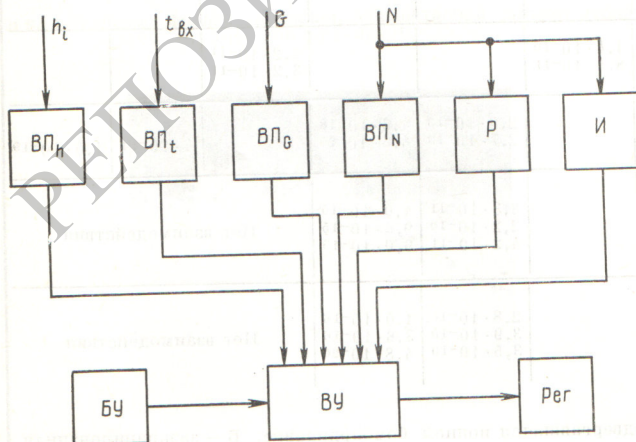
Регистрация аномальных явлений путем вычисления баланса реактивности (в. б. р.), являющегося одним из наиболее эффективных методов диагностики состояния реакторов [1], основана на решении уравнения баланса реактивности относительно аномальной реактивности ρ_a :

$$\rho_a = \rho_k + \rho_\alpha + \rho_c + \rho_v,$$

где ρ_k — суммарная реактивность реактора, определяемая решением уравнений точечной кинетики; ρ_α — эффект реактивности, вызванный изменениями параметров реактора; ρ_c — реактивность, обусловленная перемещением стержней управления и защиты (СУЗ); ρ_v — реактивность, обусловленная выгоранием и распуханием топлива.

Если учесть, что проводимые в настоящее время на стадии проектирования быстрых реакторов расчеты выполняются с недостаточной точностью, обусловленной неопределенностью многих констант и механизмов поведения компонентов реактора [2], то и вычисление баланса реактивности с использованием результатов проектных расчетов будет проводиться с существенными погрешностями.

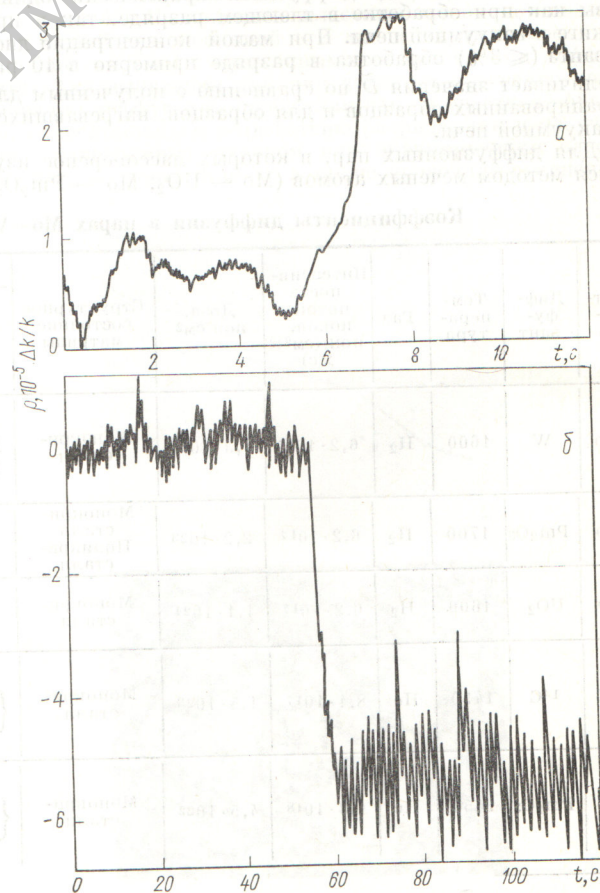
Экспериментальные исследования на БОР-60 показали, что, используя интегральные параметры реактора, измеряемые датчиками технологического контроля, можно с помощью относительно простых алгоритмов идентифицировать эффекты реактивности с достаточной точностью и на их основе создать систему в. б. р.



Р и с. 1. Упрощенная структурная схема системы в. б. р. БОР-60

В частности, для режима работы БОР-60 с отклонением параметров на 20–30% были получены следующие выражения [3]:

$$\rho_a = \sum_{i=1}^5 \rho_i; \quad \tau_i \dot{\rho}_i = \tilde{\rho}_i - \rho_i,$$



Р и с. 2. Изменение выходного сигнала системы в. б. р. при введении в реактор искусственной аномальной реактивности (а) и при вскипании натрия в тепловыделяющей сборке реактора (б)