

2. Камышанченко Н.В., Колпаков А.Я., Никитин В.М., Воеводин В.Н., Неклюдов И.М. Влияние радиационных дефектов на процессы формирования углеродных алмазоподобных покрытий: Материалы XIV Междунар. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (12 – 17 июня 2000 г., г. Алушта, Крым).

3. V.N.Inkin, G.G.Kirpilenko, A.J.Kolpakov, Inter-

nal stress in ta-C films deposited by pulse arc discharge method // *Diamond and Related materials*, 10 (2001) 1103-1108.

4 .V.P.Goncharenko, A.J.Kolpakov, A.I.Maslov, Method of forming diamond-like carbon coating in vacuum // International patent, WO 98/54376, 3 December 1998.

УДК 621.793.621.941.0257

## ПЕРЕНОС МАССЫ ПРИ ОСАЖДЕНИИ МОЛИБДЕНОВЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

*В.А.Белоус, В.М.Лунев, В.С.Павлов*

г. Харьков, НИЦ "Харьковский физико-технический институт"

Проведены исследования переноса массы испаряемого вещества в системе катод-подложка при осаждении молибденовых покрытий из плазмы вакуумного дугового разряда, генерируемой источником с магнитным удержанием катодного пятна на рабочей поверхности катода. Установлено, что на внутренней поверхности шарового сегмента, расположенного над плоскостью катода, количество осаждаемого материала при телесных углах  $\leq \pi$  ср практически не зависит от радиуса сегмента в интервале от 6,5 до 35,5 см. При телесных углах  $> \pi$  ср коэффициент переноса массы снижается (от ~66 до ~46% при  $\Omega=1,5 \pi$  ср) с изменением расстояния от 6,5 до 35,5 см, что связано, вероятно, с отражением «капель».

Тугоплавкие металлы, такие как, например, молибден, вольфрам, и их сплавы являются весьма перспективными для изготовления изделий новой техники, работающих при высоких температурах. Они могут быть получены как традиционными методами [1], так и методами испарения и конденсации в вакууме. В этом случае одной из важных задач является максимальное использование испаряемого материала, поскольку это один из основных показателей экономической целесообразности применения метода.

Известно, что потоки вещества, генерируемого вакуумно-дуговым разрядом, являются неоднородными по составу [2, 3]. Основная часть испаряемой массы приходится на ионы и «капли».

Для оценки практической реализации процесса получения изделий путем осаждения потока испаряемого вещества на подложку представлялось нецелесообразным определить коэффициент переноса молибдена с катода на заготовку детали в зависимости от расстояния катод-подложка, угловой координаты, а также оценить вклад в покрытие ионной и капельной составляющей.

Эксперименты по массопереносу проводились на установке типа «Булат» [4]. В качестве подложек использовались образцы из стали 3 размером 10мм x 15 мм с исходной шероховатостью поверхности  $Ra \sim 0,1$  мкм. Образцы располагались на подложкодержателях в виде дуг радиусами 6,5; 11; 20 и 35,5 см с центром, совпадающим с центром рабочей поверхности катода. Осаждению покрытий предшествовала очистка при отрицательном потенциале подложки  $\sim 1$  кэВ. Во время осаждения покрытий потенциал подложки составлял 20 В. В качестве испаряемого материала использовался молибден вакуумной плавки. Ток дуги составлял 150 А. Время осаждения – 30 мин. Масса сконденсированного материала и потери массы катода определялись весовым методом. Для оценки вклада «капель» в перенос массы измерялась шероховатость поверхности покрытий при помощи профилометра типа АП модель 283.

Определялась масса вещества, сконденсированного в единицу времени на поверхности шарового сегмента, в зависимости от

телесного угла  $\Omega$ , под которым она видна из центра катода. С этой целью поверхность сегмента разделялась на пояса, параллельные плоскости катода. Долю вещества из испаряемой массы (коэффициент массопереноса), осажденную на части поверхности сегмента, определяли суммированием по поясам и рассчитывали по формуле

$$\frac{\Delta M}{\Delta m_k} = \frac{1}{\Delta m_k} \sum_{\Omega=0}^{2\pi} 2\pi R h(\Omega) \rho,$$

где  $2\pi R h(\Omega)$  – площадь поверхности шарового пояса;

$h(\Omega)$  – его высота;

$R$  – радиус;

$h(\Omega)$  – толщина покрытия на  $\Omega$ -поясе;

$\Delta M$  – расчетное количество материала, сконденсированного в единицу времени на поверхности сегмента;

$\Delta m_k$  – убыль массы катода за то же время и  $\rho$  – плотность молибдена.

На рис. 1 представлены угловые распределения величины прироста массы конденсируемого молибдена на единицу поверхности подложки по отношению к убыли массы катода с единицы его рабочей поверхности за одно и то же время.

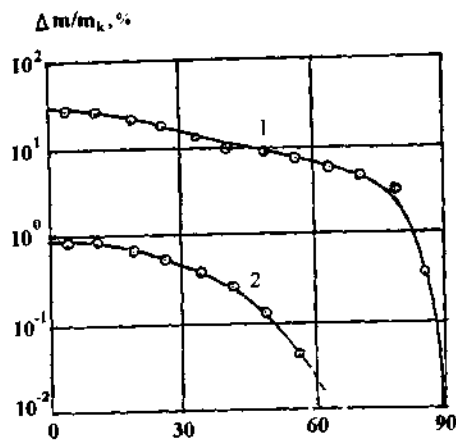


Рис.1. Угловые распределения величины переноса массы молибдена для расстояний катод-подложка:  $R=6,5$  (1) и  $35,5$  (2) см.

Из приведенных данных следует, что максимальная скорость наблюдается в направлении вертикали от поверхности катода и при сильном отклонении от нее падает практически до нуля. Это обусловлено большой неоднородностью пространственного распределения плотности плазмы в потоке, генерируемом катодными пятнами [5].

Из рисунка следует также, что с увеличением расстояния от катода скорость переноса массы значительно снижается.

Зависимость коэффициента переноса массы на поверхность сферического сегмента от величины телесного угла  $\Omega$  представлена в табл.1 для расстояний от катода  $R=6,5$  и  $35,5$  см.

Таблица 1  
Перенос массы испаряемого молибдена на поверхность сегмента

$\Omega$ , ср	$\Delta M/\Delta m_k$ , %	
	$R=6,5$ см	$R=35,5$ см
0	0	0
$0,25\pi$	8	8
$0,5\pi$	20	21
$0,75\pi$	35	33
$1\pi$	47	42
$1,25\pi$	57	45
$1,5\pi$	66	46
$1,75\pi$	73	-
$2\pi$	75	-

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о том, что с увеличением расстояния от катода коэффициент переноса массы на поверхность сегмента также снижается, причем снижение его становится более существенным в области больших телесных углов. Так, при  $\Omega = \pi$  ср коэффициент переноса при изменении  $R$  от  $6,5$  до  $35,5$  см уменьшается на  $\sim 5\%$  (от  $47$  до  $42\%$ ), в то время как при  $\Omega=1,5$  ср – на  $\sim 20\%$  (от  $66$  до  $46\%$ ). При  $\Omega=2\pi$  ср (полусфера) и  $R=6,5$  см перенос массы равен  $75\%$  (см. табл.). Значение  $\Delta M/\Delta m_k < 100\%$  может иметь место, на наш взгляд, при частичном распылении формируемого конденсата ионами осаждаемого металла и отражением «капель».

Существенное уменьшение переноса вещества, наблюдаемое с увеличением расстояния от катода в области больших телесных углов, связано, по-видимому, с доминирующей ролью отражения «капель» молибдена. Подтверждением этого являются результаты измерения шероховатости (рис. 2), которая, как известно, [6], зависит от размера и количества «капель» в покрытии. Действительно, шероховатость молибденовых покрытий, осажденных в направлении малых углов, к поверхности катода выше (при  $\alpha=75^\circ$  в  $\sim 2$  раза), нежели для об-

разцов, расположенных перпендикулярно к оси катода. Эти данные согласуются с результатами работы [7], где показано, что основное количество капель молибдена распространяется в этом же направлении.

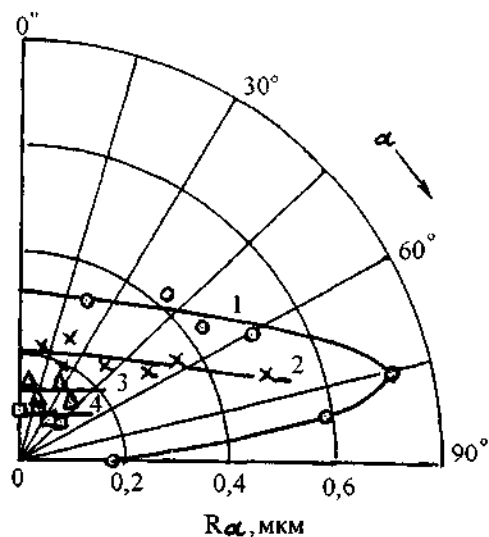


Рис.2. Угловые распределения шероховатости молибденовых покрытий, осажденных при  $R = 6,5(1); 11(2); 20(3)$  и  $35,5$  см(4).

По величине изменения коэффициента переноса массы на поверхность сегмента с удалением ее от катода в области больших телесных углов можно предположить, что на долю «капель» приходится не менее 20% сконденсированного молибдена (при  $\Omega = 1,5\pi$  ср).

**Выводы.** 1. Показано, что при осаждении молибдена из плазмы вакуумной дуго-

вого разряда основное количество материала (~60%) конденсируется в интервале телесных углов  $\leq \Omega = 1,5$  пср при расстоянии катод-подложка 6,5 см.

2. С удалением от катода на расстояние от 6,5 до 35,5 см массоперенос значительно снижается (в ~1,4 раза при  $\Omega = 1,5$  пср), что связано с отражением капель.

#### Библиографический список

1. Савицкий Е.М., Бурханов Г.С. *Металловедение тугоплавких и редких металлов.* – М.: Наука, 1971. – 240с.
2. Аксенов И.И., Коновалов И.И. и др. Исследование капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги // *ЖТФ.* – 1984. – Т.54. – Вып.8. – С.1530-1534.
3. Егоров В.Д., Клубович В.В., Литвинов А.А. Фазовый состав плазмы, генерируемой стационарной вакуумной дугой // *Физика и химия обработки материалов.* – 1992. – Вып.6. – С.69-75.
4. Саблев Л.П., Долотов Ю.И., Ступак Р.И., Осипов В.А. Электродуговой испаритель металлов с магнитным удержанием катодного пятна // *ПТЭ.* – 1976. – Вып.4. – С.247-249.
5. Лунев В.М., Падалка В.Г., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги // *ЖТФ.* – 1977. – Т.47. – Вып.7. – С. 1491-1495.
6. Белоус В.А., Лунев В.М. Шероховатость титановых покрытий, получаемых из несепарированных потоков плазмы вакуумного дугового разряда: Сб. ВАНТ. – Харьков. – 1998. – Вып.5(71). – С.89-90.
7. Хороших В.М. Об эрозии катода стационарной вакуумной дуги в капельной фазе // *Труды XIV Междунар. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению:* Сб. ВАНТ. – Алушта, 2000. – С.238-239.

УДК 533.9

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЭРОЗИОННОСТОЙКИХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ТИТАНА

*В.В.Кунченко, А.А.Андреев, Г.Н.Картмазов*

г.Харьков, ННЦ "Харьковский физико-технический институт"

В настоящей работе представлены результаты комплексных исследований взаимосвязей состава, структуры, условий осаждения вакуумно-дуговых покрытий на основе нитридов Тi с их эрозионными свойствами. Исследования проведены на образцах из сплавов титана ВТ-6 и сплава ВТ-8 в исход-

ном состоянии ( $HRC = 40...42$ ,  $H_{05} = 3,2 \cdot 10^3$  МПа) и отожженных в вакууме при  $920^\circ\text{C}$ , 2 часа и  $590^\circ\text{C}$  – 2,5 часа ( $HRC = 36...38$ ,  $H_{05} = 2,8 \cdot 10^3$  МПа) ОТ-4 и на образцах из сталей 12Х18Н10Т, Х18Н9Т.

Нанесение покрытий производилось на установке типа "Булат". Толщина покрытий