

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЫ С СЕПАРАЦИЕЙ КАПЕЛЬНОЙ ФАЗЫ ЭРОЗИИ КАТОДА

В.М. Хороших, А.А. Комарь, М.А. Бровина

Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ “ХФТИ”

Украина

Поступила в редакцию 22.01.2009

Проведен анализ литературных данных по оценкам эффективности плазменных фильтров и выполнены эксперименты по измерениям скорости осаждения покрытий в плазме вакуумной дуги. Результаты анализа литературы и данные измерений свидетельствуют о том, что токовая эффективность плазменных фильтров совпадает с эффективностью использования катодного материала для вакуума $\sim 10^{-4}$ Па. При наличии газа в фильтрующих системах токовая эффективность превышает эффективность использования катодного материала. В области давлений газа порядка нескольких Па следует учитывать влияние геометрии и потенциала подложкодержателя на результаты измерений скорости осаждения, необходимых для оценки эффективности использования катодного материала.

ВВЕДЕНИЕ

Основным недостатком, ограничивающим область применения вакуумно-дуговых эрозийных источников плазмы, является присутствие в плазменном потоке макрочастиц – капель и твердых осколков материала катода [1].

Для удаления макрочастиц из потока конденсируемого материала при его движении от катода до подложкодержателя используются различного рода электромагнитные системы поворота заряженных частиц. Одной из важнейших характеристик таких систем является эффективность использования рабочего вещества – катодного материала источника плазмы. Стремления к увеличению данного параметра привели к появлению широкоапертурных Г-образных и Т-образных фильтров [2, 3] и систем с радиальными плазменными потоками [4 – 6]. При повышенном, по сравнению с первыми образцами криволинейных фильтров, значении внутреннего радиуса плазмоведа r (60 мм [7] и 200 мм [3]), широкоапертурные фильтры отличаются малым отношением радиуса поворота частиц R к внутреннему радиусу плазмоведа ($R/r = 1,3$) [2, 3]. Радиальная система [4 – 6] содержит два прямолинейных источника плазмы с фокусировкой плазменного потока, расположенных соосно напротив друг друга. Покрытия получают конденсацией плазменных потоков движущихся в кольцевом зазоре

между источниками плазмы в радиальном от оси системы направлении. При размещении подложкодержателя с обрабатываемыми изделиями вне зоны прямой видимости со стороны рабочих поверхностей катодов источников плазмы, в такой системе обеспечивается очистка плазменных потоков от макрочастиц.

Оценки эффективности широкоапертурных криволинейных фильтров и радиальных систем проведены в работах [3, 5, 6]. При этом критерием эффективности служило либо значение $I_{i(\text{ВЫХ})}/I_{i(\text{ВХ})}$ ($I_{i(\text{ВЫХ})}$ и $I_{i(\text{ВХ})}$ – ионный ток на выходе и входе, соответственно), либо величина $I_{i(\text{ВЫХ})}/I_{\text{д}}$ ($I_{\text{д}}$ – ток дуги в источниках плазмы). Для радиальной системы измеренная величина $I_{i(\text{ВЫХ})}/I_{i(\text{ВХ})}$ достигает 80%. Однако, известно [8], что в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па, соответствующем условиям измерений в работах [5, 6], радиальные плазменные потоки характеризуются высоким содержанием ионов остаточного газа. В связи с этим обстоятельством, измеренное значение $I_{i(\text{ВЫХ})}/I_{i(\text{ВХ})}$ может оказаться завышенным по отношению к эффективности использования катодного материала источников плазмы в такой системе. Так же не ясен механизм достаточно резкого повышения скорости конденсации покрытий, в радиальной системе при давлениях газа $\sim 1 \div 3$ Па [5, 6] при заметном уменьшении отношения $I_{i(\text{ВЫХ})}/I_{\text{д}}$.

Радиальные потоки ионов остаточного газа могут также повлиять на результаты оцен-

ки эффективности широкоапертурных криволинейных фильтров с малым значением R/r :

В связи с вышеизложенным, представляет интерес оценка эффективности широкоапертурных криволинейных фильтров и радиальных систем на основании измерений расхода катодного материала и количества вещества конденсируемого на подложке, а также выяснения механизма повышения скорости конденсации в радиальных системах при давлении газа $\sim 1 \div 3$.

В настоящей работе оценки эффективности данных систем проведены на основании литературных данных по расходу массы катодного материала и по измерениям количества материала, конденсируемого на подложкодержателе. Для изучения механизма изменения скорости конденсации покрытий в плазме вакуумной дуги при наличии газа в разрядном промежутке исследовали конденсаты, получаемые при различных потенциалах на подложках различной конфигурации.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

Результаты анализа литературных данных приведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные условия и коэффициенты использования рабочего материала в сепарирующих устройствах

Ссылка	[4]	[4]	[6]	[2]
Катод + газ	Ti	Al	Ti + N ₂	Графит
p , Па	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	2	$5 \cdot 10^{-4}$
I_p , А	10	–	2	$1,5 \div 2$
U_n , А	–200	–	–200	–
L , мм	140	240	140	–
R , мм	150	176	150	200
$v_{k(M)}$, мм/с	1	1,2	8	18
$V_{пл}$, мм ³ /с	0,13	0,32	0,52	0,087
κ , мкг/К	39 [9]	110 [10]	19 [9]	27
κ_p , мкг/К	27,3 [9]	70 [10]	16,5 [9]	–
I_d , А	120	90	120	110
V_{k^2} , мм ³ /с	2,1	7,34	1,01	$1,34$ $1,65$
V_{k^2} , мм ³ /с	1,47	4,7	0,86	–
$V_{пл}/V_{k^2}$, %	6,2	4,63	51	6,44
$V_{пл}/V_{k^2}$, %	9	6,8	60,5	–
$10I_{i(вых)}/I_d$, %	41,7	–	8,3	$13 \div 18$

Суммарный расход катодного материала V_k определялся как $V_k = \kappa I_d / \rho$, где κ – коэффициент электропереноса, I_d – ток дуги, а ρ – плотность материала катода ($4,5 \text{ г/см}^3$ – для титана, $2,7 \text{ г/см}^3$ – для алюминия и $1,8 \text{ г/см}^3$ – для графита). Аналогичным образом определялся расход катодного материала в ионной фазе V_{ki} . При этом вместо значения общего коэффициента электропереноса κ использовался коэффициент электропереноса в ионной фазе κ_i . Значения κ и κ_i при различных значениях давления газа в разрядном промежутке взяты из работ [9 – 11]. Для системы с радиальными потоками объем пленки $V_{пл}$, конденсируемой на подложкодержателе, определялся путем интегрирования распределения скорости ее конденсации v_k вдоль зазора L между анодами источников плазмы ($v_k(L)$) по площади цилиндрического подложкодержателя радиусом R [6]. Для криволинейного фильтра интегрировалось распределение скорости конденсации по диаметру $v_k(D)$ плоского дискового подложкодержателя радиусом R [3].

В табл. 1 приведены значения скорости конденсации $v_{k(M)}$, соответствующие максимуму кривой $v_k(L)$, а также значения давления газа в рабочем объеме (p), потенциала подложки (U_n) и ионного тока на подложкодержатель, соответствующих условиям экспериментов. Поскольку по данным работы [12], максимальная величина ионного тока, отбираемая из плазмы вакуумной дуги, составляет 10% от разрядного тока, для оценки токовой эффективности рассматриваемых устройств использовалась величина $10I_{i(вых)}/I_d$.

Сравнение значений токовой эффективности со значением эффективности использования катодного материала для криволинейной системы с графитовым катодом указывает на то, что эффективность использования всего катодного материала примерно в 2 раза меньше значения токовой эффективности. Однако, при этом не учитывались степень эрозии катода в ионной фазе и повышение плотности конденсируемой пленки за счет формирования алмазоподобного покрытия. Следует ожидать заметного приближения эффективности использования катодного материала к значению токовой эффективности с учетом данных факторов.

К сожалению, авторы работы [2] не приводят данных об измерениях профилей распределения скорости конденсации для дуги с титановым катодом в области регистрации ионного выходного тока. Анализ данных профилей, измеренных в вертикальном и горизонтальном направлениях, кроме получения однозначных данных о коэффициенте использования материала катода, мог бы ответить на вопрос о причинах аномально высоких потерь на выходном прямолинейном участке системы. Потери частиц на этом участке могут быть связаны с условиями инжекции плазменного потока. Уменьшение коэффициента пропускания частиц на данном участке следует ожидать в случае, если центр пучка смещен относительно центра системы, (поворот частиц на 90° не достигнут).

Сравнение значений токовой эффективности со значением эффективности использования катодного материала для радиальной системы, функционирующей в вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ с титановыми катодами указывает на следующее. Эффективность использования всего катодного материала и катодного материала расходуемого в виде ионов соответственно в 6,7 и в 4,6 раза меньше значения токовой эффективности данной системы. Как отмечалось выше, данное отличие связано с высоким содержанием газовых ионов в радиальных потоках плазмы вакуумной дуги.

Для радиальной системы, функционирующей в азоте, при его давлении ~ 2 Па, происходит резкое увеличение скорости конденсации пленки нитрида титана (табл. 1), сопровождаемое снижением содержания газовых ионов в радиальных потоках [6]. В этих условиях следует ожидать сближения значений токовой эффективности и эффективности использования катодного материала. Однако, измеренная в этих условиях эффективность использования всего катодного материала и катодного материала расходуемого в виде ионов соответственно в 6 и в 7,5 раз больше значения токовой эффективности.

Эффект повышения коэффициента использования катодного материала в данных условиях, к тому же сопровождаемый уменьшением ионного тока, не может быть связан с

появлением сколь либо существенных радиальных электрических полей в системе. Об этом свидетельствует практически полное совпадение кривых $v_k(L)$ для магнитных полей пробочной и остроугольной конфигурации [6]. Также маловероятным представляется разворот основной части плазменного потока на подложкодержатель за счет упругих столкновений частиц титана с молекулами азота.

Наблюдаемое явление может быть связано с влиянием подложкодержателя ограниченных размеров, находящегося под отрицательным потенциалом, на заряженные частицы, находящиеся в его окрестности.

ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Для проверки данного предположения проводили эксперименты по изучению влияния геометрии подложкодержателя на характер зависимостей скорости конденсации от его потенциала, полученных при различных давлениях азота.

Нанесение покрытий проводили на серийной установке “Булат-6”, оснащенной вакуумно-дуговыми источниками плазмы с фокусировкой плазменного потока. В качестве катодного материала применяли титан марки ВТ-1. В качестве подложкодержателя использовали диск из немагнитной нержавеющей стали, установленный на расстоянии 100 мм от выходного торца анода на оси источника плазмы. Покрытия наносили на цилиндрические образцы диаметром и высотой 10 мм, изготовленные из нержавеющей стали. Толщина покрытий измерялась на интерферометре по методу “теневого ножа”. Схема расположения образцов на подложкодержателе представлена на рис. 1.

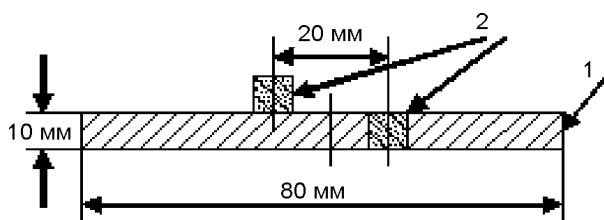


Рис. 1. Схема расположения образцов на подложкодержателе: 1 – подложкодержатель; 2 – образцы.

Результаты измерений зависимостей скорости осаждения покрытий от потенциала смещения, полученные при различных давлениях азота приведены на рис. 2.

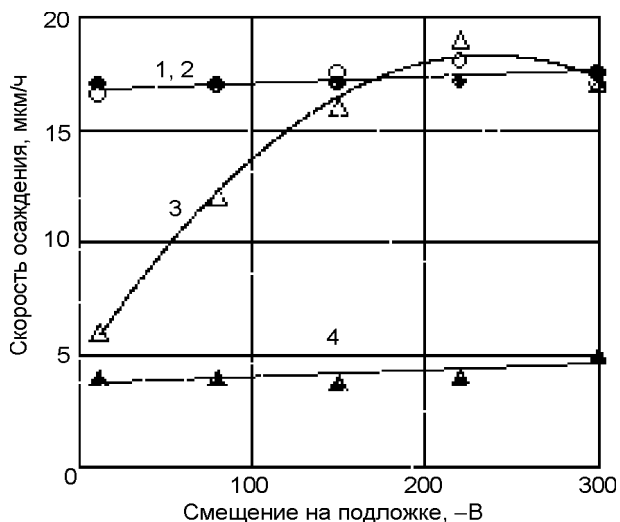


Рис. 2. Зависимости скорости осаждения покрытий от потенциала смещения: 1, 2 – давление азота 0,5 Па; 3, 4 – 2 Па. Зачерненные маркеры относятся к образцам, расположенным заподлицо с подложкой, светлые – образцы выступают над подложкой.

Из рис. 2 следует, что для давления азота 0,5 Па расположение образцов не влияет на зависимости скорости осаждения от потенциала подложки. Однако, для давления азота 2 Па на образцах, выступающих над подложкой, наблюдается рост скорости конденсации при увеличении потенциала от плавающего до $\sim -200 \div -250$ В. При этом потенциал подложки практически не влияет на скорость осаждения пленки на образцах, расположенных заподлицо с поверхностью подложки.

Причиной изменения характера кривых $v_k(U_n)$ при давлениях азота порядка нескольких Па может быть изменение параметров плазмы дугового разряда. Так, в работе [13] отмечено, что в плазме вакуумной дуги при токе ~ 100 А и давлении азота в несколько Па происходит срыв бунемановской неустойчивости, являющейся причиной ускорения ионов по направлению от катода к аноду. При отсутствии ускорения движение ионов будет носить изотропный характер, в то время как при более низких давлениях газа мы имеем дело с направленным потоком частиц. Для направленного потока потенциал подложки не оказывает влияния на количество частиц,

поступающих на поверхность конденсации любой геометрии. Однако, для изотропного распределения скорости частиц картина меняется.

В теории больших зондов [14] ($R_0 \gg D$, здесь R_0 и D – радиус зонда и дебаевский радиус соответственно) для изотермической плазмы рассматриваются два случая. Малый потенциал зонда $\phi_0 \ll (R_0/D)^{4/3}$ и случай больших потенциалов $\phi_0 \gg (R_0/D)^{4/3}$. В первом случае ток насыщения притягивающихся частиц превышает ток в отсутствие потенциала в 1,47 раза. Для второго случая насыщение тока притягивающихся частиц с ростом потенциала не наблюдается. Это связано с непрерывным возрастанием размеров слоя объемного заряда, окружающего зонд, вследствие чего отбор частиц непрерывно увеличивается. Так, при $\phi_0 = 100$ ток притягивающихся частиц более чем в 80 раз превышает ток в отсутствие потенциала. В рассматриваемых экспериментальных условиях образец, выступающий над подложкой, соответствует случаю большого зонда под высоким потенциалом, в то время как подложкодержатель отвечает условиям большого зонда при небольших потенциалах. Действительно, для плазмы вакуумной дуги концентрация заряженных частиц находится на уровне $10^{10} \div 10^{11}$ см⁻³, а температура электронов находится на уровне $\sim 2 \div 3$ эВ [15]. При этом дебаевский радиус экранирования находится на уровне $\sim 10^{-2} \div 10^{-1}$ мм. Таким образом, для образцов радиусом 5 мм при подаче на него потенциала порядка сотни вольт выполняется условие большого зонда под высоким потенциалом. Данное обстоятельство может привести к отличию скоростей осаждения при различном расположении обрабатываемых образцов, находящихся под одинаковым потенциалом. Подтверждением этому являются данные по измерениям плотности ионного тока, проведенные с помощью плоского одиночного зонда малых ($R \sim 5$ мм) размеров и тока на подложкодержателе диаметром 80 мм [16, 17]. При измерениях тока зонда, находящегося под фиксированным потенциалом -100 В области давлений $1 \div 3$ Па наблюдается рост тока зонда, в то время как для подложкодержателя с ростом давления в

диапазоне 0,01 ÷ 5 Па наблюдается монотонное снижение тока. Отметим, что покрытия в системе с радиальными потоками получали при потенциале смещения – 200 В на образцах, выступающих над подложкодержателем. При давлении азота порядка нескольких Па при таком расположении образцов измерения скорости осаждения в радиальных потоках могут давать неверную информацию о количестве частиц поступающих на выход системы.

ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ литературных данных и проведенные измерения позволяют сделать следующие выводы:

1. В вакууме $\sim 10^{-4}$ Па измеряемые значения токовой эффективности близки к значениям эффективности использования материала катода.
2. В области давлений газа $\sim 10^{-3} \div 10^{-1}$ Па токовая эффективность систем фильтрации плазмы вакуумной дуги может превышать эффективность использования материала катода, вследствие высокого содержания газовых ионов в радиальных плазменных потоках.
3. В области давлений газа порядка нескольких Па измерения скорости осаждения покрытий, необходимые для оценки эффективности использования материала катода, следует проводить с учетом возможного влияния геометрии и потенциала образцов, используемых в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Voxman R.L., et al. Recent progress in filtered vacuum arc deposition//Surf. Coat. Technol. – 1996. – Vol. 86-87. – P. 243-253.
2. Strel' nitskij V.E., Aksenov I.I, Peculiarities of direct vacuum-arc processes of DLC films deposition//Prc. 21th Int. Symp. On Discharges and El. Insulation in Vacuum. – Yalta (Ukraine). – 2004. – Vol. 2. – P. 461-466.
3. Aksenov I., Strel' nitskij V.E., Vasiliev V.V., Zaleskij D.Yu. Efficiency of magnetic plasma filters//Surf. Coat. Technol. – 2003. – Vol. 163-164. – P. 118-127.
4. Aksenov I.I., Khoroshikh V.M., Lomino N.S., Ovcharenko V.D, Zadneprovskij Yu.A. Transformation of axial vacuum-arc plasma flows into

radial streams and their use in coating deposition//IEEE trans. Plasma Sci. – 1999. – Vol. 27, № 4. – P. 1026-1029.

5. Aksenov I.I. Magnetic confinement structures in vacuum-arc plasma filtering systems//Prc. 21th Int. Symp. On Discharges and El. Insulation in Vacuum. – Yalta (Ukraine). – 2004. – Vol. 2. – P. 467-472.
6. Аксенов И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.
7. Аксенов И.И., Белоус В.А., Падалка В.Г., Хороших В.М. Устройство для очистки плазмы вакуумной дуги от макрочастиц//ПТЭ. – 1978. – № 5. – С. 236-237.
8. Хороших В.М. Стационарная вакуумная дуга в технологических системах для обработки поверхностей//Физическая инженерия поверхности. – 2003. – Т. 1, № 1. – С. 19-26.
9. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Исследование влияния давления газа в объеме на прикатодные процессы стационарной вакуумной дуги//ТВТ. – 1984. – Т. 22, № 4. – С. 650-654.
10. Хороших В.М., Холомеев М.Г. Пространственное распределение потоков частиц в стационарном дуговом разряде низкого давления//Физическая инженерия поверхности. – 2004. – Т. 2, № 6. – С. 167-170.
11. Аксенов И.И., Кудрявцева Е.Е., Кунченко В.В., Падалка В.Г., Попов А.И., Хороших В.М. Исследование влияния давления газа в объеме на параметры капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги: Препр. / ХФТИ. ЦНИИАтом- информ; 84-18.– М.: 1984. – 17 с.
12. Kimblin C.W. Erosion and ionization in the cathode spot regions of vacuum arcs//J. Appl. Phys. – 1973. – Vol.44, № 7. – P. 3074-3081.
13. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Падалка В.Г., Сизоненко В.Л., Хороших В.М. Неустойчивости в плазме вакуумной дуги при наличии газа в разрядном промежутке. II//Физика плазмы. – 1985. – Т. 11, Вып. 11. – С. 1380-1384.
14. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. – М.: Атомиздат, 1969. – 292 с.
15. Лунев В.М., Падалка В.Г., Хороших В.И. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги. II//ЖТФ. – 1977. – Т. 47, Вып. 7. – С. 1491-1495.
16. Аксенов И.И. Антуфьев Ю.П., Брень В.Г. Хороших В.М. Влияние давления газа в реакционном объеме на процесс синтеза нитридов при конденсации плазмы металлов//Химия

высоких энергий. – 1986. – Т. 20, № 1. – С. 82-86.

17. Aksenov I.I., Khoroshikh V.M., The influence of nitrogen on the erosion plasma ion compo-

nent in a vacuum-arc sources//Proc. 18 ISDEIV. Eindhoven (The Netherlands).– 1998. – Vol. 2. – P. 573-576.

**ПРО ЕФЕКТИВНІСТЬ
ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ДЖЕРЕЛ
ПЛАЗМИ ІЗ СЕПАРАЦІЄЮ
КРАПЛИННОЇ ФАЗИ ЕРОЗІЇ КАТОДА**

В.М. Хороших, А.А. Комар, М.О. Бровіна

Проведено аналіз літературних даних по оцінках ефективності плазмових фільтрів і виконані експерименти по вимірах швидкості осадження покриттів у плазмі вакуумної дуги. Результати аналізу літератури й дані вимірів свідчать про те, що струмова ефективність плазмових фільтрів збігається з ефективністю використання катодного матеріалу для вакууму $\sim 10^{-4}$ Па. При наявності газу у фільтруючих системах струмова ефективність перевищує ефективність використання катодного матеріалу. В області тисків газу порядку декількох Па варто враховувати вплив геометрії й потенціалу підкладинки на результати вимірів швидкості осадження, необхідні для оцінки ефективності використання катодного матеріалу.

**ABOUT EFFICIENCY OF VACUUM-ARC
PLASMA SOURCES WITH SEPARATION OF
DROP- PHASE CATHODE EROSION**

V.M. Khoroshikh, A.A. Komar, V.A. Brovina

The literary data analysis is conducted by estimations of efficiency of plasma filters and the experiments are executed on measuring of deposition rate in vacuum-arc plasma. The results of literature analysis and information of measuring testify that current efficiency of plasma filters coincides with efficiency of the use of cathode material for a vacuum $\sim 10^{-4}$ Pa. At presence of gas in the filtering systems, current efficiency exceeds efficiency of the use of cathode material. In area of gas presence of about a few Pa it is necessary to take into account influence of substrate geometry and potential on the results of measuring of deposition rate, which is necessary for estimation of cathode material efficiency.