УДК 537.52

МАГНЕТРОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ЖИДКОФАЗНОГО КАТОДА

Булычев В. С., Духопельников Д. В.

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва

Современная ракетно-космическая промышленность требует совершенствования методов обработки конструкционных материалов, в частности, улучшение или изменение свойств поверхности, по сравнению с материалом подложки (детали). Одним из способов модификации поверхности деталей двигателей летательных аппаратов является применение магнетронных распылительных систем (МРС). Данный метод позволяет наносить плотные качественные пленки с высокой адгезией [1-2].

Основной проблемой магнетронных распылительных систем является высокая энергетическая цена атома в наносимом покрытии. Наиболее очевидным способом решения этой проблемы является увеличение коэффициента катодного распыления. Перевод катода в жидкую фазу позволяет увеличить скорость нанесения покрытия и снижает энергозатраты при сохранении качества покрытий [3-4]. При этом скорость роста покрытия и энергозатраты становятся сравнимыми с методами дугового испарения, электронно-лучевого испарения и гальваникой.

Целью данной работы являлась оценка изменения коэффициентов катодного распыления с учетом количества вещества, уносимого с катода за счет термического испарения, и исследование изменения параметров разряда при изменении фазового состояния катода.

Работа проводились на экспериментальной вакуумной установке. Магнетронная распылительная система располагалась внутри камеры. Исследования проводились на медном и алюминиевом катодах. Конструкция тигля обеспечивала минимальный тепловой контакт с водоохлаждаемой магнитной системой, что приводило к быстрому плавлению катода при ионной бомбардировке.

При повышении температуры катода выше температуры плавления, помимо катодного распыления, значительную роль начинают играть процессы термического испарения. Поэтому для более точной оценки коэффициента катодного распыления из жидкой фазы необходимо минимизировать испарительную составляющую. Для этого температура расплавленного катода в стационарном режиме поддерживалась выше температуры плавления на 50 К, а также время работы МРС t выбиралось таким образом, чтобы время распыления катода в жидком состоянии значительно превышало время плавления катода.

Коэффициент катодного распыления определялся по разности масс катода до и после процесса распыления Δm_p с учетом массы унесенной за счет термического испарения Δm_u:

$$S = \frac{e(\Delta m_p - \Delta m_u)}{m_p M_a I t}$$

где $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ – элементарный электрический заряд, Кл;
$m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ – масса протона, кг;
M_a – атомная масса исследуемого материала, а.е.м.;
I – ионный ток, А;

Масса испаренного вещества Δm_u определялась по закону Герца-Кнудсена [5] с учетом закона Клайперона-Клазиуса для давления насыщенных паров [6].

В таблице приведены полученные коэффициенты распыления алюминия и меди в жидком состоянии в сравнении с коэффициентами распыления в твердом состоянии при одинаковых средних энергиях ионов (400 эВ для меди и 300 эВ для алюминия).

Коэффициент распыления	Распыляемый материал		Доля уноса массы за счет термического испарения $\frac{\Delta m_u}{\Delta m_p}$	
	Медь	Алюминий	Медь	Алюминий
Средняя энергия ионов, эВ	400	300	400	300
Коэффициент распыления из твёрдого состояния	1,8	0,6	—	—
Коэффициент распыления из жидкого состояния в среде аргона	2,1	1,0	14%	0,06%
Коэффициент распыления из жидкого состояния в режиме самораспыления	4,2	—	8%	—

Эксперименты показали, что коэффициенты катодного распыления меди и алюминия из жидкого состояния превышают коэффициент катодного распыления из твердого состояния.

Полученные данные показывают, что рост скорости уноса массы с катода (возрастание скорости роста покрытия) связан как с ростом коэффициента катодного распыления, так и с ростом скорости термического испарения. При высоких температурах катода скорость термического испарения может значительно превышать скорость катодного распыления.

Библиографический список

1. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы. В 2 ч. Ч1: устройство, принципы работы, применение. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 53 с.
2. Марахтанов, М.К. Трибологические свойства серебряных покрытий, полученных методом магнетронного распыления [Текст]/ М. К. Марахтанов, Д. В. Духопельников, Е. В. Воробьев, Д. В. Кириллов // Наноинженерия. – 2014. – № 9 (39). – С. 30-32.
3. Гвоздев В.В. Исследование магнетронных распылительных систем с жидкометаллическим катодом с целью увеличения производительности и снижения энергозатрат процесса катодного распыления: Дис. канд. техн. наук. – Москва, 1999.
4 Духопельников, Д. В. Магнетронный разряд с жидкофазным катодом [Текст]/ Д. В. Духопельников, В. С. Булычев, Е. В. Воробьев // Вакуумная техника, материалы и технологии. Новелла. – 2016. – С. 108-112.
5. Майссел, Л., Гленга, Р. Технология тонких пленок. Справочник. Т.1[Текст]/ Л. Майссел, Р. Гленга //. – М.: Советское радио, 1977.- 644 с. (Ин. Изд.: Maissel L., Glang R. Handbook of thin film technology. New York, McGraw-Hill Book Company, 1970).
6. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. – М.: Мир, 1975 – 623 с. (Ин. Изд.: Groszkowski J. Technika wysokiej prozni. Warszawa, Wydawnictwa naukowo-techniczne, 1972).