

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ РАБОТЫ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ИСПАРИТЕЛЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ КАПЕЛЬ В ФОРМИРУЕМЫХ ПЛЕНКАХ

В.А.Белоус, В.М.Луцев, В.С.Павлов

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
Украина, 61108, г.Харьков, ул.Академическая, 1,
E-mail: belous@kipt.kharkov.ua, факс/тел.: (0572) 35-07-55*

Вивчено відносний склад крапельної фази на поверхні титанових плівок, що формуються при вакуумно-дуговому випарюванні титану в стаціонарному (до 30 с) та імпульсному режимах горіння дуги з різною скважністю. Показано, що концентрація великих краплин знижується із зменшенням часу горіння дуги. Зроблено допущення, що великі краплі створюються при зіткненні менших краплин в області катодної плями. Малі краплі формуються в розрядних ячейках, які створюють катодну пляму.

Исследовано относительное содержание капельной фазы на поверхности конденсируемых титановых пленок при вакуумно-дуговом испарении титана в непрерывном (до 30 с) и импульсном режимах горения дуги с различной скважностью. Показано, что концентрация крупных капель снижается с уменьшением времени горения дуги. Сделано предположение, что крупные капли образуются при столкновении более мелких в области катодного пятна. Мелкие капли формируются в разрядных ячейках, которые в совокупности и образуют катодное пятно.

The relation content of the drop phase at the surface of titanium films condensed by evaporation of titanium in continuous (about 30 seconds) and pulsed modes of an arc at different pulse and pause time has been investigated. It is shown, that the concentration of large drops decreases with decreasing the arc burning time. The conjecture is made, that the large drops formation is a result of collision of small drops in the vicinity of a cathode spot. The small drops are emitted by discharge cells which form the cathode spot.

Главным недостатком вакуумно-дугового метода получения пленок и покрытий является наличие в плазменной фазе капельной составляющей [1,2], причем, количество капель и их размеры увеличиваются с ростом времени осаждения и тока дуги [3]. Целью настоящей работы являлось выбор параметров разряда (тока дуги, времени горения дуги, скважности при работе в импульсном режиме) на количество и размеры капель в формируемых пленках.

Эксперименты проводились на установке типа "Булат" [4], объектом исследования был выбран титан. Рабочая поверхность катода диаметром 60 мм предварительно полировалась до Ra~0,1 мкм. Пленки титана осаждались на стеклянные подложки, располагавшиеся параллельно рабочей поверхности катода и на расстоянии от него 200 мм.

Эксперименты проводились при длительности разряда (t_p) от 0,3 с до 30 мин, а также при импульсной работе дугового испарителя продолжительностью 2 с и временем между импульсами до 3 мин. Ток дуги во всех экспериментах был равен 50 А – минимальный устойчивый ток горения дуги в наших условиях.

Время горения измерялось с помощью осциллографа С 8 – 17, скважность работы дугового испарителя задавалась реле времени ВЛ-409ХЛЧ.

Поверхности сконденсированных пленок и рабочей поверхности катодов исследовались на микроинтерферометре МИМ-8 при увеличении 500. Определялись диаметр и количество эрозийных кратеров на рабочей поверхности катода и капель на подложке.

Результаты и их обсуждение

Исследование температурного режима катода показало, что при временах горения дуги ≥ 25 мин температура поверхности катода не меняется, и количество генерируемых катодом капель в единицу времени также остается постоянными [5]. При временах горения дуги < 25 с с уменьшением времени горения наблюдается снижение как количества, так и диаметра капель. На рис.1 показан рост относительной площади, занятой каплями разных размеров, с увеличением времени горения разряда. При времени горения разряда 30 с доля поверхности подложки, занятой каплями, составляет около 1,3%.

На рис. 2 показана зависимость отношения общей площади капель заданного диаметра (S^i кап) ко всей площади поверхности подложки, занятой кап-

лями всех размеров ($\sum S^i$ кап) от диаметра капель при различной длительности горения дугового разряда в непрерывном (кривые 1-4) и импульсном (кривая 5) режимах. Видно, что при времени непрерывного горения дуги ≤ 5 с доля капель диаметром ~ 4 мкм не превышает 5%, и с уменьшением времени непрерывного горения дуги основной вклад (до 30%) дают капли дугарывного горения дуги > 5 с, доля крупных капель стремительно нарастает, и при времени горения дуги 10 с доля капель диаметром ~ 13 мкм составляет $\sim 45\%$. При импульсной работе дугового разряда (разряд 2 с, пауза 10 с, общее время разряда 30 с, кривая 5) капель диаметром > 4 мкм вообще не наблюдается.

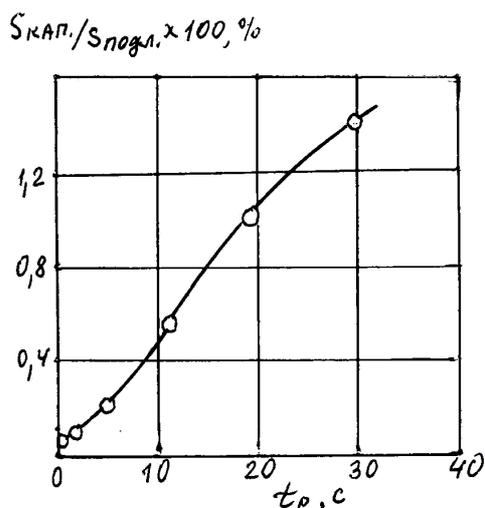


Рис.1. Зависимость относительной площади ($S_{\text{кап.}}/S_{\text{подл.}} \times 100\%$) занимаемой каплями титана ($S_{\text{кап.}}$), от длительности разряда, $I_g=100$ А; расстояние катод-подложка 250 мм

Согласно литературным данным источником капель при вакуумно-дуговом разряде являются катодные пятна, размеры которых существенно зависят от теплового режима катода [5,6].

Нами проведена оценка интегральной температуры поверхности титанового катода после различного времени горения дуги по уравнению, предложенному в работе [7]:

$$T_k = \frac{2I_g \cdot V_k}{S \sqrt{\pi}} \sqrt{t/\lambda \rho}$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности, 0,0364 кал/см·с·град; ρ - плотность, 4,5 г/см³; I_g - ток дуги, 50 А; V_k - прикатодное падение потенциала, 10 В; t - время горения дуги.

В таблице приведены значения температуры поверхности катода для различного времени горения дуги.

При длительности разряда ~ 1 с интегральная температура катода, как видно из таблицы, не отличается от комнатной и, следовательно, диаметр катодных пятен минимален. При времени горения дуги 30 с температура катода равна ~ 453 К, в этом случае диаметр катодных пятен должен быть

больше и увеличивается диаметр генерируемых капель. При импульсной работе дугового разряда интегральная температура катода практически не отличается от комнатной и, как результат этого, мы имеем только мелкие капли.

Для проверки справедливости высказанных представлений мы исследовали характер эрозии титанового катода после горения дуги в течение 0,3 с.

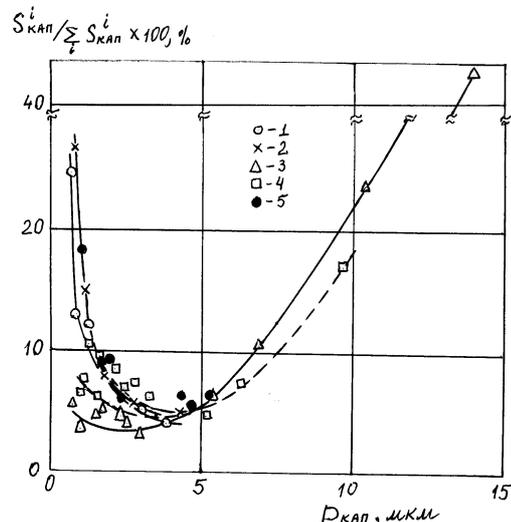


Рис.2. Зависимость отношения площади капель титана заданного размера к общей площади поверхности, занятой всеми каплями на подложке ($S^i_{\text{кап.}}/\sum S^i_{\text{кап.}} \times 100\%$), от диаметра капель ($D_{\text{кап.}}$), $I_g=55$ А; $t_p=2$ (1), 5 (2), 10 (3) и 60 с (4) при постоянном режиме работы источника и импульсном при $t_p=2$ с, $t_{\text{пауза}}=10$ с и $\sum t_p=30$ с

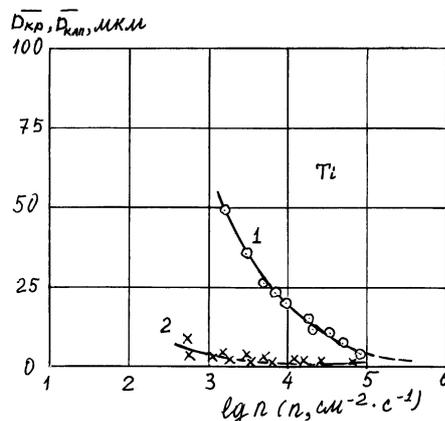


Рис.3. Зависимость диаметра капель в покрытии и диаметра кратеров на поверхности катода от их количества при распылении титана

При исследовании микрорельефа на поверхности катода наблюдались кратеры, которые представляют собой углубления, ограниченные круглой или ломанной линией. Наблюдаемые кратеры отличаются своим расположением. Кратеры размером < 10 мкм расположены по одиночке, расстояние между ними больше их диаметра, поверхность катода между кратерами не повреждена. Наблюдается также групповое расположение кратеров таких размеров - по 2-

10 в группе, они могут быть расположены вплотную друг к другу.

Время разряда, с	2	5	10	30	60
Температура поверхности катода, К	320	346	378	453	523

Минимальный наблюдаемый размер одиночных кратеров и кратеров в группе ~3 мкм. Глубина кратеров в группах (которая равна ~0,5 их диаметра) отличается не более чем на 50%, что вероятно указывает на их совместное существование в течение определенного отрезка времени. И, наконец, наряду с описанными видами кратеров наблюдаются одиночные кратеры размером >10 мкм.

На рис. 3 показана зависимость диаметров капель (Дкап) на поверхности подложки и кратеров (Дкр) на поверхности катода после дугового разряда продолжительностью 0,3 с.

Видна корреляция зависимости размеров капель и кратеров от их количества. То обстоятельство, что рост размеров капель существенно отстает от размеров кратеров, связано с тем, что при вакуумно-дуговом распылении титана крупные капли распространяются под небольшим углом к поверхности катода (до 30°), а по оси катода наблюдаются только единичные капли [3].

Из полученных результатов можно заключить, что местом формирования крупных капель являются крупные кратеры. Как установлено при исследовании катодных пятен при вакуумно-дуговом разряде, они распадаются на разрядные ячейки [5]. Количество разрядных ячеек определяется током дугового разряда и в нашем случае (если принять пороговый ток в разрядной ячейке равным ~1,6 А [8]) составляет несколько десятков. Мелкие капли формируются именно в разрядных ячейках, их размеры не могут быть больше размера разрядной ячейки (<~ 10⁻⁴ см), количество их находится на уровне ~10⁴ капель на ячейку. Близко расположенные разрядные ячейки образуют кратер, в котором мелкие капли, сталкиваясь друг с другом, образуют крупные капли, которые мы и наблюдаем на сконденсированной пленке.

С увеличением интегральной температуры катода размеры как разрядных ячеек, так и катодных пятен увеличиваются, что и приводит к росту размеров капель. По-видимому, процесс формирования крупных капель можно затормозить, если процесс распыления вести в импульсном режиме при малых временах горения дуги.

Выводы

1. Исследовано относительное содержание капельной фазы при вакуумно-дуговом испарении титана в непрерывном (до 30 с) и импульсном режимах горения дуги, с различной скважностью. Показано, что концентрация крупных капель снижается с уменьшением времени горения дуги.

2. Для обеспечения низкой концентрации крупных капель процесс следует вести в импульсном режиме. Продолжительность импульсов и скважность дугового разряда определяются величиной тока дугового разряда.

3. Предложен механизм образования крупных капель в плазменном потоке при вакуумно-дуговом распылении металлов.

Литература

1. В.В. Клубович, А.А. Литвинов. Защитные свойства и топография поверхности TiN покрытия, осажденных из капельно-плазменного потока // *ФХОМ*. 1994, т. 6, с.80.
2. В.Д. Егоров, В.В. Клубович. Фазовый состав плазмы, генерируемой стационарной вакуумной дугой // *ФХОМ*. 1992, 6, с.69.
3. И.И. Аксенов, И.И. Коновалов и др. Исследование капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги // *ЖТФ*. 1984, т.54, №8, с. 1530.
4. В.М. Лунев, В.Д. Овчаренко, В.М. Хороших. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги // *ЖТФ*. 1977, т.47, №7, с.1486.
5. Е.А. Литвинов, Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский. Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные процессы // *УФН*. 1983, т.139, №2, с.265.
6. И.И. Аксенов, В.Г. Брень, И.И. Коновалов и др. Исследование плазмы стационарного вакуумного дугового разряда. II. Влияние интегральной температуры катода // *ТВТ*. 1983, т.21, №4, с.646.
7. С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов. *Электрические ракетные двигатели*. М.: «Машиностроение», 1975, с.272.
8. И.Г. Кесаев. *Катодные процессы электрической дуги*. М.: «Наука», 1968, с.116.