

7. Hayashi K., Sugiyama K. Fundamental study of TiN films deposited by ion beam mixing. Mater. Scien. Engin., 1989, A115, p.349-353.

8. Rossnagel S., Cuomo J. Film modification by low energy ion bombardment during deposition. Thin Solid Films., 1989, 171, p.143-156.

9. Ганн В., Юдин О. Программа расчета стандартных профилей распределения радиационных дефектов по глубине материала, облученных пучками тяжелых ионов//Вопр. ат. науки и техн. Серия. Физ. рад. повр. рад. матер.–1979.–Вып.1. Стр.37-42.

УДК 537.523.5

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

*В.А. Белоус, В.М. Лунев, В.С. Павлов*

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

*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.*

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 являлся выбор параметров разряда (тока дуги, времени горения дуги, скважности при работе в импульсном режиме), влияющих на количество и размеры капель в формируемых пленках.

Эксперименты проводились на установке типа "Булаг" [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 200 мм от него.

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 С8-17, скважность работы дугового испарителя задавалась реле времени ВЛ-409ХЛЧ.

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

**Результаты и их обсуждение.** Исследование температурного режима катода показало, что при временах горения дуги  $\geq 25$  мин температура поверхности катода не меняется, и количество генерируемых катодом капель в единицу времени также остаются постоянными [2, 5]. При времени горения дуги  $< 25$  сек 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 каплями 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  $\leq 5$  с доля капель диаметром ~ 4 мкм не

превышает 5 %, и с уменьшением времени непрерывного горения дуги основной вклад (до 30%) дают капли диаметром  $\leq 1$  мкм. При увеличении времени непрерывного горения дуг  $> 5$  с доля крупных капель стремительно нарастает, и при времени горения дуги 10 с доля капель диаметром  $\sim 13$  мкм составляет  $\sim 45\%$ . При импульсной работе дугового разряда (разряд  $-2$  с, пауза  $-10$  с, общее время разряда  $-30$  с, кривая 5) капля диаметром  $> 4$  мкм вообще не наблюдается.

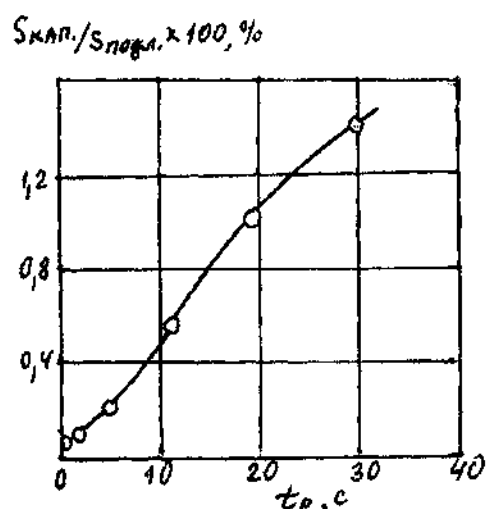


Рис.1. Зависимость относительной площади ( $S_{кап.}/S_{подл.} \times 100\%$ ), занимаемой каплями титана ( $S_{кап.}$ ), от длительности разряда:  $I_g=100A$ ; расстояние катод-подложка 250мм.

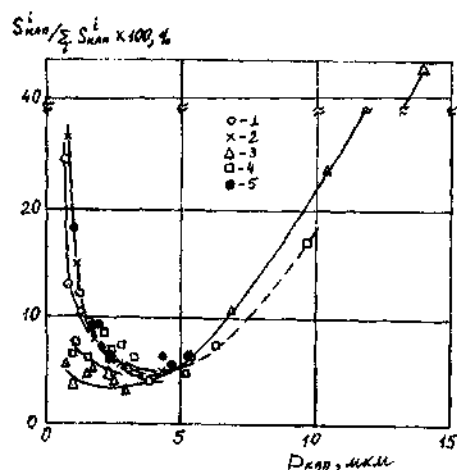


Рис.2. Зависимость отношения площади капля титана заданного размера к общей площади поверхности, занятой всеми каплями на подложке ( $S^i_{кап.}/\Sigma S^i_{кап.} \times 100\%$ ), от диаметра капля ( $D_{кап.}$ ):  $I_g=55 A$ ;  $t_p=2$  (1), 5 (2), 10 (3) и 60с (4) при постоянном режиме работы источника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

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]:

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

Здесь  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, 0,0364 кал/см·с·град;

$\rho$  – плотность, 4,5 г/см<sup>3</sup>;

$I_g$  – ток дуги, 50 А;

$V_k$  – прикатодное падение потенциала, 10В;

$t$  – время горения дуги.

В табл. 1 приведены значения температуры поверхности катода для различного времени горения дуги.

Таблица 1

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

При длительности разряда  $\sim 1$  с интегральная температура катода, как видно из табл. 1, не отличается от комнатной, и, следовательно, диаметр катодных пятен минимален. При времени горения дуги 30 с температура катода равна  $\sim 453$  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. При исследовании микрорельефа на поверхности катода наблюдались кратеры, которые представляют собой углубления, ограниченные круглой или ломаной 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. 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 (Д кап.) на поверхности подложки и кратеров (Д кр.) на поверхности катода после дугового разряда продолжительностью 0,3 с.

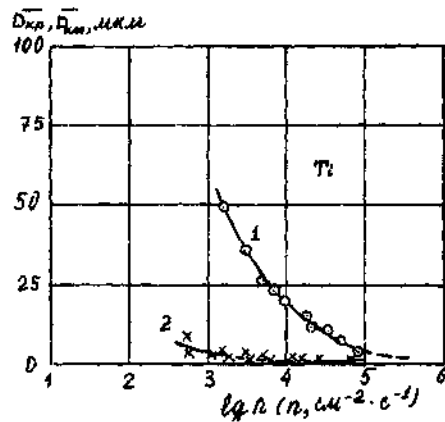


Рис. 3. Зависимость диаметра капель в покрытии и диаметра кратеров на поверхности катода от их количества при распылении титана.

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 ~ 2,0 А [8]) составляет не-

сколько десятков. Мелкие капли формируются именно в разрядных ячейках, их размеры не могут быть больше размера разрядной ячейки (< ~ 10<sup>-4</sup> см), количество их находится на уровне ~ 10<sup>4</sup> 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 конденсированной 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.

#### Библиографический список

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