

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ В СТАЦИОНАРНОМ ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.М. Хороших, М.Г. Холмеев

Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"  
Украина

Поступила в редакцию 12.02.2004

Работа посвящена изучению потоков частиц, генерируемых стационарными вакуумными дугами, горящими на катодах из алюминия и молибдена, резко отличающимися по температурам плавления. Показано, что содержание капель в потоках частиц, генерируемых вакуумной дугой, существенно отличается для тугоплавкого и легкоплавкого металлов. Так, для алюминия содержание капель в общем потоке конденсируемых частиц достигает 35,6%, в то время как для молибдена доля капельной фазы не превышает 1%. Заметное влияние на характер угловых распределений капель оказывает их взаимодействие с ионами плазмы. При анализе угловых распределений частиц следует учитывать их взаимодействие с поверхностью конденсации.

### ВВЕДЕНИЕ

Капельная фаза эрозии катода стационарной вакуумной дуги исследовалась ранее в работах [1, 2]. Изучено угловое распределение и распределение по размерам для капель, генерируемых дугой с титановым катодом, горящей в высоком ( $\sim 10^{-3}$  Па) вакууме, а также в присутствии азота (до  $\sim 1$  Па) в разрядном промежутке.

Установлено, что перенос материала в капельной фазе для стационарной вакуумной дуги с титановым катодом достигает  $\approx 30\%$  от общего расхода массы катода. Максимальный диаметр капель составляет  $\approx 40$  мкм.

Настоящая работа посвящена исследованию капель, генерируемых стационарными вакуумными дугами, горящими на катодах из алюминия и молибдена. Данные материалы резко отличаются по температуре плавления, что позволяет выявить отличия в параметрах капельной фазы для катодов из легкоплавких и тугоплавких металлов.

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования проводили на установке, аналогичной используемой в работах [1, 2]. В качестве катодных материалов использовали алюминий АВ 0000 и молибден марки МЧВП. Продукты эрозии катода осаждались на образцы, расположенные на расстоянии 85 мм от центра катода по окружности с центром, совпадающим с центром рабочей поверхности катода и лежащей в плоскости, перпендикулярной этой поверхности. В процессе осаждения продуктов эрозии на образцы подавался отрицательный, относительно заземленного анода разряда, потенциал;  $-50$  В для молибдена и  $-150$  В для алюминия. Данные значения потенциалов являются характерными

для условий использования дуги в процессах осаждения различного рода покрытий [3]. Для изучения морфологии поверхности конденсатов использовали оптический микроскоп ММР-4 и растровый электронный микроскоп РЭМ-200. Скорость конденсации общего потока частиц (ионов и капель) определяли по толщине пленок, получаемых в течение определенного промежутка времени; толщина конденсатов измерялась интерферометром МИИ-4 по методу "теневых ножей". Ток дугового разряда составлял 100 А для алюминия и 125 А для молибдена

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение поверхности конденсатов под микроскопом по методикам предложенным в работах [1, 2] показывает, что минимальные из обнаруживаемых капель имеют диаметр  $\sim 0,1$  мкм; максимальный диаметр капель для алюминия составляет  $\sim 45$  мкм, для молибдена  $\sim 8$  мкм. Распределение капель по размерам представлено на рис. 1.

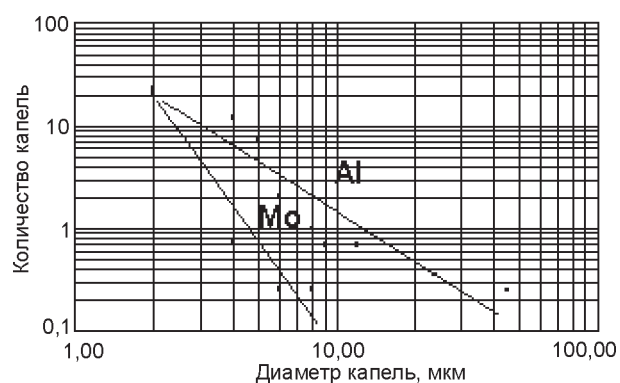


Рис. 1. Распределение капель по размерам в максимумах их угловых распределений.

Также, как и для титана [2], распределение капле по размерам описывается функцией типа:

$$\Delta n = cD_k^{-\gamma}, \quad (1)$$

где  $\Delta n$ ,  $D_k$  – количество и диаметр капле соответственно;  $c$ ,  $\gamma$  – постоянные, зависящие от материала катода. Для алюминия  $c \cong 49$ ,  $\gamma \cong 1,56$ ; для молибдена  $c \cong 164$ ,  $\gamma \cong 3,41$ .

Зависимости скорости осаждения суммарного потока частиц, генерируемых вакуумной дугой, капле и атомарных частиц (ионов и нейтральных атомов) от угла к оси разряда представлены на рис. 2 и 3.

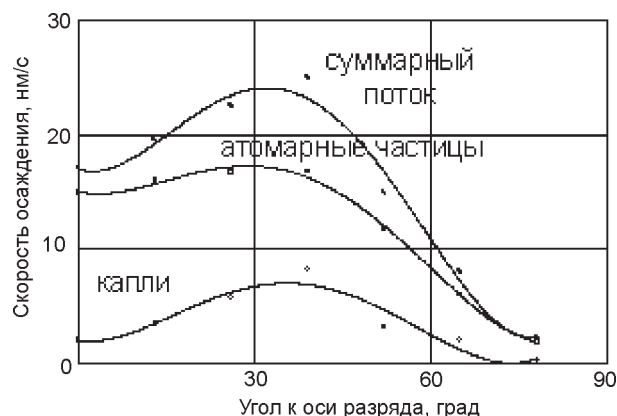


Рис. 2. Угловые распределения частиц, генерируемых вакуумной дугой с алюминиевым катодом.

Атомарный поток определялся как разность суммарного потока частиц и капле. Рассчитанные из данных, приведенных на рис. 2 и 3, доли



Рис. 3. Угловые распределения частиц, генерируемых вакуумной дугой с молибденовым катодом; (\*для капле масштаб по оси Y увеличен в 100 раз); ввиду малого содержания капле, суммарный и атомарный потоки практически совпадают.

катодного материала, генерируемые в пределах данного телесного угла, приведены в табл. 1. Здесь же представлены отношения массы материала, осаждаемого на внутреннюю поверхность полусферы диаметром 85 мм, к общей массе испаренного катодного материала. Расходы массы катодного материала рассчитаны из коэффициентов электропереноса, измеренных в работе [4].

Таблица 1

Относительное количество катодного материала, генерируемого в пределах заданных значений телесных углов к оси разряда

Телесный угол относительно оси разряда	Относительное количество катодного материала, генерируемого в пределах данного телесного угла, %	
	Mo	Al
26°	0,5	0,4
52°	5,4	5,4
78°	18,4	22,8
102°	46,4	53,1
128°	71,5	78,6
154°	90	94,1
Доля материала катода, осаждаемого на поверхность полусферы радиусом 85 мм	18,5	9,5

Из табл. 1 следует, что основная количество катодного материала для дуги с алюминиевым и молибденовым катодами, генерируется в пределах телесного угла ~ 150°.

Для алюминия поток частиц несколько уже, чем для молибдена. Причиной этого явления является высокое содержание в молибденовой плазме многозарядных ионов, обладающих высокой угловой расходимостью [5].

На внутреннюю поверхность полусферы радиусом 85 мм, расположенную над плоскостью катода (получено расчетным путем из рис. 2 и 3) осаждается 18,5 % испаренного материала молибденового и 9,5 % алюминиевого катода. Эти цифры являются значениями коэффициентов конденсации для данных экспериментальных условий. Низкие значения коэффициентов конденсации связаны с высокой энергией ионов в плазме вакуумной дуги, а также с наличием отрицательного потенциала на поверхности образцов многозарядных ионов материала катода в данном типе разряда. Основная часть потока капле, генерируемых дугой как с алюминиевым, так и с молибденовым катодами движется в пределах угла 30 ÷ 70° к оси разряда (рис. 2 и 3).

Относительное содержание капле в конденсируемом потоке частиц для различных значений углов к оси разряда приведено в табл. 2.

Таблица 2

Относительное содержание капель в конденсируемом потоке частиц при различных углах к оси разряда

Угол к оси разряда	Относительное содержание капель в конденсате, %	
	Mo	Al
0°	0,41	11,8
13°	0,15	12
26°	0,2	25,8
39°	0,76	33,9
52°	0,89	22,2
65°	0,82	22,4
78°	0,92	48,6
Доля материала катода, генерируемого в виде капель	0,83	35,6

Зависимость потока атомарных частиц алюминия от угловой координаты имеет максимум, совпадающий с максимумом аналогичной кривой для потока капель (рис. 2). Данное обстоятельство может быть связано либо с распылением конденсата ионами, имеющими максимум в приосевой зоне разряда, либо с тем, что некоторая часть ато-марных частиц образуется за счет испарения капель, движущихся под малыми углами к плоскости катода и нагреваемых ионами плазмы.

Расчеты изменения размера капель за счет испарения для дуги с титановым катодом проведены в работе [5]. Теоретическая модель, используемая в данной работе, учитывает столкновения капель с ионами и электронами, а также потери энергии за счет излучения и испарения. Выражение для расчета изменения радиуса капли  $R$  в зависимости от расстояния, пройденного ей от поверхности катода до подложки  $r$ , учитывающее вышеперечисленные факторы, имеет следующий вид:

$$\frac{dR}{dr} = \frac{3}{Cv(T)R(r) \cdot \rho \cdot v_0} \times \sqrt{\frac{m_a}{2\pi \cdot k \cdot T(r)} - \alpha \cdot \sigma \cdot T^4(r)}. \quad (2)$$

Здесь  $C_v$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность материала капли;  $v_0$  – начальная скорость капли,  $\phi_f$  – плавающий потенциал;  $\phi_k$  – средняя кинетическая энергия ионов,  $\phi_v$  – энергия конденсации,  $\phi_i$  – потенциал ионизации ионов плазмы,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_e$  – температура электронов,  $J_e$  – плотность электронного тока,  $a$  – энтальпия парообразования,  $p_0$  – давление насыщенного пара,  $m_a$  – масса атома материала катода,  $T$  – температура капли,  $\alpha$  – излучательная способность,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Для стационарной дуги с алюминиевым катодом в наших экспериментальных условиях ( $kT_e = kT_i = 2$  эВ, скорость ионов  $10^4$  м·с<sup>-1</sup>, расстояние от катода до подложки 85 мм, начальная скорость капли 4 м·с<sup>-1</sup> [6], плавающий потенциал – 12 В, энтальпия парообразования  $a = 10,6 \cdot 10^6$  Дж·кг<sup>-1</sup>) выражение (2) записывается в следующем виде:

$$\frac{dR}{dr} = 1,136 \cdot 10^{-10} \cdot J_e - 6,903 \cdot 10^{-6} \cdot p_0 \cdot T^{-0,5}. \quad (3)$$

Как следует из проведенных расчетов (рис. 4), при пролете участка от катода до поверхности конденсации радиусы капель уменьшаются.

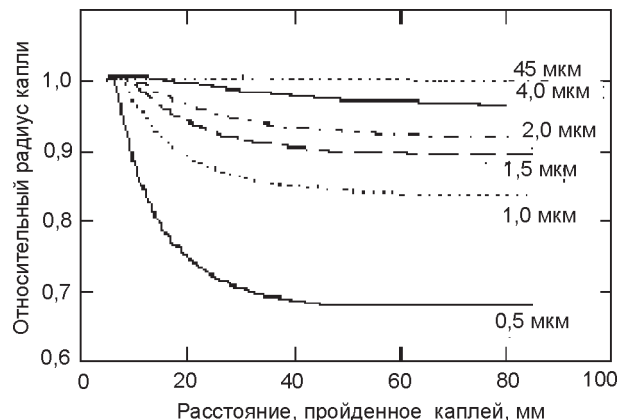


Рис. 4. Изменение относительного размера капель в зависимости от пройденного расстояния для капель с различными начальными радиусами.

При этом радиус малых капель уменьшается на 25 %, что соответствует 40 % уменьшения объема. Однако, крупные капли радиусом более 10 мкм теряют всего несколько процентов своего объема (рис. 5).

Оценки, проведенные с учетом того обстоятельства, что основной расход катодного материала для дуги с алюминиевым катодом происходит за счет крупных капель (рис. 2) показывают, что суммарные потери объема капель покидающих катод при их движении до подложки не превышают 5 %.

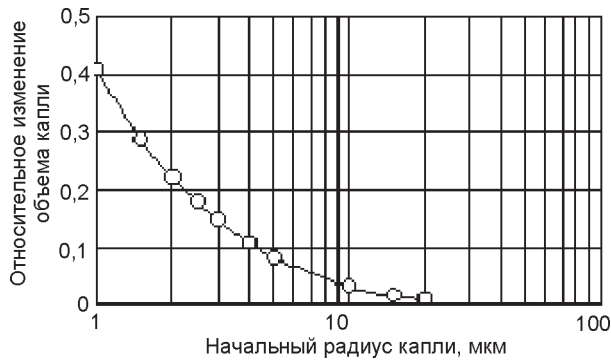


Рис. 5. Относительное изменение объема капель в зависимости от начального радиуса.

Таким образом, испарение капель не может обеспечить наблюдаемое экспериментально 15% повышение величины потоков атомарных частиц алюминия, наблюдаемое в области максимумов капельных потоков. Следовательно, небольшой “провал” на графике зависимости интенсивности потоков атомарных частиц алюминия от угловой координаты, наблюдаемый в области малых углов к оси системы, связан с распылением конденсата ионами, максимум содержания которых находится в данной области разряда [4].

Небольшое повышение потока капель в приосевой области разряда, наблюдаемое для дуги с молибденовым катодом, может быть связано с увлечением части капель малых размеров ионами, имеющими максимальную концентрацию вдоль оси разряда.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, проведенные исследования указывают на то, что содержание и размеры капель в потоках частиц, генерируемых вакуумной дугой, резко отличается для легкоплавких и туго-

плавких металлов. При анализе пространственных распределений потоков частиц в объеме следует учитывать характер взаимодействия исследуемых частиц с поверхностью конденсации. Взаимодействие ионов с каплями оказывает заметное влияние на характер угловых распределений частиц в объеме вакуумно-дугового разряда.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Аксенов И.И., Коновалов И.И. и др. Исследование капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги // ЖТФ. – 1984. – Т. 54, № 8. – С. 1530 - 1533.
2. Аксенов И.И., Кудрявцева Е.Е. и др. Исследование влияния давления газа в объеме на параметры капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги//Препринт ХФТИ 84-18, -М.: ЦНИИатоминформ, 1984. – 17 с.
3. Толоч В.Т., Падалка В.Г. Методы плазменной технологии высоких энергий// Атомная энергия.– 1978. – Т. 44. – С. 476 - 479.
4. Аксенов И.И., Коновалов И.И. и др. Об эрозии катода дуги низкого давления//ТВТ.– 1988. – Т. 26, № 3. – С. 441 - 444.
5. Хороших В.М., Аксенов И.И. и др. О структуре плазменных струй, генерируемых стационарной вакуумной дугой // ЖТФ. – 1988. – Т. 58, № 6. – С. 1220 - 1221.
6. Zhongyuan Cheng, Min Wang, Jiyan Zou. Thermal analysis of macroparticles during vacuum arc deposition of TiN // Surface & Coating Technology. – Vol. 92. – 1997. – P. 50 - 55.
7. Кудрявцева Е.Е., Осипов В.А., Хороших В.М. Измерение скорости капель, генерируемых катодным пятном вакуумной дуги // Ионно-плазменные установки для технологических целей. – Харьков: Изд. ХАИ, 1988. – С. 11 - 16.

**ПРОСТОРОВИЙ РОЗПОДІЛ ПОТОКІВ ЧАСТИНОК У СТАЦІОНАРНОМУ ДУГОВОМУ РОЗРЯДІ НИЗЬКОГО ТИСКУ**

В.М. Хороших, М.Г. Холомеєв

Робота присвячена вивченню потоків частинок, генеруємих стаціонарними вакуумними дугами, які горять на катодах з алюмінію і молибдену, що різко відрізняються за температурами плавлення. Показано, що зміст крапель у потоках частинок, генерируємих вакуумною дугою, істотно відрізняється для тугоплавкого та легкоплавкого металів Так, для алюмінію зміст краплі в загальному потоці конденсуємих частнок досягає 35,6%, у той час як для молибдену частка краплинної фази не перевищує 1%. Помітний вплив на характер кутових розподілів краплі робить їхня взаємодія з іонами плазми. При аналізі кутових розподілів часток варто враховувати їхню взаємодія з поверхнею конденсації.

**SPATIAL PARTICLES STREAMS DISTRIBUTION IN STATIONARY ARC DISCHARGE OF LOW PRESSURE**

V.M. Khoroshikh, M.G. Kholomeyev

Work sacred to study of particles streams, generated by stationary vacuum arcs, burning on aluminium and molybdenum cathodes, sharp discrepant on melting temperatures. Shown, that maintenance drops in particles streams, generated by vacuum arc, essentielle differs for refractory and fusible metals. So, for aluminium maintenance drops in general stream of condensed particles reaches 35,6%, in then how for molybdenum part of drop phase does not exceed 1%. Noticeable influence on nature of angle distributions drops renders their interaction with plasma ions refractory. Attached to analysis of angle particles distributions follows to take into account their interaction with condensation surface.