

О предельном токе разряда электродугового плазмотрона постоянного тока с трубчатыми электродами

© В.М. Кулыгин, А.В. Переславцев, С.С. Тресвятский

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
e-mail: Kulygin_VM@nrcki.ru

(Поступило в Редакцию 24 июня 2017 г.)

Имеющиеся в литературе сведения о наличии предельного тока на катодную вставку плазмотрона и связи его величины с диаметром этой вставки обсуждены на основе предположения о том, что это соответствие связано с достижением критической температуры поверхности вставки, при которой происходит резкое увеличение скорости испарения материала.

DOI: 10.21883/JTF.2018.03.45591.2404

Введение

Экспериментальные данные, получаемые при работе с плазмотронами, обычно носят интегральный характер, поэтому суждения о деталях механизма рабочего процесса можно делать лишь косвенно, привлекая модельные физические соображения и сопоставляя полученные результаты с результатами измерений. В настоящей работе мы воспользуемся таким подходом для анализа прикатодных процессов в электродуговом плазмотроне постоянного тока.

В работе [1] устанавливается соответствие между диаметром используемой катодной вставки и предельным током дуги плазмотрона. В табл. 1 приведены соответствующие цифровые данные. Превышение указанных предельных значений ведет к резкому уменьшению срока службы катодной вставки

Имея в виду этот результат, обсудим возможный механизм, обуславливающий существование такого порога. Ранее [2] было установлено, что скорость испарения гафниевой вставки, определяющая ресурс ее работы, существенно меньше скорости испарения чистого гафния в вакуум. Было сделано предположение о возможности влияния на замедление процесса испарения материала вставки двух факторов:

- наличия вблизи ее поверхности давления рабочего газа,
- наличия на этой поверхности пленки оксида и нитрида гафния.

Пороговый характер обсуждаемого явления позволяет предположить, что упомянутый предел определяется достижением некоторого критического значения температуры поверхности, при котором происходит резкое увеличение скорости испарения материала катодной

вставки. Логично поэтому принять в качестве рабочей гипотезы определяющее действие второго из названных факторов ограничения испарения: наличием оксидно-нитридной корки на поверхности расплавленного слоя материала, а критической температурой счесть температуру плавления этой корки (наиболее тугоплавкой — нитридной, 3063 К).

Рабочая модель и результаты расчета

Прикатодную область дуги плазмотрона можно условно разделить на три части.

- Поверхность катодной вставки, нагрев которой производится потоком падающих (и рекомбинирующих) ионов и излучением из дуговой плазмы, а отвод тепла в основном эмиссией электронов и теплопроводностью, так как испарение материала и тепловое излучение дают незначительный вклад. (В азоте воздуха при атмосферном давлении потери на излучение составляют один-несколько процентов от вкладываемой мощности.)
- Прикатодный слой, примыкающий непосредственно к катоду; в нем сильное электрическое поле ускоряет электроны, эмитированные катодом, и ионы, падающие на катод. Его толщина должна значительно превышать дебаевский радиус плазмы предслоя и быть меньше пробега электронов и ионов до столкновения с атомами газа.
- Предслоя — переходная часть дугового столба, в которой происходит торможение плазменных электронов и предускорение ионов. Толщина этой части прикатодной области определяется длиной пробега катодного электрона до термализации за счет столкновений с молекулами (атомами) газа.

Прикатодный слой можно рассматривать как плоский диод, причем, хотя там происходит ускорение и ионов и электронов (в противоположных направлениях), объемный заряд в нем определяется ионами из-за их значительно большей массы. Поэтому, пренебрегая вкладом электронов, мы можем использовать закон 3/2

Таблица 1.

Диаметр вставки, см	0.16	0.2	0.25	0.30
Предельный ток дуги, А	80	200	300	400

для определения плотности ионного тока, стабильно ускоряемого в слое:

$$j_i = \frac{5.4 \cdot 10^{-8} \cdot U^3/2}{\sqrt{\mu_i} \cdot d^2}. \quad (1)$$

Здесь j_i — плотность ионного тока, А/см²; U — напряжение на слое, В; d — толщина слоя, см; μ_i — масса иона в отношении к протонной массе.

Такая плотность ионного тока должна обеспечиваться поступлением на границу слоя со стороны плазмы предслоя потока ионов со скоростью, определяемой температурой этой слабоионизованной плазмы, которая из-за высокой частоты столкновений с газовыми атомами практически одинакова для всех компонентов и равна температуре газа [3]:

$$j_i = 0.96 \cdot 10^{-13} \cdot n_i \sqrt{\frac{2 \cdot T_p}{\mu_i}}, \quad (2)$$

где n_i — концентрация ионов в предслое, см⁻³; $T_p = \frac{T_g}{1.16 \cdot 10^4}$ — температура плазмы, eV; T_g — температура газа, К; μ_i — массовое число иона. Размер дебаевского радиуса оценивается по формуле

$$\lambda_D = 7.43 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{\frac{T_p}{n_e}}, \quad \text{см} \quad (3)$$

Концентрация электронов $n_e = n_i$ — из условия квазинейтральности плазмы, так как ионы при интересующих нас температурах будут однозарядными. Ионизация в разрядном столбе происходит термическим путем независимо от того, каким путем энергия в него вкладывается, поэтому плотность ионов в предслое можно оценить с помощью формулы Саха

$$n_i \approx \sqrt{n_a \cdot 3 \cdot 10^{21} \cdot T_g^{1.5} \cdot \exp\left(-\frac{11600 \cdot \Phi_N}{T_g}\right)}, \quad \text{см}^{-3}, \quad (4)$$

где $\Phi_N = 14.5 \text{ eV}$ — энергия ионизации азота, n_a — концентрация атомов азота. Дополним набор формул (1)–(4) выражением для оценки длины свободного пробега для атомов (ионов) азота

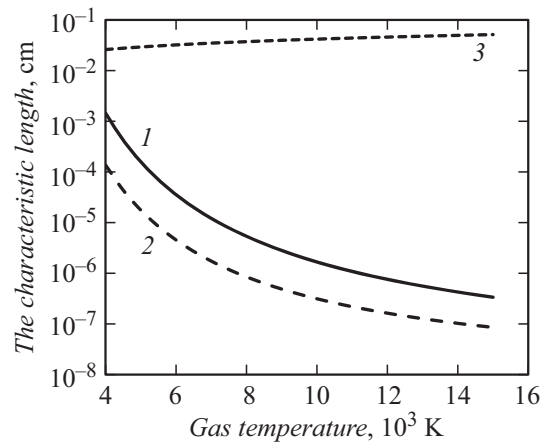
$$\lambda_{free} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot n_a \cdot \pi \cdot a_N^2 \cdot \left(1 + \frac{C_N}{T_g}\right)}, \quad \text{см}, \quad (5)$$

где a_N — радиус атома азота, $C_N \approx 120$ — поправочная постоянная для азота. После чего, определив плотность потока рабочего газа в канале плазматрона

$$q_g = \frac{Q_g}{S_c}, \quad \text{г/(с} \cdot \text{см}^2), \quad (6)$$

где Q_g — расход рабочего газа в единицу времени, S_c — площадь сечения канала, и тепловую скорость газа в канале

$$v_g = 9.28 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{T_g}{\mu_N}}, \quad \text{см/с}, \quad (7)$$



Зависимость характерных размеров: 1 — ширина слоя в соответствии с „законом 3/2“, 2 — радиус Дебая, 3 — длина пробега иона в газе от температуры газа в предслое. Оценка проведена для удельного расхода воздуха (азота) $q_g \approx 1 \text{ г/(см}^2 \cdot \text{с)}$ в плазматроне ЭДП-200 [2].

оценим пролетную плотность атомов газа

$$n_a = \frac{q_g}{v_g \cdot m_N}, \quad \text{см}^{-3}, \quad (8)$$

где m_N — масса атома азота, г.

Затем, приняв напряжение на прикатодном слое равным 10 В и варьируя температуру газа, оценим с помощью выражений (1)–(5) соотношение между тремя интересующими нас характерными размерами. Результат представлен на рисунке, из которого видно, что требуемое соотношение между шириной прикатодного слоя, дебаевским радиусом и длиной свободного пробега иона до столкновения с атомом газа выполнено в интересующем нас диапазоне температур газа в предслое.

Далее считаем, что резкое увеличение испарения материала катодной вставки наступает при достижении ее поверхности температуры плавления нитридной корки: $T_c = 3060 \text{ К}$.

Плотность тока эмиссии электронов при этой температуре с учетом эффекта Шоттки выражается следующей формулой [2]:

$$j_{ec} = A \cdot T_c^2 \cdot \exp\left[-\frac{\Phi_{ex} - e^{1.5} \cdot \sqrt{E_c/300 \cdot 6.24 \cdot 10^{11}}}{T_c/11600}\right], \quad (9)$$

$A(\text{А/К}^2) = 129.4$, Φ_{ex} (eV) — работа выхода электронов из катода, для гафния: $\Phi_{ex} = 3.53 \text{ eV}$, e — заряд электрона (ед. СГСЭ), $E_c = U/d$ — напряженность электрического поля у катода (В/см).

Дополнив формулы (1), (2), (4), (6)–(9) выражением для тока разряда $I_d = (j_{ec} + j_i) \cdot S_c$, где $S_c = \pi \cdot d^2/4$ — площадь катодной вставки, и соотношением $\eta = j_i/(j_{ec} + j_i)$ — доля ионного тока в токе разряда, и используя в качестве варьируемых параметров U , T_g и q_g , получим систему, связывающую предельный ток разряда с диаметром вставки и значениями параметров,

Таблица 2.

Диаметр вставки, d, см	0.16	0.2	0.25	0.3
Предельный ток дуги, I_{cr} , А	80.85	198.50	306.32	402.88
Катодное падение потенциала, U_k , В	25	7.6	6.7	5.61
Толщина катодного слоя, λ_k , 10^{-5} см	8.667	1.462	1.109	1.051
Концентрация атомов газа, 10^{16} см $^{-3}$	9.611	13.14	13.14	13.25
Температура газа, К	10300	12400	12400	12200
Доля ионного тока	0.06	0.224	0.227	0.219

сопутствующих анонсированной критической эффективной температуре эмиссионной поверхности катодной вставки. Результаты решения этой системы представлены в табл. 2.

Обсуждение результатов и выводы

Сравнение значений диаметра вставки и соответствующих ему расчетных значений критического тока с соответствующими данными табл. 1 дает основание считать, что принятая для расчета модель достаточно хорошо описывает наблюдаемое экспериментально явление резкой потери ресурсной способности вставки. Результаты косвенно подтверждают объяснение понижения скорости испарения материала гафниевой вставки в азотно-кислородной среде образованием нитридной/оксидной корки на поверхности вставки.

Список литературы

- [1] Аньшаков А.С., Бутова М.Н. и др. // Тр. V Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1972. Т. 2. С. 48–52.
- [2] Гнеденко В.Г., Иванов А.А., Переславцев А.В., Тресвятский С.С. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2006. № 5. С. 75–79.