

РАСЧЕТ ПЛАЗМОТРОНОВ С СИЛЬНОТОЧНЫМ КАТОДОМ ДЛЯ НАГРЕВА ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

В. Л. ДЗЮБА, д-р техн. наук, К. А. КОРСУНОВ, канд. техн. наук (Восточнукр. нац. ун-т, г. Луганск)

Представлена инженерная методика расчета электрических, тепловых и ресурсных характеристик электродуговых плазмотронов с высокоресурсным сильноточным катодом для нагрева дисперсных частиц.

Ключевые слова: методика расчета, плазмотрон, критерии подобия, характеристика, сильноточный катод, дисперсные частицы

Выпускаемые промышленностью плазмотроны для напыления обладают существенными недостатками, а именно: недостаточная протяженность зоны взаимодействия плазменной струи с нагреваемыми частицами, низкие КПД и производительность напыления, а также небольшой ресурс работы катода. Учитывая потребности металлургического и химического производств в мощных плазмотронах для нанесения защитных покрытий нами был создан плазмотрон с высокоресурсным катодом (рис. 1), который прошел промышленное испытание при нанесении защитных покрытий на огнеупорные поверхности сталеразливочных ковшей емкостью 300 т. Он состоит из сильноточного катодного узла, основного 4 анода и реакторной камеры 5.

Техническая характеристика плазмотрона

Мощность, кВт	560
Ток дуги, А	800
Расход рабочего газа (воздуха), кг/с	0,061
Расход дополнительного газа (аргона), кг/с	$(2,0...2,4) \cdot 10^{-5}$
Тепловой КПД	0,75...0,80
Производительность нагрева и напыления порошков (диоксида циркония, вольфрама, молибдена, шамотных, магнетитовых и др.), кг/ч	120...150
Ресурс работы, ч	300...500
Эрозия катода, кг/Кл	$1 \cdot 10^{-9}...1 \cdot 10^{-10}$

Сильноточный катод работает по принципу плазменного катода и представляет собой самостоятельный плазмотрон, состоящий из дополнительного анода 1, межэлектродных вставок (МЭВ) 2 и цилиндрического медного катода 3. Через вихревые кольца 6 сильноточного катода подается аргон, а в пространство между катодным узлом и основным анодом 4 — рабочий газ (воздух). В процессе работы плазмотрона основная воздушная дуга привязывается к дополнительной аргоновой. Таким образом, в разрядном канале плазмотрона с сильноточным катодом (рис. 2) положительный столб дуги имеет два характерных участка — ламинарный (в сильноточном катоде при токе до 250 А) и турбулентный (в канале основного анода при токе свыше 250 А). Поэтому расчет электрической дуги в канале такого плазмотрона сводится к расчету ее ламинарного и турбулентного участков.

В разрядном канале плазмотрона происходят чрезвычайно разнообразные и сложные явления. Однако исчерпывающие сведения о них отсутствуют. Поэтому основная роль при исследовании дуги и изучении характеристик плазмотронов отводится экспериментальным работам с применением методов теории подобия и размерности.

В работах [1, 2] на основе параметров, определяющих процесс горения дуги, составлены безразмерные комплексы — критерии, с помощью которых можно обобщить экспериментальные результаты и получить эмпирические формулы, удобные для расчетов. Так, например, характеристики дугового разряда в плазмотроне описываются безразмерными величинами Π , которые являются функциями критериев подобия:

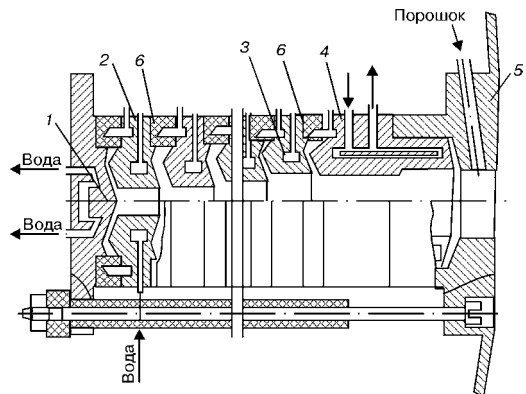


Рис. 1. Плазмотрон для нагрева дисперсных частиц (см. обозначения в тексте)

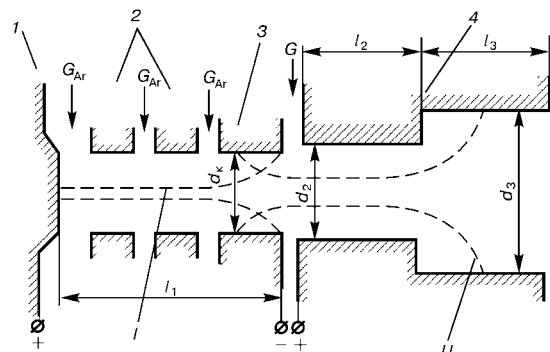


Рис. 2. Схема плазмотрона с сильноточным катодом: I, II — соответственно ламинарный и турбулентный участки дуги; 1 — дополнительный анод; 2 — межэлектродные секции; 3 — катод; 4 — основной анод (остальные обозначения см. в тексте)

$$\Pi = f\left(\frac{Ge}{Im}, Re, Kn, K'_1, K'_2, K'_3, K, K_n\right) \quad (1)$$

где G — расход газа; e — элементарный электрический заряд; I — ток; m — масса частицы; Re, Kn — числа соответственно Рейнольдса и Кнудсена; K'_1, K'_2, K'_3, K, K_n — критерии геометрического подобия.

Здесь значения Π могут быть локальными или интегральными безразмерными характеристиками дуги. Если дуга в плазмотронах горит в газе одного и того же химического состава, и его температура на входе в разрядный канал постоянна, то уравнение (1) можно упростить, отбросив размерные постоянные, и представить в виде [1]:

$$\Pi = A \left(\frac{I}{G}\right)^\alpha \left(\frac{G}{d}\right)^\beta (pd)^\gamma, \quad (2)$$

где d — диаметр разрядного канала; p — давление плазменной струи на срезе сопла плазмотрона; A, α, β, γ — постоянные размерные величины, определяемые при обработке данных исследования.

Турбулентный участок. Напряжение на дуге в плазмотронах со ступенчатым анодом может быть аппроксимировано следующим уравнением в диапазоне изменений параметров $I/d_2 = (0,5...4,0) \cdot 10^4$ А/м; $l_2/d_2 = 5,25...14,50$; $l_3/d_3 = 2,6...4,4$; $G/d_2 = 0,45...6,50$ кг/(с·м); $p(d_2 + d_3) = (5,8...18,3) \cdot 10^3$ Па·м [3]:

$$U_a = 4,55 \left(1 + 4,6 \cdot 10^{-5} \frac{I}{d_2 + d_3}\right) \left(\frac{G}{d_2 + d_3}\right)^{0,22} \times \left(\frac{l_2}{d_2} + \frac{l_3}{d_3}\right)^{0,95} [p(d_2 + d_3)]^{0,23}, \quad (3)$$

где d_2, d_3 и l_2, l_3 — соответственно диаметры и длина разрядного канала до и после уступа.

Для дуги мощных плазмотронов в диапазоне параметров $I = 300...1000$ А; $G = (24...15) \cdot 10^{-3}$ кг/с; $d_2 = (2...4) \cdot 10^{-2}$ м в работе [2] была предложена формула

$$\frac{U_a d_2^{0,77}}{G^{0,78}} = 4,55 \cdot 10^{-2} \frac{I}{G}. \quad (4)$$

Оценка теплового КПД (η) этих плазмотронов возможна по формуле

$$\frac{1-\eta}{\eta} = 5,85 \cdot 10^{-5} \left(\frac{I^2}{Gd_2}\right)^{0,27} \left(\frac{G}{d_2}\right)^{-0,27} (pd_2)^{0,3} \left(\frac{l_2}{d_2} + \frac{l_3}{d_3}\right)^{0,5}. \quad (5)$$

Ламинарный участок. Для определения напряжения дуги сильноточного катода были экспериментально определены потенциалы секций. Обобщенная зависимость напряжения и тока дуги U_c от I, d_k и z представлена на рис. 3, где по оси ординат отложена величина $\Psi = \frac{U_c}{z} - \frac{3}{d_k^{1,43}}$, а

по абсцисс — I/d_k . Как видно из рисунка, экспериментальные точки графика аппроксимируются прямой, возрастающей с увеличением I/d_k . Экспериментальные данные в диапазоне $I = 100...575$ А, $d_k = (5,5...9,5) \cdot 10^{-3}$ м, $z = (10...50) \cdot 10^{-3}$ м удовлетворительно с погрешностью 11 % описываются найденной нами формулой

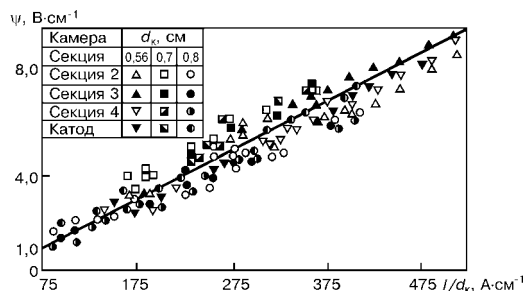


Рис. 3. Обобщенная зависимость Ψ от I/d_k

$$\frac{U_c}{z} - \frac{M_1}{d_k^{1,43}} = M_2 \frac{I}{d_k}, \quad (6)$$

где $M_1 = 3$ В·см^{0,43}, $M_2 = 0,019$ В·А⁻¹.

По формуле (6) в указанном диапазоне значений d_k, I, z можно рассчитать потенциалы секций сильноточного катода. Напряжение катодного участка сильноточного катода определяется как

$$U_{c,k} = \int_L^{l_1} Edz + (U_k + U_{д.а}), \quad (7)$$

где l_1 — длина канала сильноточного катода; L' — протяженность области анодного падения напряжения; E — напряженность электрического поля в канале сильноточного катода; $U_k, U_{д.а}$ — соответственно катодное и дополнительное анодное падение потенциала.

Чтобы воспользоваться (7), необходимо найти зависимость E от величин d_k и z . Анализ данных экспериментов показал, что зависимостью E от z можно пренебречь. Это говорит о том, что в канале сильноточного катода происходит быстрое развитие дуги и ее свойства в основном определяются предельными характеристиками. Для расчета напряженности электрического поля E в канале сильноточного катода получена формула

$$E = M_2 \frac{I}{d_k} + \frac{M_1}{d_k^{1,43}} [\text{В/см}]. \quad (8)$$

Она действительна для того же диапазона значений d_k, I, z , что и в (6).

На рис. 4 приведен график потерь энергии через дополнительный анод $Q_{д.а}$, секции Q_c и катод Q_k сильноточного катодного узла для трех значений d_k , выполненный по зависимости $Q = f(I/d_k)$. Экспериментальные данные описываются формулами (9) и (10) с погрешностью не более 14 %. Тепловые потери через катод можно определить с помощью формулы, аналогичной используемой для Q_c

$$Q_{д.а} = N_1 \left(\frac{I}{d_k^{1,95}}\right) [\text{Вт}]; \quad (9)$$

$$Q_k = Q_c = N_2 z^{0,15} \left(\frac{I}{d_k^{1,95}}\right) [\text{Вт}], \quad (10)$$

где $N_1 = 1,09$ В·см^{1,95}; $N_2 = 0,3$ В·А^{-0,57}·см^{1,42}; $z = 0,5...5,5$ см.

Расчет рабочих параметров и геометрии прочной части плазмотрона с сильноточным катодом рассмотрим в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2. Среднемассовая энтальпия газа на выходе

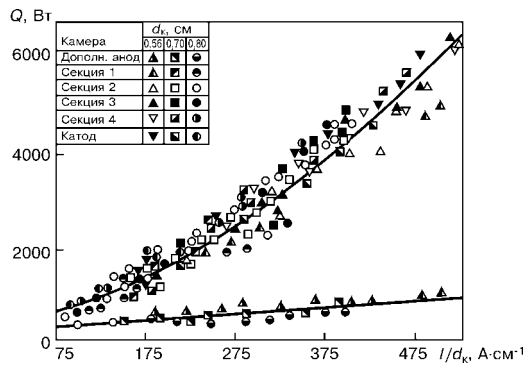


Рис. 4. Обобщенные тепловые потери через сильноточный катод из плазматрона связана с величинами U_d , η и T уравнением сохранения энергии:

$$U_d I \eta = G(\bar{i}_b - \bar{i}_{bx}), \quad (11)$$

где \bar{i}_b , \bar{i}_{bx} — энтальпия газа соответственно на выходе и входе плазматрона, определяемая по таблицам термодинамических свойств веществ.

Наиболее простая методика расчета основана на одномерном приближении. В этом случае расход газа определяется как

$$G = \frac{\pi d_2^2}{4} \rho_b v_b, \quad (12)$$

где ρ_b — плотность плазменной струи; v_b — скорость ее истечения из сопла.

Давление и плотность плазменной струи связаны с температурой уравнением состояния

$$p_b = \rho_b R c_b. \quad (13)$$

Значения величин G , T_b и p_b определяются технологическим применением плазматрона. По заданным значениям T_b и p_b из таблиц термодинамических функций находим Re и с помощью (13) определяем ρ_b . Оптимальные значения v_b зависят от назначения плазматронов. Для промышленных плазматронов значения v_b должны быть меньше скорости звука v_3 , в противном случае значительная часть подводимой к газу энергии затрачивается на ускорение потока и требуется создать большой перепад давления на входе и выходе плазматрона, что весьма нежелательно. Исходя из этих соображений, можно рекомендовать $v_b = (0,3... 0,8)v_3$. Если плазматрон одновременно служит и реактором, то при выборе значений v_b необходимо учесть оптимальное время пребывания реагентов в зоне реакции. После выбора значений v_b из (12) определяются значения диаметра разрядного канала d_2 , которые для наиболее распространенных плазматронов составляют 0,001... 0,080 м. Малые (приблизительно 0,001 м) значения d_2 имеют место у плазматронов небольшой мощности, применяемых для микросварки, напыления и пр., а большие (около 0,05 м) — у плазматронов мощностью более 500 кВт. Для расчета d_2 рекомендуют использовать зависимость [1]

Engineering method of calculation of electrical, heat and service characteristics of the electric arc plasmatrons with high-performance high-current cathode for heating dispersed particles is presented.

$$d_2 = K_2 d_{кр},$$

где $K_2 = 1,2... 2,0$; $d_{кр}$ — критический диаметр разрядного канала, равный

$$d_{кр} = 2 [G / (\pi \rho_b v_b)]^{0,5}.$$

В случае работы на воздухе в диапазоне давления 0,1... 0,5 МПа при среднемассовой температуре плазменной струи 3000... 4000 К длину разрядного канала l_2 целесообразно принимать приблизительно $(5,5... 14,5)d_2$.

Рекомендуется следующая зависимость между внутренним диаметром и длиной электрода за уступом:

$$l_3 = (2,6... 8,0)d_3, \quad (14)$$

где отношение внутреннего диаметра электрода за уступом к диаметру уступа составляет

$$d_3 = (1,5... 1,7)d_2. \quad (15)$$

Остальные неизвестные I , U_d , η определяются исходя из технологических требований и выбранной схемы плазматрона с помощью уравнений (3)–(5).

Расчет геометрии сильноточного катода рекомендуется выполнить по полученным нами экспериментальным зависимостям с учетом формул (6)–(10). Максимальный диаметр разрядного канала сильноточного катода, обеспечивающий диффузную привязку дуги, определяется соотношением

$$d_k \leq c_2 d_2 G^{-0,05}, \quad (16)$$

где $c_2 = 0,42 \text{ кг}^{0,05} \cdot \text{с}^{-0,05}$. Как показали результаты экспериментов, колебания значений диаметра канала вдоль оси z в пределах d_k не влияют на диффузную привязку дуги к катоду.

Длина разрядного канала сильноточного катода l_1 определяется количеством и размерами его промежуточных секций, длиной канала катода и геометрией дополнительного анода, которые зависят от значений d_k :

$$l_1 = (2... 10)d_k. \quad (17)$$

Экспериментальные исследования сильноточного катода в диапазоне изменения тока от 100 до 500 А показали, что расход газа (аргона) не превышает 0,1 % расхода основного рабочего газа и составляет $(13... 26) \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$.

Таким образом, с помощью приведенной выше методики можно рассчитать геометрические, электрические и тепловые характеристики плазматрона для нагрева дисперсных частиц в широком диапазоне изменения его параметров.

1. Жуков М. Ф., Коротев А. С., Урюков В. А. Прикладная динамика термической плазмы. — Новосибирск: Наука, 1975. — 297 с.
2. Дзюба В. Л., Даутов Г. Ю., Абдуллин И. Ш. Электродуговые и высокочастотные плазматроны в химико-металлургических процессах. — Киев: Выща шк., 1991. — 170 с.

Поступила в редакцию 04.07.2001