

УДК 537.523.5

А.В. ЕРШОВ

*Запорожский Национальный технический университет, Украина***ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ДИФFUЗНОГО РАЗРЯДА В ПРИАНОДНОЙ ЗОНЕ**

Получено теоретическое распределение потенциала в прианодной зоне аргоновой дуги. Обнаружена область контрагирования разряда, в которой напряжённость электрического поля уменьшается при возрастании плотности тока. Разработан интегральный метод оценки устойчивости диффузного разряда на аноде.

диффузный разряд, эрозия, анодное падение потенциала, термическая неравновесность, ионизационная неравновесность

Введение

Проблема реализации устойчивого диффузного разряда на электродах технологических устройств имеет значительный научный и практический интерес. Организация такого разряда позволит снизить тепловую нагрузку и эрозию поверхности электродов, повысить стабильность параметров электродуговых устройств и улучшить качество процессов сварки, наплавки и плазменного напыления.

В плазменных аппаратах авиационно-космической техники и технологии, таких, как плазменные ускорители и магнитогазодинамические генераторы, электромагнитные ударные трубы и технологические плазмотроны, наблюдаются режимы разряда с электродными пятнами и значительной эрозией. При реализации диффузного разряда возможно не только значительное снижение эрозии анода, но и уменьшение потерь энергии, связанных с неоднородностью магнитодинамического взаимодействия в электродных пятнах.

Существующие подходы для определения условий перехода диффузного разряда в контрагированный связаны с наличием минимума электродного падения потенциала в зависимости от плотности тока [1, 2].

Однако сложности теоретического анализа и недостаточная точность экспериментальных исследований сдерживают получение практических рекомендаций. Сказанное относится прежде всего к изу-

чению прианодной зоны разряда, где изменение потенциала имеет не скачкообразный, а распределённый характер. Имеющиеся оценки, по-видимому, дают завышенные значения плотности тока для условий перехода к диффузному разряду, что видно из сравнения результатов теоретической [2] и экспериментальной [3] работ. Теоретический минимум анодного падения получен при плотности тока $8 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$. В экспериментах [3] наблюдается диффузный разряд при плотности тока $3,3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, которая значительно отличается от теоретического прогноза. Можно предположить, что существующий метод теоретической оценки некорректен и требует дальнейшей разработки.

Идея улучшения теоретического метода заключается в учёте постоянства температуры столба плазмы при возможном изменении плотности тока в переходной зоне.

Цель работы состоит в разработке теоретического метода прогнозирования условий диффузного разряда на аноде при условии постоянства температуры в столбе плазмы перед анодом.

1. Система уравнений переноса энергии и граничных условий

Современные представления о процессах в плазме канальной дуги требуют учёта явлений диффузии электронов, теплопроводности газа и его нагрева

разрядным током при учёте термической и ионизационной неравновесности.

Этим требованиям удовлетворяет следующая система уравнений [2, 4, 5]:

$$\frac{d}{dy} \left[-\lambda_e \frac{dT_e}{dy} - j_e \left(\frac{5kT_e}{2e} + u_i - \varphi \right) \right] = -W_e - U_n; \quad (1)$$

$$\frac{d}{dy} \left(-\lambda \frac{dT}{dy} \right) = W_e; \quad (2)$$

$$j_i = -eD_i \frac{dn_i}{dy} - \sigma_i \frac{d\varphi}{dy}; \quad (3)$$

$$j_e = eD_e \frac{dn_e}{dy} - \sigma_e \frac{d\varphi}{dy}; \quad (4)$$

$$j = j_e + j_i = \text{const}; \quad (5)$$

$$\frac{dj_i}{edy} + K_u n_e n_a - K_p n_i n_e^2 = 0; \quad (6)$$

$$W_e = 3k \frac{m_e}{M} n_e v_e (T_e - T), \quad (7)$$

где λ_e , λ и T_e , T - теплопроводность и температура соответственно электронов и атомов; u_i и φ - потенциалы ионизации атомов и плазмы; W_e - объёмная плотность передачи энергии тяжёлым частицам при упругих столкновениях; U_n - объёмное излучение плазмы; j , j_e и j_i - плотности разрядного, электронного и ионного токов; D_e , D_i и σ_e , σ_i - коэффициенты диффузии и электропроводности соответственно электронов и ионов. Концентрации ионов n_i и электронов n_e в температурном слое практически не отличаются друг от друга, поэтому в расчётах принималось $n_i = n_e$. Коэффициенты ионизации K_u и рекомбинации K_p из уравнения (6) связаны друг с другом в состоянии детального равновесия соотношением

$$K_u = K_p \frac{n_{eo}^2}{n_{ao}}, \quad (8)$$

где n_{eo} и n_{ao} - равновесные значения концентраций электронов и атомов. Плотность передачи энергии тяжёлым частицам определяется уравнением (7) и зависит от соотношения массы электрона m_e и массы иона или атома M , а также от частоты столкно-

вений электронов v_e .

При расчёте концентрации частиц используется уравнение Дальтона:

$$p = k[(n_a + n_i)T + n_e T_e]. \quad (9)$$

Дифференциальные уравнения (1) – (4), (6) представляют собой систему седьмого порядка. Поэтому для решения требуется задание семи граничных условий. По два условия задавалось для электронной и атомной температуры, два условия – для концентрации ионов, а также задавалось начало отсчёта потенциала. Интегрирование уравнений начиналось с внешней границы прианодной зоны при нулевом градиенте электронной температуры. При этом задавались следующие граничные условия на расстоянии $y = \delta$ толщины температурного слоя:

$$y = \delta: \frac{dT_e}{dy} = 0; T = K_T T_e; \quad (10)$$

$$n_e = 0,9n_{eo}; \varphi = 0.$$

На границе плазмы с кнудсеновским слоем при $y = l_e$ задавалась температура тяжёлых частиц, равная температуре анода, T_w , градиент концентрации ионов и тепловой поток, который уносится электронами через потенциальный барьер в кнудсеновском слое φ_0 :

$$y = l_e: T = T_w; \frac{dn_e}{dy} = \frac{n_e}{l_e}; \quad (11)$$

$$\lambda_e \frac{dT_e}{dy} = j_e (-\varphi_0 + 5kT_e/2e),$$

где

$$\varphi_0 = \frac{kT}{e} \ln \frac{en_e}{j} \sqrt{\frac{3kT_e}{m_e}}.$$

В условии (10) коэффициент $K_T < 1$ учитывает, что атомная температура ниже электронной на внешней границе прианодной зоны. Граничное условие для теплового потока электронов в (11) следует из уравнения энергии электронов (1), если пренебречь излучением и потерей энергии при столкновениях, что допустимо на длине свободного пробега. Однако изменение потенциала в кнудсеновском слое намного превосходит изменение потенциала на длине свободного пробега в плазме и по-

этому тепловой поток электронов на границе с анодом значительно больше, чем в прианодной зоне.

2. Распределение потенциала и контрагирование разряда

Численное решение системы уравнений получено для аргона при разных значениях плотности разрядного тока и при температуре анода $T_w = 2800$ К. Плотность тока оказывала заметное влияние на температуру электронов на внешней границе прианодной зоны, которая определялась из (1) при нулевом градиенте температуры из условия

$$\frac{j_e^2}{\sigma_e} = W_e + U_A. \quad (12)$$

При увеличении плотности тока от 10^6 до $1,6 \cdot 10^7$ А/м² температура электронов возрастала примерно от 10^4 до $1,3 \cdot 10^4$ К, что, как будет показано ниже, следует учитывать при оценке условий стабильности диффузного разряда. Полученное распределение потенциала имеет немонотонный характер. Как показано на рис. 1, в прианодной зоне существуют две области, отличающиеся знаком напряжённости электрического поля. Вблизи внешней

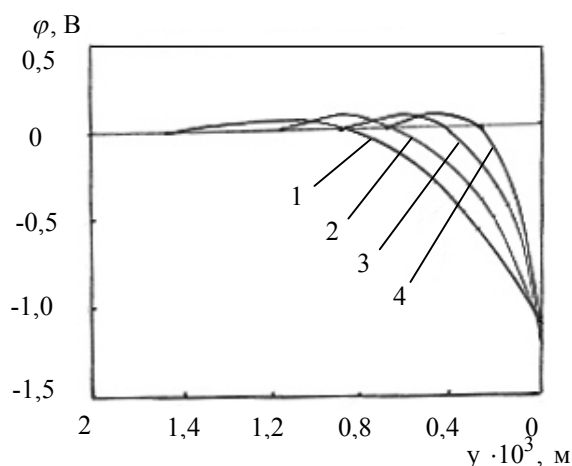


Рис. 1. Характер изменения потенциала в прианодной зоне при плотности тока: 1 – 10^6 ; 2 – $2 \cdot 10^6$; 3 – $4 \cdot 10^6$; 4 – $8 \cdot 10^6$ А/м²

границы зоны напряжённость поля положительна и возрастает с повышением плотности тока. Однако в пристеночной зоне напряжённость поля отрицательна и убывает с повышением плотности тока, что

служит причиной контрагирования разряда. Несмотря на локальный характер и противоречивость существующих тенденций, здесь возможна только интегральная оценка условий контрагирования разряда, которая ограничена допущением расчёта о постоянстве плотности тока в прианодной зоне. Будем предполагать, что небольшое изменение плотности тока возможно за пределами расчётной зоны при переходе к столбу дуги с неизменной температурой.

Для оценки дополнительного падения напряжения между прианодной зоной и столбом дуги можно использовать уравнение (1) при условии нулевых градиентов температуры и концентрации частиц на границах зоны перехода. При этом дополнительное падение напряжения определится разностью температур между внешней границей прианодной зоны $T_{e\delta}$ и столбом плазмы T_∞ :

$$\Delta U_A^\infty = \frac{5k}{2e} (T_{e\delta} - T_\infty). \quad (13)$$

Величина падения напряжения между столбом плазмы и поверхностью анода запишется следующим образом:

$$U_A^\infty = U_A + \Delta U_A^\infty = U_A + \frac{5k}{2e} (T_{e\delta} - T_\infty). \quad (14)$$

Сравнивая U_A^∞ с известным соотношением между анодным падением потенциала и вольтовым эквивалентом теплового потока [6]

$$U_A^T = U_A + \Phi + \frac{5k}{2e} (T_{e\delta} - T_w), \quad (15)$$

можно сделать вывод, что положение минимума зависимостей U_A^∞ и U_A^T от плотности тока при постоянных T_∞ и T_w совпадают. Таким образом, устойчивый диффузный разряд на аноде будет реализован, если плотность тока соответствует минимуму вольтова эквивалента теплового потока. Расчётные зависимости анодного падения потенциала и вольтова эквивалента теплового потока в анод представлены на рис. 2. Минимум вольтова эквивалента теплового потока соответствует плотности тока $j_{kp} = 3,5 \cdot 10^6$ А/м², что согласуется с экспериментами Шоека [3], в то время как минимальное значение

анодного падения соответствует плотности тока $8 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$.

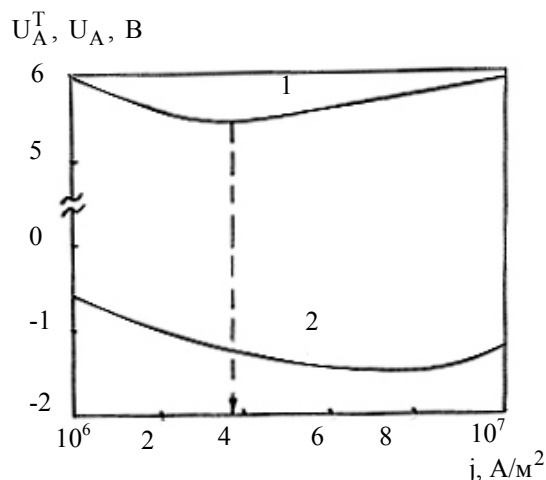


Рис. 2. Характер изменения вольтва эквивалента теплового потока (1) и анодного падения напряжения (2) в зависимости от плотности тока в прианодной зоне

Предложенный метод является интегральной оценкой устойчивости диффузного разряда, которая ограничивается условием $j = \text{const}$ и применима для случаев, когда толщина прианодной зоны заметно меньше диаметра дуги. В экспериментах Шоека [3] это условие выполнялось, поскольку диаметр дуги составлял примерно 5 мм, а толщина прианодной зоны при $j > j_{кр}$ (согласно рис. 1) не превосходит 1 мм.

В заключение следует отметить, что критическая плотность тока может зависеть от многих параметров прианодной зоны: состава плазмы, температуры анода, наличия вынужденной конвекции или продольного по направлению к поверхности электрода тока.

Выводы

1. Разработан метод расчета распределения потенциала в прианодной зоне дугового разряда. Обнаружено существование пристеночной области, в которой существует тенденция к контрагированию разряда, поскольку в ней происходит снижение напряженности электрического поля при возрастании плотности тока.

2. Показано, что устойчивый диффузный разряд существует при плотности тока в столбе плазмы большей критического значения, при котором вольтов эквивалент теплового потока в анод минимален. Использование зависимости анодного падения потенциала для такой оценки некорректно, поскольку при этом не учитывается падение напряжения, затрачиваемое на изменение температуры плазмы на внешней границе прианодной зоны.

Литература

1. Эккер Г. Теория катодных явлений // Экспериментальное исследование плазмотронов. – Новосибирск: Наука. – 1977. – С. 155 – 207.
2. Паневин И.Г., Назаренко И.П., Ершов А.В. Исследование прианодных процессов в сильноточных разрядах высокого давления // Экспериментальное исследование плазмотронов. – Новосибирск: Наука. – 1977. – С. 340 – 357.
3. Шоек П.А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена. – М.: Энергия. – 1996. – С. 110 – 139.
4. Брагинский С. М. Явления переноса в плазме // Вопросы теории плазмы. – М.: Госатомиздат. – 1963. – Вып. 1. – 191 с.
5. Паневин И.Г., Хвесюк В.И., Назаренко И.П. Теория и расчет приэлектродных процессов. – Новосибирск: Наука, 1992. – 197 с.
6. Соотношение между анодным падением потенциала и его тепловым эквивалентом в дуговых разрядах / А.В. Ершов, И.П. Назаренко, И.Г. Паневин, Б.А. Рычков // Материалы VII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. – Алма-Ата, 1997. – Т. 2. – С. 177 – 180.

Поступила в редакцию 15.12.03.

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. В.В. Гиржон, Запорожский государственный университет, г. Запорожье