

02:04:07

Влияние диффузионных процессов на формирование радиальной структуры электрической дуги в парах металлов

© И.Л. Бабич, А.Н. Веклич, В.А. Жовтянский, А.Ю. Панькин

Киевский университет им. Тараса Шевченко

Поступило в Редакцию 27 мая 1998 г.

Экспериментально и численным методом исследована роль диффузионных процессов в установлении радиальной структуры свободногорящей электрической дуги. Показано, что наблюдавшееся во многих экспериментах увеличение содержания плазмообразующих частиц в периферийной области дуг возникает в связи с неадекватностью допущения о равновесном состоянии плазмы. Ответственной за этот эффект является неравновесность плазмы за счет перепоглощения на периферии дуги резонансного излучения из ее более высокотемпературной осевой области.

Дуга инициировалась между неохлажденными медными электродами диаметром 6 mm каждый в воздухе; межэлектродное расстояние составляло $2 \div 8$ mm. Во избежание каплеобразования дуга создавалась импульсом тока амплитудой до 100 А и длительностью 30 ms, который накладывался на "дежурный" слаботочный разряд; исследования проводились в квазистационарной стадии процесса. Вследствие пространственной и временной нестабильности разряда применялся метод однократной томографической регистрации [1] радиального распределения интенсивностей спектральных линий меди 510.5 и 521.8 nm, по которым определялся профиль температуры $T(r)$ плазмы. Распределение концентрации электронов $N_e(r)$ измерялось по абсолютной интенсивности линии 465.1 nm.

Использование уравнения состояния в допущении локального термического равновесия (ЛТР) позволило рассчитать радиальные профили суммарной концентрации атомов и ионов меди $N_{Cu}(r)$. В пересчете на относительное содержание $x_{Cu} = N_{Cu} / \sum N$ (где $\sum N$ — суммарная концентрация тяжелых частиц в медно-воздушной плазме) они характеризуются, подобно [2,3], возрастанием x_{Cu} на периферии

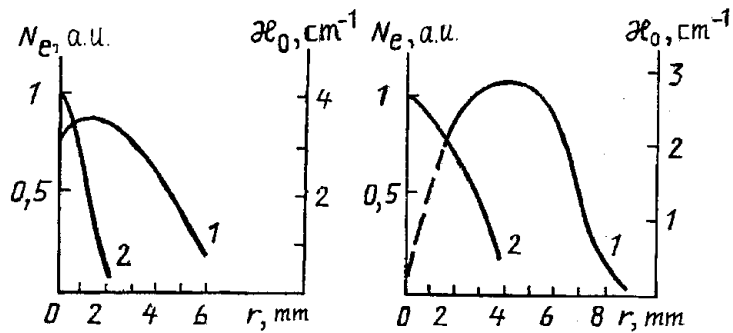


Рис. 1. Радиальные распределения коэффициента поглощения χ_0 (кривые 1) и относительной электронной концентрации N_e (2) в среднем сечении свободнотгорящей дуги между медными электродами при токе 30 А и межэлектродных расстояниях 2 (а) и 8 мм (б).

дуги. Считается обычно, что это возрастание обусловлено эффектом разделения в процессе диффузии компонент плазмообразующей смеси (в англоязычной литературе — demixing). В нашем случае особенность состоит только в том, что здесь это возрастание гораздо заметнее и составляет почти порядок величины по отношению к осевой области. Это связано, очевидно, с различием характера дуг: здесь — свободнотгорящая; в работах [2,3] — стеночностабилизированная. В любом случае полученный результат представляется нефизичным.

С целью расширения области исследований в радиальном направлении применена методика лазерной абсорбционной спектроскопии. При этом регистрировалась "тень" от дуги на входной щели спектрометра в параллельном пучке излучения от лазера на парах меди. Определенный таким образом коэффициент самопоглощения χ_0 в центре спектральной линии 510.5 нм оказался заметной величиной в пространственной области, в несколько раз превышающей по радиусу размер излучающей зоны дуги (рис. 1). Так как энергия нижнего уровня перехода, ответственного за поглощение линии 510.5 нм составляет всего 1.39 eV, то заселенности его и основного уровней тесно связаны, а результаты измерений самопоглощения отражают, фактически, распределение концентрации атомов меди.

Влияние диффузионных процессов учитывалось путем их численного моделирования в допущении аксиальной симметрии медно-азотной плазмы свободногорящей электрической дуги, состоящей из электронов, ионов CuII , атомов CuI и молекул азота N_2 :

$$(1/r)d/dr(r \cdot \Gamma_{\text{Cu}}) - S_{\text{Cu}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{Cu}} = S_{\text{CuI}} + S_{\text{CuII}}$ — плотность источника эрозии меди, Γ_{Cu} — диффузионный поток меди. Значение S_{Cu} связано с величиной разрядного тока через коэффициент эрозии электрода, значение которого для меди принималось $b_r = 10^{-4} \text{ г/Кл}$ [4]. В качестве граничных условий выбраны равенство нулю производных на оси дуги и нулевое значение x_{Cu} на поглощающей стенке, удаленной на расстояние R_W от оси. Уравнение (1) дополнялось соотношениями Саха, Дальтона и квазинейтральности.

Для радиальных профилей температуры и плотности источника эрозии меди выбраны следующие аппроксимации:

$$T(r) = (T_0 - T_a) \exp[-(r/R_T)^2] + T_a, \quad S_{\text{Cu}}(r) = S_0 \exp[-(r/R_S)^2], \quad (2)$$

где $T_a = 300 \text{ К}$ — температура окружающей среды. Первая из них общепринята для электрической дуги [5]; значения T_0 и R_T выбирались из соображений наилучшего соответствия экспериментальным результатам. Как оказалось, выбор вида функции $S_{\text{Cu}}(r)$ несуществен; в пределах $R_S < R_T$ результат расчета практически не зависит от самого значения R_S .

Коэффициенты диффузии многокомпонентной смеси определялись через коэффициенты бинарной диффузии [6]. А они, в свою очередь, — через столкновительные интегралы как функции от потенциалов взаимодействия между соответствующими компонентами с учетом температурных зависимостей. При расчете также учитывалась амбиполярная диффузия.

Поскольку уравнение (1) является нелинейным, к нему неприменим принцип максимума, согласно которому решение может принимать экстремальное значение только на границах [7]. Тем не менее результаты расчета для различных значений параметров в уравнении (2) обнаруживают только особенности поведения x_{Cu} в периферийной области излучающей зоны дуги (рис. 2); локальный максимум, подобно [2,3], не реализуется. Заметим, что наблюдающийся на рис. 2, а существенный рост абсолютных значений $N_{\text{Cu}}(r)$ по мере удаления от оси обусловлен чисто температурным эффектом увеличения плотности газа при

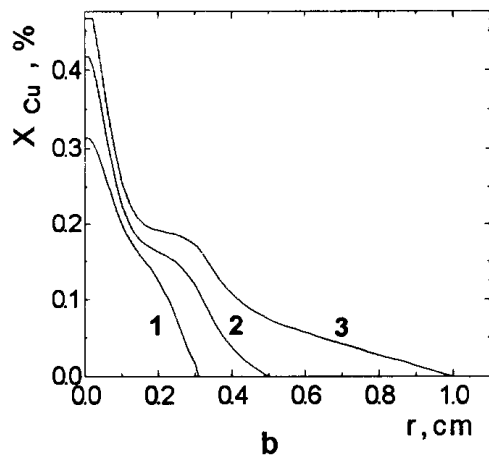
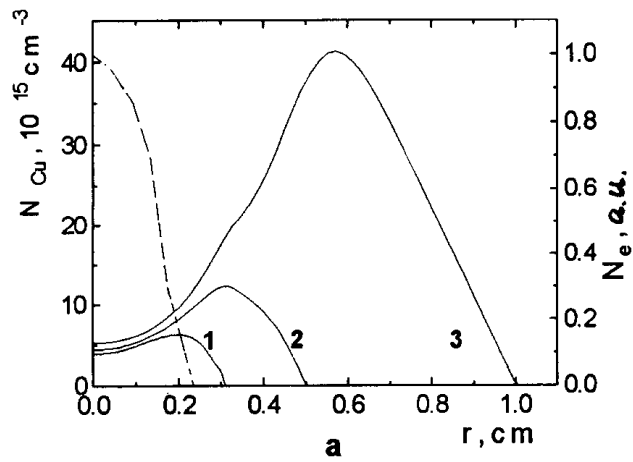


Рис. 2. Результаты расчета радиальных профилей концентрации N_{Cu} (a) и содержания x_{Cu} (b) паров меди в медно-азотной плазме с учетом диффузионных процессов при различных удалениях поглощающей стенки от оси разряда: $R_w = 0.3$ см (кривая 1), 0.5 см (2) и 1 см (3). Пунктиром представлен профиль относительной электронной концентрации N_e . Использовались следующие значения параметров: $T_0 = 8400$ К, $R_T = 0.255$ см; $S_0 = 9.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, $R_S = 0.06$ см.

постоянстве давления. В целом рис. 2 служит также иллюстрацией вымораживающего влияния поглощающей стенки на содержание меди в области собственно дуги и на структуру ее внешней области. Для случая большого удаления стенки ($R_w = 1$ см) полученные результаты соответствуют измерениям пространственного профиля коэффициента поглощения в центре спектральной линии 510.5 nm CuI (рис. 1). Удовлетворительно соответствует экспериментальным значениям также расчетный профиль $N_e(r)$.

Таким образом, нетрадиционный подход к исследованию плотной плазмы электрической дуги, сочетающий спектроскопические измерения с моделированием диффузионных процессов, позволил установить, что, вопреки распространенной точке зрения [2,3], диффузионное разделение компонент смеси не является определяющим фактором в установлении радиального распределения паров металла. В целом здесь ситуация повторяет результаты работы [8], где в иных физических условиях иными методами исследований показана пренебрежимость роли диффузионных процессов в послесвечении плазмы сильноточного импульсного разряда в инертных газах.

Проблема "катастрофического" нарастания содержания паров металла в периферийной области дуги возникает в связи с неадекватностью допущения о применимости ЛТР во всей области дуги. Как показано в [9], резонансное излучение из осевой, наиболее высокотемпературной области разряда, перепоглощаясь на периферии, "навязывает" здесь резонансному переходу атомов меди заселенности, превышающие равновесные для местного значения температуры. Последовательное применение модели частичного ЛТР с учетом уравнения переноса излучения позволяет получить при интерпретации спектроскопических измерений физически обоснованные распределения компонент электродуговой плазмы.

Список литературы

- [1] Веклич А.Н., Жовтянский В.А. // ЖПС. 1989. Т. 50. В. 4. С. 565–570.
- [2] Rahal A.M., Rahhaoui B., Vacquie S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1984. V. 17. N 9. P. 1807–1822.
- [3] Ouajji H., Cheminat B., Andanson P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1986. V. 19. N 10. P. 1903–1916.
- [4] Kimblin C.W. // Proc. IEEE. 1971. V. 56. N 4. P. 546–555.

- [5] Патон Б.Е., Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А. Микроплазменная сварка. Киев: Наук. думка, 1979. 248 с.
- [6] Лапин Ю.В., Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. М.: Наука, 1989. 368 с.
- [7] Владимиров В.С. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1981. 512 с.
- [8] Жовтянский В.А., Новик О.М. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 9. С. 186–189.
- [9] Бабич И.Л., Веклич А.Н., Головкина В.А., Жовтянский В.А. // ЖПС. 1992. Т. 56. В. 2. С. 323–326.