

В.А. Перерва, Е.В. Карпович

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДУГИ ПРИ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Аннотация. Проведен теоретический анализ математических моделей для способа сварки неплавящимся электродом. Установлено, что для построения модели процесса сварки полым катодом необходимо учитывать катодные и анодные явления в столбе дуги. Показана возможность определения параметров плотности тока на аноде и оптимальных условий ведения процесса сварки.

Ключевые слова: сварка полым катодом, сварочная дуга, катодная область, анодная область.

Современный уровень развития машиностроительного производства характеризуется внедрением на стадии технологической подготовки математической оценки физических процессов, обеспечивающих основной цикл изготовления продукции. При производстве шаробаллонов высокого давления из титанового сплава ВТ6С или нержавеющей стали таким процессом является аргонно-дуговая сварка полым катодом в вакууме. Математическое описание различных методов сварки основывается на моделировании электрических дуг с учетом ряда физических явлений в пределах полного сварочного процесса. Определение параметров дуги является одной из основных задач, решение которой заключается в определении распределения энергии и давления, оказываемого дугой на рабочую поверхность [1, 2]. Анализ существующих математических моделей дуг позволит определить оптимальный комплекс параметров для описания и управления процессом сварки деталей полым катодом в вакууме.

Сварочная дуга состоит из термической плазмы, окруженной электродными областями, в которых сосредоточена основная часть падения напряжения [2, 3]. Анодная и катодная области представляют собой тонкие слои вокруг активных областей электродов. Приэлектродные области можно рассматривать как одномерные, так как их осевая протяженность мала по сравнению с радиальной. Основная

область дуги (столб дуги) должна рассматриваться в виде двухмерной (принимая цилиндрическую симметрию), или трехмерной для высокоскоростных сварочных технологий и при наклонном положении дуги. Анализ существующих моделей дуги, приведенных в [3 – 5], показал необходимость рассмотрения и учета катодных явлений и нелинейную зависимость коэффициентов переноса энергии от температуры.

Катодные явления при сварке неплавящимся вольфрамовым электродом в инертных газах рассматриваются из предположения, что перед металлической поверхностью, эмитирующей электроны, находится пространственный заряд (неравновесный слой), затем – зона ионизации [3 – 5]. Принимается, что в зоне пространственного заряда не происходит столкновений между частицами, а в зоне ионизации происходит множество столкновений, но сохраняется состояние квазинейтральности. Со стороны плазмы зона ионизации, находится в состоянии локального термодинамического равновесия.

Анализ данных по сварке полым катодом [3 – 5] показал, что в столбе катода электроны распределяются по энергиям и процесс катодного падения напряжения не может быть описан математической моделью плазмы дуги перед металлической поверхностью, эмитирующей электроны. Предполагается, что в области выхода плазмы из полого катода существует двойной электрической слой (ДЭС). Наблюдаемое при сварке ограничение тока в этом случае связано с распадом ДЭС, экстремальный характер зависимости глубины проплавления от величины межэлектродного промежутка – с фокусирующим действием ДЭС, а появление группы быстрых электронов объясняется их разгоном за счет падения напряжения на слое.

Двойные слои чаще всего образуются в местах сужения при контрагировании газовых разрядов пониженного давления. В разрядах равномерного сечения, к которым можно отнести полый катод, двойной слой может образовываться при наличии области местного разрежения. Таким местом в исследуемом разряде является район выхода плазмы из катода в камеру. Уменьшение ионного потока в этой части разряда, вызванное повышенным разрежением газа и повышенными потерями ионов, вследствие их радиальной диффузии на стенки катода, приводит к образованию области с нескомпенсированным отрицательным зарядом и значительной напряженностью элект-

трического поля. Ускоренные в этой зоне электроны интенсивно ионизируют газ и непосредственно за ней создается избыточный положительный заряд (рис. 7).

Толщина слоя составляет несколько дебаевских длин. Форма ДЭС представляет собой часть сферы и поэтому слой способен фокусировать электроны, поступающие на него из катодной плазмы. Ускоренные в слое электроны обладают большой ионизирующей способностью, поэтому с анодной стороны слоя обычно возникает ярко светящийся плазменный сгусток. Электроны в сгустке состоят из двух групп, одна из которых образована быстрыми электронами, прошедшими двойной слой, не испытывая неупругих взаимодействий, а вторая – медленными электронами, появившимися в результате ионизации атомов.

Расчет в зоне пространственного заряда проводится по граничным условиям на поверхности катода и на границе зоны пространственного заряда с целью определения падения потенциала. Характер процессов на полом катоде термоэмиссионный. В области активной зоны имеет место радиальное падение напряжения, аналогичное катодному падению напряжения в классической дуге.

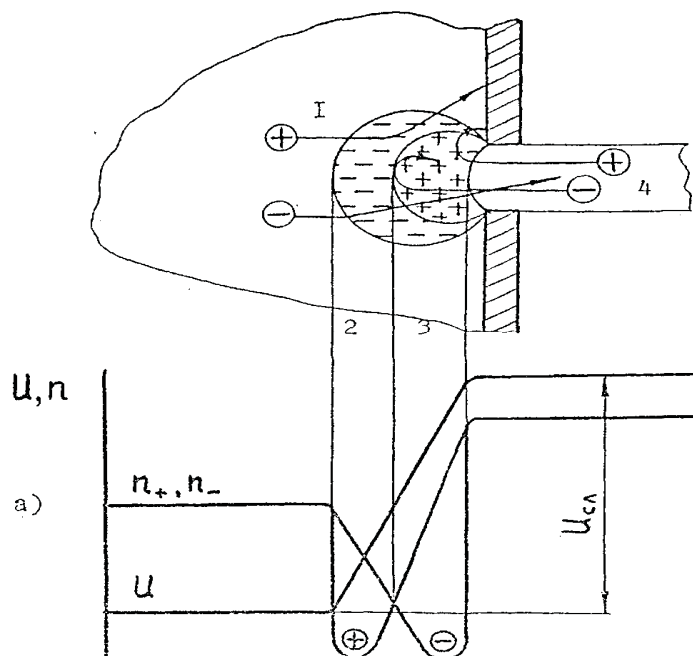


Рисунок 1 – Структура ДЭС, распределение концентраций, потенциала:

- 1 – катодная плазма; 2 – область отрицательного объемного заряда; 3 – область положительного объемного заряда;
4 – анодная плазма

На элементарном участке эмитирующей поверхности, работающей в режиме термоэмиссии в условиях самостоятельного газового разряда, энергия на катод подводится за счет потока тепла из плазмы $q_{пл}$ и джоулева нагрева $q_{дж}$ при протекании по катоду тока. Отвод энергии от катода осуществляется за счет эмиссии электронов q_e , а также посредством излучения q_u и теплопроводности q_m (рис. 2). В стационарном режиме справедливо следующее равенство:

$$q_{пл} + q_{дж} = q_e + q_u + q_m \quad (1)$$

откуда можно считать, что

$$q_{дж} = q_u + q_m \quad (2)$$

Следовательно, на катоде должно соблюдаться соотношение

$$q_{пл} = q_e, \quad (3)$$

то есть в стационарном режиме работы тепловой поток на катод из плазмы снимается в результате "электронного охлаждения".

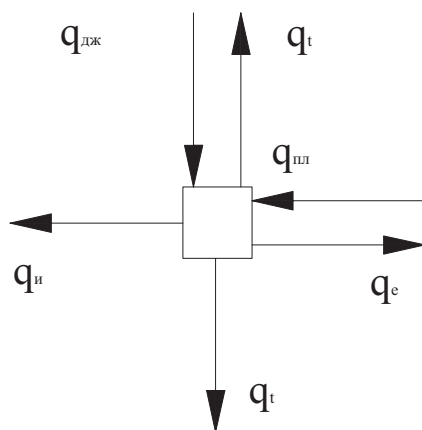


Рисунок 2 – Схема энергетического баланса элементарного участка эмитирующей поверхности полого катода

Величина $q_{пл}$ складывается из кинетической энергии ионов, ускоренных в зоне катодного падения, и энергии нейтрализации ионов, выделяющейся при рекомбинации ионов на поверхности катода. Кроме того, энергия катоду передается из плазмы конвекцией и излучением, но в плазме низкого давления этот член оказывается относительно малым и его, в первом приближении, можно не учитывать:

$$q_{пл} = j_i U_k + j_i (U_i - \Phi_{эф}), \quad (4)$$

где j_i – плотность ионного тока на поверхности катода; U_k – величина катодного падения напряжения; U_i – потенциал ионизации рабочей среды; $\Phi_{эф}$ – эффективное значение работы выхода катода.

Поток энергии, уносимый эмитированными электронами, выражается через плотность тока эмиссии j_e и эффективную величину работы выхода катода:

$$q_e = j_e \cdot \Phi_{эф}, \quad (5)$$

В соответствии с (3), равенства правых частей выражений (4) и (5), с учетом $U_k \approx \Phi_{эф}$ после преобразований ток эмиссии будет определяться формулой

$$j_e \approx j_i \frac{U_i}{\Phi_{эф}}, \quad (6)$$

Из (6) следует, что увеличение плотности электронного тока на катоде может быть достигнуто тремя способами: увеличением плотности ионного тока j_i ; увеличением потенциала ионизации рабочей среды U_i , а также снижением работы выхода катода $\Phi_{эф}$:

– увеличение за счет U_i связано с заменой плазмообразующего газа для полого катода, что не выгодно экономически, так как инертные газы, у которых U_i выше, чем у аргона менее доступны и имеют более высокую стоимость;

– учитывая то, что доля ионного тока j_i на катоде является фактором, обеспечивающим нагрев катода, появляется возможность снизить температуру и повысить срок службы полого катода.

В разработке математической модели важно также провести оценку анодных явлений [3, 4, 6]. Диффузионный анодный слой определяется как низкотемпературная зона перед анодом, которая имеет толщину порядка 0,1 мм, что существенно больше, чем средняя длина свободного пробега электрона. Это приводит к большой концентрации частиц в этой зоне, значительным градиентам температур и вызывает диффузионные потоки, которые нужно учитывать в основных уравнениях.

Температура тяжелых частиц в прианодной зоне падает от температуры плазмы до температуры поверхности анода. Наличие электрической проводимости и сохранение закона неразрывности тока подразумевает, что температура электронов должна быть существенно больше температуры тяжелых частиц, что обуславливает заметные отклонения от локального термодинамического равновесия в пределах пограничного анодного слоя.

Анодное падение напряжения объясняется наличием над поверхностью анода зоны пространственного заряда размером на несколько порядков меньше толщины пограничного анодного слоя. В пределах этой зоны присутствует сильные электрические поля вследствие отклонения от квазинейтральности. Модели анодного слоя, включенные в программы полного моделирования дуги, фактически идентичны моделям соответствующих катодных слоев.

Для сварочных приложений избыточное давление дуги будет оставаться постоянным в узком пограничном анодном слое и может быть вычтено из результатов моделирования столба. Фактически на поток энергии влияет анодное падение напряжения. Для определения теплового потока на аноде наиболее широко используется формула [4].

$$q_a = q_{\text{ток}} + q_{\text{конв}} + q_{\text{изл}}, \quad (7)$$

где $q_{\text{ток}}$ – тепловой поток, переносимый электронным током (вносящий около 70% в суммарный тепловой поток на поверхности анода); $q_{\text{изл}}$ – поток мощности, теряемой на излучение; $q_{\text{конв}}$ – поток мощности, теряемой на конвекцию.

Составляющие выражения (7) могут определяться по следующим формулам [4]:

$$q_{\text{ток}} = j_a(2,76 + \Phi_a); \quad (8)$$

$$q_{\text{изл}} = \int_{v_j} \frac{P_{\text{изл},j}}{4\pi r_{i,j}^2} \cdot \cos \psi dV_j; \quad (9)$$

$$q_{\text{конв}} = \frac{0,515}{Pr_w} \left(\frac{\mu_e \rho_e}{\mu_w \rho_w} \right)^{0,11} \left(\mu_w \rho_w \frac{dv_{re}}{dr} \right)^{0,5} (h_e - h_w), \quad (10)$$

где Φ_a – эффективная функция работы выхода материала анода, изменяющееся от 4,3 (Cu)...4,5 (сталь); $P_{\text{изл}}$ – мощность собственного излучения плазмы; r – радиальная координата.

В формуле (10) индекс e обозначает значение на анодном конце столба дуги (граница анодного слоя) и w значения на стенке.

По распределению теплового потока q_a , можно определить коэффициент полезного действия (КПД) дуги η :

$$\eta = \frac{2\pi \int_0^{L_r} q_a r dr}{I_\partial (U_k + U_{cm} + U_a)}, \quad (11)$$

где I_{∂} – ток дуги; U_k – катодное падение напряжения; U_a – анодное падение напряжения.

Формула обычно применялась без учета неизвестного анодного падения напряжения и результаты моделирования не обеспечивали формулу КПД дуги, подходящую для практических целей. Наиболее часто в расчетах параметров сварки используются эмпирические данные эффективного значения КПД. Для дуговой сварки неплавящимся полым катодом эффективный КПД составляет $\eta = 0,8...0,85$ [7].

Приравняв формулу (11), полученную в результате теоретического анализа, к экспериментальным значениям КПД можно определить величину анодного падения напряжения U_a или суммарный тепловой поток на аноде для условий сварки, определяемых как отдельным показателем формулы, так и их соотношением:

$$U_a = \frac{2\pi \int_0^{L_r} q_a r dr}{\eta \cdot I_{\partial}} - (U_k + U_{cm}) \quad (12)$$

Процесс проплавления основного материала при сварке является конечным результатом теплового и силового взаимодействия технологического источника энергии с обрабатываемым материалом. Глубина проплавления, а также его форма определяются концентрацией вводимой в зону сварки энергии, которая в свою очередь при сварке полым катодом определяется величиной и характером распределения плотности тока в пятне нагрева. Для построения наиболее правильной модели процесса сварки полым катодом необходимо учитывать как катодные явления с двойным электрическим слоем в столбе дуги, так и анодные с учетом слоев диффузионного взаимодействия и пространственного заряда.

На основе экспериментальных данных и теоретического анализа физических процессов в электрической дуге между полым катодом и деталью-анодом (формулы (7) – (12)) можно установить характер распределения и параметры регулирования плотности тока на аноде, определить оптимальные условия ведения процесса сварки, которые будут обеспечивать требуемые геометрические и эксплуатационные характеристики сварного соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Судник В. А. Расчеты сварочных процессов на ЭВМ / В. А. Судник, В. А. Ерофеев – Тула: Тульский политехнический институт, 1986. – 100 с.
2. Судник В. А. Математическое моделирование технологических процессов сварки в машиностроении / В. А. Судник, В. А. Ерофеев – М.: Машиностроение, 1987. – 56 с.
3. Anode-boundary-layer behaviour in a transferred, high-intensity arc / T. Amakawa, J. Jenista, J. Heberlein, E. Pfender. // J. Phys. D: Appl. Phys., 1998. – Vol. 31 – P. 2826-2834.
4. Dinulescu H. A. Analysis of the anode boundary layer of high intensity arcs / H. A. Dinulescu, E. Pfender // J. Appl. Phys., 1980. – Vol. 51 – P. 3149-3157.
5. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги / И. Г. Кесаев – М.: Наука, 1968. – 244 с. – Библиогр.: с. 237 – 242.
6. Prediction of anode temperatures of free burning arcs / P. Zhu, J. J. Lowke, R. Morrow, J. Haidar // J. Phys. D: Appl. Phys., 1995. – Vol. 28 – P. 1369-1376.
7. Сварка и свариваемые материалы: справочник в 3-х т. Т. II / Под ред. В. М. Ямпольского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. – 574 с. – Библиогр.: с. 564 – 537. – ISBN 5-7038-1253-4.