

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМОЙ

Широкое распространение плазменных технологий обработки материалов приводит к необходимости решения вопросов, связанных с: созданием потоков плазмы с необходимыми свойствами; управлением характеристиками плазмы; проблемами совершенствования технологического процесса и устройств. Потоки дуговой плазмы генерируются плазмотронами, которые различаются между собой конструкционными особенностями, мощностью, плазмообразующей средой и т.д. Причем при реализации большинства технологических процессов обрабатываемое изделие из электропроводящего материала выступает в качестве второго электрода - анода (рис. 1) /1,2/.

Явления в анодной области дуги в технологических процессах играют очень важную роль, так как определяют долю передаваемой аноду энергии дуги и тем самым характер нагрева основного металла. Поэтому изучение закономерностей взаимодействия электрической дуги с материалом необходимо для управления технологическим процессом. Общей теории анодных явлений до сих пор не существует, но отдельные ее вопросы разработаны /3-6/. Функционирование анодной области дуги характеризуется анодным падением потенциала U_a , значение и знак которого регулируют концентрацию заряженных частиц перед анодом на уровне, обеспечивающем подведение к нему разрядного тока, и определяются, в основном, энергией, потребляемой для образования положительных ионов в анодной области. По некоторым данным, U_a для дуг в молекулярных газах (азоте и воздухе) может достигать 12 В /1, 4/. Согласно представлениям плазмодинамической ситуации, ток в прианодной области переносится электронами, положительные ионы под действием поля уходят в столб дуги, и вблизи анода возникает область отрицательного объемного заряда. Анод не компенсирует оттока ионов, повышенная ионизация в прианодной области создается положительным анодным падением потенциала /3-5/. Прианодная область характеризуется высокими градиентами температур и тепловыми потоками.

В нагрев анода вносят вклад излучение и потоки тепла из плазмы, а также электроны, приносящие свою кинетическую энергию и работу выхода. Экспериментально установлено, например, при резке, что $Q_a \sim 10$ Вт на 1 А тока дуги.

С позиции технологического процесса в результате направленного воздействия источника энергии на изделие формируется определенная зона обработки материала. Нагрев сопровождается

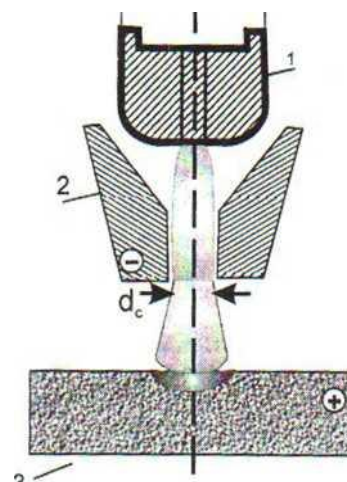


Рис. 1. Структурная схема плазменной дуги прямого действия/1/: 1 - катод, 2- сопло, 3 - анод (изделие)

разнообразными физическими и химическими процессами в металле: плавлением, структурными превращениями, кристаллизацией, пластическими деформациями.

Таким образом, при обработке материалов электродуговой плазмой существуют две разнородные сопряженные системы 111. Их особенность состоит в том, что в первой с помощью плазмотрона получают источник энергии с заданными характеристиками; во второй реализуется технологический процесс, связанный с обработкой материала - сварка, резка, напыление и т.д. Реальная картина технологического процесса плазменной обработки материалов может быть получена в результате решения ряда задач (рис. 2). Для математического их описания используется система уравнений, выражающих законы сохранения массы, количества движения и энергии для разных фаз: плазменного потока, расплава и уравнения теплопроводности для твердого металла соответственно 111.

Для решения задач моделирования технологического процесса вполне обосновано применение упрощенной расчетной модели анодной области. Упрощение основано на позициях, при которых в пределах анодного пятна температура испаряющегося анода равна температуре кипения; граница столба с анодной областью почти плоская и осевой градиент дуги $dT/dx = \text{const}$; доля кинетической энергии электронов близка единице, энергия дуги передается в сторону анода только теплопроводностью, пространственный заряд определяется только электронами /2/.

В данной работе приведены результаты решения тепловой задачи плавления и испарения на аноде, определения температурного поля в зоне воздействия с подвижными границами фаз (задача Стефана). Целью расчетов является определение координат границ плавления и испарения в определенный момент времени и температурного поля в металле /8, 9/.

Математическое описание задачи теплопереноса в системе тел с подвижными границами фаз может быть представлено для каждой фазы уравнением теплопроводности

$$c_i \rho_i \frac{\partial (T_i)}{\partial t} = \text{div}(\lambda_i \text{grad} T_i) + Q ,$$

где Q - количество тепла, выделяемого источником; T_j - температура, теплофизические свойства и коэффициенты переноса металла; A_i - теплопроводность, ρ_i - плотность, C_j - удельная теплоемкость, при $i=1$, расплавленного слоя; $i=2$ - в зоне термического влияния. Они являются функциями температуры. Плотность теплового потока источника Q определяют рабочие параметры режима горения дуги. В рассматриваемой постановке, температура фазового перехода есть функция координат и времени. Скорости перемещения границ фазовых превращений определяются из граничных условий:

на внешней границе изделие - источник нагрева

$$T_1|_{S1} = T_{\text{ист}}|_{S1}, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_S + \rho L \frac{ds_1}{dt} = Q ;$$

на внутренней границе расплав – твердый материал

$$T_1|_{S2} = T_2|_{S2} = T_{\text{пл}}|_{S2}, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_S = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_S + \rho L \frac{ds_2}{dt}.$$

Здесь T_1 - температура расплава, T_2 - твердого металла в зоне термического воздействия; $S1$ и $S2$ - фазовые границы испарения и плавления соответственно (рис. 3) ; λ_1 и λ_2 - коэффициенты теплопроводности изделия в жидкой и твердой фазе соответственно, L - скрытая теплота фазового перехода; ds_1/dt , ds_2/dt - скорости движения фазовых границ испарения и плавления.

Расчеты выполнены с помощью программы моделирования процесса плазменной резки металлов, описание которого и методы решения приведены в работе /7/. В качестве анода рассмотрена низкоуглеродистая сталь толщиной 10 мм. На рис. 3 приведено распределение температуры на аноде по радиусу пятна за время его существования. В используемых для обработки материалов плазмотронах линейной схемы реализуется существование продуваемого разряда с контрагированной привязкой анодного пятна /1, 2/. За время, в течение которого оно остается неподвижным, происходят плавление и интенсивное испарение металла. На рис. 4 показано изменение температуры изделия в зависимости от времени при воздействии источника нагрева на фронтальной поверхности.

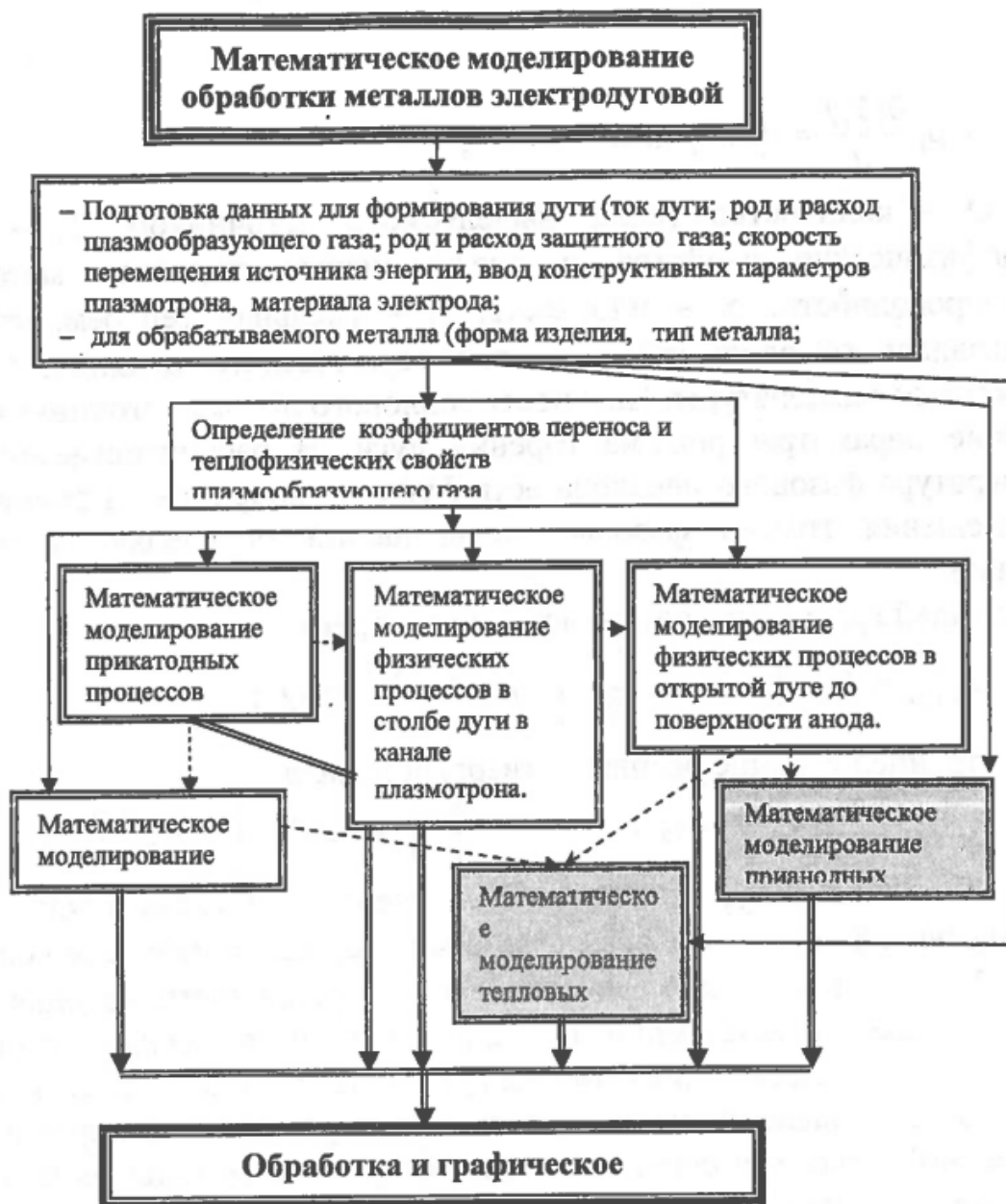


Рис. 2. Общая схема математического моделирования процесса обработки материала электродуговой плазмой



Рис. 3. Распределение температуры по пятну анода

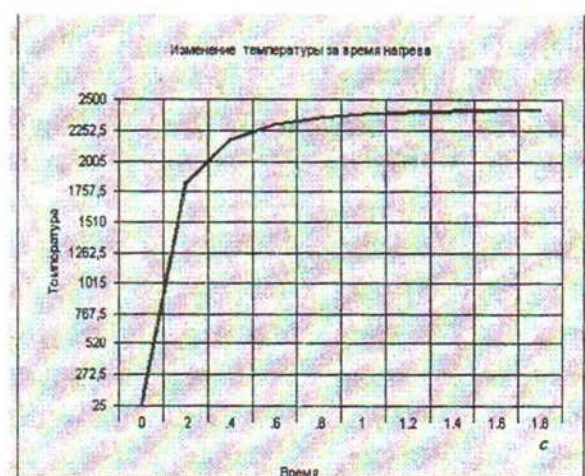


Рис. 4. Изменение температуры изделия в зависимости от времени

Результаты расчетов изменения координаты фронта плавления в зависимости от времени показали, что плавление происходит немонотонно, практически с некоторой возрастающей скоростью, и затем выходит на стационарное значение. На рис. 5 представлены диаграммы движения межфазной границы плавления в зависимости от времени нагрева. На первой диаграмме показан характер изменения скорости в начальный период плавления.

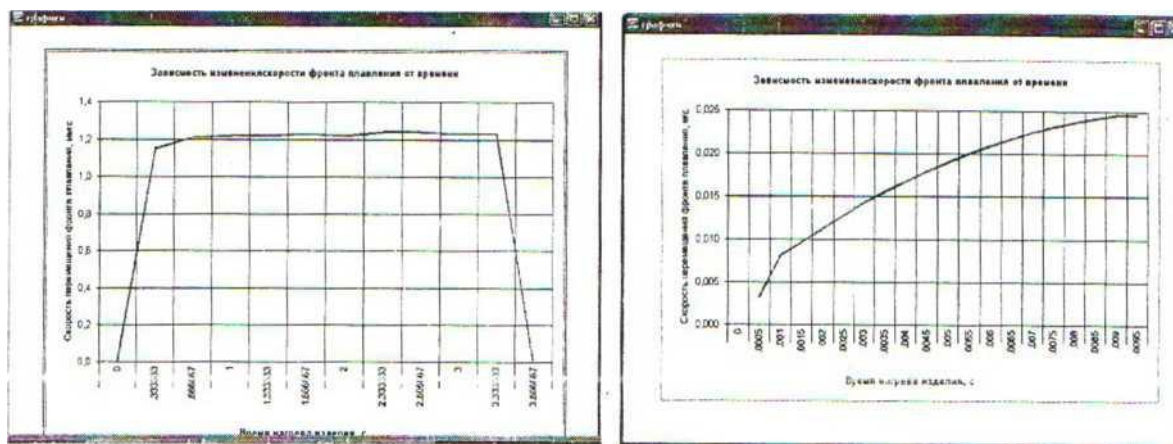


Рис. 5. Зависимости скорости движения границы фазового перехода (плавления изделия) от времени нагрева изделия

На второй диаграмме при увеличении рассматриваемого промежутка времени нагрева изделия изменение скорости перемещения межфазной границы во времени выглядит более определенно, вначале наблюдается резкое ее возрастание, затем скорость становится постоянной и по окончании времени счета становится равной нулю, т.е. стадию образования слоя расплава конечной толщины с температурой превышающей температуру плавления металла завершает процесс снесения его внешним потоком. Эти две стадии чередуются с высокой скоростью до завершения процесса резки.

В строгой постановке задача теоретического исследования анодных процессов должна включать рассмотрение и прианодной области, в которой происходит резкое изменение температуры и концентрации частиц, происходят процессы переноса заряда и тепла [6]. Однако оценка теплового вклада источника энергии является одной из конечных целей анализа технологического процесса.

Список литературы

1. Оборудование для плазменной сварки, наплавки и резки /Эсибян Э.М., Гладкий П.В., Никифоров Н.И.и др.//Машиностроение: Энциклопедия. Т.IV-6: Оборудование для сварки. - М.: хМашиностроение, 1999. - 375 с.
2. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. - М.: Машиностроение, 1970.- 335 с.

3. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма-М.: ИЛ, 1961.-369 с.
4. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. - М. Наука, 1971.-543 с.
5. Шоек П.А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг горящих в атмосфере аргона //Современные проблемы теплообмена. - М. Энергия, 1966. - С. 110-139.
6. Теория термической электродуговой плазмы. 4.1. Метод математического исследования плазмы / Жуков М.Ф., Урюков Б.А., Энгельш В.С., Лелевкин В.М. и др. - Новосибирск: Наука, 1987. - 287 с.
7. Жайнаков А.Ж., Кабаева Г.Д. Особенности моделирования процессов теплообмена при плазменной резке металлов // Известия КГТУ, Материалы Межд.юбил.конференции «Информ. техн. и матем. мод. в науке, технике и образовании». № 24. 2011. - С. 30-37.
8. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Анищенко Л.М. Высокотемпературные технологические процессы: Теплофизич. Основы. - М.: Наука, 1985. - 172 с.
9. Солоненко О.П., Головин А.А. Нестационарный сопряженный теплообмен и фазовые превращения при высокоэнергетической обработке поверхности. Часть 2: Моделирование технологических процессов II Теплофизика и аэромеханика. - 2007. -№ 4. - Т.14. - С. 623-638.