УДК 537.523:533.924

М.В.Дубов (асп., каф. ЭиЭ), В.Я.Фролов, д.т.н., проф.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ ДУГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СРЕДЕ АРГОНА ДЛЯ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

Оценка составляющих потока мощности в анод, при сварке металлов аргоно-дуговой горелкой, позволяет оптимизировать процесс регулирования и нагревания с повышением эффективности процесса с помощью варьирования исходных параметров сварочной горелки (величина тока, расход плазмообразующего газа, длина дуги). Проведение экспериментов с целью получения зависимостей эффективности нагревания заготовки, представляется очень дорогим процессом, поэтому для отображения зависимости эффективности необходимо прибегать к математическому моделированию технологического процесса.

В процессе горения дуги в аргоно-дуговой горелке происходит множество физических процессов, которые необходимо учесть в математической модели дуги:

- процесс выделения джоулева тепла;
- разогрев плазмообразующего газа;
- изменение скорости движения плазмы по всем направлениям;
- набегание плазменного потока на заготовку.

Все эти процессы необходимо учесть при моделировании электрической дуги в аргонодуговой горелке. Для описания выше представленных процессов воспользуемся фундаментальными законами физики, которые полностью будут описывать дугу.

Закон сохранения энергии – уравнение баланса энергии (в цилиндрической системе координат):

$$\rho \cdot v_z \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + \rho \cdot v_r \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{j^2}{\sigma} - U_{rad} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r}\right);$$

Закон сохранения импульса – уравнение движения среды (в цилиндрической системе координат):

$$V_z : \rho\left[\mathrm{V_z} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z} + \mathrm{V_r} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial r}\right] = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot \mu \cdot \frac{\partial V_z}{\partial r}\right) + \mu_0\left[\vec{J} \times \vec{H}\right]_z + \rho \cdot g_z,$$

$$V_r : \rho\left[\mathrm{V_z} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial z} + \mathrm{V_r} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial r}\right] = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \cdot \frac{\partial V_r}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot \mu \cdot \frac{\partial V_r}{\partial r}\right) + \mu_0\left[\vec{J} \times \vec{H}\right]_r - \mu \cdot \frac{V_r}{r^2};$$

Закон сохранения массы – уравнение неразрывности:

$$div\left(\rho\vec{V}\right) = 0.$$

Для описания электрофизических процессов применяется система уравнений Максвелла в дифференциальной форме, преобразованная через уравнения связи:

$$\begin{cases} \vec{E} = \dfrac{\vec{J}}{\sigma} \\ rot\left(\dfrac{1}{\sigma} rot\vec{H}\right) = 0 \\ rot\vec{H} = \vec{J} \end{cases},$$

которая впоследствии сводится к уравнению относительно функции тока:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\sigma}\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\chi}{r}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\sigma}\frac{1}{r}\frac{\partial \chi}{\partial r}\right) = 0.$$

В коэффициенты дифференциальных уравнений входят величины, зависящие непосредственно от искомой величины – температуры, поэтому уравнения являются нелинейными, что требует численного решения. Написанная программа для расчета параметров дуги позволяет рассчитывать распределение температуры плазмы, распределение скорости плазмы, распределение плотности тока дуги в каждой точке расчетной области. Расчетная сетка, на которой производится расчет, имеет переменный шаг, что позволяет с большей точностью рассчитывать градиенты величин в близи границ расчетной области, это очень важно для расчетов мощности в анод. Для расчета одного режима требуется около 3000 итераций и порядка 20 часов работы компьютера.