

## СКВОЗНОЙ РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ.

**Жайнаков А.,** *Институт горного дела и горных технологий им. акад. У. Асаналиева*  
**Усенканов Дж.О.,** *Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б. Ельцина,*  
*juma\_21@mail.ru*

**Аннотация.** В работе предложен метод сквозного расчета сложной системы включающей в себя газ, электродугую плазму, жидкий (расплавленный) металл и нерасплавленный твердый металл. Обсуждаются физические условия на границах между фазами и их математическое формулировка. Приводятся результаты расчета.

**Ключевые слова.** Электродугуговая плазма, катод, анод, столб электрической дуги, сварочная ванна, процессы на аноде.

## CALCULATION OF END-TO-END CHARACTERISTICS OF PLASMA ARC.

**Zhainakov A.,** *Institute of Mining and Mining Technologies Acad. U. Asanaliyeva*  
**Usenkanov D. O.,** *Kyrgyz-Russian Slavic University B. Yeltsin*

**Annotation.** In the work method of end-to-end calculation of complex system which includes gas, electric arc plasma, liquid (molten) metal and nerasplavlenyj solid metal. Discusses the physical conditions at the boundaries between the phases and their mathematical formulation. The results of the calculation.

**Keywords.** ARC plasma cathode, anode, a pillar of electric arc welding, bath, processes at the anode.

### **Введение.**

В случаях, когда требуется определить взаимное влияние физических процессов в электрической дуге и в обрабатываемом изделии возникает необходимость в учете физических процессов происходящих на границе «столб дуги – обрабатываемое изделие». При разработке технологий обработки материалов, понимание физических процессов именно на этой границе становится наиболее важными.

Поэтому, для дальнейшего развития теории электродугового разряда, необходимо исследовать взаимное влияние гидродинамических, тепловых и электромагнитных величин столба дуги и обрабатываемого изделия.

### **1. Математическая модель.**

#### Электродуговой разряд.

Математическое моделирование физических процессов в электродуговой плазме осуществляется в основном на базе системы магнитогидродинамических (МГД) уравнений [1-2]. При записи системы МГД уравнений учитывается, что главной причиной протекания электрического тока в электродуговом разряде является внешнее электрическое поле. Роль

индуцированного электрического поля незначительна. Нагрев электродуговой плазмы осуществляется в основном за счет джоулева тепла. Электродуговая плазма рассматривается как несжимаемая электропроводящая жидкость, которая в каждой точке пространства  $\mathbf{r}$  в любой момент времени  $t$  характеризуется определенной скоростью  $\mathbf{v}$ , давлением  $P$  и температурой  $T$ . Записанная с учетом вышесказанного система МГД уравнений является системой уравнений электродуговой плазмы.

Электродинамика дугового разряда описывается уравнениями Максвелла

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0, \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} \quad (1-4)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H} \quad (5-6)$$

закон Ома в дифференциальной форме

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

При записи уравнений гидродинамики предполагается, что течение электродуговой плазмы стационарное и ламинарное.

Уравнением неразрывности

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (8)$$

Уравнением движения электродуговой плазмы уравнения Навье-Стокса дополненное электростатическими и электромагнитными слагаемыми:

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}) \mathbf{v} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \operatorname{grad} \left( P + \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} \mathbf{v} \right) + 2 \operatorname{div}(\mu \mathbf{S}') \quad (9)$$

где  $\mathbf{S}'$  вязкий тензор напряжений для несжимаемой жидкости [4]:

Диссипируемая энергия существенно меньше кинетической энергии потока, поэтому в дальнейшем его можно не учитывать. При этих предположениях, уравнение энергии запишется в виде:

$$\rho \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} \left( h + \frac{v^2}{2} \right) = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} - \varphi + \operatorname{div} \left( \frac{\lambda}{c_p} \operatorname{grad} h \right). \quad (1.0)$$

Таким образом, для описания процессов в столбе электрической дуги в дальнейшем будут использоваться система уравнений (1–10). Система уравнений дополняется соотношениями, которые описывают состояние среды и зависимость свойств среды от температуры и давления:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(T, P), \quad \sigma = \sigma(T, P), \quad \lambda = \lambda(T, P), \quad \mu = \mu(T, P), \\ c_p &= c_p(T, P), \quad h = h(T, P), \quad \psi = \psi(T, P). \end{aligned} \quad (11)$$

#### Расплавленный металл.

При электродуговой сварке под воздействием столба электрической дуги в теле изделия происходит плавление металла и образуется объем жидкого металла (сварочная ванна). Жидкий металл по существу представляет собой плотную плазму. Эти особенности строения и определяют методы исследования жидких металлов, опирающиеся на теорию классической однокомпонентной плазмы и теорию простых жидкостей [5].

Таким образом, математическое моделирование процессов в сварочной ванне проводится на основе системы МГД уравнений (1-11). Все допущения принятые для электродуговой плазмы, кроме пункта об излучении, которое для жидкого металла не учитываются, верны и для жидкого металла.

#### Условия на границе «столб дуги – металл»

Вследствие отсутствия достаточно простой модели прианодных процессов на границе «столб дуги - металл» предполагается, что: обмен тепла между электрической дугой и металлом осуществляется за счет теплопроводности и за счет работы выхода электронов  $\varphi_0$ ,

т. е. ставятся граничные условия:  $\lambda_{cd} \frac{\partial T_{cd}}{\partial z} + j\phi_0 = \lambda_{жсм} \frac{\partial T_{жсм}}{\partial z}$ . Границу плазма - жидкий металл считаем горизонтальной линией раздела двух вязких несмешивающихся жидкостей.

Для аксиальной составляющей скорости на границе выполняется условие непроницаемости  $u_{cd} = u_{жсм} = 0$ . Для радиальной составляющей скорости выполняется условие прилипания  $v_n = v_{жсм}$ ,

Равенство касательных напряжений приводит к выполнению равенства  $\mu_{cd} \frac{\partial v_{cd}}{\partial z} = \mu_{жсм} \frac{\partial v_{жсм}}{\partial z}$ , здесь  $\mu$  - коэффициенты динамической вязкости контактирующих сред.

## 2. Результаты расчета.

Расчетная область включает в себя сопло плазматрона, с внутренним электродом, открытую область между срезом сопла и анодом, и анод, рабочая поверхность которой представляет собой плоскую пластину.

Для выяснения влияния режима работы анода на параметры столба дуги были проведены расчеты при разных граничных условиях на нижней границе анода. Расчет проводился для дуги в среде аргона, при расходе газа 100 мг/с, силе электрического тока 100А.

На рис. 1 приведены поля расходов и изотермы в столбе дуги и в расплавленном металле анода при условии свободного теплообмена с окружающей средой на нижней границе анода, т.е. на нижней границе анода для энтальпии задавалось условие  $\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$

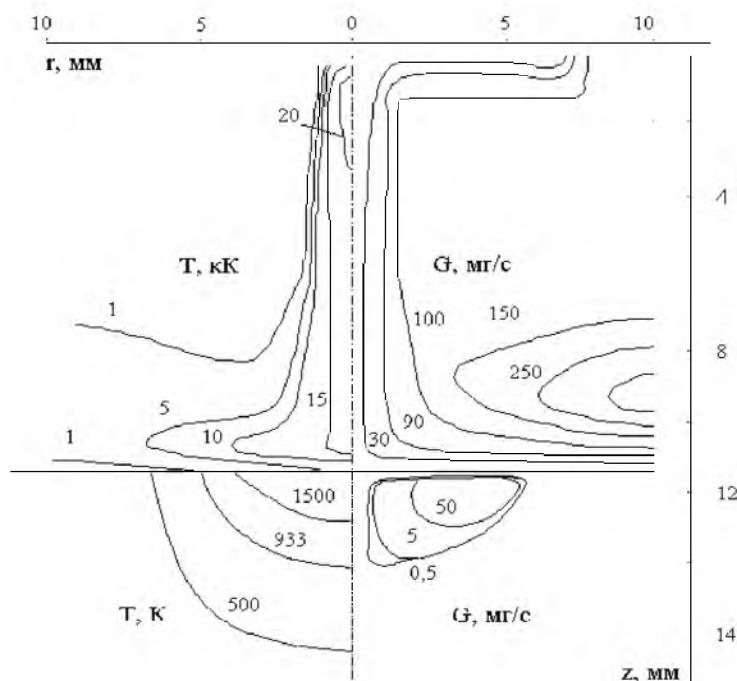


Рис. 1. Поля температур и линии равных расходов в столбе дуги и в расплавленном металле анода.

Поля температур и изотерм при условии незначительного теплообмена с окружающей средой, т.е. когда по всей внешней границе анода задавалось условие  $\frac{\partial h}{\partial z} = 0$ , приведены на рис. 2.

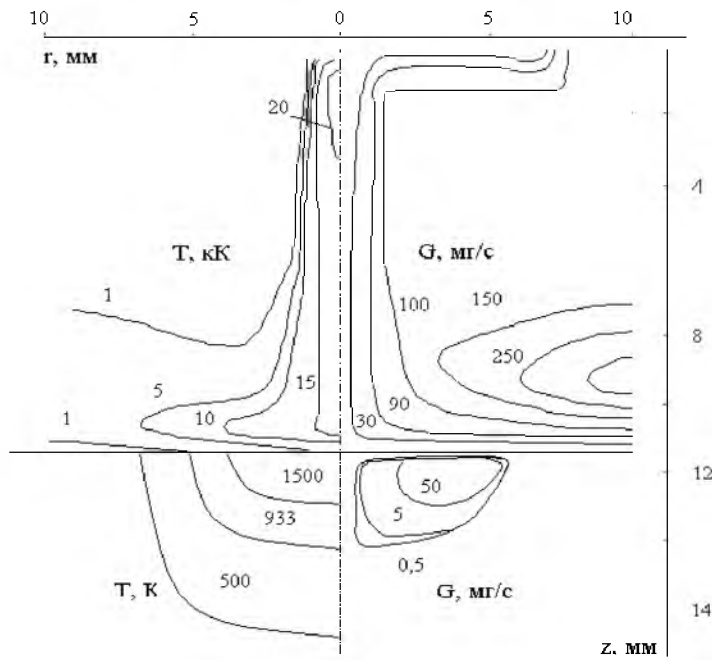


Рис. 2. Поля температур и линии равных расходов в столбе дуги и в расплавленном металле анода.

Как видно из этих рисунков, в области столба дуги, поля температур и газодинамического тока практически не отличаются для обоих случаев, отличие наблюдается только в области расплавленного металла. В случае незначительного обмена тепла с окружающей средой, в отличие от случая свободного обмена тепла, несколько увеличены размеры сварочной ванны и наблюдается больший прогрев металла анода.

Отводимое, в первом случае, из анода теплопроводностью тепло, используется в этом случае на нагрев тела анода.

На рис.3 приведены поля температур и линии равных расходов плазмы и жидкого металла анода при граничных условиях, которые соответствуют условиям вынужденного охлаждения анода. В этом случае на нижней границе анода, в сечении  $z = L$ , задавалось граничное условие  $h = h_{\text{вд}}$ , где  $h_{\text{вд}}$  - температура охлаждающей анод жидкости.

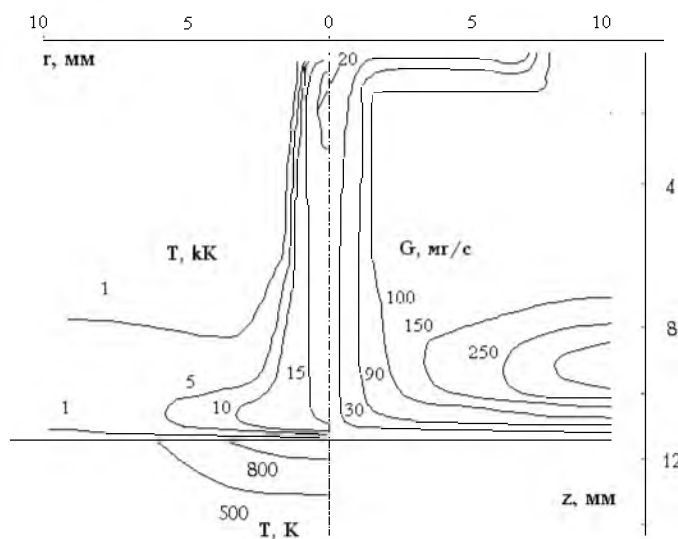


Рис. 3. Поля температур и линии равных расходов.

Сечение выбиралось таким образом, чтобы толщина анода  $L_a = 2\text{ мм}$ .

Как видно из рисунка, в этом случае изотермы столба дуги в области анода более поджаты к оси и в теле анода нет расплавленного металла. Вследствие более холодной температуры анода, возрастают градиенты температуры у поверхности анода в аксиальном направлении и увеличиваются в центральной части потоки тепла в анод за счет теплопроводности (рис.4). На периферийной области, из-за уменьшения радиальных размеров дуги, наоборот, потоки тепла уменьшаются.

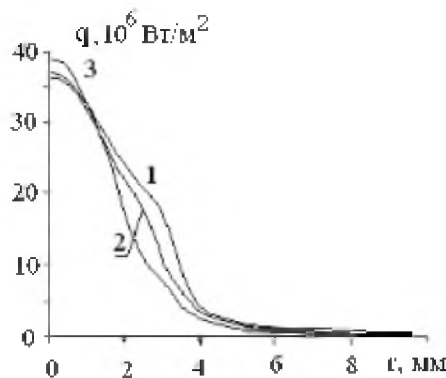


Рис.5 Потоки тепла в анод. 1 – свободный теплообмен, 2 – незначительный теплообмен, 3 – вынужденное охлаждение.

### Список литературы.

1. Математическое моделирование электрической дуги. / Под ред. В.С. Энгельшта. Фрунзе: Илим, 1983, с.364.
2. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1975, с.298.
3. Теория термической электродуговой плазмы / Под ред. М.Ф.Жукова, А.С.Коротеева. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987, с.311.
4. Низкотемпературная плазма. Новосибирск: Наука, 1990, с. 365.
5. Теория термической электродуговой плазмы. Ч.1 /Под ред. М.В.Жукова. - Новосибирск: Наука, Сиб.отделение, 1987, с.287.
6. Урюков Б.А., Хайтман С.М. Начальный участок электродугового плазматрона //Изв. СО АН СССР. Сер. Техн.наук, 1974, №2, вып.2, с.94-120.
7. Жайнаков А., Лелевкин В.М., Энгельшт В.С. Нагрев и течение проводящего потока газа. // Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 5.- с.190-193.
8. Назаренко И.П., Паневин И.Г. Расчет характеристик стабилизированных дуг с учетом переноса излучения и отрыва температур // Моделирование и методы расчета физико-химических процессов в низкотемпературной плазме. М.: Наука, 1974, с.86-106.
9. Применение магнитной гидродинамики в металлургии и литейном производстве. Киев: Наукова думка, 1981, с.
10. Повх И.Л. Магнитная гидродинамика в металлургии. М.: Наука, 1974.
11. D. Rosenthal, Welding Journal. 1941. vol. 20. pp. 220-234.
12. O.T.F. Roberts, Proc. R. Soc. London, 1923, A 104, pp 640-654.

13. Zacharia, T., S.A. David, J.M. Vitek and T. Debroy, *Welding Journal*. 68, 499-s to 509-s (1989).
14. Sundell, R.E., H.D. Solomon and S.M. Correa, “Advances in Welding Science and Technology,” ed. S.A. David, pp. 53-57, ASM International, Materials Park, OH (1986).
15. Operer, G.M., T.W. Eagar and J. Szekely, *Welding Journal*. 62, 307-s to 312-s (1983).
16. Kou S. and Y.H. Wang. *Welding Journal*. 65, 63-s to 70-s (1986).
17. Kou S. and D.K. Sun. *Metall. Trans. A* 16A, 203-213 (1985).
18. S. Kou and D.K. Sun. *Fluid Flow and Weld Penetration in Stationary Arc Welds*. Metallurgical transactions A. Vol 16A., 1985 pp. 203-213.
19. Jainakov A., Usenkanov J.O., Valeeva A.A Mathematical modeling of fluid flow in welding pool at high currents // *Journal of high temperature chemical processes*. Paris, France, № 3, Vol 11, 1992, p.38-40.