

## References

1. Mathematical modeling of electrical arc. Engelsht. Frunze, 1983
2. Jainakov A., Usenkanov J., Sultangazieva R. On joint modeling of processes in electrica arc plasma and melted metal. 6 general assembly of federation of engineering institutions of Islamic countries, 27-30 June-1999, Almaty
3. M.Sschnick, U.Ffuessel, M.Hhertel, M. Haessler, A. Spille-Kohoff, A.B.Murphy Modelling of gas-metal arc welding taking into account metal vapour. Journal of Physics D: Applied Physics 43, 43 (2010) 434008
4. (Menart J, Lin L. Numerical study of a free-burning argon arc with copper contamination from the anode. Plasma Chem. & Plasma Process. 1999; 19(2):153–170.
5. Pressure of chemical elements vapor/ Nesmejanov A.N., M.: Publish AN SSSR, 1961, s.396.

УДК 621.791

### ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА МАРАНГОНИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СВАРОЧНОЙ ВАННЕ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ

*Султангазиева Р.Т., Медралиева Б. Н. к.ф.-м.н., доцент, и.о. доц. КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан. 720044 г.Бишкек пр.Мира 66, e-mail: [renasultangazieva@mail.ru](mailto:renasultangazieva@mail.ru), [medralieva@mail.ru](mailto:medralieva@mail.ru)*

В работе представлены результаты численного моделирования влияние эффекта Марангони на параметры различных металлов при электродуговой сварке. Рассчитан коэффициент поверхностного натяжения стали. В качестве обрабатываемого изделия использованы стальная и алюминиевая пластины. Изучено влияние силы тока на гидродинамические процессы сварочной ванны. Дан сравнительный анализ воздействия силы Марангони на потоки расплавленного металла стали и алюминия.

**Ключевые слова:** электродуговая плазма, МГД уравнения, сварочная ванна, термокапиллярная конвекция, эффект Марангони, вихрь-функция тока

### INFLUENCE OF MARANGONI EFFECT TO THE HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE WELD POOL DURING ARC WELDING

*Sultangazieva R.T., Medralieva B.N. . PhD, Associate Professor, docent, K S T U named after I.Razzakov, Kyrgyzstan. 720044 c. Bishkek, p.Mira 66, e-mail: [renasultangazieva@mail.ru](mailto:renasultangazieva@mail.ru), [medralieva@mail.ru](mailto:medralieva@mail.ru)*

In work results of numerical modeling influence of effect of Marangoni on parameters of various metals at arc welding are presented. The coefficient of a superficial tension of steel is calculated. As the processed product steel and aluminum plates are used. Influence of current on hydrodynamic processes of a welding bathtub is studied. The comparative analysis of impact of strength of Marangoni on streams of the melted metal of steel and aluminum is given.

**Keywords:** electric arc plasma, MHD equations, weld pool, thermocapillary convection, Marangoni effect, the vortex-flow function

Электродуговая сварка является весьма сложным физико-химическим и металлургическим процессом, в ходе которого металл шва и околошовная зона претерпевают фазовые превращения и структурные изменения, что, в свою очередь, влияет на физико-механические характеристики материала. Моделирование процессов в электрической дуге, обрабатываемом изделии, а также процессы их взаимного влияния, целесообразно для оптимизации параметров режима сварки и получения сварных соединений с улучшенными качественными характеристиками.

В работе [1-2] предлагается модель совместного рассмотрения области электродуговой плазмы и обрабатываемого изделия. Физические процессы в столбе электродугового разряда и взаимодействующего с этим разрядом жидкого металла описываются одной и той же системой уравнений магнитной гидродинамики. При записи МГД уравнений в наиболее простом виде предполагается, что в электродуговом разряде выполняются следующие условия: среда является сплошной, между скоростью деформации и напряжением существует линейная связь, течение газа ламинарное, выполняется условие локального термодинамического равновесия, излучение ионизированного газа объемное, течения ламинарные. Система МГД уравнений в цилиндрических координатах имеет вид:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0$$

Уравнения движения для радиальной составляющей:

$$\rho v \frac{\partial v}{\partial r} + \rho u \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} - j_z B_\varphi + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2\mu \frac{v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{2}{3} \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (rv)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right)$$

Уравнения движения для аксиальной составляющей:

$$\rho v \frac{\partial u}{\partial r} + \rho u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + j_r B_\varphi + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{2}{3} \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial vr}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + S_u$$

Закон сохранения энергии

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho v h - \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho u h - \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{1}{\sigma} (j_r^2 + j_z^2) + S_h$$

Уравнения Максвелла

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r H_\varphi}{\partial r} = j_z, \quad \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = j_r$$

Закон Ома

$$j_r = \sigma E_z, \quad j_z = \sigma E_r$$

Система дополняется зависимостями теплофизических коэффициентов плазмообразующего газа и расплавленного жидкого металла изделия от температуры и давления.

$$\rho = \rho(T, P), \sigma = \sigma(T, P), \lambda = \lambda(T, P), \mu = \mu(T, P),$$

$$c_p = c_p(T, P), h = h(T, P), \psi = \psi(T, P)$$

Использованы следующие обозначения:  $v$  – радиальная скорость,  $u$  – аксиальная скорость,  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $j$  – плотность тока,  $E$  – напряженность электрического тока,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $\rho$  – плотность,  $\sigma$  – электропроводность,  $\lambda$  – теплопроводность,  $\mu$  – вязкость,  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении,  $h$  – энтальпия,  $\psi$  – излучательная способность

В уравнении движения:

$$S_u = \begin{cases} 0 & \text{для дуги} \\ \rho g - \rho g \beta (T - T_0) & \text{для ванны} \end{cases} \quad \beta - \text{коэффициент термического расширения.}$$

Данное слагаемое обусловлено суммой силы инерции и выталкивающей силы в сварочной ванне в приближении Буссенака. Высокие температурные градиенты, которые имеют место в сварочной ванне, могут вызвать естественный поток конвекции из-за зависимости плотности расплавленного металла от температуры.

В уравнении энергии слагаемое  $S_h$  учитывает потери тепла на плавление. В сварочной ванне жидкая фракция  $f_L$  меняется линейно от температуры (s-твердая фракция)

$$f_L = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases}$$

Энтальпия связана с удельной энтальпией формулой  $h = c_p T + f_L H_f$

В объеме сварочной ванны радиусом  $R$  и глубиной проплавления  $h$ , форма которой определяется изотермой плавления  $T_{plav}$ , находится жидкий металл, поведение которой описывается МГД уравнениями. Форма поверхности жидкого металла является плоской. Основными причинами, определяющими движение металла в сварочной ванне считаем:

-вязкие силы между радиально растекающимся у поверхности металла потоками плазмы и жидким металлом;

-тепловая конвекция, возникающая в неравномерно нагретых жидкостях;

-термокапиллярная конвекция (эффект Марангони), вызванная зависимостью коэффициента поверхностного натяжения жидкости от температуры;

-собственное магнитное поле протекающего через металл электрического тока.

Система МГД уравнений (1) решается в переменных «вихрь-функция тока»[3]:  $\omega$  – напряженность вихря,  $\psi$  – функция тока,  $\chi$  – функция электрического тока, которые в случае цилиндрической системы координат и осевой симметрии определяются соотношениями:

$$\omega = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right);$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} = \rho u r, \quad -\frac{\partial \psi}{\partial z} = \rho v r;$$

$$\frac{\partial \chi}{\partial r} = r j_z, \quad -\frac{\partial \chi}{\partial z} = r j_r;$$

Для решения полученной системы дифференциальных уравнений необходимо задать граничные условия по всему контуру, охватывающему расчетную область.

Схема расчетной области представлена на рис.1. Неплавящийся катод представляет собой цилиндр с плоским торцом, анодом служит обрабатываемое изделие, система находится в замкнутом объеме, ограниченная боковыми стенками на расстоянии  $R$ , плазмообразующим газом служит аргон.

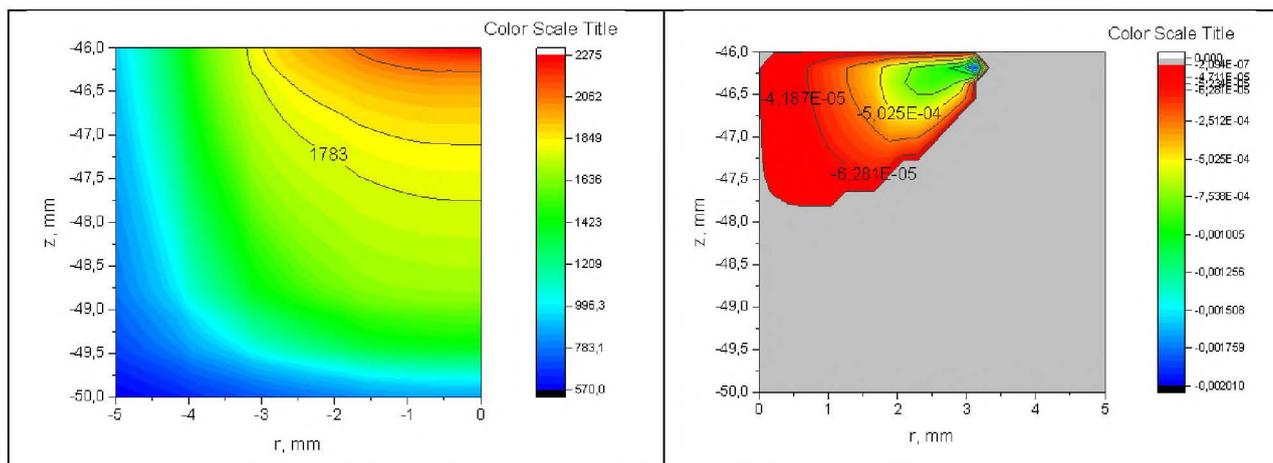


Рис.2 Изотермы и линии равных расходов расплавленной стали, I=150 А

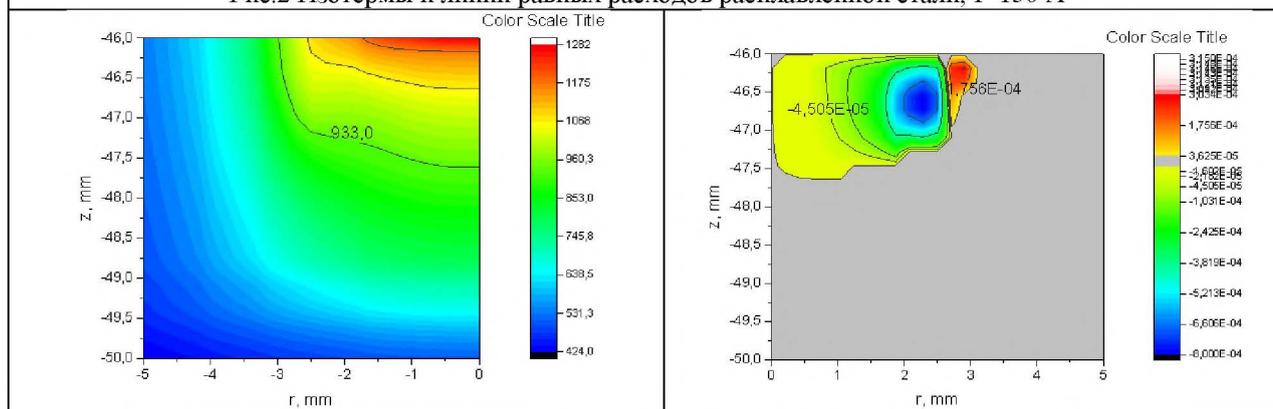


Рис.3 Изотермы и линии равных расходов расплавленного алюминия, I=150 А

Свойства обрабатываемого изделия дают заметное влияние на гидродинамическую обстановку в сварочной ванне.

В случае стали, растекающиеся радиально у поверхности жидкого металла поток плазмы вследствие вязкого взаимодействия и термокапиллярной конвекции, вовлекает в радиальное движение верхние слои жидкого металла и вызывает во всем объеме сварочной ванны вихрь, центр которого смещен в направлении движения потока расплавленного металла.

Для алюминиевой пластины в объеме сварочной ванны, у ее краев, образуется дополнительный вихрь обратного направления, вовлекающий в движение столько же металла, сколько и в основном вихре. Так как интенсивность перемешивания металла в малом вихре очень высока, этот вихрь несет мощный поток тепла вглубь ванны, что приводит к дополнительному плавлению основного металла у краев ванны. Таким образом, проплавление металла приобретает грибовидную форму с некоторым углублением в корне. При силе тока в 150 А форма проплавления металла имеет менее ярко выраженное углубление в корне. С увеличением силы тока грибовидная форма проплавления становится более наглядной.

Данное различие вызвано особенностями зависимости коэффициента поверхностного натяжения стали и алюминия от температуры, то есть воздействием силы Марангони, которая определяется следующим выражением:

$$F_m = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

В таблице 1 приведены глубина проплавления  $H_v$  и радиус сварочной ванны  $R_v$  для стальной и алюминиевой пластин. Для алюминия глубина проплавления ванны при увеличении силы тока со 150А до 250А увеличивается, а дальнейшее увеличение силы тока до 300А, наоборот приводит к уменьшению глубины проплавления и большему растеканию ванны в радиальном направлении. Это связано с возросшей ролью эффекта Марангони по сравнению с электромагнитной силой. Подобное явление наблюдается и для стали: при возрастании тока с 200А до 250А глубина проплавления стальной ванны практически не меняется при относительно высоком увеличении радиуса ванны. Дальнейшее увеличение силы тока приводит к увеличению электромагнитной силы и увеличению проплавляющей способности электрической дуги.

**Выводы:** Термокапиллярная конвекция на границе «плазма-расплавленный металл» ухудшает проплавляющую способность дуги, что приводит к необходимости принятия специальных мер по изменению зависимости коэффициента поверхностного натяжения и его градиента от температуры. Одним из таких мер является использование поверхностно активных веществ.

Таблица 1. Геометрические параметры сварочной ванны

	Стальная пластина		Алюминиевая пластина	
	Hv (мм)	Rv (мм)	Hv(мм)	Rv (мм)
I=150A	0,8	2,8	0,9	3
I=200A	1	3,7	1,3	5,25
I=250A	1,5	5	1,3	6
I=300A	1,3	6	1,7	8,5
I=350A	1,4	6,5	1,7	9

#### Список литературы

1. A.Jainakov, J.Usenkanov, R.Sultangazieva "On joint modeling of processes in electrica arc plasma and melted metal", 6 general assembly of federation of engineering institutions of Islamic countries, 27-30 June-1999, Almaty
2. Жайнаков А.Ж., Султангазиева Р.Т., Усенканов Дж.О. "О влиянии термокапиллярной конвекции на параметры расплавленного электрической дугой металла", Доклады 3 традиционной казахстанско-российской научно-практической конференции «Математическое моделирование научно-технологических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности», 19-20 сентября 2000, Алматы
3. Математическое моделирование электрической дуги./Под ред. В.С.Энгельшта, Фрунзе, 1983
4. Keene, B. J. Review of data for the surface tension of pure metals, International Materials Reviews 38(4), 157-192. 1993

#### References

1. A.Jainakov, J.Usenkanov, R.Sultangazieva "On joint modeling of processes in electrica arc plasma and melted metal", 6 general assembly of federation of engineering institutions of Islamic countries, 27-30 June-1999, Almaty
2. Jainakov A, Sultangazieva RT, Usenkanov JO "The effect of thermocapillary convection on the parameters of the molten metal arc" Reports 3 traditional Kazakh-Russian scientific-practical conference "Mathematical modeling of scientific-technological and ecological problems in oil and gas manufactory", September 19-20, 2000, Almaty
3. Mathematical modeling of electric arc. / Ed. VS Engelshta. -Frunze 1983.
4. Keene, B. J. Review of data for the surface tension of pure metals, International Materials Reviews 38(4), 157-192. 1993

УДК 621.7

### К РАСЧЕТУ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МКЭ

*Н.Маер, Н.Акматава, М.Чыныбаев*

*Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова, Кыргызская Республика, 720044, г. Бишкек, пр. Мира 66, maer\_n@mail.ru*

В данной статье приводятся результаты численного моделирования процесса упругого нагружения толстостенной трубы известных размеров с целью обеспечить лучшее понимание распределения напряжений возникающих при высоких давлениях. Моделирование методом конечных элементов задачи автофреттирования позволяет решать более широкий спектр практических задач по сравнению с аналитическими методами. В работе приведены результаты расчетов напряжений в упругой области до процесса автофреттирования с целью сопоставить результаты аналитических расчетов и значений, полученных при помощи метода конечных элементов (МКЭ) для оценки границ применения этого метода.

**Ключевые слова:** толстостенные трубы, напряжение, метод конечных элементов

### THICK-WALLED PIPES CALCULATION USING FEM

*N.Maer, N.Akmatova, M.Chynybaev*

*Kyrgyz State Technical University, Kyrgyz Republic, 720044, Bishkek, Mira avenue 66, maer\_n@mail.ru*

This article presents the results of numerical modeling of elastic loading thick-walled pipe of known dimensions to ensure a better understanding of the distribution of stresses encountered at high pressures. Finite element modeling problem of autofrettage solves a wide range of practical problems than analytical methods. The results of calculations of stresses in the elastic region before the process of autofrettage. In order to compare the results of analytical calculations and the values obtained using the finite element method (FEM) to evaluate the boundaries of this method.

**Keywords:** the thick-walled pipes, tensions, method of eventual elements