

сопоставимой с величиной продольной деформации, иначе говоря, при этом возникает почти плоско-пластическая деформация.

**Заключение:** Таким образом, механизм разрыхления на допределельной [2, 5] и запределельной [1, 6, 7] ветвях полной диаграммы всё-таки отличается, а именно: за пределом прочности преобладает механизм скольжения. Это, в свою очередь, приводит к разделению образца на части при достижении предела остаточной прочности.

#### Список литературы

1. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах/ А.Н Ставрогин, А.Г. Протосеня. - М.: Недра, 1985. – 271 с.
2. Рычков Б.А. О деформационном упрочнении горных пород / Б.А. Рычков // Изв. РАН. МТТ, 1999. – №2. – С. 115-124.
3. Новожилов В.В. О пластическом разрыхлении/ В.В. Новожилов // ПММ. – 1965. – Т. 29. – Вып. 4. – С. 681– 689.
4. Рыбакина О.Г. Экспериментальное исследование закономерностей пластического разрыхления металлов/ О.Г. Рыбакина, Я.С. Сидорин // Инженерный журнал. МТТ. – 1966. – № 5. – С. 103–111.
5. Рычков Б.А. О пределах упругости и прочности горных пород/ Б.А. Рычков, Н.М. Комарцов, Т.А. Лужанская // Вестник ПНИПУ. – 2013. - №2. - С. 110-123.
6. Ставрогин А.Н. Пластичность горных пород/ А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня – М.: Недра, 1979.
7. Тарасов Б.Г. Закономерности деформирования и разрушения горных пород при высоких давлениях. Автореферат. дис. На соиск. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1991.

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 влияния 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.

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

$$c_p = c_p(T, P); \quad h = h(T, P); \quad \psi = \psi(T, P).$$

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 уравнениях движения:

$$S_u = \begin{cases} 0 & \text{для дуги,} \\ \rho g - \rho g \beta (T - T_0) & \text{для ванны} \end{cases}$$

$\beta$  – 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 которого описывается МГД уравнениями. Форма поверхности жидкого металла является плоской. Основными причинами, определяющими движение металла в сварочной ванне, считаем:

-вязкие силы между радиально растекающимися 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:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right); \\ \frac{\partial \psi}{\partial r} &= \rho u r, \quad -\frac{\partial \psi}{\partial z} = \rho v r; \\ \frac{\partial \chi}{\partial r} &= r j_z, \quad -\frac{\partial \chi}{\partial z} = r j_r; \end{aligned}$$

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, ограниченном боковыми стенками на расстоянии  $R$ , плазмообразующим газом служит аргон.

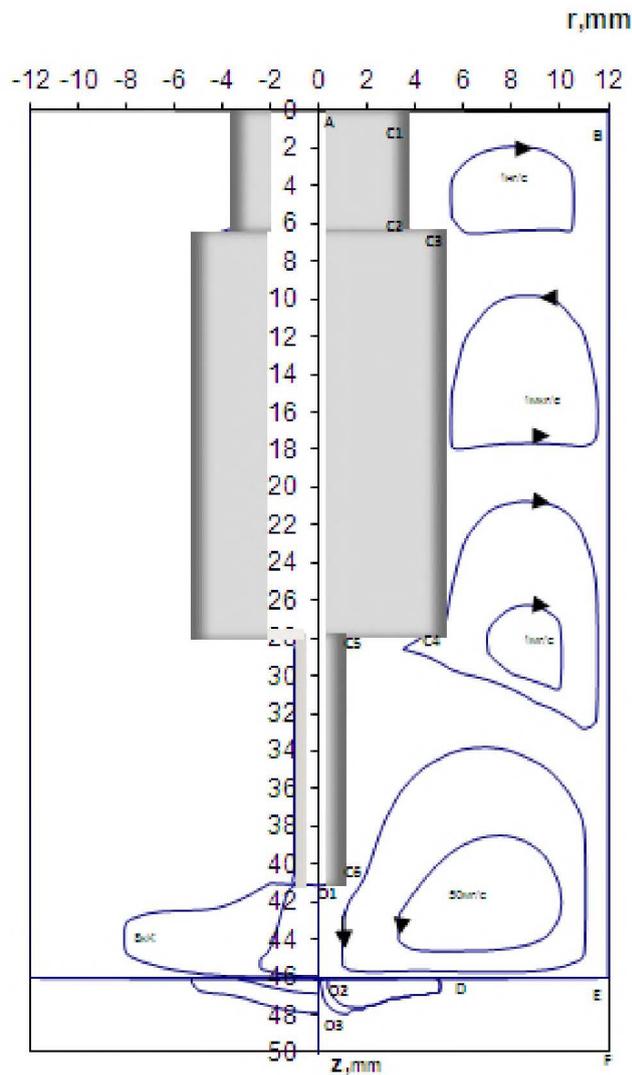


Рис.1 Схема расчетной области

Граничные условия:

	$\omega$	$\psi$	$h, T$	$\chi$
AB	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0$	$\psi = 0$	$T = T_0, h = h(T_0)$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
C1C2, C2C3 C3C4, C4C5 C5C6, BE	$\frac{\partial \psi}{\partial r} = 0$	$\psi = 0$	$T = T_0, h = h(T_0).$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
O1O3 O2O3 O3Z	$\frac{\partial \omega}{\partial r} = 0$	$\psi = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial h}{\partial r} = 0$	$\chi = 0$
O2E	$\mu_p \omega_p = \mu_a \omega_a$ $-\frac{1}{r} \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}$	$\psi = 0$	$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z}$ $-\sigma_\varepsilon \varepsilon (T_a^4 - T_0^4) - W_v h_{fg}$	$\frac{\partial \chi_p}{\partial z} = \frac{\partial \chi_a}{\partial z}$
EF ZF	$w = 0$	$\psi = 0$	$T = T_0, h = h(T_0)$	$\frac{\partial \chi}{\partial z} = 0$

Коэффициент поверхностного натяжения стали определяется по формуле, данной в работе /4/:

$$\alpha = \alpha_{plav} - A_{plav}(T - T_{plav}),$$

где  $\alpha_{plav} = 1,862 \frac{H}{M}$  - поверхностное натяжение при температуре плавления железа, коэффициент  $A_{plav} = 3,9 * 10^{-4} \frac{H}{M * K}$

Данная задача решена для двух случаев - в качестве обрабатываемого изделия использована стальная пластина, во втором случае – алюминиевая пластина при сохранении всех остальных параметров.

На рис.2-3 представлены графики линий равных расходов стали и алюминия в сварочной ванне для I=150 А.

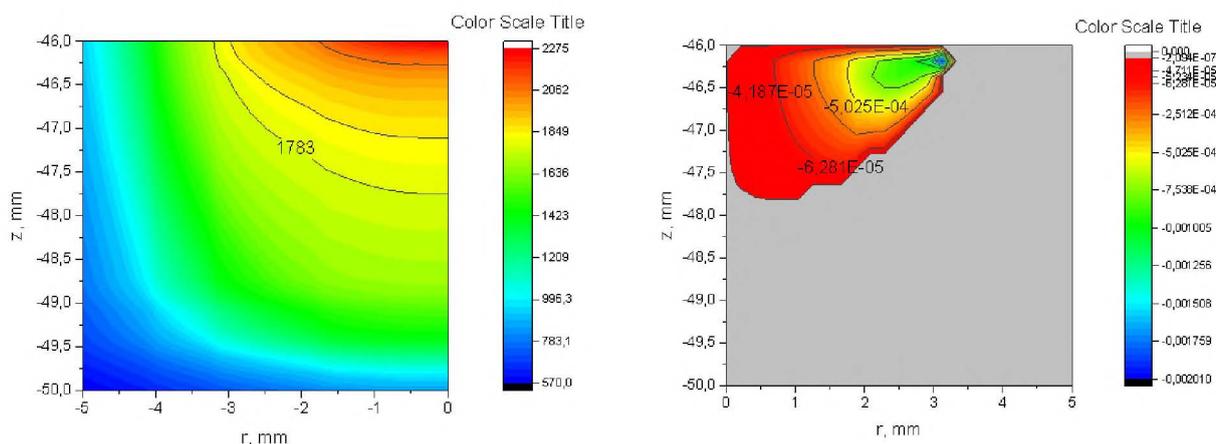


Рис.2 Изотермы и линии равных расходов расплавленной стали, I=150 А

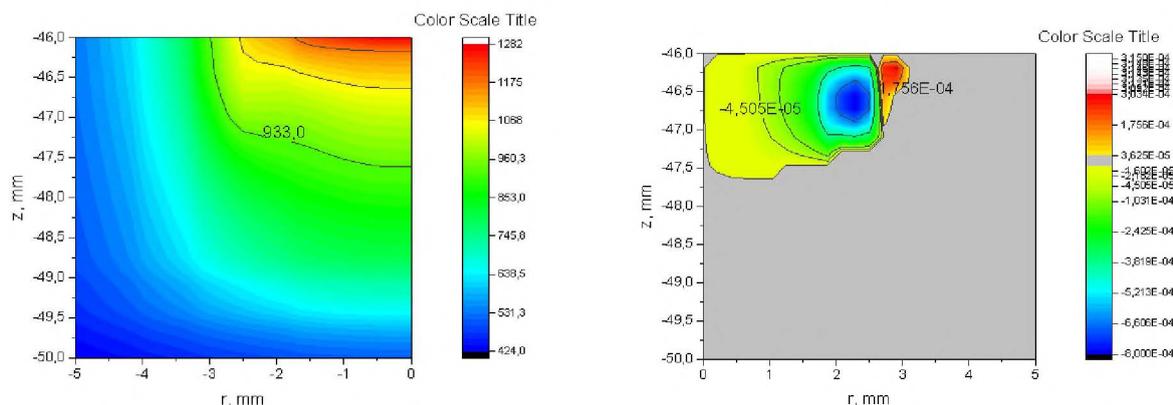


Рис.3 Изотермы и линии равных расходов расплавленного алюминия, I=150 А

Свойства обрабатываемого изделия заметно влияют на гидродинамическую обстановку в сварочной ванне.

В случае стали растекающийся 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 150 А до 250 А увеличивается, а дальнейшее увеличение силы тока до 300 А, 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 200 А до 250 А 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	
	$H_v$ (мм)	$R_v$ (мм)	$H_v$ (мм)	$R_v$ (мм)
I=150 А	0,8	2,8	0,9	3
I-200 А	1	3,7	1,3	5,25
I=250 А	1,5	5	1,3	6
I=300 А	1,3	6	1,7	8,5
I=350 А	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

УДК 621.791

### О ВЛИЯНИИ ПАРОВ МЕТАЛЛА СВАРОЧНОЙ ВАННЫ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ

*Султангазиева Р.Т., Аманкулова Н.А. к.ф.-м.н., доцент, ст. преп. КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан. 720044 г.Бишкек пр.Мира 66, e-mail: [renasultangazieva@mail.ru](mailto:renasultangazieva@mail.ru), [a\\_nur4@mail.ru](mailto:a_nur4@mail.ru)*