

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ**  
**NUMERICAL SIMULATION FOR THE ELECTRIC ARC WELDING IN THE CLOSED VOLUME**

*Макаланын максаты - ширетүүчү ваннадагы эритилген темир менен электрдик жаачанын өз ара айкалышынын кошулуу моделин өнүктүрүү. Бул эмгекте жабык көлөмдөгү электрдик ширетүү учурундагы ар кандай темирлердин параметрлерине Марангони натыйжасынын таасирлеринин моделдөөсүнүн сандык жыйынтыктары берилген. Темирдик беттик чыңалуусунун коэффициенттери эсептелинип чыкты. Иштетүү буюмдары катары болот жана алюминий колдонулду. Марангони күчүнүн эритилген болот менен алюминий агымына таасирине салыштырмалуу талдоо берилди.*

***Ачык сөздөр:** электр жаалык плазма, МГД теңдемелер, ширетүүчү ванна, жылуулук капиллярдык конвекция, Марангони натыйжасы, токтун куюн-функциясы.*

*Цель статьи – развитие интегрированной модели взаимодействия электрической дуги и расплавленного металла сварочной ванны. В работе представлены результаты численного моделирования влияния эффекта Марангони на параметры различных металлов при электродуговой сварке в замкнутом объеме. Рассчитан коэффициент поверхностного натяжения стали. В качестве обрабатываемого изделия использованы стальная и алюминиевая пластины. 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*

*Purpose of the article is the development of an integrated model of interaction of electric arc and molten weld pool. There are results of numerical modeling of the influence of Marangoni effect on the parameters of various metals at me-arc welding in the closed volume in the work. In this work calculated the coefficient in surface tension steel. As the work piece are used steel and aluminum plate. In this work are given comparative analysis of the impact forces of Marangoni flows of molten metal in steel and aluminum.*

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

Электродуговая сварка металлов широко применяется в современной индустрии и является важным технологическим процессом во многих областях промышленности. 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. Параметры электродуговой плазмы, термодинамические характеристики и коэффициенты переноса плазмообразующего и защитного газа, режимы сварки, наличие активирующих веществ, все это, тем или иным образом влияет на конечный результат процесса – свойства сварного шва. Характеристики сварного шва (размеры, форма, микроструктура и т.д.) в значительной степени также зависят от характера потоков расплавленного металла сварочной ванны. Сварочная ванна образуется за счет проплавления присадочного и основного металлов. Кристаллизация жидкого металла начинается с неполностью оплавленных зерен основного металла. При движении источника теплоты вдоль обрабатываемого материала условия формирования интерфейса

«проплавленный металл-шов-основной металл» играют заметную роль в формировании качественного шва.

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 [1,5] 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 выполнение следующих условий: среда является сплошной, между скоростью деформации и напряжением существует линейная связь, течение газа ламинарное, выполняется условие локального термодинамического равновесия, излучение ионизированного газа объемное. Система МГД уравнений в цилиндрических координатах имеет вид [2]:

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:

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

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

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0 \tag{1}$$

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

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.

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(T, P), \sigma = \sigma(T, P), \lambda = \lambda(T, P), \mu = \mu(T, P), \\ c_p &= c_p(T, P), h = h(T, P), \psi = \psi(T, P) \end{aligned} \tag{2}$$

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:

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

$\beta$  – 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. Оно показывает поведение удельной теплоты плавления во время изменения фаз: теплота поглощается во время плавления, то есть при изменении твердой фазы к жидкой, и высвобождается в процессе затвердевания.

$$S_h = -\nabla \rho V \Delta H, \Delta H = H_f, H_f - \text{удельная энтальпия} \quad (3)$$

$$H_f = \begin{cases} L & T > T_l \\ f_l L & T_s < T < T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases}$$

где  $L$ -удельная теплота плавления металла анода.

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  $h = C_p T + f_l H_f$

Скрытая теплота выделяется или поглощается, когда материал претерпевает фазовые изменения. Эти изменения могут произойти резко при одной температуре - т.е. при температуре плавления  $T_{plav}$ , или в течении некоторого температурного интервала от температуры твердой фазы  $T_s$  до температуры жидкой фазы  $T_l$  (Рис.1.). Данный участок – участок твердо-жидкого состояния; на этом участке зоны происходит формирование шва на частично оплавленных зернах основного металла. Участок имеет небольшую ширину, по своему составу и структуре он отличается от соседнего участка основного металла. За время контакта жидкой и твердой фаз в нем протекают диффузионные процессы, и развивается химическая неоднородность. Именно на этом участке часто образуются трещины, ножевая коррозия, усталостные разрушения при вибрационной нагрузке, хрупкие разрушения и т. п. Ширина переходной зоны зависит от природы источника нагрева, теплофизических свойств, состава и толщины основного металла, режима сварки и других факторов.

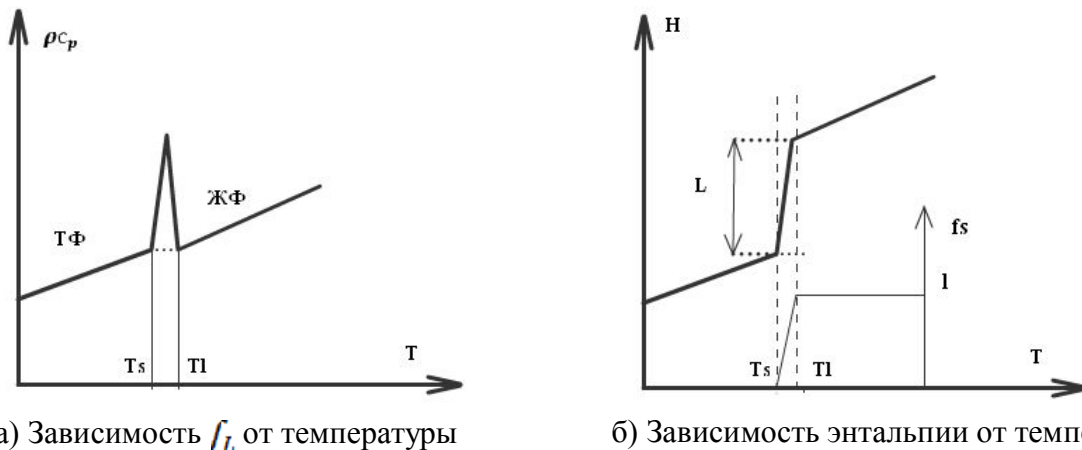


Рис.1. График жидкой фракции сварочной ванны

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, 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 в случае осевой симметрии определяются соотношениями:

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

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

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

Введенные новые переменные  $\psi$  и  $\chi$  удовлетворяют уравнениям неразрывности и сохранения заряда. В новых переменных исходная система запишется в следующем каноническом виде:

$$a \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \varphi \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \varphi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ b \frac{\partial}{\partial z} (c\varphi) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ b \frac{\partial}{\partial r} (c\varphi) \right] + e r = 0;$$

где  $\varphi$  – искомая функция, принимающая значения  $\omega, \psi, h$  и  $\chi$ , a, b, c, e – нелинейные коэффициенты, соответствующие каждому из уравнений. Единая форма записи позволяет при решении системы уравнений использовать один и тот же алгоритм расчета. Для решения полученной системы дифференциальных уравнений необходимо задать граничные условия для данных функций. Поскольку уравнения системы являются уравнениями эллиптического типа, то граничные условия должны быть заданы 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.

Постановка граничных условий для столба дуги не вызывает затруднений, так как подобные задачи решались неоднократно.

1) На боковой границе катода: для функции тока выполняется условие непроницаемости  $\psi = 0$ , функция  $\omega$  определяется из условия прилипания, температура принимается равной  $T_0 = 300\text{K}$ , тем самым определяется  $h = h(T_0)$ . Функция электрического тока  $\chi = \frac{I}{2\pi}$ .

2) На торце катода: Функция тока:  $\psi = 0$ ; Функция  $\omega$  определяется из условия:  $\frac{\partial \psi}{\partial r} = 0$ ; Распределение температуры у торца катода задается следующим распределением:  $T_k(r) = (T_{\text{кип}} - T_0) \left(1 - \frac{r}{R_k}\right)^m \left(1 + \frac{r}{R_k} m\right) + T_0$ ,  $T_{\text{кип}}$  - температура кипения катодного материала, m - степень заполнения профиля температуры. Функция электрического тока  $\chi_k = \frac{I}{2\pi \int_0^{R_k} \sigma r \partial r} \times \int_0^r \sigma r \partial r$ ,  $R_k$  – радиус катодного пятна.

3) На боковой границе плазматрона:

$$\psi = 0; \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0; \quad h = h(T_0); \quad \chi = \frac{I}{2\pi};$$

4) На оси столба дуги выполняются условия симметрии:

$$\psi = 0; \quad \frac{\partial \omega}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial h}{\partial r} = 0; \quad \chi = 0;$$

Граничные условия для напряженности вихря задавались в точке, отстоящее на один шаг от твердой границы, что позволило избежать неоднозначности задания граничных условий в угловых точках и обеспечить устойчивую сходимость решения на прямоугольной сетке для границы любой формы.

5) Границу «дуга-анод» считаем горизонтальной линией раздела двух вязких несмешивающихся жидкостей:  $\psi = 0$ ; Для переменной «напряженность вихря»

учитывается вязкое взаимодействие потоков электрической дуги со сварочной ванной и эффект Марангони:

$$\mu_p \frac{\partial v_p}{\partial z} = \mu_a \frac{\partial v_a}{\partial z} - f_l \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad \text{т.е.:} \quad \mu_p w_p r - \mu_a w_a r - f_l \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r};$$

где индекс "р" относится к дуговой плазме, индекс "а" –к материалу анода.

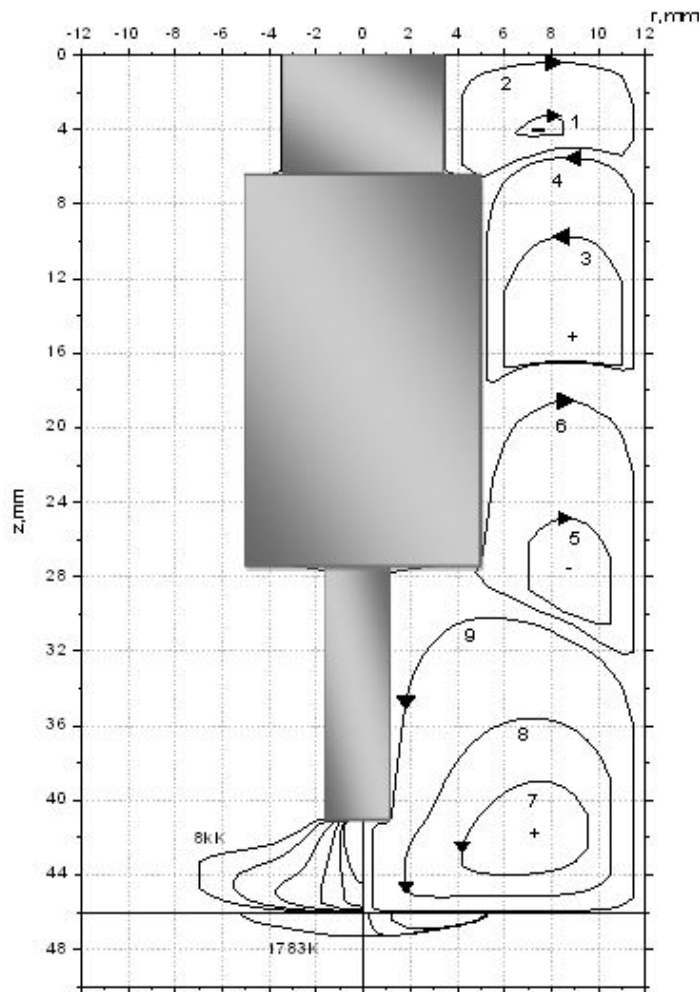


Рис.2. Схема расчетной области, линии равных расходов газа

При постановке граничных условий для температуры учитывается, что тепловые потери с поверхности сварочной ванны включают радиационные потери и потери на испарение:

$$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} - \sigma_\varepsilon \varepsilon (T_a^4 - T_0^4) - W_v h_{fg}$$

где  $\sigma_\varepsilon$  - коэффициент Стефана-Больцмана,  $\varepsilon$  - излучательная способность вещества,  $h_{fg}$  - удельная теплота испарения,  $W_v$  - скорость испарения, которая находится из следующего приближения:

$$\log W_v = A_v + \log I_{atm} - 0,5 \log I$$

$A_v$  – постоянная, зависящая от материала обрабатываемого изделия [9].

Линии электрического тока подходят нормально к границе раздела фаз:  $\frac{\partial \chi_p}{\partial z} = \frac{\partial \chi_a}{\partial z}$ ;

- 1) На нижней границе обрабатываемого изделия:

$$\psi = 0; \quad w = 0; \quad h = h(T_0); \quad \frac{\partial \chi}{\partial z} = 0;$$

- 2) На боковой границе обрабатываемого изделия:

$$\psi = 0; \quad w = 0; \quad h = h(T_0); \quad \chi = \frac{I}{2\pi};$$

Среди гидродинамических процессов, происходящих в жидкой фазе сварочной ванны значительный интерес представляет эффект Марангони, то есть движение жидкости, вызванное зависимостью поверхностного натяжения от температуры. Возникновение градиента поверхностного натяжения может быть вызвано градиентом концентрации активирующих веществ или градиентом температуры. В последнем случае такую конвекцию называют термокапиллярной.

В работе [4,8] отмечено, что градиент поверхностного натяжения имеет сильное влияние на направление течений жидкого металла в сварочной ванне. Когда данный коэффициент отрицательный, термокапиллярные потоки направлены от центра ванны к ее краям, увеличивая ширину сварочной ванны. В случае, когда градиент поверхностного натяжения положителен, термокапиллярные течения направлены вглубь ванны, формируя более глубокую, но узкую ванну. Причем сила вязкого трения заметно зависит от химического состава защитного газа. Обычно,  $\frac{\partial \alpha}{\partial T} < 0$  для чистых металлов, но может стать положительной величиной при введении поверхностно активных веществ, таких как сера и кислород.

Ранние математические модели сварочной ванны рассматривали градиент поверхностного натяжения величиной постоянной и равной порядка  $\frac{\partial \alpha}{\partial T} \approx 10^{-4} \frac{H}{M \cdot K}$ .

Поверхностное натяжение чистых металлов линейно снижается с повышением температуры и равно нулю при критической температуре  $T_{кр} = 1,7T_{кип}$ , где  $T_{кип}$  - температура кипения металла при атмосферном давлении [10].

В представленной работе коэффициент поверхностного натяжения определяется по формуле, данной в работе [6,7]:

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

Таблица 1. Данные для расчета коэффициента поверхностного натяжения

	$\alpha_{plav}, \frac{H}{M}$	$A_{plav}, \frac{H}{M \cdot K}$	$T_{plav}, K$
Fe	1,862	$3,9 * 10^{-4}$	1783
Al	0,871	$1,55 * 10^{-4}$	933

Таблица 2. Расчетные данные

	$h_{fg}, \frac{Дж}{кг}$	$\beta, 1/K$	$\varepsilon$	$H_f, \frac{Дж}{кг}$
Fe	$6,2595 * 10^6$	$10^{-4}$	0,9	$2,47 * 10^5$
Al	$1,08 * 10^7$	$2,34 * 10^{-5}$	0,4	$3,93 * 10^5$

Для изучения влияния эффекта Марангони были проведены численные расчеты при токах I=150, 200, 250 и 300А, дуга горит в среде аргона при давлении P=0,1 МПа в замкнутом объеме, при постоянном межэлектродном расстоянии в 5мм. Расчеты проводились для двух вариантов: 1) обрабатываемое изделие – алюминиевая пластина; 2) обрабатываемое изделие – стальная пластина. Данные для расчетов приведены в таблице 1, 2.

На Рис.1. представлены поля равных расходов газа электрической дуги  $1 = -5 * 10^{-14}$ ;  $2 = -1 * 10^{-12}$ ;  $3 = 1 * 10^{-12}$ ;  $4 = -1 * 10^{-10}$ ;  $5 = -1 * 10^{-8}$ ;  $6 = -5 * 10^{-7}$ ;  $7 = 5 * 10^{-5}$ ;  $8 = 2 * 10^{-5}$ ;  $9 = 1 * 10^{-6}$  кг/сек при силе тока I=200А.

В обоих случаях электрическая дуга генерирует цепочку тороидальных газодинамических вихрей, вытянутых между стенкой плазматрона и боковой стенкой катода. Образование тороидального вихря в области столба электрической дуги является результатом совместного действия собственных электромагнитных сил дуги и сил



вязкости газа. В результате вязкого взаимодействия основного вихря с окружающим неподвижным газом образуется следующий вихрь, интенсивность которого во много раз меньше интенсивности первого основного вихря. В свою очередь, меньший вихрь генерирует таким же образом следующий вихрь. Интенсивность вихрей экспоненциально уменьшается по мере удаления от катода. Вследствие расширения дуги от катода электромагнитные силы вовлекают окружающий газ в столб и ускоряют его в направлении к аноду. Поток плазмы набегает на анод и растекается в радиальном направлении, способствуя выносу тепла из приосевой области анода на периферию. Это приводит к сгущению изотерм у анода и вытягиванию их в радиальном направлении, формируя характерную «колокообразную» форму видимой границы дуги. За границу дуги принимаем изотерму  $T=8000\text{K}$ , т.е. границу, которую можно наблюдать визуально при проведении экспериментов в реальном устройстве. Через высокотемпературные области приосевой зоны проходит лишь небольшая часть потока, значительная часть расхода газа приходится на относительно холодные периферийные зоны.

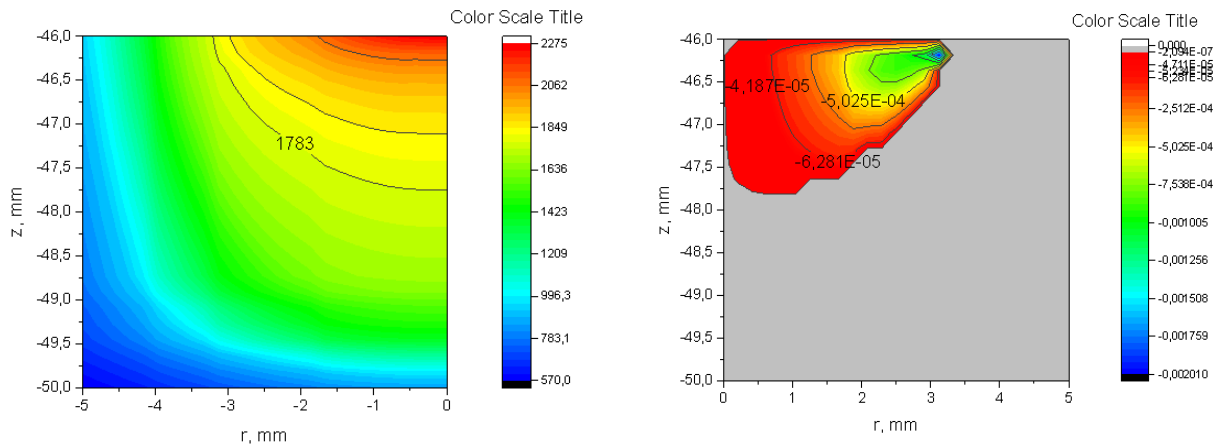


Рис. 2. Изотермы и линии равных расходов расплавленной стали,  $I=150\text{ A}$

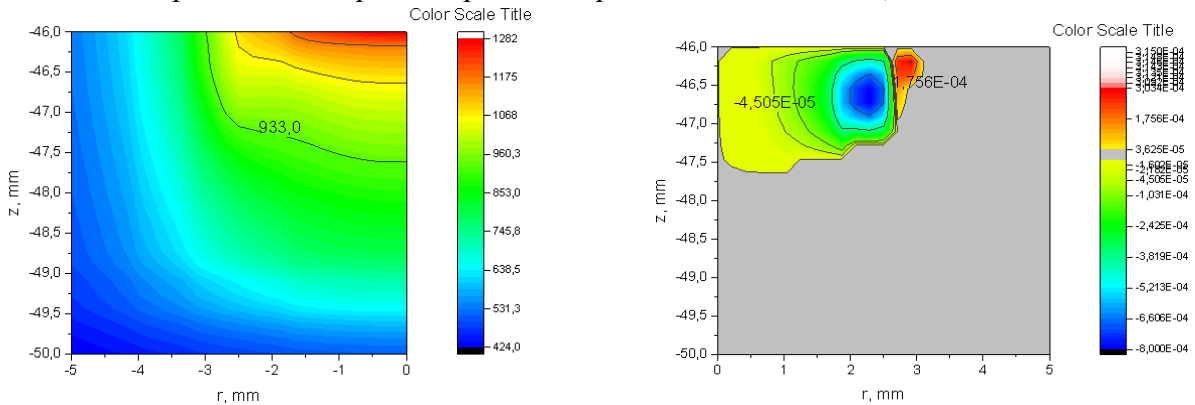
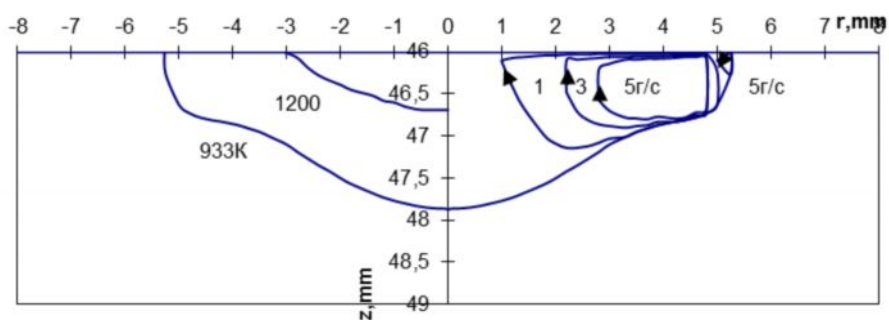


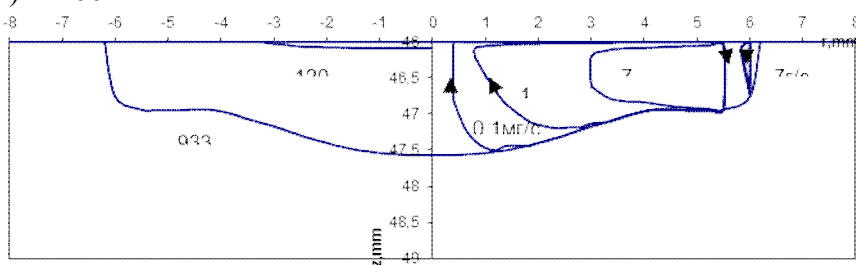
Рис. 3. Изотермы и линии расходов расплавленного алюминия,  $I=150\text{ A}$

На Рис. 2., 3. представлены графики линий равных расходов стали и алюминия в сварочной ванне для  $I=150\text{A}$ . 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, цент которого смещен в направлении движения потока расплавленного металла.



А) I=200А



б) I=300А

Рис. 4. Изотермы и линии потоков расплавленного алюминия

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 (Рис. 4.).

Данное различие вызвано особенностями зависимости коэффициента поверхностного натяжения стали и алюминия от температуры, то есть воздействием силы Марангони, а также соотношением поверхностных и объемных сил в сварочной ванне.

В таблице 3 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. Таким образом, 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 3. Геометрические параметры сварочной ванны

	Алюминиевая пластина	Стальная 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

**Выводы:** При электродуговой аргоновой сварке алюминиевых и стальных изделий в замкнутом объеме установлены диапазоны силы тока, при которых термокапиллярная конвекция играет доминирующую роль. Дальнейшее увеличение силы тока не приводит к увеличению глубины проплавления изделия, то есть линейная зависимость коэффициента поверхностного натяжения чистых жидких металлов от температуры ухудшает проплавляющую способность электрической дуги.

### Список литературы

1. Жайнаков А.Ж. “О влиянии термокапиллярной конвекции на параметры расплавленного электрической дугой металла” [Текст]: Доклады 3 традиционной казахстанско-российской научно-практической конференции «Математическое моделирование научно-технологических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности»/ А.Ж. Жайнаков, Р.Т. Султангазиева, Дж.О.Усенканов. - Алматы: 19-20 сентября 2000. – с.160-167.
2. Математическое моделирование электрической дуги [Текст] / Под ред. В.С. Энгельшта. – Фрунзе: 1983. – 266с.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] Пер. с англ. (1980 г) / под ред. В.Д.Виленского. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
4. Atthey, D. R. A mathematical model for fluid flows in a weld pool at high currents. *Journal of Fluid Mech.* 98 (4), 1980.
5. 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
6. Hatch J. E. Aluminum: Properties and Physical Metallurgy. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1984
7. Keene, B. J. Review of data for the surface tension of pure metals, *International Materials Reviews* 38(4), 157-192. 1993
8. Lowke J. J., Tanaka M., Ushio M. Mechanisms giving increased weld depth due to a flux. *Physics D: Applied physics*, Vol. 38, pp. 3438-3445, 2005.
9. Zacharia T., David S.A., Vitek J.M. Effect of evaporation and temperature-dependent material properties on weld pool development, *Metall. Trans.* 22B 233-241. 1991
10. Wheeler D., Bailey C. Numerical modeling and Validation of Marangoni and Surface Tension Phenomena Using the Finite Volume Method, *Int. J. Num. Methods in Fluids*, 212-B. 1999