

Численный анализ гидродинамических процессов сварочной ванны при электродуговой сварке

А. Жайнаков, Р. Султангазиева, Б. Медралиева

Кыргызский Государственный Технический Университет
пр. Манаса, 66, Бишкек, Кыргызстан
{jainakov-41,renasultangazieva,medralieva}@mail.ru

Аннотация. В данной работе проведен сравнительный анализ математических моделей сварочных ванн при электродуговой сварке, поставлены граничные условия на поверхности сварочной ванны в приближении свободной поверхности ванны и в условиях взаимодействия с потоками электрической дуги, приведены результаты численных расчетов для обоих случаев

Ключевые слова: Электродуговая плазма, МГД уравнения, сварочная ванна, тензор напряжений, термокапиллярная конвекция, эффект Марангони

1 Введение

Сварка металлов широко применяется в современной технике и является одним из самых важных технологических процессов во многих областях промышленности. Во многих случаях сварка – наиболее эффективный или единственно возможный способ создания неразъемных соединений и получения требуемой по геометрии и форме конструкции. Полученное изделие должно не только отвечать конструктивным формам, но и также механическим и физическим свойствам тому назначению и тем условиям эксплуатации, для которых они создаются. 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. Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом обеспечивает высокое качество шва, хотя невысокая проплавливающая способность данного вида сварки в некоторых случаях является заметным недостатком. Сварка аргоном применяется для сварки деталей из легированных сталей цветных металлов, в том числе неповоротных деталей. Аргон тяжелее воздуха и при поддуве аргона в сварочную ванну, последний вытесняется оттуда, что позволяет избежать протекания химических реакций с воздухом в сварочной ванне, к тому же, при сварке в обычной среде сварочная ванна с расплавленным металлом содержит примеси, которые при взаимодействии с воздухом выгорают, оставляют нагар и образуют поры. Также, вместе с аргоном обычно подается около 5% воздуха с кислородом, чтобы сжечь загрязнения, которые могут попасть в сварную ванну извне. Таким образом, аргонодуговая сварка неплавящимся электродом позволяет четко контролировать глубину проплавления металла, получить качественный гладкий сварочный шов, не уступающий по прочности, антикоррозионным и прочим свойствам основному металлу. Компьютерное моделирование процессов сварки позволяет подобрать оптимальные сварочные режимы, уменьшить деформации от нагрева, рассчитать глубину проплавления и профиль сварочной ванны, что позволяет оптимизировать технологический процесс сварки. Вопросы формирования сварного соединения тесно связаны с необходимостью изучения процессов движения металла в сварочной ванне. Быстрое протекание процессов, высокая температура и значительное излучение при сварке обуславливают сложность прямого изучения реальных

процессов. Для адекватного теоретического описания процессов, протекающих при сварке металлических материалов, требуется принимать во внимание сложное взаимодействие различных физических процессов и явлений, связанных с нагревом и плавлением основного материала при воздействии источника нагрева. Взаимодействуют между собой гидродинамические, температурные и электромагнитные поля, а также поля упругих напряжений, обусловленные силой гравитации. Моделирование таких процессов целесообразно для оптимизации параметров режима сварки и получения сварных соединений с улучшенными качественными характеристиками. Процесс проплавления основного материала является конечным результатом теплового и силового взаимодействия технологического источника энергии с обрабатываемым материалом. Характеристики сварного шва (размеры, форма, микроструктура и т.д.) и процессы теплопередачи в твердо-жидком интерфейсе в значительной степени зависят от потока жидкости в сварочную ванну. В результате, чтобы получить хороший прогноз формы шва, а также тепловые циклы и вызванные остаточные напряжения вокруг зоны сварки (где риск перелома является самым высоким), необходимо принимать во внимание развитие формирования сварочной ванны и ее динамику во времени. Глубина проплавления, а также его форма определяется концентрацией вводимой в зону сварки энергией. Для построения наиболее правильной модели необходимо учитывать как катодные явления, так и анодные с учетом слоев диффузионного взаимодействия и пространственного заряда. На основе экспериментальных данных и анализа физических процессов в электрической дуге можно установить характер распределения и параметры регулирования плотности тока на аноде, определить оптимальные условия ведения процесса сварки, которые будут обеспечивать требуемые геометрические и эксплуатационные характеристики сварного соединения.

1.1 Постановка задачи

Долгие годы математическое моделирование электродуговой сварки шло отдельно по двум направлениям: моделирование электрической дуги и моделирование сварочной ванны [1]. В последние годы разработаны модели, которые рассматривают и электрическую дугу и сварочную ванну по единой модели с учетом их взаимодействия между собой. В основе модели лежит система МГД уравнений для всей расчетной области. Схема расчетной области представлена на рис. 1

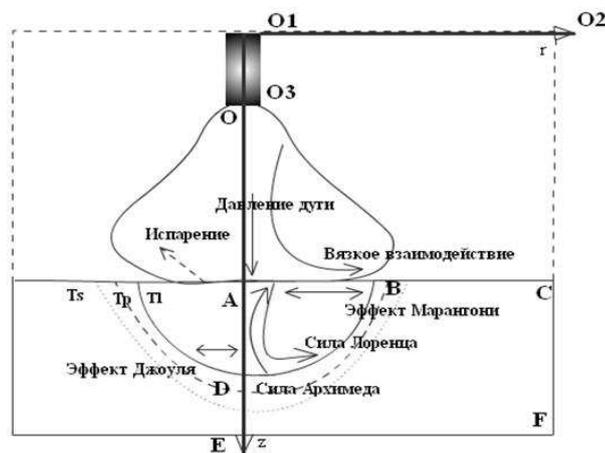


Рис. 1. Схема расчетной области

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. Для сварочной ванны выдвинуты следующие допущения: Процесс сварки ограничивается стационарной точечной сваркой с неплавящимся электродом в замкнутом объеме, течения ламинарные, поскольку размер ванны относительно мал, в предположении жесткой поверхности анода. Другими словами, деформация поверхности сварочной ванны не влияет на расчетные явления переноса. Учитывая, что система осесимметрична $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$, отсутствие внешней закрутки газа и наложенного извне магнитного поля, система МГД уравнений в цилиндрических координатах примет вид:

Уравнение неразрывности:

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

Уравнения движения для радиальной составляющей:

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

Уравнения движения для аксиальной составляющей:

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

Закон сохранения энергии:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho v h - \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho u h - \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{1}{\sigma} (j_r^2 + j_z^2) + S_h \quad (4)$$

Уравнения Максвелла:

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial r H_\varphi}{\partial r} = j_z, \quad -\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = j_r \quad (5)$$

Закон Ома:

$$j_r = \sigma E_z j_z = \sigma E_r \quad (6)$$

Система (1) дополняется зависимостями теплофизических коэффициентов плазмообразующего газа и расплавленного жидкого металла изделия от температуры и давления. Используются следующие обозначения: v - радиальная скорость, u - аксиальная скорость, P - давление, T - температура, j - плотность тока, E - напряженность электрического поля, H - напряженность магнитного поля, ρ - плотность, σ - электропроводность, λ - теплопроводность, μ - вязкость, c_p - теплоемкость при постоянном давлении, h - энтальпия, Ψ - излучательная способность. В уравнении движения:

$$S_u = \begin{cases} 0, & \text{для дуги} \\ \rho g - \rho g \beta (T - T_0) & \text{для ванны} \end{cases} \quad (7)$$

β - 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, поэтому считаем полезным оценить вклад данного слагаемого. В уравнении энергии источниковый член S_h учитывает потери тепла на плавление. Он 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. H_f - удельная энтальпия.

$$H_f = \begin{cases} L & T > T_l \\ f_l L & T_l < T < T_s \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (8)$$

Энтальпия связана с удельной энтальпией формулой:

$$h = c_p T + f_l H_f$$

Исходная система МГД уравнений решается в переменных "вихрь-функция тока" ω - напряженность вихря, ψ - функция тока, χ - функция электрического тока, которые в случае цилиндрической системы координат и осевой симметрии определяются соотношениями:

$$\omega = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} = \rho u r \quad - \frac{\partial \psi}{\partial z} = \rho v r \quad (10)$$

$$\frac{\partial \chi}{\partial r} = r j_z \quad - \frac{\partial \chi}{\partial z} = r j_r \quad (11)$$

Введенные новые переменные ψ и χ удовлетворяют уравнениям неразрывности и сохранения заряда. Тогда исходная система запишется в следующем каноническом виде:

$$a \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\varphi \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\varphi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[b \frac{\partial}{\partial z} (c\varphi) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[b \frac{\partial}{\partial r} (c\varphi) \right] + er = 0 \quad (12)$$

Где φ - искомая функция, принимающая значения ω, ψ, h и χ ; 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. Для сравнения моделей, представленных в работе [2] - [3] и работах [4]- [5] рассчитываются обе модели: 1) Решается вся система МГД уравнений для электрической дуги и сварочной ванны, однако сварочная ванна рассматривается в приближении свободной поверхности. Расчетные данные электрической дуги используются для оценки теплового потока в сторону ванны. На свободной поверхности ванны учитывается термокапиллярная конвекция.

2) Система МГД уравнений решается при совместном рассмотрении процессов в электрической дуге и расплавленном металле обрабатываемого изделия с учетом их вязкого взаимодействия между собой и термокапиллярной конвекции.

1.2 Граничные условия

Для первой модели поставим граничные условия для всей области. Постановка граничных условий для столба дуги не вызывает затруднений, так как подобные задачи решались неоднократно. На поверхности всех стенок условием замкнутости объема будет условие непроницаемости: $\psi = 0$. Температура стенок области, которые не взаимодействуют между собой принимается равной $T_0 = 300$, тем самым определяется $h = h(T_0)$. Функция электрического тока $\chi = \frac{I}{2\pi}$. Функция ω определяется из условия прилипания. Для торца катода: $\chi_k = \frac{I}{2\pi R_k} \int_0^r \sigma r dr$, R_k - радиус катодного пятна. Распределение температуры у торца катода задается либо с учетом экспериментальных данных, либо задается урюковским распределением:

$$T_k(r) = (T_v - T_0) \left(1 - \frac{r}{R_k}\right)^m \left(1 + \frac{r}{R_k} m\right) + T_0$$

где T_v - температура кипения катодного материала, m - степень заполнения профиля температуры. На оси столба выполняются условия симметрии. На границе "дуга-анод" для системы "вихрь-функция тока" используется методика Грязнова В.Л. и Полежаева В.И., при котором значение функции ω не используются, а вычисляется у поверхности электродов в узлах сетки, отстоящих на один шаг от стенки.

Граничные условия для свободной поверхности сварочной ванны могут быть двух типов: кинематические - установка скорости на жидкой границе, и динамические, связанные с давлением. Форма свободной поверхности сварочной ванны определяется из условия баланса внутренних и внешних сил на ее поверхности. Граничные условия на свободной границе дуга- жидкий металл включают в себя:

— Нормальные напряжения от баланса давления жидкости и сил вязкого трения, балансом капиллярных сил и сил давления дуги в дуге условия сварки, записаны с учетом тензора вязких напряжений. В рамках данной задачи мы рассматриваем границу раздела дуга-ванна плоской, поэтому нормальную составляющую не рассматриваем.

— Тангенциальная составляющая:

$$\mu \frac{\partial v}{\partial z} = -f_l \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (13)$$

то есть касательные напряжения вызваны зависимостью коэффициента поверхностного натяжения расплавленного металла от температуры. В приближении свободной поверхности сварочной ванны тепловой поток от дуги обычно рассматривают в следующем виде:

$$q(r) = -\frac{Q}{2\pi r_a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_a^2}\right) \quad (14)$$

где Q - количества тепла от дуги, r_a -радиус анодного пятна. Для нашей задачи воспользуемся численными данными поля температуры электрической дуги, тогда

$$q(r) = \lambda_{arc} \frac{\partial T_{arc}}{\partial z} \quad (15)$$

Тепловые потери с поверхности сварочной ванны включают конвективные потери, радиационные потери и потери на испарение:

$$q_{conv} = \lambda (T - T_0) \quad q_{rad} = \sigma_\varepsilon \varepsilon (T^4 - T_0^4) \quad q_{evap} = W_v h_{fg} \quad (16)$$

где T_0 - температура окружающей среды, σ_ε - коэффициент Стефана-Больцмана, ε - излучательная способность вещества, h_{fg} - удельная теплота испарения, W_v - скорость испарения, которая находится из следующего приближения:

$$\log W_v = A_v + \log P_{atm} - 0,5 \log T$$

A_v - постоянная, зависящая от материала обрабатываемого изделия.

Граничные условия для дуги:

	ω	ψ	h, T	χ
O1O2	$u=0$ $v=0$	$\psi = 0$	$T = T_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
O1O3	$u=0$ $v=0$	$\frac{\partial \psi}{\partial r} = 0$ $\psi = 0$	$T = T_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
OO3	$u=0$ $v=0$	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0$ $\psi = 0$	$T = T_k(r)$	$\chi = \chi_k$
OA	$\frac{\partial \omega}{\partial r} = 0$	$\psi = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\chi = 0$
O2C	$u=0$ $v=0$	$\psi = 0$	$T = T_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
AB	-	$\psi = 0$	$\lambda_{дуги} \frac{\partial T_{дуги}}{\partial z} = \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z}$	$\frac{\partial \chi}{\partial z} = 0$

Граничные условия для сварочной ванны:

	ω	ψ	h, T	χ
AB	$\mu w = -\frac{1}{r} \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}$	$\psi = 0$	$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \lambda_{arc} \frac{\partial T_{arc}}{\partial z} - \sigma_\varepsilon \varepsilon (T_a^4 - T_0^4) - W_v h_{fg} - j \varphi_a$	$\frac{\partial \chi}{\partial z} = 0$
BC	$u=0$ $v=0$	$\psi = 0$	$\lambda_{дуги} \frac{\partial T_{дуги}}{\partial z} = \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} - \sigma_\varepsilon \varepsilon (T_a^4 - T_0^4)$	$\frac{\partial \chi_a}{\partial z} = 0$
AE	$\frac{\partial w}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \psi}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\chi = 0$
CF	$w=0$	$\psi = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
EF	$w=0$	$\psi = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \chi}{\partial z} = 0$

По второй модели, при совместной рассмотрении дуги и ванны изменяются только условия на границе АВ "дуга-ванна": $\mu_a w_a = \mu_{arc} w_{arc} - \frac{1}{r} \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}$, остальные граничные условия остаются неизменными. Для изучения влияния постановки граничных условий по обеим моделям, были проведены численные расчеты при токах $I=150A$ и $I=200A$, дуга горит в среде аргона при давлении $P=0,1$ МПа в замкнутом объеме, при постоянном межэлектродном расстоянии в 5мм, в качестве материала анода используется алюминий. Размеры дуги у катода принимались равными размеру цилиндрического электрода и равны 1мм, температура в центре катодного пятна 18000К. Боковые стенки катода и стабилизирующие стенки

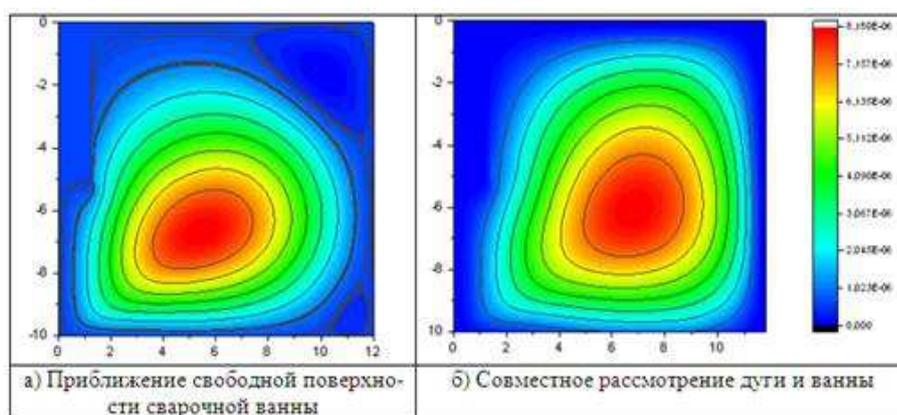
Таблица 1. Физические характеристики алюминия.

T_{plav} , К	h_{fg} , Дж/кг	β , 1/К	T_s , К	T_l , К	ε	φ_a , eV	L , Дж/кг
933	$1,08 * 10^7$	$2,34 * 10^{-5}$	922	947	0,4	4,25	$3,93 * 10^5$

поддерживаются при температуре $T=300\text{K}$. Размеры дуги у анода формируются в процессе расчета в соответствии с поставленными условиями. Расчетные данные для чистого алюминия:

2 Обсуждение результатов

На рис. 2 представлены поля расходов газа для электрической дуги, рассчитанных по обейм моделям.

Рис. 2. Линии равных расходов газа в дуге, $I=150\text{ A}$

В результате совместного действия собственных электромагнитных сил и сил вязкости газа электрическая дуга генерирует основной тороидальный газодинамический вихрь, который вовлекает в свое движение почти всю основную массу газа. При постановке граничного условия для вихря скорости по методу Патанкара, вихрь скорости определяется только для внутренней области, а исходные граничные условия для функции тока ставились как для твердой непроницаемой стенки. Поэтому подобная постановка граничных условий тормозят потоки электродуговой плазмы, линии расхода газа более сконцентрированы в осевой части, прокачивая весь газ в сторону анодного пятна. Вязкое взаимодействие основного вихря с окружающим неподвижным газом вовлекает в движение оставшийся газ у холодных углов плазматрона, образуя угловые вихри с небольшой интенсивностью и обратного направления.

По второй модели потоки плазмы и потоки расплавленного металла растекаются в радиальном направлении, радиальные скорости в данном случае выше, что позволяет захватить большую массу газа в движение основного вихря. Также, это способствует более интенсивному выносу тепла из приосевой области анода на периферию и нагреву газа у стен плазматрона. Изотермы более вытянуты в радиальном направлении, формируя более "колокообразную" форму видимой границы дуги по сравнению с первым случаем (рис. 3).

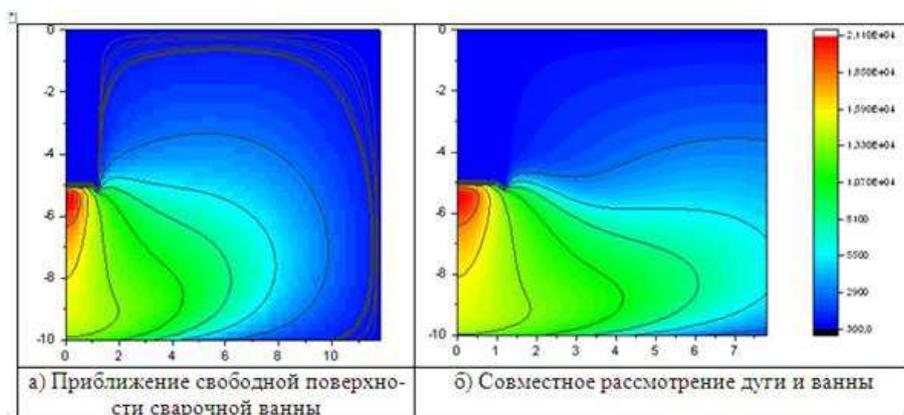


Рис. 3. Изолинии температур в сварочной дуге, $I=150A$

В приближении свободной поверхности в объеме сварочной ванны образуются два вихря: А - поверхностный, направленный от центра ванны к ее краям, и В - у оси, на дне сварочной ванны объемный вихрь, направленный против часовой стрелки (рис. 4а). Поверхностный вихрь образован результирующей сил Архимеда и Марангони, которые имеют одинаковое направление, в то время, как силы Лоренца индуцируют конвективные потоки противоположного направления. С увеличением силы тока до $I=200A$ возрастает роль электромагнитных сил и этот вихрь увеличивается в объеме, занимая почти всю центральную часть сварочной ванны. На поверхности остается тонкий слой расплавленного металла, вовлеченный в радиальное движение от центра ванны к краям термокапиллярными силами. Это подтверждает тот факт, что роль термокапиллярной силы возрастает при силах тока в 200А. При силе тока в $I=250A$ в объеме сварочной ванны наблюдается только один вихрь, направленный по часовой стрелке (рис. 4б).

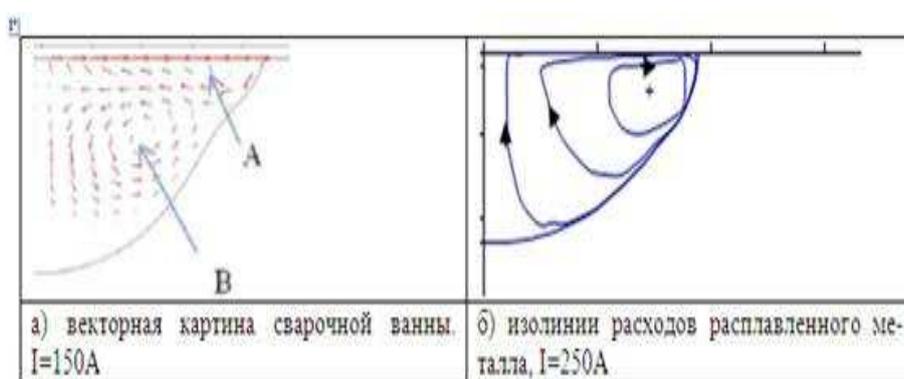


Рис. 4. Влияние силы тока на гидродинамику сварочной ванны

При учете вязкого взаимодействия электрической дуги и сварочной ванны в объеме ванны основной вихрь направлен от центра ванны к ее краям, и второй вихрь противоположного направления образуется у краев ванны за счет изменения знака градиента поверхностного натяжения (рис. 5). Взаимодействие с потоками электрической дуги увеличивает радиальные размеры ванны и уменьшает глубину проплавления металла. Геометрические

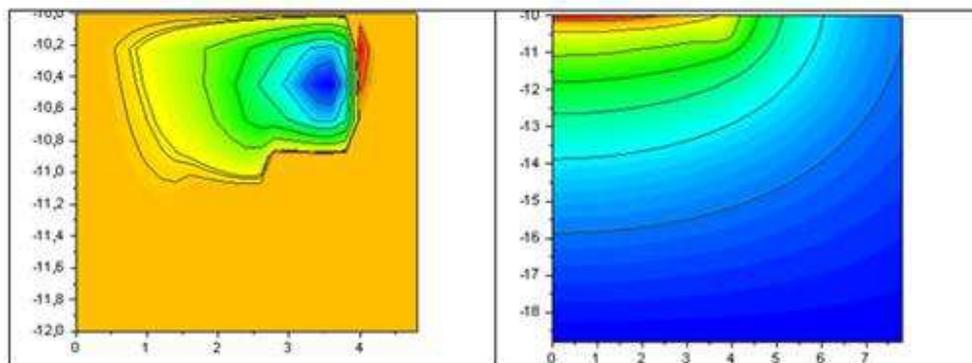


Рис. 5. Изолинии расхода и изотермы в сварочной ванне, $I=200A$

Таблица 2. Зависимость параметров сварочной ванны от силы тока.

I, A	Свободная поверхность		Взаимодействие с дугой	
	Rv (мм)	Hv (мм)	Rv (мм)	Hv (мм)
I=150A	2,4	0,8	2,8	0,8
I=200A	3,2	1,2	4	1
I=250A	4	1,6	5	1,2

размеры ванны при различных силах тока, рассчитанные по обеим моделям представлены в таблице. Геометрические размеры сварочной ванны в зависимости от силы тока

Список литературы

1. Wheeler, D., Bailey, C. *Numerical modelling and Validation of Marangoni and Surface Tension Phenomena Using the Finite Volume Method*, Int. J. Num. Methods in Fluids (1999).
2. Abderrazak Traidia *Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA weld pools*, PhD Thesis (2008).
3. Mougnot J., Gonzalez J.-J., Freton P. *Plasma-weld pool interaction in tungsten inert-gas configuration*, J. Phys. D: App. Phys.(2004).
4. Jainakov A., Usenkanov J., Sultangazieva R. *On joint modeling of processes in electric arc plasma and melted metal*, 6 general assembly of federation of engineering institutions of Islamic countries, Almaty (1999)
5. 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 Алматы (2000).