

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 проплавающей способности электрической дуги.

Выводы: Термокапиллярная конвекция на границе «плазма-расплавленный металл» ухудшает проплавающую 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, a_nur4@mail.ru

В данной работе система МГД уравнений электродуговой плазмы дополнена уравнением конвективной диффузии для паров металла испаряющегося анода. Поставлены граничные условия для концентрации паров металла. Рассчитаны транспортные коэффициенты смеси плазмообразующего газа и паров металла. Приведена оценка весовой концентрации паров металла обрабатываемого изделия в столбе аргоновой дуги при электродуговой сварке при различных силах тока сварки. Установлена необходимость учета влияния паров при токах выше 150 А.

Ключевые слова: электродуговая плазма, пары металла, МГД уравнения, плазмообразующий газ, аргоновая дуга, электродуговая сварка.

THE INFLUENCE OF THE WELD POOL METAL VAPOR ON THE ARC PLASMA PARAMETERS

Sultangazieva R.T., Amankulova N.A. PhD, Associate Professor, s. lecturer, K S T U named after I.Razzakov, Kyrgyzstan. 720044 c. Bishkek, p.Mira 66, e-mail: renasultangazieva@mail.ru, a_mur4@mail.ru

In this paper, the system of MHD equations arc plasma supplemented by the equation of convective diffusion for metal vapor evaporating anode. We set the boundary conditions for the concentration of the metal vapor. Calculated transport coefficients mixture plasma gas and metal vapor. The estimation of the mass concentration of metal vapor workpiece in the column the argon arc welding electric power for various welding current are presented. Account the effect of vapor at currents above 150A is necessary.

Keywords: electrical arc plasma, metal vapor, the MHD equations, plasma forming gas, argon arc, arc welding.

Свойства электродуговой плазмы критически зависят от теплофизических коэффициентов плазмообразующего газа. Наличие паров металла действует как на теплофизические характеристики, так и на коэффициенты переноса и оптические свойства дуги. Это изменение свойств дуги влияет на температурное распределение в столбе электрической дуги, плотность тока и тепловой поток в сторону обрабатываемого изделия и непосредственным образом влияет на качество сварного шва. В свою очередь, испарение примесей изменяет состав расплавленного металла, вызывает изменения в микроструктуре металла и механических свойствах сплавов.

Область электрической дуги обрабатываемого изделия описывается системой МГД уравнений, включающей в себя уравнение неразрывности, уравнение движения, закон сохранения энергии, закон Ома и уравнения Максвелла [1-2]. Для учета наличия паров в столбе электрической дуги система МГД уравнений дополняется уравнением конвективной диффузии паров металла:

$$\nabla \rho V C_1 = \nabla (\rho D_{Ar-Fe} \nabla C_1) \quad (1)$$

где V - вектор скорости потока плазмы, C_1 - весовая концентрация паров металла, D_{Ar-Fe} - коэффициент диффузии паров железа в аргоновой плазме, ρ - плотность. Взаимодействие между плазмой и парами металла, их взаимное влияние друг на друга определяются через теплофизические свойства среды как функции температуры и концентрации паров металла в плазме.

Решение уравнения конвективной диффузии требует определения зависимости коэффициента диффузии от температуры, давления и состава плазмы, совместно с конвективными потоками они определяют распределение паров металла в дуге. В общем случае, уравнение конвективной диффузии решается для каждого сорта частиц, и расчет коэффициента диффузии для всех частиц является сложной задачей. Поэтому обычно

используется ряд приближений. В простейшем приближении используется аппроксимация бинарного коэффициента диффузии, описывающая диффузию между атомами паров металла и плазмообразующего газа [3]:

$$D_{Ar-Fe} = \frac{2\sqrt{2}\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}\right)^{0.5}}{\left(\left(\frac{\rho_1^2}{\beta_1^2 \eta_1^2 M_1}\right)^{0.25} + \left(\frac{\rho_2^2}{\beta_2^2 \eta_2^2 M_2}\right)^{0.25}\right)^2} \quad (2)$$

где M_1, M_2 – молярный вес металла (Fe) и плазмообразующего газа (Ar);

ρ_1, ρ_2, η_1 и η_2 - плотность и вязкость металла и газа соответственно;

β_1, β_2 - безразмерные постоянные, теоретически лежат в пределах от 1,2 – 1,543 для различных типов газов, таких как Ar, He, N_2, O_2, CO_2 . По экспериментальным данным $\beta_1 = \beta_2 = 1.385$.

Система МГД уравнений решается в переменных «вихрь-функция тока» относительно пяти искомым переменных: ω - напряженность вихря, ψ - функция тока, χ - функция электрического тока, C_1 -концентрация паров металла.

Граничные условия для C_1 ставятся следующим образом:

На границе «дуга – расплавленный металл», то есть на поверхности анода, где температура выше температуры плавления определяется выражением [4]:

$$C_1 = \frac{P_{vap}M_1}{P_{vap}M_1 + (P_{atm} - P_{vap})M_2} \quad (3)$$

где P_{atm} -атмосферное давление; P_{vap} - парциальное давление паров металла, которое является функцией температуры расплавленного металла сварочной ванны; На всех остальных границах $C_1 = 0$; На оси выполняется условие симметрии: $\frac{\partial C_1}{\partial r} = 0$.

Высокая температура дуги вызывает интенсивный процесс испарения металла, переносимого через дугу, в связи с чем, в газовой фазе, окружающей металл, в условиях сварки появляется значительное количество паров, снижающих парциальное давление других газов, присутствующих в дуговом промежутке. Для определения возможного давления паров металла при различных температурах можно использовать упрощенное уравнение Клапейрона – Клаузиуса, которое для удобства расчетов приводится к виду [5]:

$$P_{vap} = P_{atm} \exp\left(\frac{-H_{vap}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{крит}}\right)\right) \quad (4)$$

Где H_{vap} - молярная теплота испарения, R - универсальная газовая постоянная.

На практике при электродуговой сварке стали, частицы паров металла содержат Fe, Mn, Cr, Ni. В целях упрощения модели рассматриваются только пары основного металла - Fe. Формула Клайперона-Клаузиуса для определения парциального давления паров получена для равновесного состояния, что практически трудно достижимо для процессов испарения, протекающих во время сварки. Однако зависимость сохраняется, и поэтому в первом приближении данная формула может быть применима.

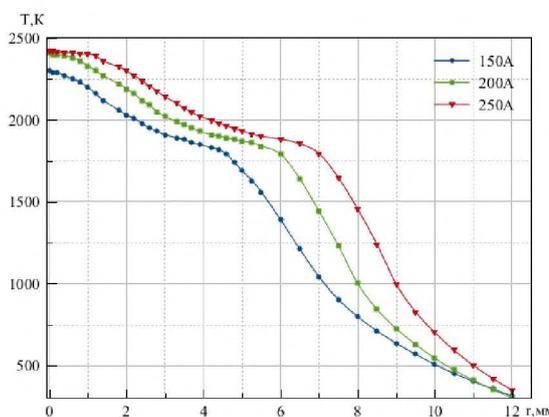


Рис. 1 Температура поверхности анода без учета испарения

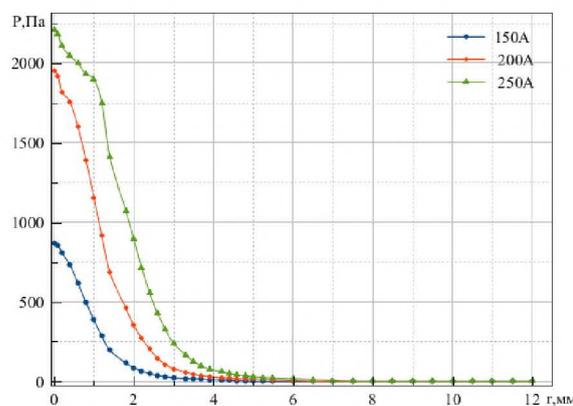


Рис. 2 Ожидаемое распределение давления паров металла на поверхности анода

На рис. 1 представлены значения температур на поверхности сварочной ванны без учета процесса испарения атомов металла с поверхности анода при силах тока $I=150$ А, 200 А и $I=250$ А.

Для расчета транспортных коэффициентов аргона с парами металла, необходимо оценить возможную весовую концентрацию паров металла для наших условий.

На рис.2 представлено ожидаемое распределение давления паров металла над поверхностью анода для данных температур, рассчитанное по формуле (4).

Рассчитанное ожидаемое распределение концентрации паров металла на поверхности сварочной ванны, удовлетворяющее граничному условию (3), представлено на рис.3.

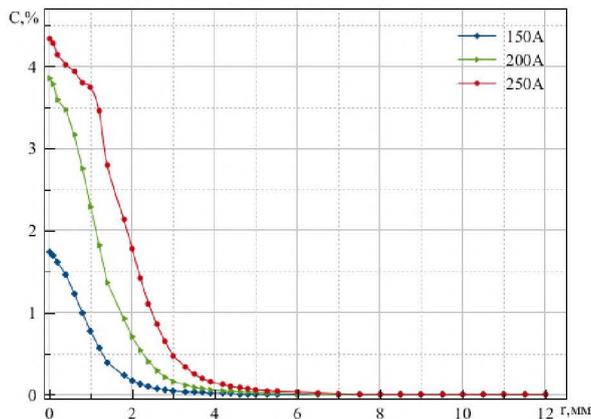


Рис.3 Ожидаемое распределение концентрации паров металла на поверхности анода

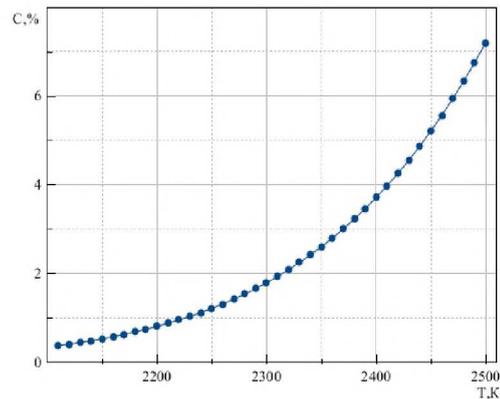
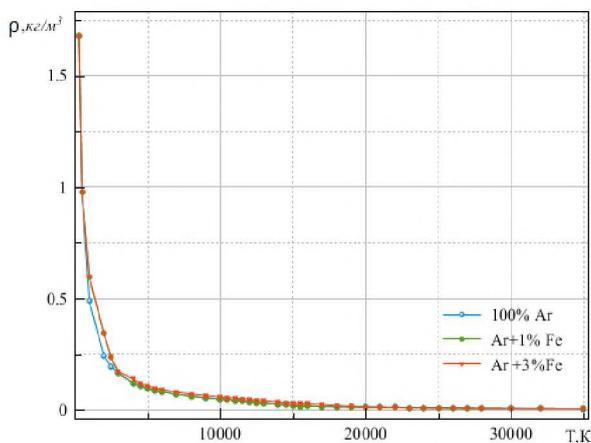
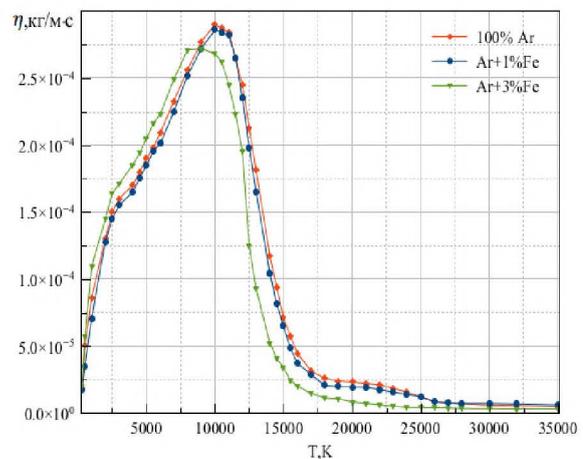


Рис.4 Зависимость концентрации паров металла от температуры поверхности

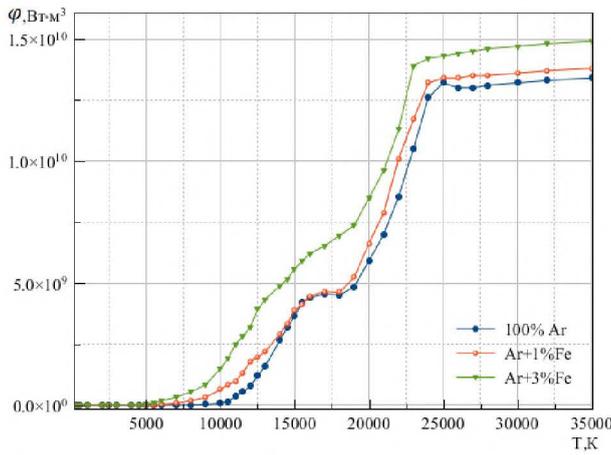
При решении задачи с учетом паров металла расчетная температура на поверхности анода будет ниже из-за потерь на испарения и увеличения излучения газовой смеси, и очевидно, концентрация паров металла для всех случаев будет ниже. На рис.4 представлена концентрация паров металла как функция температуры. Из графика видно, что уменьшение температура на 10 К дает уменьшение концентрации на 0,3-0,4 процента. Если учет испарения паров понизит температуру на поверхности анода хотя бы на 100 К, концентрация паров металла уменьшится в 2 раза. Таким образом, из анализа графика 4, можно предположить, что для силы тока в 150А, концентрация паров металла составит около 1%, для $I=200$ А концентрация Fe будет около 2%, и для $I=250$ А концентрация паров металла – около 2,5%.



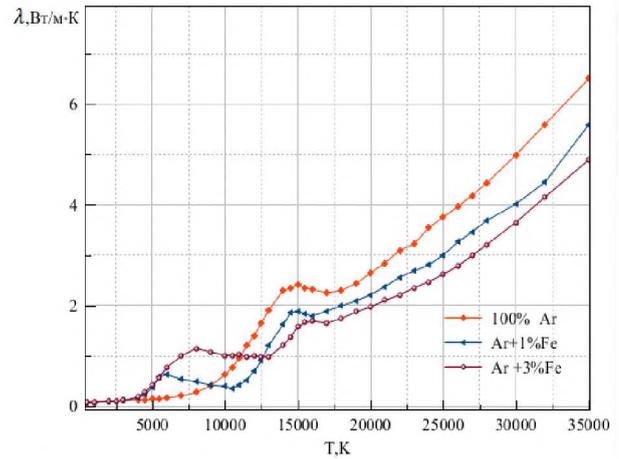
а) Плотность



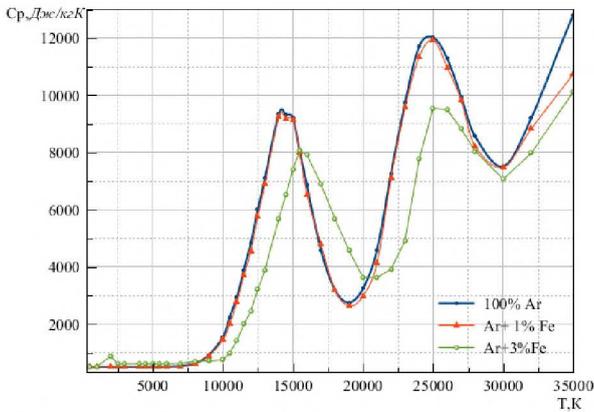
б) Вязкость



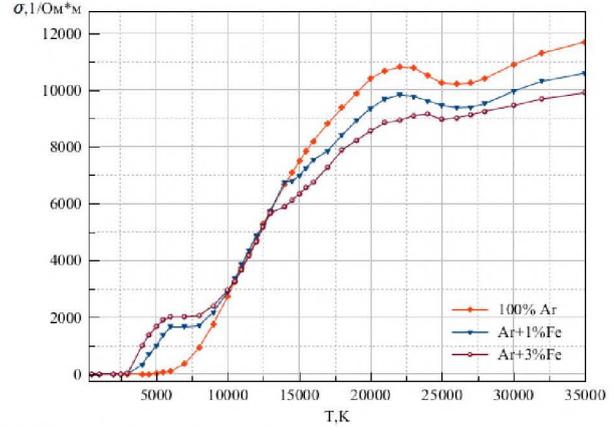
в) Излучение



г) Теплопроводность



д) Теплоемкость



е) Электропроводность

Рис.2 Транспортные коэффициенты аргона с различной концентрацией паров железа

Исходя из вышеуказанного, на основании свойств чистых компонентов, с помощью программных пакетов АСТРА и ТЕРРА рассчитаны коэффициенты переноса для смесей Ar+1Fe%, Ar+3Fe%. Полученные данные согласуются с данными, приведенными в работе [5].

С полученными коэффициентами переноса для электрической дуги и сварочной ванны была решена система МГД уравнений при силе тока в 150, 200, 250 и 300 А.

Расчетные данные:

$$T_{кип} = 3133 \text{ К } T_{plav} = 2783 \text{ К } \Delta H_f = 2,47 * 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$M_1 = 55 * 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}; M_2 = 27 * 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}; h_{fg} = 6259,5 * 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$\log(P_{atm}) = 6,1210 - \frac{18836}{T} A_v = 2,52 \quad H_{vap} = 340 * 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$$

На рис. 3 представлены температурные распределения в столбе электрической дуги и концентрации паров металла при соответствующих силах тока. В приосевой части конвекция является доминирующей, поэтому пары металла вовлекаются в радиальное направление с потоками газа и растекаются над поверхностью анода. Максимальная концентрация паров железа при силе тока в 150 А составляет 0,6%, для тока в 200 А – 1,2 %, при токе в 300 А концентрация паров металла с поверхности анода превышает 2%.

Как видно из графиков на рисунке 3, при содержании паров железа уже с 1% в аргоне электропроводность и излучение имеют заметное отличие в интервале температур от 5000 до 10000 К. В этой области лежит изотерма в 8000К, которую обычно принимают за видимую

границу дуги. Изменение данных коэффициентов дуги должно оказать охлаждающее влияние на электрическую дугу, что должно наблюдаться даже визуально.

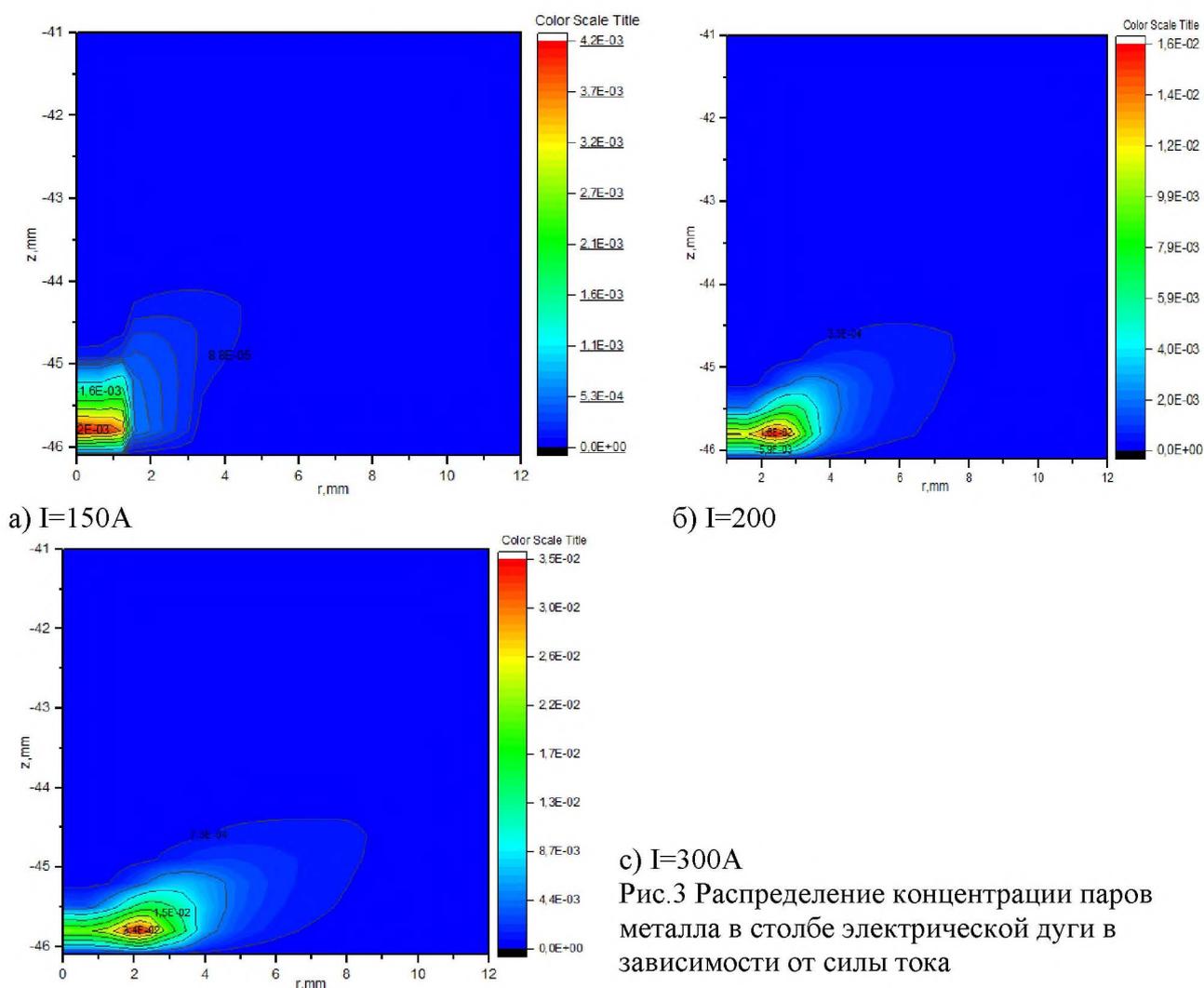


Рис.3 Распределение концентрации паров металла в столбе электрической дуги в зависимости от силы тока

Выводы: Из приведенного выше анализа можно сделать вывод, что при электродуговой сварке в замкнутом объеме при токах выше 150 А для более полного описания физических процессов взаимодействия электрической дуги с обрабатываемым изделием необходимо учитывать наличие паров металла над поверхностью анода.

Список литературы

1. Энгельшт В.С. Математическое моделирование электрической дуги/В.С.Энгельшт. - Фрунзе, 1983.-363с.
2. Jainakov A. On joint modeling of processes in electrica arc plasma and melted metal./ Jainakov A., Usenkanov J., Sultangazieva R. // 6 general assembly of federation of engineering institutions of Islamic countries. – Almaty, 1999. - P.160-167
3. Sschnick M. Modelling of gas–metal arc welding taking into account metal vapour./ Sschnick M., Ffuessel U., Hhertel M., Haessler M., Spille-Kohoff A., Murphy A.B. // Journal of Physics D: Applied Physics 43, 43. – 2010. - 434008p.
4. Menart J. Numerical study of a free-burning argon arc with copper contamination from the anode. / Menart J, Lin L. // Plasma Chem. & Plasma Process.19(2) – 1999. - P.153 –170
5. Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов / А.Н. Несмеянов - М.:Издательство АН СССР, 1961. – 396 с.