

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРОВ МЕТАЛЛА СВАРОЧНОЙ
ВАННЫ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ**
**NUMERICAL SIMULATION OF INFLUENCE OF THE WELD POOL METAL VAPOR
ON THE ARC PLASMA PARAMETERS**

Макаланын максаты - эритилген аноддон бөлүнгөн металлдын бууларынын тийгизген таасирин эске алуу менен туюк көлөмдөгү электр жаа ширетүүсүнүн математикалык моделин түзүү. Бул иште электр жаасынын МГД теңдемелери иштетилген нерседен бөлүнгөн металдардын бууларын эске алып эсептөө үчүн конвективдүү диффузия теңдемеси менен толукталды. металлдын бууларынын концентрациясы үчүн чектик шарттар коюлган. Плазма пайда кылуучу газдын кошумчалары жана металлдын буулары үчүн транспортук коэффициенттери эсептелинди. Сандык эсептөөнүн жыйынтыктары көрсөтүлдү.

Ачык сөздөр: конвективдүү диффузия теңдемеси, диффузия коэффициенти, жакындаштырылган илешкектик аппроксимациясы, электр жаа сваркасы, канныкан буулануу басымы, МГД- системасы, термокапиллярдык конвекция.

Цель статьи – разработка математической модели электродуговой сварки в замкнутом объеме с учетом влияния паров металла испаряющегося анода. В данной работе система МГД уравнений электродуговой плазмы дополнена уравнением конвективной диффузии для паров металла обрабатываемого изделия. Поставлены граничные условия для концентрации паров металла. Рассчитаны транспортные коэффициенты смеси плазмообразующего газа и паров металла. Приведены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: уравнение конвективной диффузии, коэффициент диффузии, приближение вязкой аппроксимации, электродуговая сварка, давление насыщенных паров, МГД система, термокапиллярная конвекция.

Purpose of the article is the development of a mathematical model of electric arc welding in a closed volume with the influence of metal vapor from evaporating anode. In this paper, the system of MHD equations of arc plasma supplemented by the equation of convective diffusion of the workpiece metal vapor. Boundary conditions for the concentration of the metal vapor is delivered. Transport coefficients for mixture of plasma gas and metal vapors are calculated. Results of the numerical modeling are presented.

Keywords: equation of convective diffusion, coefficient diffusion, viscous approximation, arc welding, vapor pressure, MHD system, thermocapillary convection.

Электродуговая сварка характеризуется высокими значениями градиентов температуры расплавляемого дугой металла, при этом значительная часть поверхности металла сварочной ванны находится при температуре кипения и выделяет в зону дуги определенное количество паров металла. Присутствие паров металла в столбе электрической дуги оказывает существенное влияние на ее основные физические свойства, энергетическую эффективность, влияет на размер и формы сварочной ванны. Атомы металла имеют более низкий потенциал ионизации по сравнению с инертными газами, такими как аргон и гелий. Так, например, потенциал ионизации аргона составляет 15.755 эВ, у алюминия - 5.984эВ, а потенциал ионизации железа - 7.8эВ. Это увеличивает излучение и электропроводность плазмы и обуславливает изменение состава и свойств

плазменной дуги в анодной области и некоторой части столба дуги. В свою очередь, испарение примесей изменяет состав расплавленного металла, что может вызвать изменения в микроструктуре металла и механических свойствах сплавов.

Область электрической дуги и обрабатываемого изделия описывается единой системой МГД уравнений, включающей в себя уравнение неразрывности, уравнение движения, закон сохранения энергии, закон Ома и уравнения Максвелла [3]. Для учета наличия паров в столбе электрической дуги система МГД уравнений дополняется уравнением конвективной диффузии паров металла [7]:

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

где \mathbf{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 определяется 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 [8]:

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

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 $\beta_1 = \beta_2 = 1.385$ [5]

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 [2].

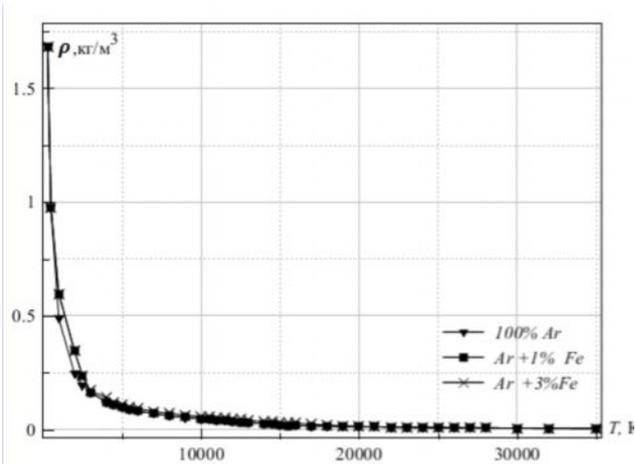
Граничные условия для C_1 ставятся следующим образом:

На границе «дуга – расплавленный металл», то есть на поверхности анода, где температура выше температуры плавления определяется выражением [6]:

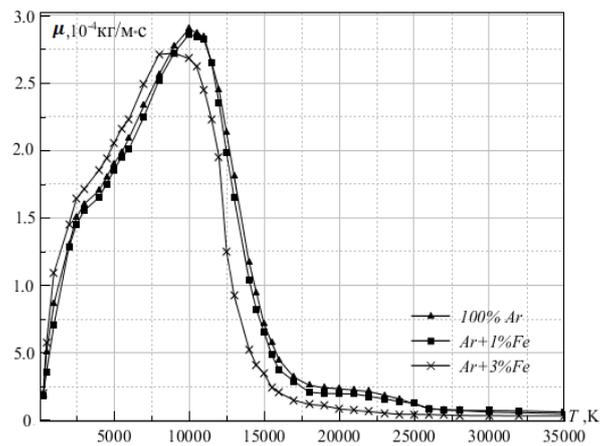
$$C_1 = \frac{P_{vap} M_1}{P_{vap} M_1 + (P_{atm} - P_{vap}) M_2} \quad (3)$$

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: $\frac{\partial C_1}{\partial r} = 0$

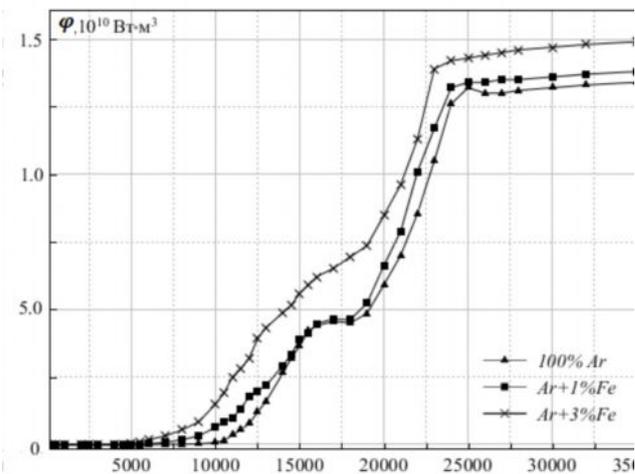
Высокая температура дуги вызывает интенсивный процесс испарения металла, переносимого через дугу, в связи с чем, в газовой фазе, окружающий металл, в условиях сварки появляется значительное количество паров, снижающих парциальное давление других газов, присутствующих в дуговом промежутке. Для определения возможного давления паров металла при различных температурах можно использовать упрощенное уравнение Клапейрона – Клаузиуса, которое для удобства расчетов приводится к виду [1]:



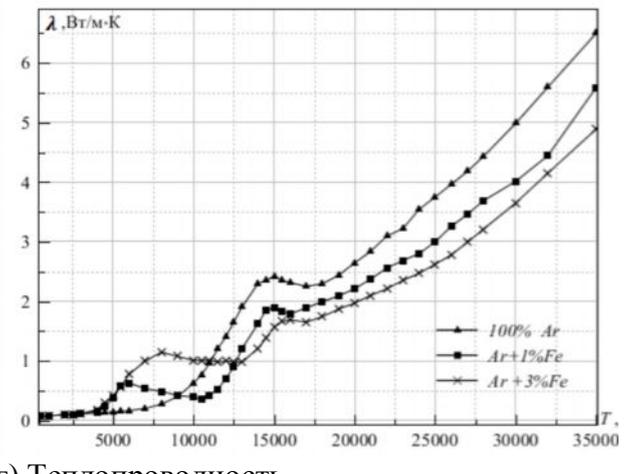
а) Плотность



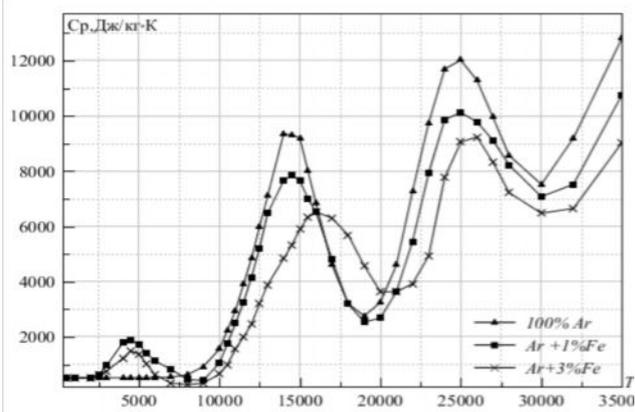
б) Вязкость



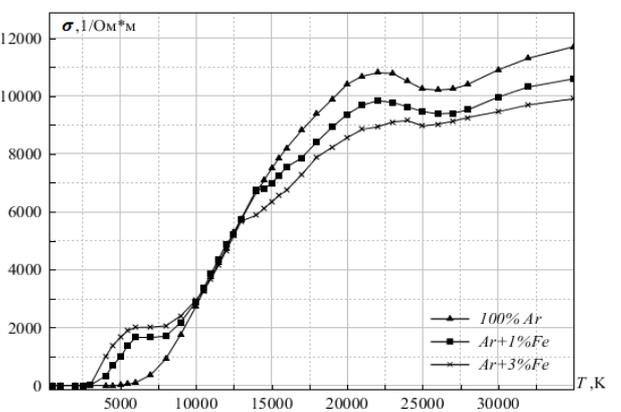
в) Излучение



г) Теплопроводность



д) Теплоемкость



е) Электропроводность

Рис.1. Транспортные коэффициенты аргона с различной концентрацией паров железа

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

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 получены 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.

Для решения вышеставленной задачи на основании свойств чистых компонентов, с помощью программных пакетов АСТРА и ТЕРРА рассчитаны коэффициенты переноса для смесей $Ar+1Fe\%$, $Ar+3Fe\%$, представленные на Рис.1. Полученные данные согласуются с данными, приведенными в работе [5]. Как видно из графиков, при содержании паров железа уже с 1% в аргоне электропроводность и излучение имеют заметное отличие в интервале температур от 5000 до 10000К. В этой области лежит изотерма в 8000К, которую обычно принимают за видимую границу дуги.

С полученными коэффициентами переноса для электрической дуги и сварочной ванны была решена система МГД уравнений при силе тока в 150, 200, 250 и 300А. Для силы тока в 150А максимальная концентрация паров железа на поверхности сварочной ванны исходя из граничного условия (3) составила 0,6%, что практически не влияет на транспортные коэффициенты аргонной дуги. С увеличением силы тока увеличивается концентрация паров металла над поверхностью анода и увеличивается их влияние на физические процессы в электрической дуге.

На рисунке 2., 3. представлены графики распределения концентрации паров железа на поверхности анода и в объеме электрической дуги при силе тока $I=200А$. Максимальная концентрация паров железа при силе тока в 200А составляет 1,05% на оси дуги.

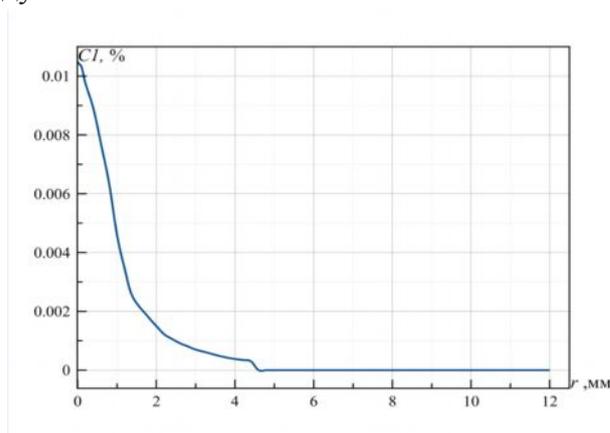


Рис. 2. Распределение концентрации паров Fe на поверхности анода

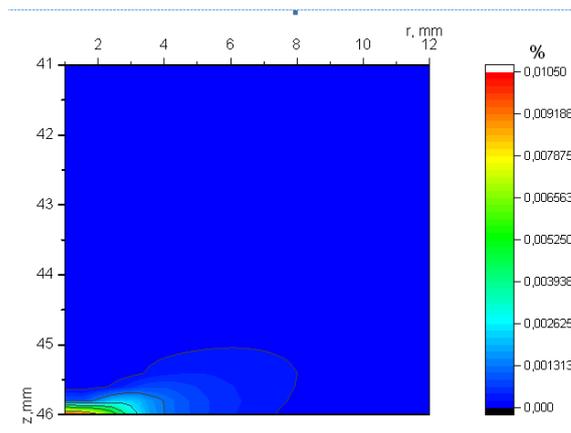


Рис. 3. Распределение паров Fe в столбе электрической дуги

Аксиальные скорости потока газа, направленные к аноду в 5 раз выше радиальных скоростей над поверхностью анода (Рис. 4.,5.), поэтому пары металла в приосевой части сосредоточены в основном у поверхности анода, а расширение области паров металла происходит за пределами оси дуги. Также это связано с характером коэффициента диффузии (рис.6), максимальное значение которого приходится на периферию ядра дуги, где атомы металла легче диффундируют в область электрической дуги. В приосевой части конвекция является доминирующей, поэтому пары металла вовлекаются в радиальное направление с потоками газа и растекаются над поверхностью анода.

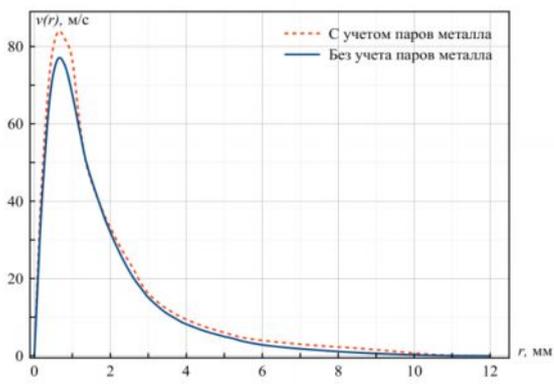


Рис. 4. Распределение радиальной скорости над поверхностью анода

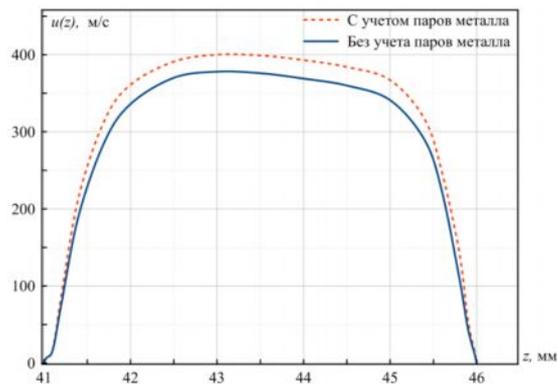


Рис. 5. Осяевая аксиальная скорость в столбе электрической дуги

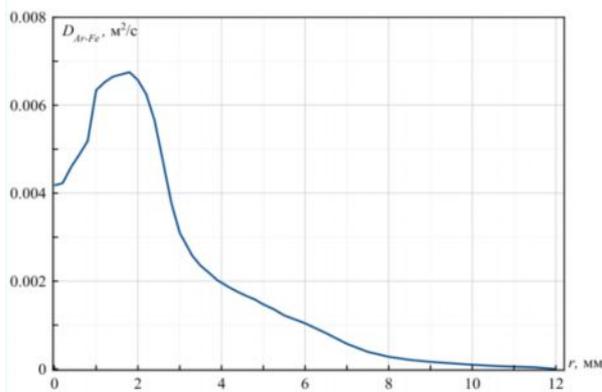
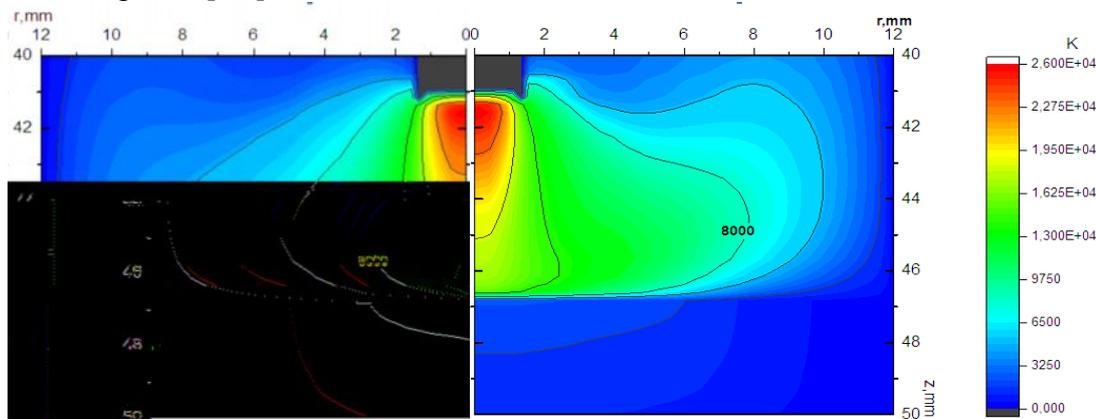


Рис. 6. Коэффициент диффузии над поверхностью анода

На Рис. 7. представлены изолинии температур без учета и с учетом паров металла в аргоновой плазме при силе тока $I=200A$. Присутствие паров металла в прианодной части поджигают радиально дугу, охлаждая столб дуги по ее краям и нагревая ядро дуги. Это объясняется тем, что коэффициент излучения для смеси аргона с парами металла заметно выше в интервале температур от 5000 до 10000K, что приводит к увеличению радиационных потерь в данном интервале и сужению дуги. Данное явление охлаждения дуги при наличии паров металла согласуется с экспериментальными и теоретическими результатами работ [4,9].



а) с учетом паров металла б) без учета паров металла

Рис. 7. Изотермы столба электрической дуги, $I=200A$

На Рис. 8. представлен тепловой поток в от столба электрической дуги на анод для обоих случаев. Несмотря на то, что температура ядра дуги выше для аргона с парами металла, тепловой поток выше для чистого аргона, так как коэффициент теплопроводности для чистого аргона при температурах выше 8000К выше. Для температур ниже 8000К коэффициент теплопроводности выше для смеси и на периферии столба дуги значения теплового потока для обоих случаев почти одинаково из-за более низких температур и градиентов температур в данной области в присутствии паров металла. Это обуславливает более низкие температуры на поверхности сварочной ванны (Рис.9.).

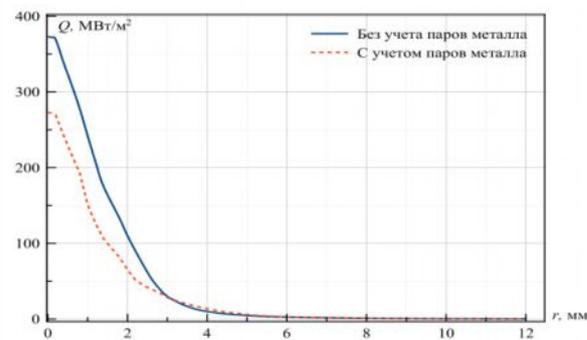


Рис. 8. Тепловой поток на анод

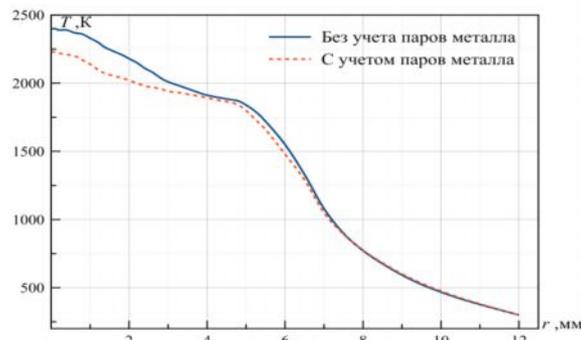


Рис. 9. Температура на поверхности анода

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

Выводы: При электродуговой аргоновой сварке стальных изделий в замкнутом объеме влияние паров металла над поверхностью анода заметно при силах тока выше 150А. Присутствие паров металла в прианодной части поджигают радиально дугу, охлаждая столб дуги по ее краям и нагревая ядро дуги. Наличие паров металла уменьшает тепловой поток в сторону анода, и уменьшают температуру поверхности анода.

Список литературы

1. Несмеянов Ан.Н. Давление пара химических элементов [Текст] / Ан. Н. Несмеянова - М.: Издательство АН СССР, 1961.-396 с.
2. Математическое моделирование электрической дуги [Текст] / Под ред. В.С. Энгельшта. - Фрунзе: 1983.- 266 с.
3. 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, Almaty, 27-30 June-1999.
4. Lag - Lago F., Gonzalez J.-J., Freton P., Gleizes A. A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: Part I. The two-dimensional model, Journal of Physics D: Applied Physics, 37(6), 883, 2004.
5. Menart J, Lin L. Numerical study of a free-burning argon arc with copper contamination from the anode. Plasma Chem. & Plasma Process. 19(2):153–170, 1999.
6. Murphy A. B. Diffusion in equilibrium mixtures of ionized gases. Phys. Rev. E, 48, 3594-3603. 1993.
7. Murphy A. B. Thermal plasmas in gas mixtures (Topical Review). J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 34, pp. 151 - 173, 2001.
8. Schnick M., Fu U., Hertel M., Haessler M., Spille-Kohoff A., Murphy A. B. Modeling of gas-metal arc welding taking into account metal vapor. J. Phys. D: Appl. Phys., 43, 2010.
9. Tanaka M., Yamamoto K., Tashiro S., Nakata K., Yamamoto E., Yamazaki K., Suzuki K., Murphy A. B., Lowke J. J. Time-dependent calculations of molten pool formation and thermal plasma with metal vapour in gas tungsten arc welding, Journal of Physics D: Applied Physics, 43(43), 434009, 2010.

