

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

А.Ж. Жайнаков, академик НАН КР, заведующий кафедрой ИТиМО ИГДиГТ им. академика У.Асаналиева КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, пр. Чуй 215;
Г.Д. Кабаева, д.ф.-м.н., профессор КРСУ им. Б. Ельцина; Кыргызстан, kabgd@mail.ru,
Н.А. Аманкулова, ст. преподаватель ИГДиГТ им. академика У.Асаналиева КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, пр. Чуй 215 nur4@mail.ru;

Решение задачи математического моделирования процесса плазменно-дуговой обработки металлов приводит к необходимости определения физических параметров в дуговой плазме, в зонах: расплава, термического влияния и структурных превращений. В последние годы большой интерес вызывает применение в качестве плазмообразующих многокомпонентных смесей активных и инертных газов. В работе выполнены исследования влияния рабочих смесей газов на характеристики электродуговой плазмы и тепловую эффективность взаимодействия плазменно-дугового потока с обрабатываемой поверхностью.

Ключевые слова: дуговая плазма, плазменная обработка, плазмообразующий газ, математическое моделирование, задачи теплообмена.

MODELING THE IMPACT OF WORKING GAS MIXTURES ON THE PROCESS OF THE PLASMA ARC TREATMENT OF METAL

A. Zhainakov, Academician of the National Academy of Sciences, Head of Department of the IGDIGT named after Academician U.Asanaliev KSTU named after I. Razzakov, Kyrgyzstan, pr. Chui 215,
G. Kabaeva, Professor KRSU named after B.Yeltsin, Kyrgyzstan, pr. Chui 66, kabgd@mail.ru
N. Amankulova, Senior Lecturer of the IGDIGT named after Academician U.Asanaliev KSTU named after I. Razzakov, Kyrgyzstan, pr. Chui 215, nur4@mail.ru

Solution of the problem of mathematical modeling of plasma-arc treatment of metals leads to the need to identify the physical parameters of the plasma in the arc, in the areas of: melting, heat-affected and structural transformations. In recent years, great interest is the use as a plasma-forming multi-component mixtures of active and inert gases. In the work are carried out studies of the effect of working gas mixtures on the characteristics of electric arc plasma and thermal efficiency of interaction of plasma-arc flow in the treated surface.

Keywords: plasma arc, plasma arc treatment, the mathematical modeling, problems of heat transfer.

Одним из эффективных источников энергии, применяемых для обработки металлов, является дуговая плазма. Поток дуговой плазмы генерируется в плазмотронах, различающихся между собой по конструкции, методам нагрева и ускорения плазмы, энергетическими параметрами, плазмообразующей средой и т.п. В большинстве случаев используются дуги прямого действия, когда обрабатываемое изделие из электропроводящего материала выступает элементом электрической цепи в качестве второго электрода - анода. В результате направленного воздействия источника энергии на изделие образуется зона нагрева, где имеют место соответствующие физические и химические процессы в металле:

испарение, плавление, структурные превращения, термдеформационные изменения. При воздействии электродуговой плазмы на поверхность металла имеет место взаимодействие газодинамических, тепловых и электромагнитных полей.

С первых теоретических работ по изучению тепловых процессов при обработке металлов (сварке и резке), посвященных установлению закономерностей нагрева в зависимости от мощности источника энергии, основной целью исследований процессов при обработке материалов электрической дугой продолжает оставаться определение основных зависимостей тепловой эффективности процесса и качества обработки от энергетических и технологических характеристик источника энергии [1,3-9]. При этом значительное внимание уделяется решению задач, связанных с такими вопросами как: 1) повышение проплавляющей способности электродуговой плазмы с помощью специальных мер (совершенствование конструкции плазмотронов; совершенствование технологий обработки, с учетом вопросов продления срока службы основных узлов плазмотрона и использования доступных и экологичных материалов)); 2) влияние состава рабочего и защитного газа, режима горения дуги на тепловое и силовое воздействие дуговой плазмы в зоне обработки; 3) теплофизические и кинетические процессы в анодной области; 4) качество и структура обрабатываемой поверхности.

В последние годы вызывают большой интерес исследования теплофизических и транспортных свойств рабочих смесей газов. Широкий диапазон используемых газов и их смесей, обладающих значительно различающимися теплофизическими свойствами, обуславливает большие их технологические возможности. Например, двойные и тройные смеси инертных и активных газов на основе аргона $Ar+O_2$, $Ar+CO_2$, $Ar+N_2$ и $Ar+He$, находят все более широкое применение так как имеют ряд технологических преимуществ: меньшую по сравнению с активными газами интенсивность химического воздействия на металл, высокую устойчивость дугового процесса, благоприятный характер переноса электродного металла через дугу. Исследование влияния состава рабочей смеси газов на характеристики дуговой плазмы и тепловую эффективность их воздействия на обрабатываемую поверхность является целью данной работы.

Актуальность изучения таких процессов остается высокой в связи с решением вопросов повышения технологических показателей плазменно-дуговых процессов обработки металлов. Высокая сложность, ресурсоемкость и трудности проведения натурных исследований процессов плазменно-дуговой обработки делают предпочтительными методы математического моделирования, позволяющими реализовать многократный вычислительный эксперимент.

Сложность теоретического описания технологических процессов обработки материалов электродуговой плазмой заключается в необходимости рассмотрения взаимосвязи двух разнородных систем, как единого целого, учитывая их взаимное влияние. Реализация такого подхода состоит из решения ряда задач: определения физических параметров в столбе дуговой плазмы; в прианодной области дуги; в расплавленном металле; в зонах кристаллизации, структурных превращений и термического влияния, то есть сопряженных задач теплообмена и термоупругости. Этот подход широко применяется для задач, имеющих конкретное технологическое приложение, когда решаются задачи нестационарного теплообмена и фазовых превращений в системе тел, обладающих различными свойствами [3].

На рис. 1 представлена обобщенная схема задач математического моделирования для исследования плазменно-дуговой обработки металлов.

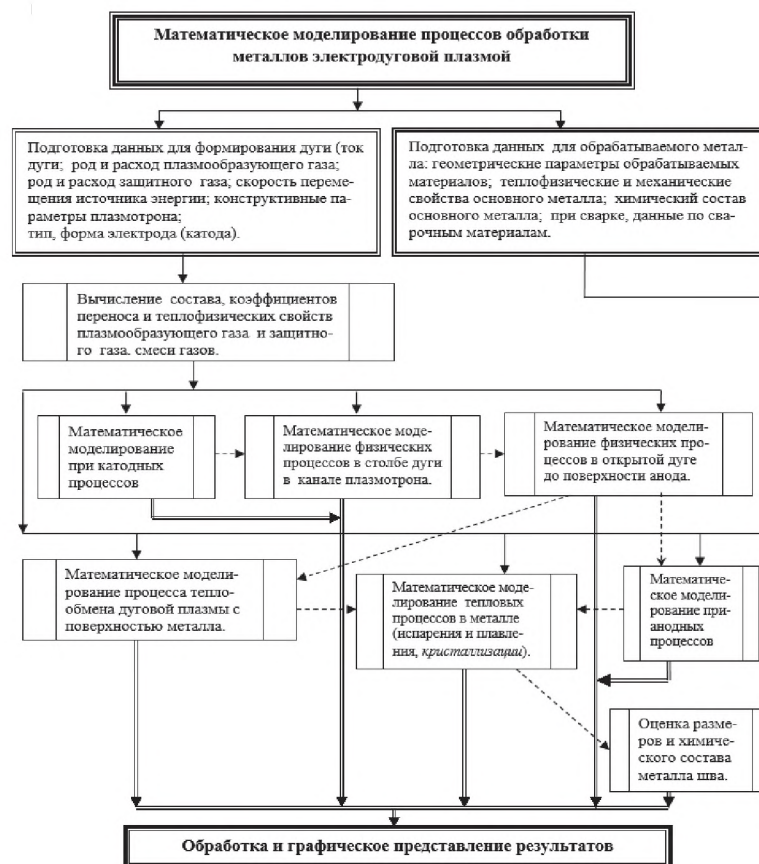


Рис. 1. Задачи математического моделирования процессов плазменной обработки металлов.

Для приведенных на схеме задач моделирования по отдельности известны решения при различных постановочных условиях. Исследованиям электромагнитных, тепловых и газодинамических явлений электрической дуги, а также распределения температурных полей в металле посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований [1-5]. С технологической точки зрения наиболее информативным представляется рассмотрение взаимодействия *дуга – поверхность* и его описание выполняется либо в виде сопряженных задач, либо на основе единой системы МГД уравнений, записываемой для всей рассматриваемой области [7-8]. Сопряженная их постановка позволяет развивать известные модели для технологических задач, таких как сварка и резка.

Одним из путей решения вопроса повышения проплавляющей способности, и т.о. тепловой эффективности дуговой плазмы является - применение высокоэнтальпийных рабочих сред. Широкий диапазон используемых газов и их смесей, обладающих значительно различающимися теплофизическими свойствами, обуславливает большие технологические возможности. Например, двойные и тройные смеси инертных и активных газов на основе аргона $Ar+O_2$, $Ar+CO_2$, $Ar+N_2$ и $Ar+He$, находят все более широкое применение так как имеют ряд технологических преимуществ: меньшую по сравнению с активными газами интенсивность химического воздействия на металл, высокую устойчивость дугового процесса, благоприятный характер переноса электродного металла через дугу. В последние годы исследования теплофизических и транспортных свойств рабочего газа вызывают большой интерес и относятся к актуальным задачам.

Для проведения, численного анализа характеристик дуговой плазмы с использованием многокомпонентных смесей рабочих газов и нагрева поверхности обработки были проведены расчеты компонентного состава и свойств рабочих смесей, заданных в весовых долях процентных соотношений компонентов в температурном интервале от 300 до 35000K.

Вычисления проведены с помощью программ АСТРА4, ТЕРРА. Полученные результаты показаны на рис. 2 и 3.

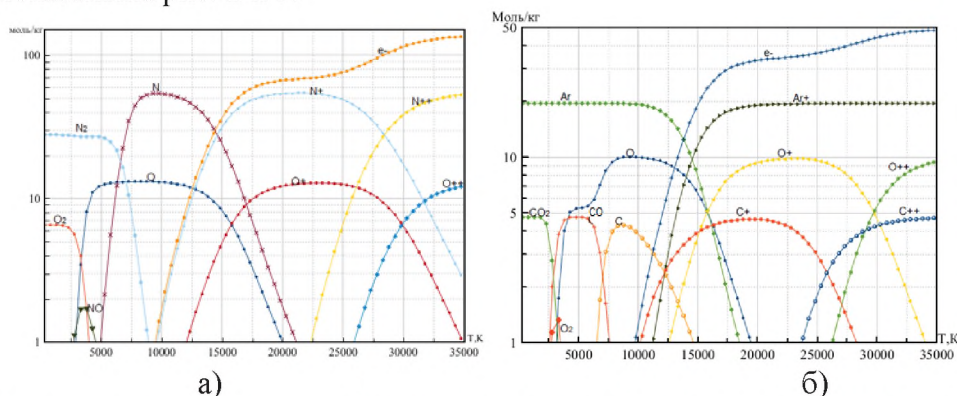


Рис.2. Компонентный состав рабочих смесей при 0,1МПа $T=300-35000\text{K}$: а) $\text{N}_2 - 78\%$, $\text{O}_2 - 21\%$, $\text{CO}_2 - 0.03\%$, $\text{Ar} - 0.93\%$; б) $\text{N}_2 - 0.03\%$, $\text{O}_2 - 0.93\%$, $\text{CO}_2 - 21\%$, $\text{Ar} - 78\%$

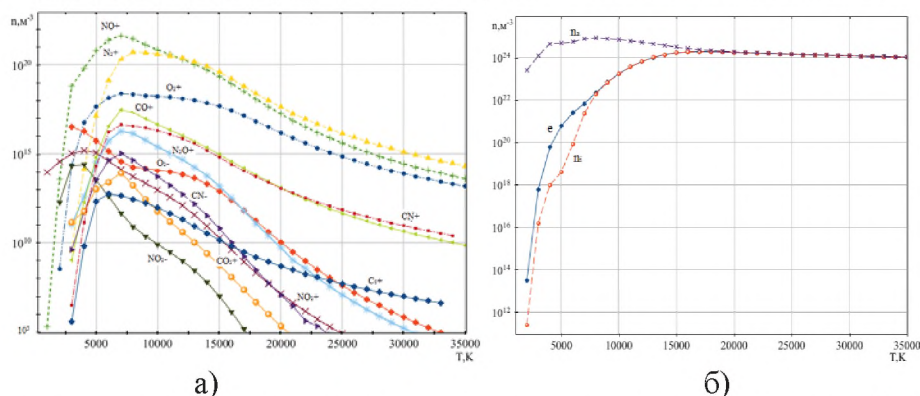


Рис. 3. Концентрации компонентов воздушной плазмы при $P = 0,1\text{МПа}$, $T = 3000 - 35000\text{K}$: а) молекулярные ионы; б) атомы n_a , электроны и ионы n_i .

По результатам можно определить доминирующие в определенных температурных интервалах группы компонентов, что необходимо для понимания характера протекающих физических процессов. Результаты удовлетворительно согласуются с данными других авторов [8], имея некоторый разброс при высоких температурах. Это объясняется в основном используемыми методами вычислений интегралов столкновений и концентрационных компонентов.

На рис. 4. в качестве примера, показаны полученные распределения значений теплоемкости и энтальпии для рассматриваемых смесей. Резкие их изменения обусловлены процессами диссоциации молекул и ионизации атомов, которые еще более сильно отражаются на изменениях теплоемкости различных компонентов воздушной смеси.

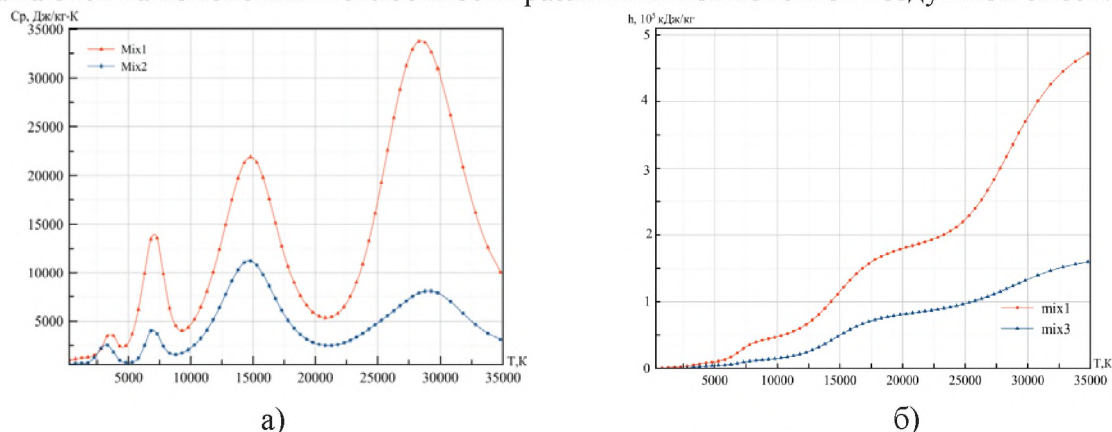


Рис. 4. Теплоемкость (а) и энтальпия (б) смесей а) $\text{N}_2 - 78\%$, $\text{O}_2 - 21\%$, $\text{CO}_2 - 0.03\%$, $\text{Ar} - 0.93\%$; б) $\text{N}_2 - 0.03\%$, $\text{O}_2 - 0.93\%$, $\text{CO}_2 - 21\%$, $\text{Ar} - 78\%$ и при $P = 0,1\text{МПа}$, $T = 000 - 35000\text{K}$.

С помощью рассчитанных свойств рабочей среды выполнен численный анализ нагрева электродуговой плазмы в канале плазматрона в зависимости от состава смесей, определены температурные профили на основе моделирования нагрева газа с позиций локального термодинамического равновесия на установившемся участке дуги. Оценка температурных профилей выполнена на основе упрощенной математической модели. Математическая модель на основе МГД – уравнений, записанных в цилиндрической системе координат, расчетная схема, граничные условия и метод решения подробно описаны в работе [3]. Предполагается, что градиент давления постоянный и внешние магнитные поля отсутствуют, плазма оптически прозрачная и излучение описывается в объемном приближении, вязкая диссипация не учитывается.

Изделие представляет собой полубесконечную пластину толщиной ℓ_m , с начальной температурой T_0 ; электрическая дуга прямого действия привязана анодным пятном к поверхности изделия. При нагреве образуется жидкий слой металла толщиной δ , через который осуществляется теплоперенос к твердой фазе и на внешней поверхности которого температура металла равна температуре кипения, а на внутренней границе фазового перехода из твердого в жидкое состояние (межфазная граница) поддерживается постоянная температура, равная температуре плавления.

Результаты расчетов, приведены на рис.5 - 7. Как видно из полученных температурных профилей с увеличением количественного содержания аргона в составе рабочей смеси: $N_2 - 0.03\%$, $O_2 - 0.93\%$, $CO_2 - 21\%$, $Ar - 78\%$; в приосевых участках канала при силе тока $I=200A$ и радиусе канала $0,0025mm$, температура дуговой плазмы становится заметно выше по сравнению с температурой на тех же участках воздушной дуги и значительно выше на 2000-4000K температурного профиля аргоновой дуги (рис.6).

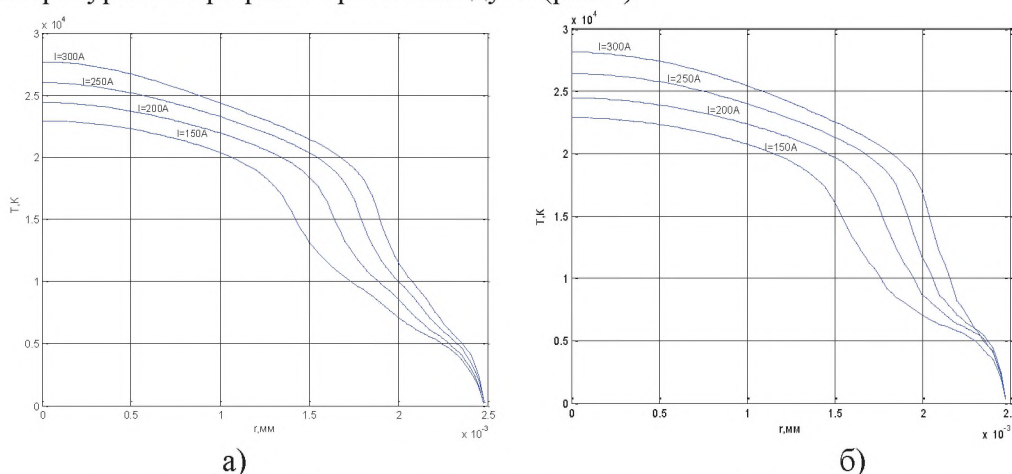


Рис.5. Профили температуры по сечению в смесях следующего состава: а) $(N_2 - 78\%) + (O_2 - 21\%) + (CO_2 - 0.03\%) + (Ar - 0.93\%)$; б) $(N_2 - 0.03\%) + (O_2 - 0.93\%) + (CO_2 - 21\%) + (Ar - 78\%)$ при $r=0,0025m$.

Это объясняется переносом энергии диссоциации и ионизации в процессах диффузии, составляющих плазмы из зоны высоких температур в низкотемпературную область, в которой происходит их ассоциации и рекомбинация. В рассматриваемых рабочих смесях в диапазоне температур 20000-25000K увеличиваются теплопроводность и электропроводность, и приводит к более быстрому нагреванию газа в этих смесях. А также при больших токах основную роль в формировании радиального распределения температуры играет излучение, приводящее к более наполненным профилям.

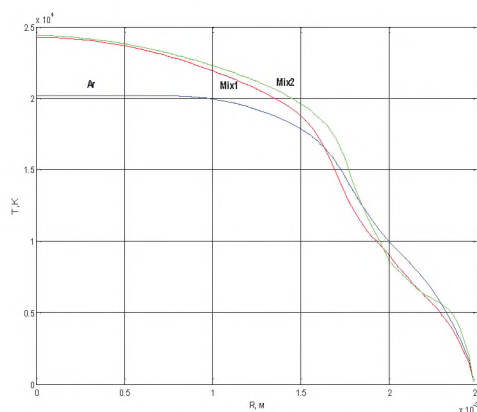


Рис.6. Температурные профили по сечению: чистый аргон, смесь Mix1: ($N_2 - 78\%$, $O_2 - 21\%$, $CO_2 - 0.03\%$, $Ar - 0.93\%$) и смесь Mix2: ($N_2 - 0.03\%$, $O_2 - 0.93\%$, $CO_2 - 21\%$, $Ar - 78\%$) при $R=0.0025\text{ м}$ и $I=200\text{ А}$.

Оценка теплового вклада источника энергии в изделие всегда является основной задачей при рассмотрении любого технологического процесса, связанного с тепловой обработкой материалов. Важную роль в передаче энергии от столба дуги обрабатываемому металлу играет и определяет характер его нагрева анодная область дуги, сложная для модельного представления зона взаимодействия дуговой плазмы с металлом, для которой в некоторых работах применяются методики согласования между кинетическим подходом и МГД приближением [6]. Согласно современным представлениям плазмодинамической ситуации прианодных явлений:

- Функционирование прианодной области дуги характеризуется анодным падением потенциала. Знак и величина анодного падения потенциала зависят от формы как самого анода, так и окружающего газового пространства, от рода и давления газа, силы тока, ряда других факторов.

- область отрицательного объемного заряда Электроны проходя анодную область, резко увеличивают скорость своего движения и, попадая на анодное пятно, тормозятся и нейтрализуются. При торможении электронов выделяется вся приобретенная ими в области анодного падения напряжения кинетическая энергия.

- В передаче энергии к поверхности анода вносят вклад: конвективная теплоотдача от столба дуги через пограничный слой, включающая тепло, выделяющееся в пограничном слое; излучение дуги; кинетическая энергия электронов, составляющих ток дуги и соударяющихся с поверхностью анода; энергией электронов (работа выхода), проникающих через поверхность анода. Газ, состоящий из тяжелых частиц и электронный газ передают энергию аноду независимо друг от друга.

- Прианодная область характеризуется высокими градиентами температур и тепловыми потоками. Температура газа в этой области падает от температуры столба дуги до температуры поверхности анодного пятна $\sim 3000\text{ К}$.

- Тепловая мощность, выделяющаяся в анодной области, передается аноду и расходуется на его нагрев и плавление.

Таким образом, рассматриваемые сопряженные задачи замыкает решение нестационарного уравнения теплопроводности на аноде, для определения характера протекания процессов нагрева и плавления металла и размеров зоны расплавленного металла. Расчеты выполнены на основе математической постановки задачи, описанной в работе [3], где приведены граничные условия и метод решения. Тепловая мощность, выделяющаяся в анодной области, определяется из условий сопряжения тепловых потоков на границе дуга – поверхность.

На рис. 7-10 показаны в качестве примера результаты выполненных расчетов: распределение температуры изделия на его поверхности в зависимости от времени при воздействии источника нагрева (рис. 8); изолинии температур на поверхности

непосредственного воздействия источника энергии. Полученные графики позволяют провести первичную оценку размеров зон расплавленного металла и термического влияния (рис.9), в зависимости от мощности движущегося источника энергии. Начало координат привязано к источнику. Расчеты были выполнены для поверхности с теплофизическими свойствами, соответствующим Стalii 20.

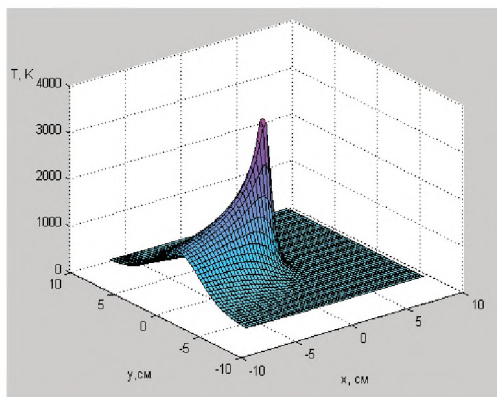


Рис. 7. Распределение температуры на поверхности обработки.

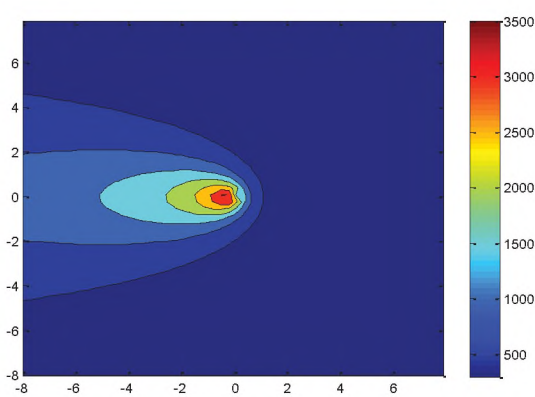


Рис. 10. Изолинии температур на поверхности обработки.

Выводы. Таким образом, для исследования влияния рабочих смесей газов на характеристики электродуговой плазмы и тепловую эффективность взаимодействия плазменно-дугового потока с обрабатываемой поверхностью:

- выполнен расчет компонентного состава и свойств рабочих смесей, заданных в весовых долях процентных соотношений компонентов в температурном интервале от 300 до 35000 К.
- проведен численный анализ характеристик дуговой плазмы, результаты которого показали, что температурные профили выше - до 2000 К для рассматриваемых смесей активных и инертных газов.
- получено распределения температурных полей на обрабатываемой поверхности, позволяющие оценить размеры зон нагрева и плавления.

Список литературы

1. Влияние состава защитного газа и конструкции неплавящегося катода на проплавляющую способность дуги и формирование сварных швов / А. В. Савинов, В. И. Атаманюк, И. Е. Лапин и др. // Сварочное производство. - 2009. - 12. - С. 39 - 43.
2. Компьютерное моделирование процессов обработки материалов высокочастотными потоками энергии / А. Ж. Жайнаков, О. П. Солоненко, Г. Д. Кабаева, А. А. Головин. - Бишкек, Илим. 2011 – 228 с.
3. Князева А. Г. Моделирование физических и химических явлений в процессах обработки поверхностей материалов высокоэнергетическими источниками / А. Г. Князева // Математическое моделирование систем и процессов. - 2009. - № 17. - С. 66 – 84
4. Солоненко О. П. Нестационарный сопряженный теплообмен и фазовые превращения при высокоэнергетической обработке поверхности. Часть 2: Моделирование технологических процессов // О. П. Солоненко, А. А. Головин // Теплофизика и аэромеханика. - 2007. - № 4. - Т. 14. - С. 623–638.
5. Теория столба электрической дуги. Низкотемпературная плазма. Т. 1 / В. С. Энгельшт, В. Ц. Гурович, Г. А. Десятков и др. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1990. - 376 с.
6. Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding. / M. Tanaka, S. Tashiro, T. Satoh, A. B. Murphy and J. J. Lowke // Science and Technology of Welding and Joining – 2008- vol. 13. № 3. P. 225-231.

7. Plasma–weld pool interaction in tungsten inert-gas configuration. / J. Mougnot, J. Gonzalez, P. Freton and M. Masquère // J. Phys. D: Appl. Phys. 46. 2013. 135-206.
8. Numerical study and comparisons of gas tungsten arc properties between argon and nitrogen/ Shanping Lu, Wenchao Dong, Dianzhong Li, Yiyi Li. // Computational Materials Science 45 (2009) 327–335
9. M. C. Tsai Heat Transfer and Fluid Flow in Welding Arcs Produced by Sharpened and Flat Electrodes./ M. C. Tsai and S. Kou. // Int. J. Heat and Mass Transfer, 1990. vol. 33. pp. 2089-2098.

УДК 621.791

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В МАГНИТНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКЕ

Жайнаков Аманбек, д.ф.-м.н., профессор, академик, КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: jainakov-41@mail.ru

Рассмотрены основные этапы становления вычислительной школы Кыргызстана в области численного моделирования в физике низкотемпературной плазмы. Подчеркивается важная роль современных вычислительных средств и новых компьютерных технологий в решении ресурсоемких задач магнитной газовой динамики. Приведена математическая модель и метод численного решения трехмерных уравнений, описывающих процессы тепло - массообмена в электродуговой аргоновой плазме атмосферного давления.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, магнитная газовая динамика, неравновесная трехмерная математическая модель, аргоновая плазма, тепло-массообмен.

COMPUTATIONAL TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING IN MAGNETO HYDRODYNAMICS

Zhaynakov Amanbek, D.Sc., professor, academician, KSTU im.I.Razzakova, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Mira 66, e-mail: jainakov-41@mail.ru

The main stages of computer schools in Kyrgyzstan in the field of numerical simulation of low-temperature plasma physics. The important role of advanced computational tools and new computer technology in solving demanding tasks of magnetic gas dynamics. The mathematical model and numerical method for three-dimensional equations describing the processes of heat - mass transfer in an electric argon atmospheric pressure plasma.

Keywords: low-temperature plasma, magneto hydrodynamics, nonequilibrium three-dimensional mathematical model, argon plasma, heat and mass transfer.

Бурное развитие новых плазменных технологий настоятельно требует дальнейшего, более глубокого изучения теплофизических процессов и свойств электродуговой плазмы. Наряду с экспериментальными исследованиями, большое значение имеет теоретические методы.

В настоящее время теоретическое исследование электродуговой плазмы происходит в двух основных направлениях.

Первое из них – это развитие аналитических методов, которые позволяют в упрощенной форме исследовать зависимость между основными параметрами разряда.

Второе направление – это численное моделирование, или вычислительный эксперимент, потенциальные возможности которого неизмеримо больше аналитических