

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

На правах рукописи
УДК 539.99

АСАНОВ ДАМИР САТАРКУЛОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ
С ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек – 2007

Handwritten signature and date:
20.04.07

- Научный руководитель: академик НАН КР,
доктор физико-математических наук,
Жайнаков А.Ж.
- Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Болотов А.В., г. Алматы,

кандидат физико-математических наук,
Султангазиева Р.Т., г. Бишкек.
- Ведущая организация: Кыргызско-Российский Славянский
Университет, г. Бишкек.

Защита диссертации состоится « 6 » апреля 2007 г. в 16.00 часов на заседании Межведомственного Диссертационного Совета Д 01.07.342. при ИФ НАН КР, Иссык-Кульском Университете им. Тыныстанова К. и Ошском Государственном Университете, по адресу: 720071, г.Бишкек, проспект Чуй, 265 а.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке НАН КР.

Автореферат разослан « 2 » *марта* 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

Л. К. Меренкова Л. К. Меренкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Большое распространение получили в настоящее время электродуговые генераторы плазмы (плазматроны), основным элементом которых является сильноточный дуговой разряд. Поэтому электрическая дуга в канале плазматрона стала объектом интенсивных исследований. Значительно меньше изучены свободно горящие сильноточные дуги, имеющие большое практическое значение для сварочного производства и плазменной металлургии.

Актуальность работы обусловлена широким применением электрической дуги в народном хозяйстве, в частности, при проектировании плазменных установок в металлургии и сварочном производстве. Плавящийся электрод отличается от тугоплавких электродов тем, что в процессе дугового разряда меняет свою геометрию из-за формирования жидкой капли на торце электрода, что существенно оказывает влияние на устойчивое горение разряда и качество свариваемого изделия. Существующие экспериментальные методы исследования не полностью позволяют изучать теплофизические характеристики сварочной дуги из-за скоротечности процессов и ограниченным межэлектродным промежутком. Имеющиеся к настоящему времени, численные методы дают распределения электрического, теплового и газодинамического полей в виде численных данных, применение которых ограничено при изучении нестационарных процессов сварочной дуги. Поэтому представляется актуальным аналитическое исследование сварочных процессов на основе экспериментальных данных и данных численного расчета.

Связь темы диссертации с планами научных работ. Диссертационная работа выполнялась в соответствии с планами научных работ кафедры теоретической физики факультета физики и электроники КНУ им.Ж.Баласагына.

Цель и задачи исследований. Цель работы заключалась в изучении электрофизических и теплофизических процессов сварочной дуги с плавящимся электродом при разных режимах разряда с учетом особенностей переноса расплавленного металла и геометрии свариваемого изделия.

Для достижения поставленной цели ставились следующие задачи:

1. Теоретически исследовать формирование и перенос расплавленного металла в виде капли и струи на сварочную ванну.
2. Исследовать электрофизические и теплофизические характеристики между электродом и каплей в момент отрыва и переноса в межэлектродном пространстве, а также в сварочном шве.

3. Создание комплекса вычислительных программ для анализа и расчета теплофизических параметров нелинейных вычислительных процессов.

Научная новизна. Впервые используются гладкие функции из теории кривых и поверхностей в евклидовом пространстве для описания геометрии поверхности расплавленного металла для капельного и струйного переноса. Применен метод крупных частиц для исследования обтекания плазмообразующим газом цилиндрического электрода, капли на разных стадиях ее развития и переноса в межэлектродном пространстве. Предложена математическая модель при электродного процесса, учитывающая наличие паров металла. Впервые получена оценка электрических параметров дуги в момент отрыва и переноса капли с торца электрода в сварочную ванну. Разработаны алгоритм и программа расчета теплофизических процессов сварочной дуги при разных геометриях электрода и свариваемого изделия.

Практическая ценность работы.

1. Разработанные математические модели имеют фундаментальное значение в теории электрической дуги с плавящимся электродом.
2. Разработанные модели развития электродугового разряда с плавящимся электродом и аналитические модели могут быть использованы при проектировании электросварочного комплекса.
3. Разработанные математические модели позволяют выявить оптимальные рабочие режимы электродуговой сварки и прогнозировать возможные её затухания с учетом неоднородности геометрии сварочного шва.
4. Разработанные алгоритмы и прикладные программы могут быть использованы для расчета теплофизических процессов сварочной дуги и при решении аналогичных задач.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Математический метод оценки электрического поля дуги при разных геометриях поверхности расплавленного металла электрода и сварочной ванны.
2. Математическая модель расчета теплофизических параметров электрической дуги между плавящимся электродом и свариваемым изделием.
3. Математическая модель прикатодной области сварочной дуги.
4. Результаты и выводы распределения электрического и температурного полей в межэлектродном пространстве с учетом разных геометрий расплавленного электрода и сварочной ванны при разных режимах электрической дуги.

Личный вклад соискателя. Автором проведен анализ литературных данных, решены теоретические и практические задачи по исследова-

нию электрической дуги с плавящимся электродом. Разработаны алгоритмы расчета соответствующих моделей и реализованы программы на ЭВМ с применением современных компьютерных технологий. В работах [1-6], [9],[13],[17] научным руководителям академику НАН КР Жайнакову А.Ж., Слободянюку В.С. принадлежит постановка задачи и обсуждение результатов, а соискателю - проведение расчетов, получение конкретных результатов, их анализ и обсуждение. В монографии [3, гл. 4] соискателю принадлежит расчет потоков тепла и импульса, вблизи погруженного в дуговую плазму электрода, исследования электрической дуги с плавящимся электродом.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты и положения работы докладывались на VIII-X Всесоюзной конференциях «Генераторы низкотемпературной плазмы» (Новосибирск, 1980, Фрунзе, 1983, Каунас, 1986), на Международных научных конференциях: (Минск, 1981, Бишкек, 2003, 2006), на региональных научно-практических конференциях (Бишкек, 2003, 2005, Москва, 2006).

Опубликованность результатов диссертации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Работа содержит 118 страниц машинописного текста, 46 рисунков и 82 библиографических ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность, сделан краткий обзор экспериментальных и теоретических исследований сварочной дуги, сформулированы цель и задачи диссертации, отмечена научная новизна и практическая ценность, указаны публикации и структура диссертации.

В первой главе приводится краткий литературный обзор работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям электрической дуги. Рассматриваются особенности дугового разряда с плавящимся электродом при разных режимах горения. В качестве объекта исследования принята электрическая дуга сварочного процесса. Приведены общие сведения о сварке, сварных соединениях и швах, а также, о защитных плазмообразующих газах. Проведен краткий анализ применяемых источников питания сварочной дуги и технологии дуговой сварки.

Во второй главе рассмотрена динамика развития расплавленного металла на торце сварочного электрода. Используются математические методы анализа для описания формы капли и струи при сварке. Также рассмотрен перенос капли в импульсном режиме сварки.

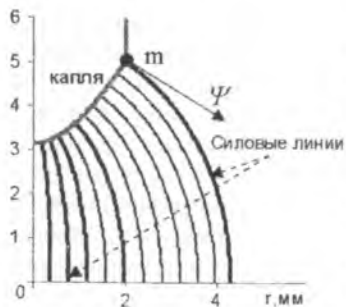


Рис. 1. Распределение силовых линий между каплей и сварочной ванной.

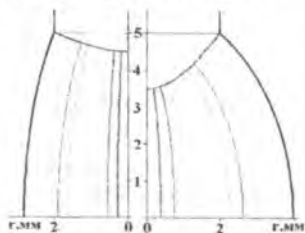


Рис. 2. Силовые линии при разных значениях размеров капли. $R=2$ мм.

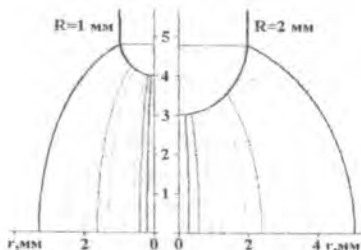


Рис. 3. Силовые линии сварочной дуги при разных значениях радиуса.

$$a_g = \sqrt{x_m^2 + \frac{(H - b_g \sqrt{1 - \frac{x_m^2}{a_g^2}})^2}{a_g^2 z_m (H - y_m)}}, \quad b_g = \sqrt{\frac{a_g^2 a_y^2 z_m}{b_g^2 x_m^2} (H - y_m)}. \quad (2)$$

На основе результатов анализа киограмм электродуговой сварки и теоретического исследования определено, что на начальной стадии капля имеет геометрию в виде: $y = H - A \cos(\frac{\pi x}{2R})$, где A – высота свисания жидкого металла, H – расстояние между электродом и сварочной ванной. Силовые линии электрического поля дуги определяются в виде кривых второго порядка, которые подходят к поверхности капли нормально (рис.1). Нормаль $\vec{\psi}$ к поверхности электрода в точке m в свою очередь является касательной $\vec{\psi}$ к силовым линиям электрического поля, интерполированной в виде линий эллипса. Параметры поверхности определяются из геометрии капли:

$$a_v = \sqrt{\frac{2R \cdot x_m^2 z_m - A^2 \pi x_m \sin(\frac{\pi x_m}{2R}) \cdot \cos^2(\frac{\pi x_m}{2R})}{2R \cdot z_m}},$$

$$b_g = \sqrt{\frac{2R a_g^2 z_m}{A \pi \cdot x_m \cdot \sin(\frac{\pi x_m}{2R})}}. \quad (1)$$

Из рис.2 видно, что изменение размеров электрода и капли приводят к расширению поперечного размера силовых линий электрического поля.

Для капли в виде эллипса

$\frac{x^2}{a_g^2} + \frac{(y-H)^2}{b_g^2} = 1$ (рис. 3), параметры силовых линий электрического поля имеют следующий вид:

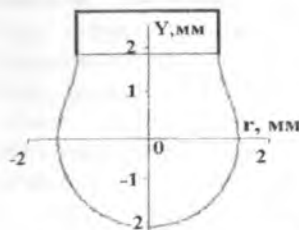


Рис.4. Линия боковой поверхности капли перед отрывом с торца электрода.

Расплавленный электрод, по мере набирания своей массы приобретает форму эллипсоида вращения (поперечные масштабы сравнимы с диаметром электрода): $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$.

Перед отрывом поперечные размеры капли превышают диаметр электрода (рис.4). Тогда уравнение линии верхней части капли имеет в следующем вид:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$$

Коэффициенты a_0, a_1, a_2 и a_3 определяются из баланса сил веса капли и поверхностного натяжения, а также требованиям выполнения ус-

ловий непрерывности поверхности верхней и нижней части капли и выполнением гладкого сопряжения кривизны линий. Форма донной части капли рассматривается в виде эллипсоида вращения.

Взаимодействие защитного газа с электродом, каплей на разных стадиях ее существования исследовалось методом крупных частиц (рис. 5-7). Используются следующие граничные условия: в начале расчетной области – условие набегающего потока газа (расход газа 20 л/мин); на оси – условие симметрии потока. На открытой боковой границе задавались условия гладкого сопря-

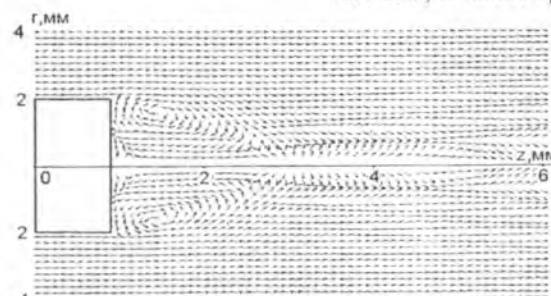


Рис. 5. Обтекание электрода.

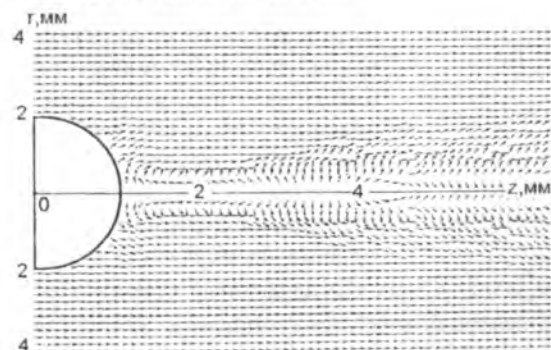


Рис. 6. Обтекание капли на торце электрода.

жения с окружающей средой. На выходе проводилась экстраполяция параметров течения за рассматриваемую область.

Электрическое поле сварочной дуги определено решением уравнения Лапласа методом конформных преобразований – метода анализа и расчета эквипотенциальных и силовых линий. Граничные условия на электроде $\varphi = U$, на сварочной ванне $\varphi = 0$.

Электрические параметры дуги вычисляются по формуле:

$$E_v = \frac{m \cdot x \cdot \operatorname{tg} \frac{U}{m}}{k^2 \left(1 - 2 \operatorname{Sin}^2 \frac{U}{m} \right) - (x^2 + y^2)}, \quad (3)$$

$$\varphi = m \cdot \arcsin \left(\sqrt{\frac{k^2 - x^2 - y^2 + \sqrt{(x^2 + y^2 - k^2)^2 + 4k^2 y^2}}{2k^2}} \right) \quad E_v = - \frac{m \cdot y \cdot \operatorname{ctg} \frac{U}{m}}{k^2 \left(1 + 2 \cdot \operatorname{Sin}^2 \frac{U}{m} \right) - x^2 - y^2},$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}. \quad (4)$$

При определении теплофизических параметров дуги в атмосфере Ar, электропроводность низкотемпературной плазмы интерполировалась функцией $\sigma(T) = 55770 \cdot \exp\left(-\frac{31113,8}{T}\right)$, а излучательная способность защитного газа $\psi = 1,25 \cdot 10^{12} \cdot \exp\left(-\frac{88000}{T}\right)$.

Распределение температуры по сечению столба дуги задавалось в виде функции $T(x) = \frac{T_0}{1 + \tau \cdot x}$, где $x = \frac{r^2}{R^2}$, τ - коэффициент определяется из граничных условий $\tau = \frac{T_0 - T_R}{T_R}$. T_0 - температура на оси дуги, определяется из совместного решения уравнения энергии $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma E^2 - \psi = \rho \cdot c_p \cdot u \frac{\partial T}{\partial z}$ и интегрального закона Ома $I = 2\pi \int_0^R \sigma E r dr$ численно из нелинейного соотношения:

$$\sqrt{\frac{e^{\sigma_1/T_0}}{\sigma_0} \left[\frac{4T_0 \tau \lambda_0}{R^2} e^{-\frac{\lambda_1}{T_0}} + \psi_0 \cdot e^{-\frac{\psi_0}{T_0}} - \rho_0 \cdot c_p \cdot u \cdot k \cdot T_0 \cdot e^{-\left(\frac{\rho_0 c_p u}{T_0}\right)} \right]} = \frac{I \left(\varepsilon + \tau \frac{\sigma_1}{T_0} \right)}{\pi \sigma_0 R^2 \left(e^{\frac{\sigma_1}{T_0}} - e^{-\left(\varepsilon + \frac{\sigma_1}{T_0}\right)} \right)}. \quad (5)$$

Вычисления теплофизических параметров сварочной дуги проводились для электрического тока $I=200$ А при длине дуги $L=0,005$ мм. Радиальное распределение температуры и напряженности электрического поля, полученные для разных сечений дуги, приведены на (рис.10) и

Граничные условия на электроде и капле – условие непроницаемости стенки (прилипание). Для случая дробных ячеек: внутри капли формируется слой целых фиктивных ячеек, прилегающих к дробным ячейкам. Из центра фиктивной ячейки на контур жидкого металла опускается нормаль. Газодинамические параметры в расчетной ячейке определяются путем «взвешивания», где суммирование проводится по тем ячейкам, часть площадей которых попали в исследуемую ячейку.

Полученные расчетные поля вектора скорости (рис. 5-7) показывают зарождение срыва и образование вихревых течений за торцом плавящегося электрода и сферической капли. Из (рис. 8) видно, что наблюдаемый по потоку перепад давления оказывает ощутимое ускоряющее действие на каплю.

При струйном переносе геометрия поверхности жидкого металла описывается кривой

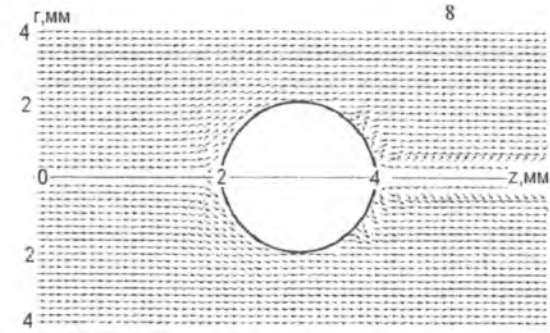


Рис. 7. Обтекание сферической капли.

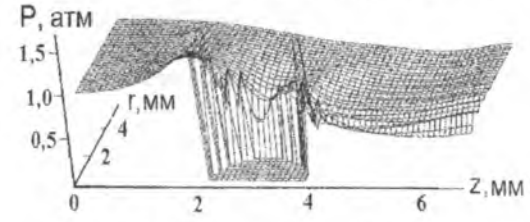


Рис. 8. Поле давления вокруг сферической капли.

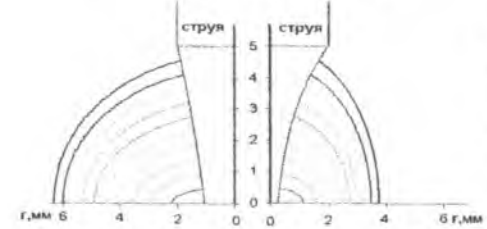


Рис. 9. Картина силовых линий электрического поля при разных размерах струи жидкого металла.

(рис.9) $y = \alpha_1 \cdot \exp(-\beta_1 \cdot x) - \alpha_2 \cdot \exp(-\beta_2 \cdot x)$. Предложенные геометрические параметры расплавленного электрода являются функциями эквипотенциальных линий электрического поля капли и струи, которые в дальнейшем будут использованы при расчете электрических и теплофизических характеристик дуги.

В третьей главе рассматривается задача определения электрического поля сварочной дуги при отрыве и переносе капли с торца электрода, а также при струйном переносе жидкого металла в сварочную ванну.

(рис.11), где на осевой области наблюдается наличие высокотемпературной проводящей зоны.

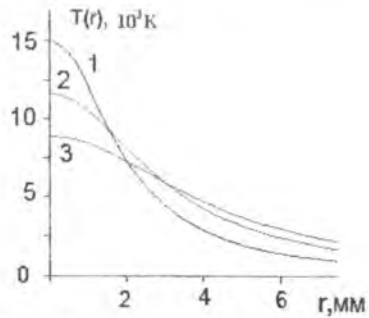


Рис. 10. Радиальное распределение температуры.

1 - $z=0$, 2 - $z=L/2$, 3 - $z=L$.

Радиальное распределение давления создаваемого собственными электромагнитными силами в сварочной дуге вычисляется следующим образом:

$$P = P_1 + P_2,$$

$$P_1 = \mu_0 E^2 \left\{ \int_r^\delta \frac{\sigma(s)}{s} \int_0^s \sigma(t) t dt ds \right\}, \quad P_2 = \mu_0 E^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \int_0^r \sigma(t) t dt \right)^2 \right\},$$

где, δ - граница токопроводящей зоны, μ_0 - магнитная постоянная.

Для изучения теплофизических процессов происходящих при отрыве капли с торца электрода создана математическая модель, где перемычка рассматривается в виде несоприкасающихся конусообразных воронок с углами θ_1 и θ_2 (рис.13). Граничные условия: при

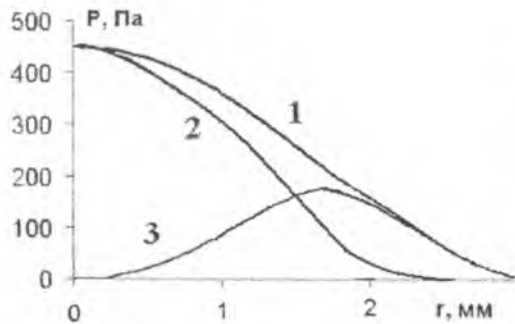


Рис. 12. Радиальное распределение давления 1 - $P=P_1+P_2$, 2 - P_1 , 3 - P_2 .

$\theta = \theta_3$ $\varphi = \varphi_3$ - условие на электроде, при $\theta = \theta_k$ $\varphi = \varphi_k$ - условие на поверхности капли.

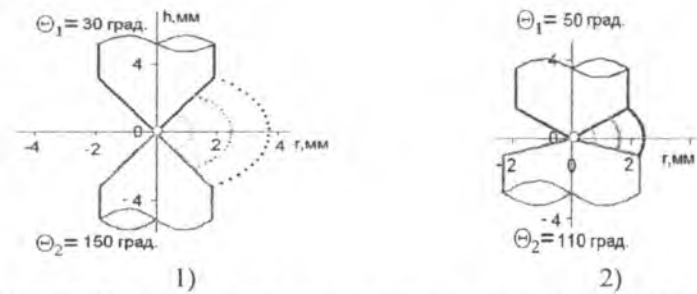


Рис. 13. Схема момента отрыва капли от электрода при (1) диффузионной и (2) контрагированной привязке сварочной дуги.

Потенциал точки находящейся между электродом и каплей является решением уравнения Лапласа:

$$\varphi = \frac{\varphi_3 - \varphi_k}{\ln \left(\frac{r \sin(\theta/2)}{r \sin(\theta_k/2)} \right)} \ln \left(r \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) + \frac{\varphi_k - (\varphi_3 - \varphi_k)}{\ln \left(\frac{r \sin(\theta/2)}{r \sin(\theta_k/2)} \right)} \frac{\ln \left(r \sin \left(\frac{\theta_k}{2} \right) \right)}{\ln \left(\frac{r \sin(\theta/2)}{r \sin(\theta_k/2)} \right)}$$

Напряженность поля имеет только θ - составляющую:

$$E_\theta = \frac{d\varphi}{R d\theta} = \frac{\varphi_3 - \varphi_k}{R \sin(\theta) \ln \left(\frac{r \sin(\theta_1/2)}{r \sin(\theta_k/2)} \right)} \quad (6)$$

Результаты расчета показывают (рис.14), что изменение электриче-

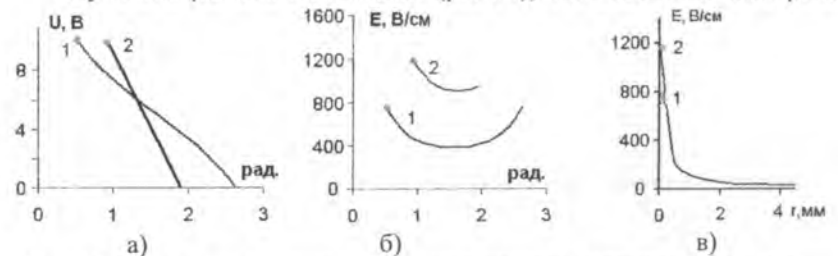


Рис. 14. Угловое распределение электрического потенциала (а), напряженности электрического поля (б) и радиальное распределение напряженности (в) вблизи острия конуса при 1) диффузионной привязке 2) контрагированной привязке сварочной дуги.

ского потенциала в зависимости от угла поворота между каплей и электродом имеет линейную форму зависимости. Напряженность электрического поля у поверхности электрода достигает достаточно больших величин, чтобы отрывать электроны с поверхности электрода и капли. С удалением от оси конуса напряженность электрического поля снижается.

Вблизи острия электрода напряженность электрического поля для крупнокапельного режима в два раза больше чем мелкокапельного переноса расплавленного электрода.

Разработана математическая модель двойного (каскадного) дугового разряда в электросварке. Для решения этой задачи интегрируется уравнение Лапласа $\nabla^2 \varphi = 0$ в частных производных в сферической системе координат.

Капля рассматривается как шар радиусом a . На поверхность капли силовые линии подходят нормально. Потенциал определяется в виде

$$\varphi = E_0 \cdot \left(R - \frac{a^3}{R^2} \right) \cdot \cos(\theta) \quad (7)$$

Напряженность электрического поля имеет две составляющие

$$E_R = -E_0 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a^3}{R^3} \right) \cdot \cos(\theta), \quad E_\theta = E_0 \cdot \left(1 - \frac{a^3}{R^3} \right) \cdot \sin(\theta) \quad (8)$$

На полюсах шара (рис.15) напряженность поля в три раза больше напряженности равномерного поля E_0 .

Таким образом, капля вызовет значительное местное увеличение напряженности электрического поля.

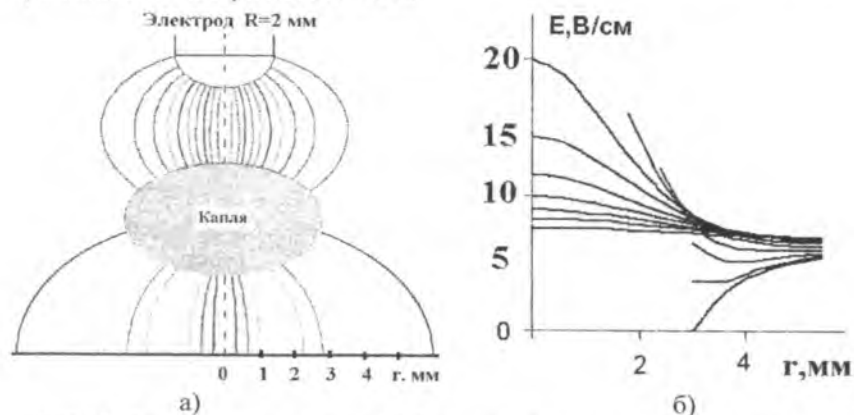


Рис.15. Схема силовых линий (а) и радиального распределения электрического поля дуги (б) при капельном переносе.

Следовательно, сверху и снизу капли есть возможность образования двойного дугового разряда в момент перехода капли в межэлектродном пространстве.

Для определения характера изменения температуры газа при сварке переменным током применяется метод интегрального преобразования Лапласа. Без токовый горячий газ в межэлектродном пространстве имеет форму ограниченного круглого цилиндра, поверхность которого поддерживается при температуре $T=T_R$, а начальная температура

$$T|_{t=0} = J_0 \left(\frac{\mu_{0i}}{R} r \right) \sin \left(\frac{\pi}{h} z \right) + T_R \quad (9)$$

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\begin{cases} T_t = a^2 \Delta T, & 0 < r < R, & 0 < z < h, & t > 0, & a^2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \\ T|_{t=0} = J_0 \left(\frac{\mu_{0i}}{R} r \right) \sin \left(\frac{\pi}{h} z \right) + T_R, & 0 \leq r \leq R, & 0 \leq z \leq h, \\ T|_{z=0} = T|_{z=h} = T_R, & T|_{r=R} = T_R, & t \geq 0, \end{cases} \quad (10)$$

где λ , c , ρ – теплопроводность, теплоемкость и плотность плазмы, h – высота столба дуги. T_R считается равной температуре жидкого металла.

Решение имеет вид

$$T(r, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} c_{nm} e^{-a^2 \nu_{nm} t} J_0 \left(\frac{\mu_{0m}}{R} r \right) \sin \left(\frac{n\pi}{h} z \right) + T_R \quad (11)$$

Из начального условия (9) определяются коэффициенты c_{nm} .

$$T(r, z, t) = \exp \left(-a^2 \pi^2 \left[\left(\frac{l}{h} \right)^2 + \left(\frac{\mu_{0l}}{R} \right)^2 \right] \cdot t \right) J_0 \left(\frac{\mu_{0l}}{R} r \right) \sin \left(\frac{\pi}{h} z \right) + T_R.$$

При падении капли уменьшается промежуток между каплями и сварочной ванной, т. е. $h \rightarrow 0$. Следовательно, кондуктивные потери тепла в аксиальном направлении значительно увеличиваются относительно радиальных, что может повлиять на устойчивое горение дуги вплоть до ее загорания.

Предлагается математическая модель прикатодной области сварочной дуги, учитывающая ионный токоперенос и испарение металла. Перенос тока через прикатодный слой описывается следующими уравнениями:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{e}{4\epsilon} n_i, \quad E = -\frac{dU}{dx}, \quad j_i = \frac{en_i v_i}{4}, \quad \frac{d}{dx} \left(\frac{m_i v_i^2}{2} \right) = eE, \quad (12)$$

где ϵ – диэлектрическая постоянная, n_i , v_i – концентрация и скорость ионов.

Напряженность электрического поля:

$$E = E_0 + \frac{e}{\varepsilon} n_i x, \text{ где } E_0 = I / \pi R_g^2 \sigma(T), S = \sqrt{8\varepsilon U_k / e n_i}. \quad (13)$$

S - тонкий приэлектродный слой.

Потоки импульса

$$K = K_0 + \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{R_g}{R_n}, \quad V = \sqrt{\frac{K}{\pi R_g^2 \rho(T)}}, \quad Q = \frac{h(T)}{V} K, \quad (14)$$

где K_0 - поток импульса с поверхности капли, V - скорость «катодной» струи. Q -конвективный поток тепла, μ_0 -магнитная проницаемость среды.

Испарение металла обусловлено тепловым потоком q в катод, определяемым выражением

$$q = jU_i + \frac{16}{3} \frac{m_i}{e^3 n_i^2} \left[\left(j_{i_0}^2 + \frac{e^3 n_i^2}{8m_i} U_k \right)^{3/2} - j_{i_0}^3 \right] + \frac{5}{2} j_{i_0} kT, \quad (15)$$

где $j = \frac{I}{\pi R_n^2}$ - плотность хаотического ионного тока.

Скорость паров металла на поверхности катода вычисляется по формуле

$$W = \frac{(q - j\Phi)}{\lambda \rho \mu} RT_k, \quad (16)$$

где R - универсальная газовая постоянная, λ - удельная теплота парообразования, μ - молекулярный вес, Φ - работа выхода электронов, P - давление в дуге, U_i - потенциал ионизации, m_i - масса ионов, n_i - концентрация ионов.

В четвертой главе приведены методы исследования силовых линий сварочной дуги с произвольной геометрией электрода и сварочной ванны. А также рассмотрены явления, происходящие в области свариваемого изделия с учетом особенностей свариваемой ванны и шва.

Отрываясь от электрода и попадая на сварочную ванну, она растекается по поверхности изделия.

$$a_x = \sqrt{x^2 + \frac{2A\lambda \cdot x_m^2 (H - Ae^{-ix_m}) e^{-ix_m}}{Z_m}}$$

$$b_x = \sqrt{\frac{a_x^2 z_m}{2A\lambda \cdot x_m^2 e^{-ix_m}}} \quad (17)$$

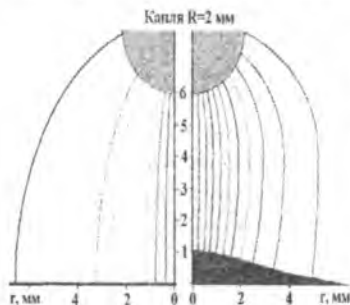


Рис. 16. Распределение силовых линий электрической дуги для плоской и выпуклой сварочной ванны.

Выражением (17) определяются параметры эллипса для силовых линий электрического поля нормально подходящих к поверхности выпуклого жидкого расплава (рис.16).

Для сварочной ванны имеющей вогнутую геометрию силовые линии электрического поля определяются следующим образом:

Уравнение поверхности капли:

$$\frac{x^2}{a_k^2} + \frac{y^2}{b_k^2} = 1, \text{ где } a_k = k \cdot ch \frac{U}{m}, \quad b_k = k \cdot sh \frac{U}{m}, \quad k = \sqrt{a_k^2 - b_k^2}. \quad (18)$$

Уравнение поверхности сварочной ванны:

$$\frac{x^2}{a_v^2} - \frac{y^2}{b_v^2} = 1, \text{ где } a_v = v \cdot ch \frac{U}{m}, \quad b_v = v \cdot sh \frac{U}{m}, \quad v = \sqrt{a_v^2 - b_v^2}. \quad (19)$$

В таком случае решению уравнения Лапласа удовлетворяет уравнение гиперболы

$$\frac{x^2}{a_r^2} - \frac{y^2}{b_r^2} = 1, \text{ где } a_r = \Gamma \cdot \cos \frac{V}{m}, \quad b_r = \Gamma \cdot \sin \frac{V}{m}, \quad \Gamma = \sqrt{a_r^2 - b_r^2}. \quad (20)$$

Постоянные m и k определяются из граничных условий исходя из того, что электрод и ванна имеют неодинаковую форму.

$$U = m \cdot \text{arc sh} \left(\pm \sqrt{\frac{x^2 + y^2 - k^2 \pm \sqrt{(x^2 + y^2 - k^2)^2 + 4k^2 y^2}}{2k^2}} \right), \quad (21)$$

$$E_x = \frac{mx \cdot sh \frac{U}{m}}{2k^2 sh^2 \frac{U}{m} \cdot ch \frac{U}{m} + k^2 ch \frac{U}{m} - x^2 ch \frac{U}{m} - y^2 ch \frac{U}{m}}, \quad (22)$$

$$E_y = \frac{my \cdot (1 + sh^2 \frac{U}{m}) + x^2 sh \frac{U}{m} \cdot ch \frac{U}{m}}{k^2 sh \frac{U}{m} \cdot ch \frac{U}{m} \cdot (1 + 2sh^2 \frac{U}{m}) - (x^2 + y^2) \cdot sh \frac{U}{m} \cdot ch \frac{U}{m}}. \quad (23)$$

Результат расчета $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ приведен на рис.16.

Из анализа полученных картин силовых линий видно, что привязка на электроде для вогнутой сварочной ванны уже, чем для плоской ванны (рис.17 а). Вариация размера электрода (рис.17 б) мало меняет картину силовых линий сварочной дуги. Сопоставление результатов (рис.16-17, рис.9 гл.2) показывает, что форма ванны электрода оказывает влияние на степень концентрации силовых линий, а следовательно, и на сварочный процесс.

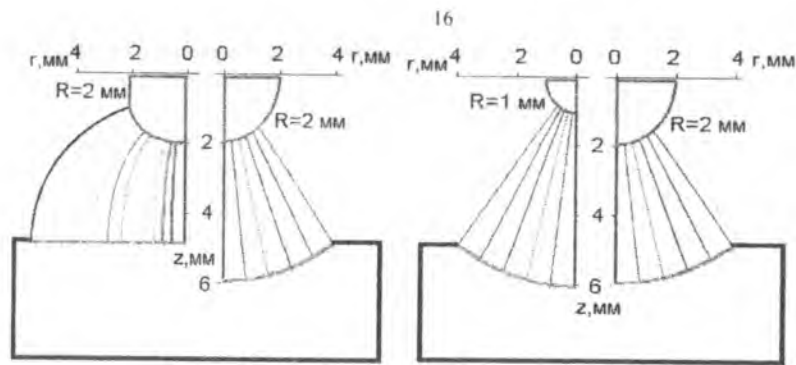


Рис. 17. Силовые линии сварочной дуги: а) для плоской и вогнутой сварочной ванны б) при разных радиусах электрода.

Определены электрический потенциал и напряженность электрического поля внутри сварочного шва. Глубина и форма проплавления свариваемого изделия зависят от множества параметров. В частности, немаловажную роль играет привязка электрической дуги к обрабатываемому изделию, а также глубина проникновения электрического поля внутрь сварочного шва. Рассмотрены модельные задачи: 1) длина свариваемого шва намного превышает ширину, 2) длина и ширина шва соизмеримы, 3) сварочный шов рассматривается как цилиндрическое отверстие.

1. Задача сводится к интегрированию уравнения Лапласа $\nabla\varphi=0$ в декартовой системе координат с учетом того, что длина шва намного превышает его ширину a и высоту b :

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}=0, \quad \text{тогда: } \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}=0.$$

Внутри прямоугольной области с граничными условиями

$$\varphi|_{x=a} = \varphi|_{x=0} = \varphi|_{y=0} = 0, \quad \varphi|_{y=b} = U_0.$$

Формула для вычисления потенциала имеет вид:

$$\varphi_3(x, y) = \frac{4u_0}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{(2k+1)\pi x}{a}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{(2k+1)\pi y}{a}\right)}{(2k+1) \operatorname{sh}\left(\frac{(2k+1)\pi b}{a}\right)}. \quad (24)$$

Формулы для расчета напряженности электрического поля (рис. 18):

$$E_x(x, y) = \frac{4u_0}{a} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos\left(\frac{(2k+1)\pi x}{a}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{(2k+1)\pi y}{a}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{(2k+1)\pi b}{a}\right)}, \quad (25)$$

$$E_y(x, y) = \frac{4u_0}{a} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{(2k+1)\pi x}{a}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{(2k+1)\pi y}{a}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{(2k+1)\pi b}{a}\right)}. \quad (26)$$

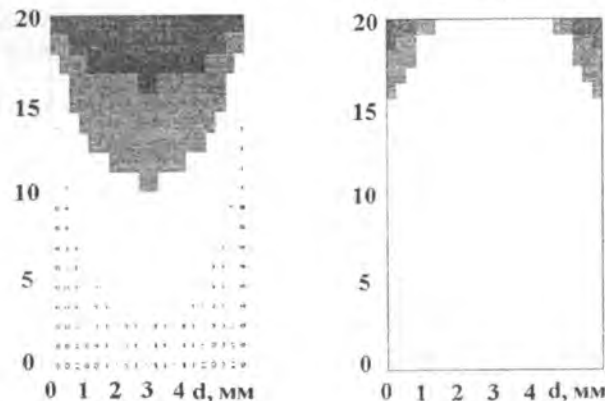


Рис. 18. Поле распределения изолиний φ и напряженности электрического поля E .

Поле распределения φ (рис. 18) показывает глубину проникновения электрического потенциала в сварочный шов. Отсюда видно, что напряженность электрического поля на торцах сварочного шва достигает максимального значения. Следовательно, основной электрический ток проходит на $1/3$ глубины шва, а также видно, что на $1/3$ высоты от основания призмы напряженность электрического поля $E \sim 0$.

2. Свариваемый шов имеет форму прямоугольного параллелепипеда со сторонами a , b и c . Считается, что одна грань прямоугольного параллелепипеда находится под потенциалом U , все прочие грани имеют нулевой потенциал. Общее решение уравнения Лапласа можно представить в виде линейной комбинации частных решений:

$$\varphi(x, y, z) = \sum_{n,m=1}^{\infty} A_{nm} \sin(\alpha_n x) \sin(\beta_m y) \operatorname{sh}(\gamma_{nm} z), \quad (27)$$

$$\alpha_n = \frac{\pi \cdot n}{a}, \quad \beta_m = \frac{\pi \cdot m}{b} \quad n \text{ и } m - \text{целые числа}$$

Коэффициенты A_{nm} находятся из условия $\varphi = U$ при $z = c$:

$$A_{nm} = \frac{4U}{ab \operatorname{sh}(\gamma_{nm}c)} \int_0^a dx \int_0^b dy \sin(\alpha_n x) \sin(\beta_m y) =$$

$$= \begin{cases} \frac{16U}{\pi^2 nm \operatorname{sh}(\gamma_{nm}c)} & \text{при } n \text{ и } m \text{ нечетных} \\ 0 & \text{при } n \text{ или } m \text{ четных} \end{cases}$$

Подставив A_{nm} в (27) получим значение потенциала в любой точке сварочного шва.

3. В цилиндрической системе координат решение уравнения Лапласа можно представить следующим образом: $\varphi(\rho, z) = R(\rho)Z(z)$, где $R(\rho)$ и $Z(z)$ удовлетворяют уравнениям $\frac{d^2 Z}{dz^2} = k^2 Z$, $\frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dR}{d\rho} + k^2 R = 0$.

Частное решение этих уравнений имеет вид

$$\varphi(\rho, z) = e^{-kz} J_0(k_1 \rho) \text{ при } z > 0,$$

где J_0 - функция Бесселя, k_1 определяется из равенства нулю потенциала на поверхности цилиндра: $J_0(k_1 r_0) = 0$.

Общее решение уравнения для потенциала представляет собой суперпозицию частных решений:

$$\varphi_2 = \sum_{l=1}^{\infty} A_l e^{-k_l z} J_0(k_l \rho) \text{ при } z > 0.$$

Коэффициенты A_l находятся из граничного условия. Для данной задачи

$$A_l \text{ определится из выражения } A_l = \frac{\sigma r_0}{\varepsilon_0} \frac{1}{J_1(k_l r_0)}.$$

Определены электродинамические параметры, когда длина шва L намного больше ширины d и высоты H . Из рис. 19. видно, что при $N=10$

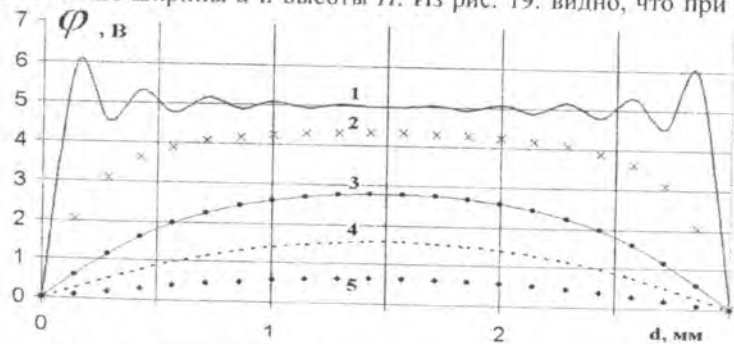


Рис. 19. Распределение электрического потенциала
1 - $z = H/5$, 2 - $z = 2H/5$, 3 - $z = 3H/5$, 4 - $z = 4H/5$, 5 - $z = H$.

суммирование ряда является недостаточным, так как наблюдается существенное колебание, которое искажает ожидаемую монотонную картину в распределении $\varphi(x)$. Рекомендуется $N=100$.

Заключение

1. На основе анализа кинограмм электродуговой сварки и теоретического исследования получены функции, описывающие форму поверхности капли кривыми второго порядка на разных стадиях ее развития и геометрию поверхности струи расплавленного электрода.

2. Разработан математический метод расчета электрического поля между плавящимся электродом и свариваемым изделием на основе решения уравнения Лапласа методом конформного преобразования. Достоверность модели подтверждается качественным совпадением рассчитанных силовых линий с контурами дуги кинограмм для разных режимов сварки.

3. Установлено, что поля силовых линий электрического поля сварочной дуги определяется формой капли и геометрией электрода, что влияет на теплофизические и магнитогазодинамические параметры дуги.

4. Получено численным методом крупных частиц зарождение срыва потока газа за осесимметричным торцом электрода и образование поля вихря решением задачи обтекания плазмообразующим газом плавящегося электрода.

5. Получены аналитические зависимости теплофизических свойств аргоновой плазмы, позволяющие получить аналитическое решение тепловой задачи сварочной дуги и оценить давление сварочной дуги на расплавленный металл электрода и ванны.

6. Получены оценка параметров электрического поля в момент отрыва и переноса капли с торца электрода, а также условия оптимальной привязки электрической дуги к сварочному изделию с учетом его геометрии, которые оказывают влияние на устойчивое горение сварочной дуги.

Основные результаты исследований отражены в следующих работах:

1. Асанов Д.С., Жайнаков А.Ж., Слободянюк В.С., Мечев В.С., Самсонов М.А., Энгельшт В.С. Электрическая дуга с плавящимся электродом в аргоне и углекислом газе // Генераторы низкотемпературной плазмы: Тез. докл. VIII Всесоюзн. конф. – Новосибирск, 1980. – Т.2. – С.84-87.
2. Asanov D.S., Engelsht V.S., Nevelev D.V., Slobodianyuk V.S., Zhainakow A.A A high-current arc in a narrow passing // Proc. 15-th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. – Minsk, 1981. – P. 693 – 694.
3. Асанов Д.С., Жайнаков А.Ж., Энгельшт В.С., Гурович В.Ц. и др. Математическое моделирование электрической дуги // Под ред. В.С.Энгельшта. – Фрунзе: Илим. 1983. – 363 с.
4. Мечев В.С., Сычев Л.Е., Асанов Д.С., Жайнаков А.Ж., Слободянюк В.С. Расчет характеристик сварочной дуги с плавящимся электродом // Сварочное производство. – 1983. – №7. – С.24–27.
5. Асанов Д.С., Слободянюк В.С. Прикатодная область дуги с испаряющимся электродом // Генераторы низкотемпературной плазмы: Тез. докл. IX Всесоюзн. конф. – Фрунзе: Илим. 1983. – С.144–145.
6. Асанов Д.С., Слободянюк В.С. Колебания столба дуги в турбулентном потоке газа // Генераторы низкотемпературной плазмы. Тез. докл. X Всесоюзн. конф. Каунас, 1986. – С.18–19.
7. Асанов Д.С. Механика и термодинамика сварочного электрода // Вестн. КНУ им. Ж.Баласагына. – Физ., философия. – 2003. – Спец. вып. – С. 56–64.
8. Асанов Д.С., Эстебесов Т.К. Электродинамика импульсного плазматрона // Вестн. КНУ им. Ж.Баласагына. Физ. и физ. образование. – 2003. – Вып. 4. – С. 88–91.
9. Асанов Д.С., Жайнаков А.Ж., Сагынбаева М.Т., Бабаев Б.Н. Регрессионный анализ ВАХ сварочной дуги // Вестн. КНУ им. Ж. Баласагына. Сер. Физ. и техн. – 2005. – Вып.3. – С. 72–77.
10. Асанов Д.С. Математическая модель сварочного электрода // Там же. – С. 246–250.
11. Асанов Д.С., Акжолов М.Ж., Токтобеков Т. Алгоритм вычисления формы капли электрической сварочной дуги // Изв. КГТУ им. И. Раззакова. – 2006. – № 9. – С. 181 – 185.
12. Асанов Д.С., Таштанов Р.А., Урманбетов К., Жеенбаев Ж.Ж. Определение температуры в плоскости симметрии струй плазмы усовершенствованного двухструйного плазматрона // Изв. НАН КР. – Бишкек, 2006. – №2. – Т.2 – С.81–85.

13. Жайнаков А.Ж., Асанов Д.С. Математическое моделирование электрической дуги // Исслед. по интегро-дифференц. уравнениям.- Бишкек: Илим. -2006. - Вып. 35. - С.193-203.
14. Жайнаков А.Ж., Асанов Д.С., Акжолов М.Ж., Энгельшт В.С. Определение кривизны поверхности капли // Там же. - С.203-208.
15. Асанов Д.С. Электрические характеристики сварочной дуги с плавящимся электродом // Вестн. КНУ им. Ж. Баласагына. Сер. 3. Физ. и физ. образование: достижения и перспективы развития. - Бишкек.- 2006.- Вып. 3.- С.88-92.
16. Асанов Д.С., Асаналиева Г.Б. Электрические характеристики сварочной дуги с плавящимся электродом // Там же. - С.132-136.
17. Жайнаков А.Ж., Асанов Д.С., Акжолова М.Ж., Ашбаев А.А, Калыбаева Б.К.Численное решение методом крупных частиц обтекания электрода и капли плазмообразующим газом // Там же. - С.172-176.

РЕЗЮМЕ

Асанов Дамир Сатаркулович

«Эриген электроддуу электр жаасын изилдөө»

Адистиги: 01.04.14 – жылуулук физикасы жана теоретикалык жылуулук техникасы

Негизги сөздөр: төмөнкү температуралык плазма, электр жаасы, электр ширетүү, эриген электрод, тамчылап түшүү, диркиреп агып түшүү, ширетүүчү ванна, ширетүү тигиш, Лапластын теңдемеси, Пуассондун теңдемеси, конформдуу өгөртүп түзүү, ийрилик радиусу.

Изилдөөнүн объектиси: Электрдик ширетүү.

Иштин максаты: Эриген электроддуу ширетүү жаасынын жылуулук физикалык жана электрдик мүнөздөмөлөрүн изилдөө.

Изилдөөнүн ыкмалары: Айрым туундулуу теңдемелерди аналитикалык жана сандык түрдө чыгаруу. Дифференциалдык геометриянын ыкмалары. Чоң бөлүкчөлөр ыкмасы.

Изилдөөнүн жабдуулары: Эриген электроддуу электр жаасын ширетүүнүн кинограммаларынын материалдары.

Колдонуу аймагы: ширетүү өндүрүшү, ширетүү аппараттарын түзүү.

Электрдик ширетүүнүн кинограммаларын анализдөөнүн негизинде электроддун ээриген учурундагы жүрүүчү кубулуштарды анализдөөнүн аналитикалык модели жана математикалык ыкмасы иштеп чыгарылды. Лапластын теңдемесин аналитикалык жол менен чыгаруунун негизинде ширетүүдөгү электр жаасынын экилик математикалык модели иштелип чыгарылды. Эриген электроду электр жаасынын сандык талдоосу жүргүзүлгөн. Электроддун учунан тамчынын жулунуу жана түшүү учурундагы кош жаанын пайда болуу мүмкүнчүлүгүнүн аналитикалык изилдөө. Суяк тамчынын бетинин өнүгүшүнүн түрдүү стадияларындагы формасынын аналитикалык чыгаруулары алынды. Электр жаасынын катоддук областынын жөнөкөйлөштүрүлгөн модели иштелип чыкты.

РЕЗЮМЕ

Асанова Дамира Сатаркуловича

«Исследование электрической дуги с плавящимся электродом»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14- Теплофизика и теоретическая теплотехника

Ключевые слова: Низкотемпературная плазма, электрическая дуга, электрическая сварка, плавящийся электрод, капельный перенос, струйный перенос, сварочная ванна, сварочный шов, уравнение Лапласа, уравнение Пуассона, конформное преобразование, радиус кривизны.

Объект исследования: Электрическая сварка.

Цель исследования: Изучение теплофизических и электрических характеристик электрической сварочной дуги с плавящимся электродом.

Методы исследования: Аналитические и численные методы решения уравнений в частных производных. Методы дифференциальной геометрии. Метод крупных частиц.

Исследовательские оборудования: Материалы кинограмм электродуговой сварки с плавящимся электродом.

Область применения: сварочное производство, проектирование сварочных аппаратов.

На основе результатов анализа кинограмм электродуговой сварки разработаны аналитические модели и математические методы анализа электродуговых явлений, происходящих при плавлении электрода. На основе аналитического решения уравнения Лапласа разработана математическая модель двойного дугового разряда в электросварке. Проведен численный анализ электрической дуги с плавящимся электродом. Аналитически установлена возможность двойного дугового образования при отрыве и переносе сварочной капли с торца электрода. Получены аналитические решения формы жидкой поверхности капли на разных стадиях ее развития. Разработана упрощенная математическая модель прикатодной области электрической дуги.

RESUME**Damir S. Asanov****«Research of electric arc with consumable electrode»**

Speciality 01.04.14 – heatphysics and molecular physics

Key words: a low-temperature plasma, an electrical arch, a melted electrode, drop transfer, spray transfer, welding article, welding sew, equation of the Laplas, equation of the Puasson, conform transformation, radius curvature.

Object of research: electric arc welding.

Purpose of research: research heat physics and electrical characteristic of electrical arch with consumable electrode.

Methods of research: analytical and numerical methods solve of the partial derivatives equations. The methods of the theory differential geometrics. The methods of the large-scale particles.

Research equipment: The material of results electric arc welding Cinerama.

Field of using: The welding. Projection of the welding apparatus.

On the basic of results analysis of electric arc welding cinegram the analytical model and mathematical methods of analysis of electric phenomena at melting electrode are devised. On the basic of the Laplas equation analytical solution the mathematical model of double arc at electric welding are proposed. Numerical analysis of electric arc with consumable electrode are carried out. It is defined the possibility of the double arc formation at droplet detachment and transfer from electrode nose. Drop surface equations at different stage of its developing are found. The simplified mathematical model of electrical arc is developed.

