

На правах рукописи



Земляков Евгений Вячеславович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Туричин Глеб Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Шиганов Игорь Николаевич
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Вихман Валерий Борисович

Ведущая организация: ОАО «Центр технологии судостроения и
судоремонта» (ОАО «ЦТСС»), Санкт-
Петербург

Защита состоится «04» апреля 2012 г. в 16:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.229.26 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, I уч. корп., ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «02» марта 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Тисенко В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время сварочные технологии являются основными технологиями получения неразъемных соединений в промышленности. Использование материалов нового поколения (высокопрочных сталей и легких сплавов) при изготовлении ответственных сварных конструкций требует разработки современных сварочных технологий, не только гарантирующих получение необходимых эксплуатационных характеристик сварного соединения, но и обеспечивающих высокую производительность технологического процесса. Технологические решения, основанные на применении традиционных способов сварки, не позволяют в полной мере решить эти задачи. Наиболее перспективным путем их решения является развитие гибридных лазерно-дуговых технологий.

Идея совместного использования лазерного луча и электрической дуги для обработки материалов принадлежит английскому ученому Стину В.М., предложившему гибридные способы сварки, резки, сверления и обработки поверхности в 80-х годах XX-го века. Теоретические и экспериментальные исследования гибридных лазерно-дуговых процессов проводятся в ведущих мировых научных центрах. В области исследования физических основ и математического моделирования лучевых технологий отечественные ученые традиционно занимают одно из ведущих мест в мире. В настоящее время исследования и разработки в данной области в России ведутся в СПбГПУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИПЛИТ РАН. При построении физической картины и математических моделей процессов гибридной лазерно-дуговой обработки могут быть использованы существующие модели родственных лазерных технологических процессов, особый вклад в развитие которых внесла научная школа СПбГПУ. Здесь необходимо отметить работы В.В. Башенко и В.А. Лопоты в области экспериментальных исследований электронно-лучевой и лазерной сварки, а также теоретические исследования процессов электронно-лучевой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой обработки, проводимые Г.А. Туричиным.

Отличительной чертой гибридного лазерно-дугового процесса являются особенности формирования теплового источника на поверхности обрабатываемого изделия при совместном воздействии лазерного излучения и электрической дуги. При лазерно-дуговой обработке значительное влияние на ход технологического процесса оказывает плазменный факел, который является

областью взаимного влияния лазерного и дугового источников нагрева, наличием которой объясняется повышение эффективности нагрева металла при совместном действии лазерного луча и электрической дуги.

Этот факт диктует необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований физических процессов, протекающих в эрозионном пароплазменном факеле при мощном лазерном или лазерно-дуговом воздействии на металлические материалы, что и определяет актуальность данной работы.

Целью работы является разработка физико-технологических основ использования плазмы гибридного разряда при лазерно-дуговой обработке на базе результатов комплексных теоретических и экспериментальных исследований физических процессов, протекающих при лазерно-дуговом воздействии на металлические материалы.

Задачи работы.

Для достижения поставленной цели был решен ряд основных задач:

- разработано математическое описание процесса формирования химического состава плазмы в дуговом промежутке при лазерно-дуговой сварке с глубоким проплавлением, основанное на решении газодинамической задачи о смешении металлических паров с защитным газом;
- для определения макроскопических свойств плазмы в условиях гибридной лазерно-дуговой сварки построена кинетическая модель развития гибридного (оптико-дугового) разряда;
- разработана кинетическая модель процесса конденсации в плазменном факеле при гибридной лазерно-дуговой обработке металлических материалов;
- разработана самосогласованная математическая модель лазерно-дугового источника нагрева;
- проведена экспериментальная проверка теоретических положений и результатов моделирования.

Объектом исследования в данной работе являлась плазма гибридного разряда, образующаяся в процессе лазерно-дуговой сварки над поверхностью изделия при совместном воздействии лазерного излучения и электрической дуги, а

также параметры теплового источника, формирующегося при лазерно-дуговой обработке.

Методы исследования. В работе использовались методы теоретической и математической физики, вычислительной газодинамики, компьютерное и математическое моделирование. Для проверки разработанных теоретических положений использовались современные экспериментальные методы, такие как интерферометрия, спектроскопия, высокоскоростная видеосъемка. При разработке системы мультисенсорного мониторинга технологических процессов лазерной и лазерно-дуговой сварки также использовались методы цифровой обработки сигналов – быстрое преобразование Фурье и Вейвлет-преобразование.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. В приближении аксиально-симметричного пограничного слоя решена задача о вытекании струи горячего металлического пара из парогазового канала в атмосферу холодного защитного газа в условиях гибридной лазерно-дуговой сварки с учетом сжимаемости газовой смеси.
2. Разработана математическая модель плазменной кинетики, позволяющая определить макроскопические свойства пароплазменного факела (степень ионизации, электропроводность, коэффициент поглощения плазмой лазерного излучения), образующегося при лазерно-дуговой сварке.
3. На основе совместного решения задачи о диффузии металлических паров к поверхности растущих кластеров конденсированной фазы и кинетики роста самого кластера построена математическая модель, позволяющая количественно оценить влияние процесса конденсации на структуру и свойства плазменного факела при лазерно-дуговой сварке.
4. Разработанная самосогласованная модель кинетики гибридного разряда и газовой динамики пароплазменного факела при лазерно-дуговой сварке с глубоким проплавлением дает возможность определить основные характеристики пароплазменного факела и его влияния на распределение теплового источника на поверхности изделия.

Практическая ценность. Полученные результаты были использованы в качестве физико-технологических основ при разработке гибридных лазерно-дуговых технологий обработки материалов, а также при создании

технологических комплексов для их реализации. Также полученные результаты внедрены в образовательный процесс.

Достоверность полученных результатов обеспечена используемыми теоретическими методами исследований, а также современными экспериментальным оборудованием и методиками проведения экспериментов. Результаты теоретических исследований процесса формирования пароплазменного факела при гибридном лазерно-дуговой сварке хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Достоверность также подтверждается практическим использованием полученных результатов при создании технологических комплексов для лазерно-микроплазменной сварки и наплавки, лазерно-дуговой сварки легких конструкций и металлов больших толщин, при разработке технологий гибридной лазерно-дуговой сварки легких сплавов и сталей больших толщин, а также при отработке алгоритмов мониторинга лазерных и лазерно-дуговых сварочных процессов и создании экспериментального образца системы мультисенсорного мониторинга.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Модель формирования химического состава пароплазменного факела при гибридной лазерно-дуговой сварке с глубоким проплавлением за счет смешения металлических паров с защитным газом.
2. Кинетическая модель комбинированного лазерно-дугового разряда в смеси паров металла и защитного газа в условиях гибридной лазерно-дуговой сварки.
3. Самосогласованная математическая модель теплового источника, формирующегося при гибридной лазерно-дуговой обработке материалов.
4. Результаты экспериментальных исследований пароплазменного факела при лазерной и лазерно-дуговой обработке.
5. Примеры практического использования полученных результатов при разработке лазерно-дуговых сварочных и родственных технологий и оборудования для их реализации.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

- 18-я конференция по математическому моделированию лазерной обработки материалов (Инсбрук, Австрия, 2005)

- 2-я, 3-я и 4-я международные конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» (Кацевели, Украина, 2005, 2007, 2009)
- 3-я и 4-я международные конференции «Лазеры в промышленности» (Мюнхен, Германия, 2005, 2007)
- 3-я международная конференция «Информационные технологии в сварке и родственных процессах» (Киев, Украина, 2006)
- 5-я и 6-я международные конференции «Лучевые технологии и применение лазеров» (Санкт-Петербург, 2006, 2009).
- 4-й международный симпозиум «Высокомощные волоконные лазеры и их применение» (Санкт-Петербург, 2008)

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 20 печатных работ, в том числе 4 публикации в журналах, входящих в перечень ВАК.

Личный вклад автора. При выполнении работ по теме диссертации автором выполнен обзор современного состояния исследований в области обработки материалов с помощью гибридных источников энергии, проанализированы основные проблемы в данной области, сформулированы цель и основные задачи работы, выбраны обоснованные пути их решения. Автором разработана самосогласованная модель кинетики гибридного разряда и газовой динамики пароплазменного факела при лазерно-дуговой обработке металлических материалов. Для проверки результатов теоретических исследований автором были проанализированы существующие методы диагностики низкотемпературной плазмы и разработаны схемы экспериментальных стендов. Автор принимал непосредственное участие в проведении экспериментов и обработке экспериментальных данных, а также в разработке системы мониторинга лазерных и лазерно-дуговых сварочных процессов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения и включает в себя 217 страниц текста, 78 иллюстраций и список литературы из 147 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована научная новизна полученных результатов и описано их практическое использование.

В первой главе выполнен обзор современного состояния исследований в области обработки материалов с помощью гибридных источников энергии. Рассмотрена история развития гибридных лазерно-дуговых технологий и проанализированы области их возможного применения. Особое внимание было уделено анализу результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов формирования плазменного факела при лазерно-дуговой сварке, что позволило выделить основные физические процессы, определяющие структуру и свойства пароплазменного факела: смешение металлических паров с окружающим (защитным) газом; объемная конденсация металлических паров; развитие гибридного разряда. Также в первой главе были сформулированы цель и основные задачи работы, определены методы их решения.

Вторая глава посвящена описанию газодинамики пароплазменного факела при лазерно-дуговой сварке. Пароплазменный факел рассматривался как дозвуковая затопленная струя. Для упрощения постановки задачи о смешении струи металлических паров с защитным газом было использовано приближение пограничного слоя для системы связанных уравнений непрерывности потоков импульса, энтальпии и вещества (диффузии) в цилиндрических координатах (r, z) для осесимметричного случая:

$$\rho \left(V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r}, \quad (1)$$

$$\rho V_r \frac{\partial C}{\partial r} + \rho V_z \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho D \frac{\partial C}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\rho V_r \frac{\partial h}{\partial r} + \rho V_z \frac{\partial h}{\partial z} = V_z \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho \lambda_T \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где V_z, V_r - продольная и радиальная компоненты скорости течения смеси, C - концентрация металлических паров в смеси, D - коэффициент диффузии, h, T - энтальпия и температура смеси, p - давление, ρ - плотность смеси, μ - коэффициент динамической вязкости, λ_T - коэффициент теплопроводности.

Вместе с уравнением состояния уравнения (1)-(3) полностью описывают задачу о вытекании струи металлического пара из парогазового канала в защитный газ. Для упрощения системы и сведения ее к виду уравнений для несжимаемой жидкости было использовано преобразование Ховарта-Дородницына. Неизвестные функции (скорость течения, энтальпия и концентрация смеси)

были представлены в виде разложений по степеням продольной координаты, умноженным на функции автомодельной переменной. Такая подстановка позволила получить цепочку зацепляющихся дифференциальных уравнений для функций автомодельной переменной. Последовательное решение этих уравнений и обратное преобразование Ховарта-Дородницына позволили получить искомые распределения температуры, скорости и концентрации смеси.

Для проверки аналитического решения система уравнений (1)-(3) (без использования преобразования Ховарта-Дородницына) была решена численно с помощью метода конечных разностей. Сравнение решений показало практически полное совпадение повсюду за исключением небольшого начального участка струи. Для исключения этого участка из области решения начало продольной оси было сдвинуто вглубь парогазового канала, из которого и вытекает струя. Примеры расчетов по разработанной модели представлены на рисунке 1.

В отличие от «классической» затопленной струи полученное решение позволяет учесть влияние сжимаемости, диффузии и теплопроводности газовой смеси на параметры плазменного факела.

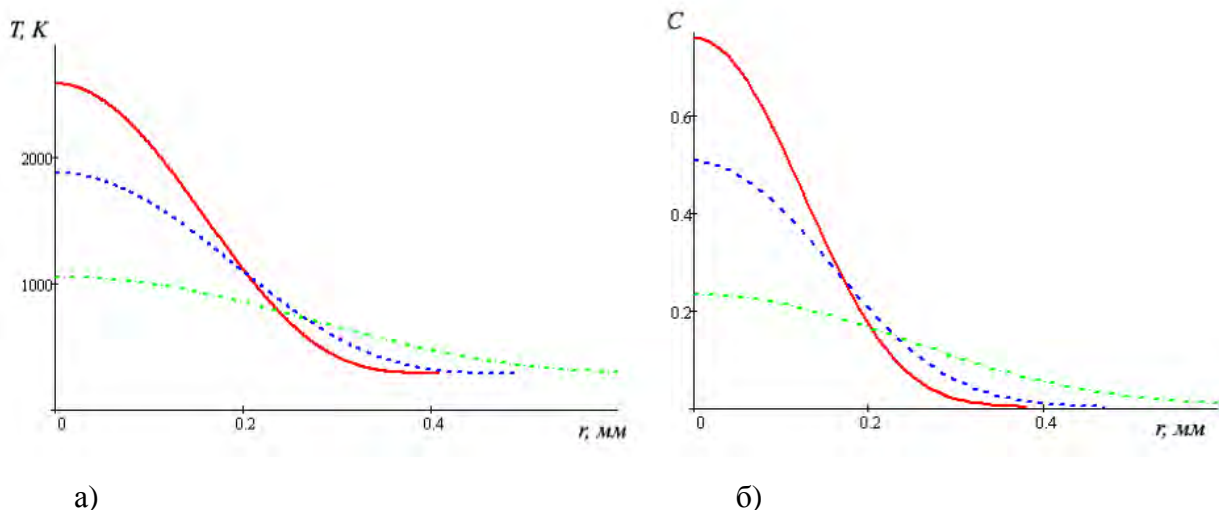


Рисунок 1 - - Радиальное распределение температуры струи (а) и концентрации железа (б) на различных расстояниях от поверхности; сплошная кривая – 1 мм, штриховая – 3 мм; штрихпунктир – 10 мм

В третьей главе рассмотрено влияние на газовую динамику пароплазменного факела объемного нагрева за счет поглощения лазерного излучения и тепловыделения в электрической дуге. Для определения плотности источника тепла в пароплазменном факеле при лазерно-дуговой обработке была решена кинетическая задача о развитии комбинированного лазерно-дугового разряда в

газовой смеси с учетом ее реального химического состава. Для построения модели плазмы гибридного разряда без предположения о наличии локального термического равновесия решалось кинетическое уравнение для энергетического спектра электронов. Для учета реального химического состава плазмы в кинетическое уравнение были введены отдельные вероятности столкновения электронов с атомами и ионами различного типа, пропорциональные концентрациям соответствующих частиц. Концентрации компонентов рассчитывались с помощью описанной в предыдущей главе модели смешения металлических паров и защитного газа.

Кинетическое уравнение решалось с помощью приближенной аналитической процедуры. При этом учитывалась как «столкновительная», так и «излучательная» рекомбинация. В результате было получено выражение для энергетического спектра электронов $n(\varepsilon)$ в области совместного действия лазерного излучения и электрической дуги:

$$n(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \langle \varepsilon \rangle^{-\frac{3}{2}} \varepsilon^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\langle \varepsilon \rangle}\right) \quad (4), \quad \text{где} \quad \langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} k_b T + \left(\frac{2 \cdot m_e}{A} \cdot \sum_j \frac{v_{tj}}{M_j} \right)^{-1},$$

$$A = \frac{e^2}{3 \cdot m_e} \left(\frac{2 \cdot E_a^2}{\sum_j v_{tj}} + \frac{E_l^2 \cdot \sum_j v_{tj}}{\left(\left(\sum_j v_{tj} \right)^2 + \omega^2 \right)} \right)$$

где T – температура тяжелых частиц, e , m_e – масса и заряд электрона, M_j – масса j -й тяжелой частицы, v_{tj} – частота столкновения электронов с тяжелыми частицами j -го сорта, ω – частота лазерного излучения, E_l и E_a – напряженность поля лазерного излучения и электрической дуги соответственно. Средняя энергия электронов $\langle \varepsilon \rangle$ складывается из средней энергии тяжелых частиц и дополнительной энергии, связанной с нагревом электронов лазерным полем и полем дуги при обратнотормозном поглощении.

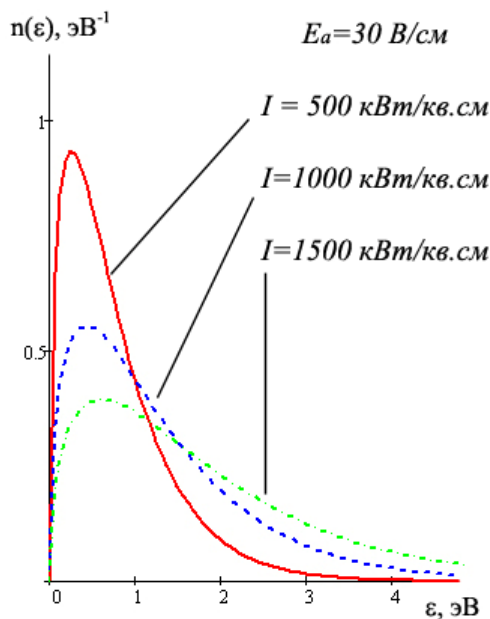


Рисунок 2 - Энергетический спектр электронов

Полученное распределение (4) можно интерпретировать как распределение Максвелла, с температурой, определяемой силовыми характеристиками электрического поля, создаваемого лазерным излучением и электрической дугой.

На рисунке 2 представлены энергетические спектры электронов для различных значений интенсивности лазерного излучения при напряженности электрической дуги 30 В/см.

Для определения плотности свободных электронов была решена система алгебраических уравнений ионизационного равновесия для обеих компонент смеси с учетом полученного энергетического спектра электронов. Полагая, что ионизованы в основном атомы железа, было получено выражение для плотности свободных электронов в плазме, позволяющее определить степень ионизации плазмы, ее электропроводность и коэффициент поглощения лазерного излучения, а также плотность источников нагрева в плазме q :

$$q = \frac{4m_e C \rho}{\sqrt{\pi} M_{Fe} M_{He}^2} \cdot \frac{\nu_\infty^2}{N_\infty^2 \alpha_{Fe}} \cdot J_{Fe} \exp\left(-\frac{J_{Fe}}{\langle \varepsilon \rangle}\right) \quad (5)$$

где M_{Fe} , M_{He} - атомная масса железа и гелия, α_{Fe} - коэффициент рекомбинации, J_{Fe} - потенциал ионизации атома железа, N_∞ - плотность частиц окружающего газа (гелия), ν_∞ - частота столкновения электронов с частицами окружающего газа.

Решение газодинамической задачи с учетом тепловыделения строилось на основе полученного во второй главе описания пароплазменного факела. В уравнение энтальпии был добавлен член-источник (5), отвечающий за тепловыделение электрической дуги и поглощение лазерного излучения в плазменном факеле.

Расчеты показали, что объемный нагрев плазменного факела за счет поглощения лазерного излучения и проходящего тока электрической дуги приводит к увеличению толщины струи (рисунок 3). Кроме того, влияние объемного тепловыделения в плазме вместе с конкуренцией конвективного теплопереноса со струей и кондуктивного теплопереноса в радиальном направлении приводит к сдвигу температурного максимума от поверхности мишени даже в случае поверхностной фокусировки (см. рисунок 4). При этом оказывается, что в условиях, характерных для лазерно-дуговой сварки, разница температур легкой и тяжелой компонент плазмы, характеризующая ее неравновесность, также изменяется вдоль оси факела.

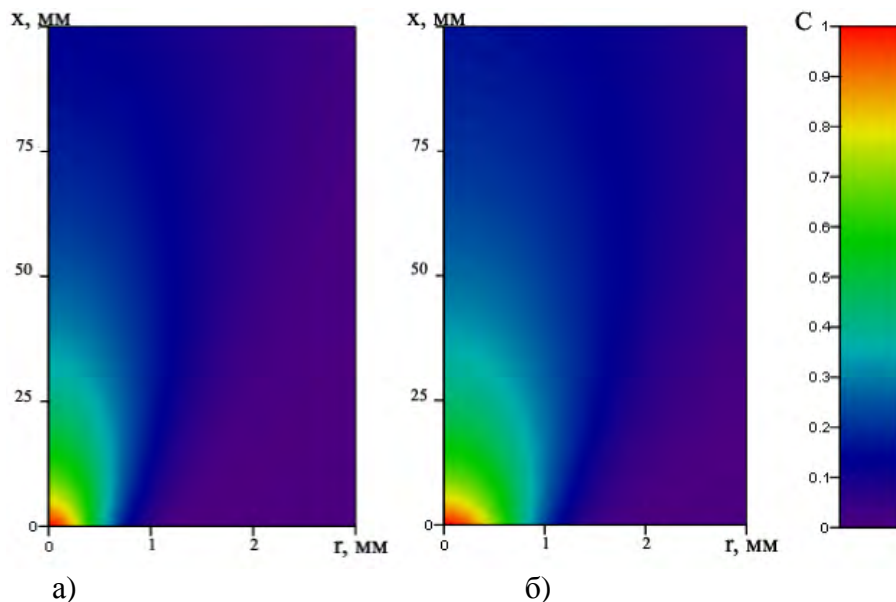


Рисунок 3 - Поле концентрации паров металла в плазменном факеле; (а) – без учета поглощения в плазме, (б) – с учетом поглощения.

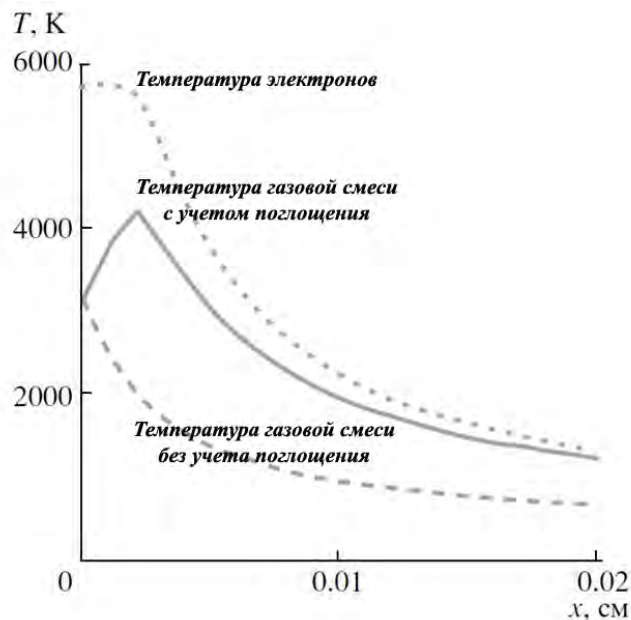


Рисунок 4 - Распределение температуры вдоль оси факела

Разработанная самосогласованная модель пароплазменного факела позволяет определить пространственное распределение проводимости в дуговом промежутке при лазерно-дуговой сварке и связанное с ним распределение плотности тока электрической дуги, определяющее, в свою очередь, параметры дугового источника нагрева. Формирование узкого проводящего канала у поверхности изделия в условиях лазерно-дуговой сварки приводит к повышению коэффициента сосредоточенности дугового источника нагрева. Суммирование лазерного и дугового источников нагрева с учетом их взаимного

влияния позволило построить модель теплового источника, формирующегося при гибридной лазерно-дуговой сварке.

Предметом исследования **четвертой главы** является процесс конденсации в пароплазменном факеле при лазерно-дуговой сварке. Для количественной оценки влияния процесса конденсации на концентрационные поля в пароплазменном факеле было получено совместное решение задач диффузии металлических паров к поверхности растущих кластеров конденсированной фазы и кинетики роста самого кластера:

$$\frac{dC}{dt} = D\Delta C = D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (6) \quad \text{и} \quad \frac{da}{dt} = K_1(T) \cdot C - K_2(T) \quad (7),$$

где a - радиус растущего кластера конденсированной фазы, $K_1(T)$, $K_2(T)$ константы скорости прилипания и испарения атомов на поверхности кластера, C - поверхностная концентрация паров железа, D - коэффициент диффузии атомов железа в парогазовой смеси.

Для описания свойств кластера использовалась модель жидкой капли, в которой кластер считается подобным жидкой сферической капле с плотностью макроскопической системы.

Из решения уравнения (6) была найдена поверхностная концентрация металлических паров с учетом влияния ансамбля растущих кластеров:

$$C = C_0 - \frac{a^3}{r_w^3} \frac{M}{\rho} n_{cl} - 2 \cdot (K_1 \cdot C_0 - K_2) \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi \cdot D}} + 0.74 \frac{1}{D \left(\frac{1}{a} + \frac{K_1}{D} \right)} \ln \left(0.47 \left(\frac{1}{a} + \frac{K_1}{D} \right) \sqrt{Dt} + 1 \right) \quad (8)$$

где C_0 - начальное значение концентрации, M - атомная масса металла, ρ - плотность жидкого металла, n_{cl} - плотность кластеров в плазме, r_w - радиус Вигнера-Зейтса.

Вместе с уравнением роста (7) выражение (8) образует систему, решение которой дает значение концентрации железа в пароплазменной фазе и размера кластера конденсированной фазы в любой момент времени t .

Совместное решение задачи о диффузии металлических паров к поверхности растущих кластеров конденсированной фазы и кинетики роста самого кластера позволяют количественно оценить влияние процесса конденсации на концентрационные поля в плазменном факеле. Предложенная модель также может быть использована при исследовании процессов синтеза наноматериалов (нанопорошков) в плазме газового разряда атмосферного давления.

В пятой главе приведены результаты экспериментальной проверки разработанных теоретических положений. Поскольку физическая природа и особенности процессов лазерной и лазерно-дуговой сварки весьма близки, а получение экспериментальных данных при лазерном процессе существенно проще, то сначала исследовался пароплазменный факел, формирующийся при лазерной сварке. При этом использовались современные методы диагностики низкотемпературной плазмы, такие как: плазменная эмиссионная спектроскопия, интерферометрия, высокоскоростная съемка.

Исследования динамических процессов развития и релаксации плазменного факела при лазерной сварке с помощью высокоскоростной видеосъемки проводились как при импульсном, так и при непрерывном воздействии. Временная развертка процесса формирования плазменного факела при импульсном лазерном воздействии на металлическую мишень показана на рисунке 6.

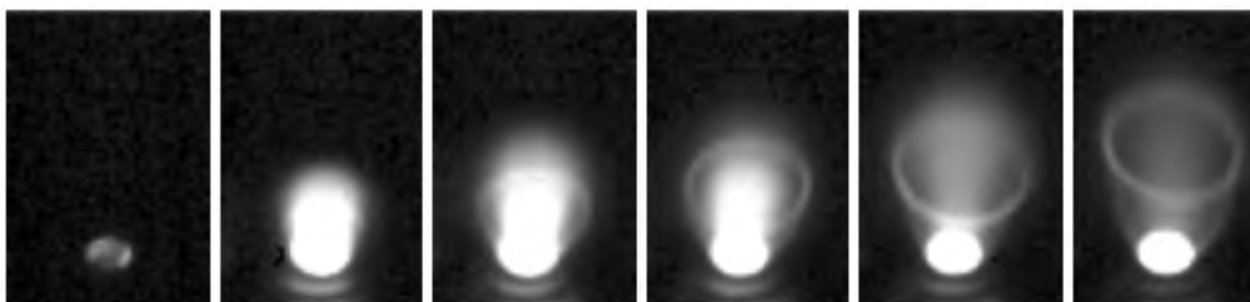


Рисунок 6 – Формирование и релаксация плазменного факела при импульсном лазерном воздействии. Шаг по времени – 1 мс.

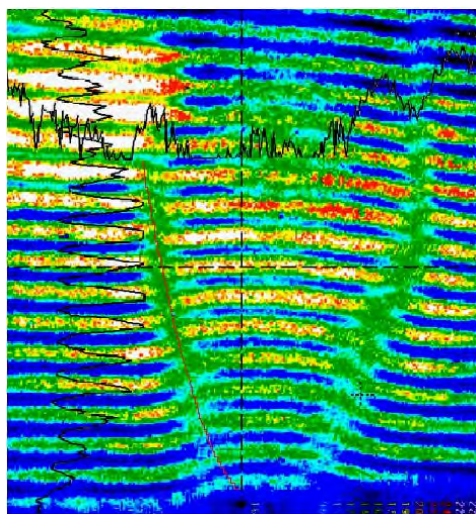


Рисунок 7 - Интерферограмма плазменного факела

Результаты эксперимента по интерферометрии плазменного факела при импульсной лазерной сварке показаны на рисунке 7.

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с разработанной теорией формирования пароплазменного факела. Из рисунков 6 и 7 видно, что пароплазменный факел имеет форму параболоида вращения, то есть его радиус растет пропорционально квадратному корню из продольной координаты, что полностью соответствует результатам теоретических исследований. Также рисунок 6

хорошо иллюстрирует наличие в центральной части плазменного факела

области с повышенной плотностью, что также было предсказано разработанной теорией.

При высокоскоростной съемке процесса лазерно-дуговой сварки был зафиксирован процесс развития лазерно-дугового разряда (см. рисунок 8).

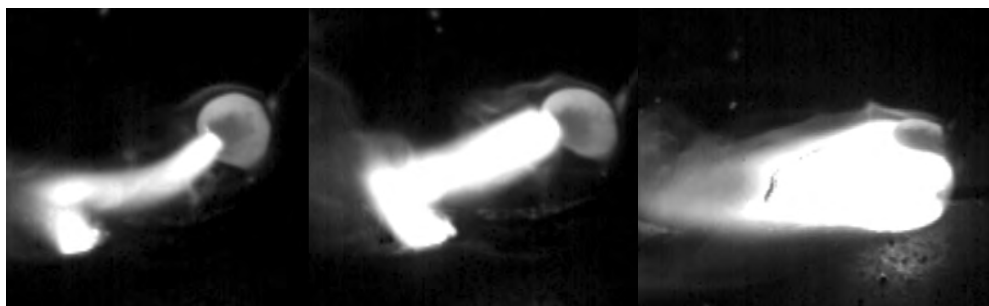


Рисунок 8 - Развитие лазерно-дугового разряда

Такой вид лазерно-дугового разряда объясняется формированием узкого проводящего канала у поверхности образца за счет интенсивного испарения металла при воздействии мощного лазерного излучения. Изменение химического состава дугового промежутка, связанное с увеличением концентрации металлических паров, приводит к уменьшению эффективного потенциала ионизации парогазовой смеси, что, в свою очередь, создает благоприятные условия горения электрической дуги.

Полученные результаты подтвердили адекватность предложенного аналитического описания процесса формирования пароплазменного факела, как при лазерной, так и при гибридной лазерно-дуговой обработке материалов.

Также в заключительной главе приведены примеры практического использования полученных в ходе выполнения данной работы результатов. Особое внимание уделено построению систем мониторинга лазерных и лазерно-дуговых технологических процессов, основанных на регистрации и анализе вторичноэмиссионных сигналов из активной зоны. Апробация разработанной системы показала принципиальную возможность отслеживания в режиме реального времени параметров парогазового канала и сварочной ванны при лазерной и лазерно-дуговой сварке с помощью регистрации косвенных информационных сигналов из активной зоны.

Результаты предварительных технологических экспериментов показали высокие технологические возможности разработанного оборудования, актуального для широкого круга отраслей промышленности.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработанная самосогласованная модель кинетики гибридного разряда и газовой динамики плазменного факела при лазерно-дуговой сварке с глубоким проплавлением позволяет определить основные характеристики пароплазменного факела и его влияние на распределение теплового источника на поверхности изделия.
2. Показано, что в условиях, характерных для лазерно-дуговой сварки, влияние объемного тепловыделения в плазме вместе с конкуренцией конвективного теплопереноса со струей и кондуктивного теплопереноса в радиальном направлении приводит к сдвигу температурного максимума в пароплазменном факеле от поверхности мишени даже в случае поверхностной фокусировки.
3. Установлено, что газодинамические особенности процесса смешения металлических паров с защитным газом при лазерно-дуговой сварке приводят к формированию узкого проводящего канала у поверхности изделия, обеспечивающего повышение коэффициента сосредоточенности дугового источника нагрева.
4. Физическая адекватность разработанных теоретических положений подтверждена результатами экспериментальных исследований пароплазменного факела с применением методов спектроскопии, интерферометрии и высокоскоростной видеосъемки.
5. Полученные результаты были использованы при разработке технологий и оборудования для лазерно-дуговой обработки, а также внедрены в образовательный процесс.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Е.В. Земляков. Особенности формирования плазменного факела при гибридной лазерно-дуговой сварке / Г.А. Туричин, А.М. Григорьев, Е.А. Валдайцева, Е.В. Земляков, У. Дилтей, А. Гуменюк // Теплофизика высоких температур. – 2006. - т. 44, № 5 - с.655-663.
2. Е.В. Земляков. Численно-аналитическая модель плавления электрода при лазерно-дуговой сварке / Г.А.Туричин, Е.Ю. Поздеева, Е.В. Земляков // Физика и химия обработки материалов. – 2007. - №4 - с.41-45

3. Е.В. Земляков. Управление формированием микроструктуры при светолазерной обработке стали / Г.А. Туричин, В.А. Лопота, Е.А. Валдайцева, Е.Ю. Поздеева, Е.В. Земляков, К.В. Савельева // Изв. вузов: Приборостроение. - 2008. - Т. 51, № 4 - с. 43-47.

4. Е.В. Земляков. Моделирование динамического поведения сварочной ванны при лазерной и гибридной сварке с глубоким проплавлением / Г.А. Туричин, Е.А. Валдайцева, Е.Ю. Поздеева, Е.В. Земляков, А.В. Гуменюк // Автоматическая сварка. – 2008. - № 7 - с. 15-19.

Публикации в других изданиях

5. Turichin G., , Zemlyakov E., Dilthey U., Goumeniouk A. Boundary layer model of optic- arc discharge above the workpiece during hybrid welding // Proc. of the 3 Int. WLT-conf. on LIM, Munich, 2005.

6. Г.А. Туричин, Е.В. Земляков, А.М. Григорьев, Е.Ю. Поздеева. Влияние объемного тепловыделения и конденсации паров на плазменный факел при лазерных и гибридных технологиях обработки материалов // Лучевые технологии и применение лазеров: материалы 5-й межд. конф. / СПбГПУ. – Санкт-Петербург, 2006. - с. 274-281.

7. Е.В.Земляков. Особенности формирования сварных швов при лазерной и гибридной сварке металлов больших толщин с помощью мощных волоконных лазеров / Г.А.Туричин, И.А.Цибульский, Земляков Е.В., В.В.Харламов // Труды СПбГПУ. - 2009.- № 510 - с. 3-18.

8. Г.А. Туричин, Е.В. Земляков. Кинетика формирования нанокластеров конденсированной фазы в плазменном факеле при гибридном лазерно-дуговом воздействии на металлические материалы // Лучевые технологии и применение лазеров: материалы 6-й межд. конф. / СПбГПУ. – Санкт-Петербург, 2009. - с. 146-148.

9. Е.В. Земляков. О системе мониторинга лазерно-дуговой сварки / Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, Е.В. Земляков, В.В. Харламов // Металлообработка-Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2009. - №6 - с. 46-48.