

САЛОМАТОВА Екатерина Сергеевна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ С
ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена на кафедре «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Беленький Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты: **Мелюков Валерий Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Вятский государственный
университет», профессор кафедры
«Прикладная математика и информатика»

Гончаров Алексей Леонидович,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский университет "МЭИ"»,
доцент кафедры «Технологии металлов»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», г. Воронеж**

Защита диссертации состоит «07» апреля 2016 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=253261>

Автореферат разослан _____._____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Е.Ю. Раскатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными способами сварки плавлением. При ЭЛС возможно получение глубоких и узких сварных соединений с минимальной зоной термического влияния, что позволяет сваривать большие толщины за один сварочный проход. Существенным преимуществом ЭЛС является также и то, что процесс сварки ведется в вакууме, который обеспечивает защиту зону сварки от вредного воздействия газовой среды.

На протяжении более 50 лет ученые из разных стран занимаются исследованиями закономерностей, механизмов образования парогазового канала и сопутствующими процессами при ЭЛС, без знания которых затруднительно использование электронного луча (ЭЛ) при соединении материалов. Большой вклад в изучение процессов, протекающих при ЭЛС, внесли такие советские и российские исследователи как, Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А., Назаренко О. К., Кайдалов А. А., Башенко В. В., Миткевич Е. А., Лесков Г. И., Мелюков В.В., Нестеренков В. М., Туричин Г.А, Судник В.А., Ерофеев В.А., Браверман В.Я., Драгунов В.К., Язовских В. М., Беленький В. Я., А. Каплан, а так же зарубежные исследователи – Р. Рай, Т. Деброй, Ч. Ванг, Р. Зенкер и др.

В последнее время при ЭЛС применяется ряд технологических приемов, обеспечивающих улучшенное формирование сварного шва. К ним относится динамическое воздействие на ЭЛ при сварке, которое может осуществляться путем осцилляции ЭЛ с использованием различных траекторий или расщепления ЭЛ на несколько тепловых источников за счет его динамического позиционирования.

Применение указанных технологических приемов способствуют получению сварных соединений с отсутствием специфических дефектов ЭЛС, таких как пикообразование в корневой части шва, формированию однородной структуры сварных швов при сварке разнородных материалов, средне и высоколегированных сталей, а также устранению пористости сварного шва при ЭЛС цветных металлов и сплавов.

Физические процессы в парогазовом канале, формирующемся в металле при ЭЛС с динамическим воздействием на ЭЛ, до настоящего времени являются малоизученными. При этом одним из важнейших процессов, протекающих при ЭЛС материалов, содержащих легкоиспаряемые легирующие элементы, является процесс испарения. Доказано, что процессы испарения при ЭЛС оказывают влияние на формирование парогазового канала, и при интенсивном испарении легкоиспаряемых компонентов может уменьшаться глубина проплавления, а следовательно, изменятся геометрические характеристики сварного соединения.

Также эти процессы оказывают влияние на конечный химический состав и, соответственно, на эксплуатационные характеристики сварных соединений.

До настоящего времени в литературе практически отсутствуют исследования о процессах испарения и истощения сплавов легкоиспаряемыми легирующими элементами при ЭЛС с динамическим воздействием на ЭЛ. Восполнение этого пробела является актуальной научной задачей, имеющей важное фундаментальное и прикладное значение.

Целью работы является выявление закономерностей изменения химического состава сварных соединений при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч для повышения качества металла сварного соединения.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ существующих математических моделей и экспериментальных данных по вопросам испарения и формирования конечного химического состава сварных соединений при электронно-лучевой сварке.

2. Разработать математических моделей, которые позволят описывать процессы испарения и изменения химического состава сварных соединений при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч.

3. Исследовать влияние параметров режимов сварки при осцилляции электронного луча на формирование химического состава сварных соединений и верификация с экспериментальными данными.

4. Исследовать влияние параметров режимов сварки при динамическом расщеплении электронного луча на формирование химического состава сварных соединений и верификация с экспериментальными данными.

Степень разработанности темы исследования

Электронно-лучевые технологии применяют свыше 50 лет. В работах отечественных и зарубежных ученых изучено влияние осцилляции ЭЛ на макро и микроструктуру сварных швов, процессы кристаллизации и устранения корневых дефектов в сварных соединениях. Исследовано влияние расщепления ЭЛ с формированием нескольких тепловых источников на характер получаемых сварных соединений с различными вариациями процесса, такими как: ЭЛС одновременно в нескольких зонах свариваемого изделия, ЭЛС с образованием нескольких сварочных ванн, следующих друг за другом (многованновая сварка), совмещение процессов сварки и термообработки сварных соединений.

На данный момент достигнуты значительные успехи в численном моделировании процессов ЭЛС и лазерной сварки, но законченные общепринятые модели до настоящего времени отсутствуют. Особенно следует отметить отсутствие динамических моделей, описывающих процессы в канале проплавления при ЭЛС с динамическим воздействием на ЭЛ. Отметим так же, что при

моделировании сходной с электронно-лучевыми процессами лазерной сварки температуру в парогазовом канале принимают обычно равной температуре кипения при атмосферном давлении, но ЭЛС ведется в вакууме, и данное допущение при моделировании процесса ЭЛС необоснованно.

Процессы испарения при ЭЛС статическим ЭЛ достаточно полно исследованы. При этом установлено, что истощение легкоиспаряемыми легирующими элементами сплава не превышает 5 %. Этот факт указывает на преимущество ЭЛС статическим ЭЛ перед другими способами сварки. Однако, при этом технологическом способе сварные соединения имеют дефекты в корневой части шва (поры, пикообразование, несплавления), и получить качественное сварное соединение без применения дополнительных технологических решений крайне затруднительно. Работы, по изучению влияния на процессы испарения динамического воздействия на ЭЛ при ЭЛС до настоящего времени не проводились, хотя процессы, протекающие в парогазовом канале в этом случае, существенно отличаются от процессов при ЭЛС статическим ЭЛ. Существенным отличием в данном случае являются размеры выходного сечения парогазового канала при осцилляции ЭЛ и формирование нескольких каналов при динамическом расщеплении ЭЛ на несколько тепловых источников.

Научная новизна:

1. Предложена численная модель процессов испарения и изменения химического состава сварных швов, полученных при ЭЛС с динамическим воздействием на электронный луч.
2. Разработана методика определения интегральной температуры, давления и состава паров в парогазовом канале при ЭЛС с осцилляцией и динамическим расщеплением ЭЛ на основе изучения процессов испарения и осаждения.
3. Получены закономерности формирования химического состава сварных швов при динамическом расщеплении ЭЛ на три тепловых источника с образованием трех парогазовых каналов при ЭЛС алюминиевых сплавов.

Теоретическая значимость работы

Разработанная модель процессов испарения может быть использована для описания процессов формирования плазмы в парогазовом канале и над зоной обработки, при исследовании процессов формирования сварных соединений при ЭЛС и при разработке методов управления процессом.

Практическая значимость работы и внедрение

Разработанные математические модели процессов испарения позволяют прогнозировать конечный химический состав сварных швов, полученных при ЭЛС с осцилляцией и динамическим расщеплением ЭЛ.

Определены оптимальные параметры режимов ЭЛС с динамическим расщеплением ЭЛ на несколько тепловых источников применительно к сварке алюминиевых сплавов с толщиной металла от 4 до 10 мм.

Результаты диссертационной работы апробированы при разработке новых технологий ЭЛС в отделе «Главного сварщика» на ОАО «Пермский моторный завод».

Личный вклад автора

Предложены и реализованы: численная модель процессов испарения и формирования химического состава сварных соединений при ЭЛС и экспериментальная методика определения давления и интегральной температуры в парогазовом канале при ЭЛС. Выполнены экспериментальные исследования, проведен анализ и обобщение полученных результатов, осуществлена формулировка выводов и положений, выносимых на защиту.

Методология и методы исследования

Для реализации технологий динамического воздействия на электронный луч в диссертационной работе использовалась специально разработанная высокоскоростная система управления электромагнитным отклонением ЭЛ при ЭЛС, содержащая низкоиндуктивную отклоняющую систему, широкополосный усилительный тракт с цифроаналоговым интерфейсом. Исследования химического состава сварных соединений проводилось при помощи рентгенофлуоресцентного анализа на энергодисперсионном рентгеновском флуоресцентном спектрометре *EDX-800HS2 (Shimadzu, Япония)*. Исследование геометрических параметров сварных соединений проводилось с использованием компьютерной программы *ВидеоТест–Размер*. Для моделирования процессов испарения, конденсации и диффузии элементов в расплаве использовался современный программный пакет *Comsol Multiphysics*, который предназначен для решения задач методом конечных элементов.

На защиту выносятся:

1. Результаты численного моделирования процессов испарения легкоиспаряющихся элементов и прогнозирования химического состава сварных соединений при ЭЛС с осцилляцией и динамическим расщеплением ЭЛ.
2. Экспериментальная методика определения давления и интегральной температуры в парогазовом канале при ЭЛС с динамическим воздействием на ЭЛ, которые определялись по данным о химическом составе паров, образующихся над зоной сварки и совместно с расчетными значениями.
3. Результаты исследований влияния параметров режимов сварки на изменение концентрации легкоиспаряемых компонентов в сварных соединениях при ЭЛС с динамическим воздействием на ЭЛ.

Степень достоверности и апробация результатов

Работа выполнена при поддержке:

- гранта РФФИ №13-08-00397А «Реконструкция формы проплавления по параметрам вторичного тока в плазме при электронно-лучевой сварке»;
- со стороны проекта С-26/246 Международной исследовательской группы (2011-2013 г.г.) «Совершенствование и создание бездефектных технологий электронно-лучевой сварки изделий с чистовыми размерами».
- гранта РФФИ-Урал №14-08-96008 р_урал_а «Моделирование процессов в области проплавления при электронно-лучевой сварке с периодическим воздействием на пучок»;
- со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части госзадания № 1201460538 на 2014-2016 годы «Совершенствование технологий и исследование процессов при лучевых способах сварки»;

Экспериментальные результаты, представленные в диссертационной работе, получены на современном аналитическом и испытательном оборудовании, уровень которого соответствует уровню передовых лабораторий в области ЭЛС. Полученные результаты расширили представления о протекающих в парогазовом канале процессах испарения и формировании конечного состава сварных соединений при ЭЛС сварке с динамическим воздействием на электронный луч.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: Международной научно-технической конференции «Сварка и контроль – 2013» посвященной 125-летию изобретения Н.Г. Славяновым электродуговой сварки, плавящимся электродом, г. Пермь, 15-17 мая, 2013 г.; на Международной конференции «Энергетика и машиностроение», г. Санья, Китай; на 11-ой международной конференции «Электронно-лучевые технологии», г. Варна, Болгария 2014г.; на III Международной научно-практической конференции, г. Санкт-Петербург, 24-26 июня 2014 г.; на Международной конференции «Комсол», г. Кембридж, Великобритания, 2014г.; на 14-ой Международной конференции "Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах", г. Пермь, 2014 г.; на Международной электронной научно-технической конференции «Компьютерные технологии в соединении материалов», г. Тула, 2015 г.; на Международной научно-практической конференции «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика», г. Екатеринбург, 2015 г.; на Международной научно-практической конференции «Лучевые технологии и применение лазеров», г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, 21-24 сентября 2015г; на Международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии», г. Москве, 17-20 ноября 2015 г.

По результатам исследования были опубликованы 22 работы, из них 8 статей – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий,

рекомендованных ВАК РФ; 9 – в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 156 страницах основного текста, включая 59 рисунков и 33 таблицы, библиографический список, состоящий из 162 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена актуальность диссертационной работы и дана характеристика области исследования с выводом основной цели и постановкой задач.

В **первой главе** проведен анализ процессов формирования парогазового канала при ЭЛС, рассмотрены различные математические модели процессов испарения при ЭЛС и экспериментальные исследования по изучению формирования конечного химического состава сварных соединений при ЭЛС. Проведен анализ литературных данных в области исследования влияния динамического воздействия на электронный луч и его влияния на процессы при ЭЛС.

Во **второй главе** описывается методика проведения исследований, в которую входит математическая модель испарения и формирования химического состава сварных шов при ЭЛС с динамическим воздействием на ЭЛ. Расчетная схема, используемая в модели представлена на рисунке 1.

Система уравнений, описывающая процессы испарения при ЭЛС, включает:

– уравнение переноса импульса (уравнение Навье - Стокса)

$$(\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{U}, \quad (1)$$

– уравнение переноса энергии

$$\rho c_p \vec{U} \cdot \nabla T = \nabla(\lambda \nabla T), \quad (2)$$

– уравнение переноса примеси

$$\vec{U} \cdot \nabla S = D(\nabla^2 S), \quad (3)$$

где \vec{U} – поле скоростей расплава; P – давление; ρ – плотность; ν – коэффициент кинематической вязкости; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; λ – коэффициент теплопроводности; S – концентрация i -го компонента в расплаве; T

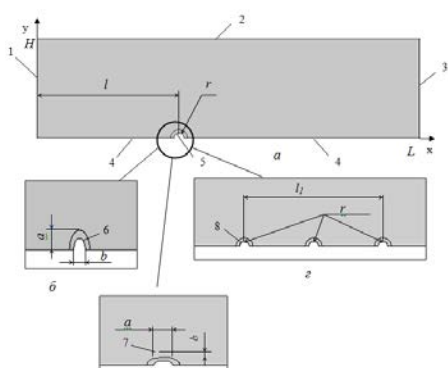


Рисунок 1 - Расчетная схема. 1 – входная граница; 2 – боковая граница; 3 – выходная граница; 4 – ось симметрии; 5 – парогазовый канал, образованный статическим электронным лучом; 6 – парогазовый канал, образованный лучом с поперечной осцилляцией; 7 – парогазовый канал, образованный лучом с продольной осцилляцией; 8 – три парогазовых канала, образованных при динамическом позиционировании ЭЛ; r – радиус парогазового канала; a – большая полуось эллипса; b – малая полуось эллипса

– температура на стенках парогазового канала; D – коэффициент диффузии i -го элемента расплава; $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ – оператор Лапласа; индекс i – здесь и далее опущен.

Зависимость коэффициента диффузии от температуры экспоненциальной:

$$D = D_0 \exp(Q/8,31 \cdot T), \quad (4)$$

где D_0 – амплитудное значение диффузии i -го элемента расплава; Q – энергия активации i -го компонента сплава. Для определения давления и температуры в парогазовом канале разработана методика, при проведении экспериментов по осаждению испаряющихся элементов из зоны сварки на стеклянную пластину возможно определения концентрации осажденных элементов и сравнения ее с расчетными значениями.

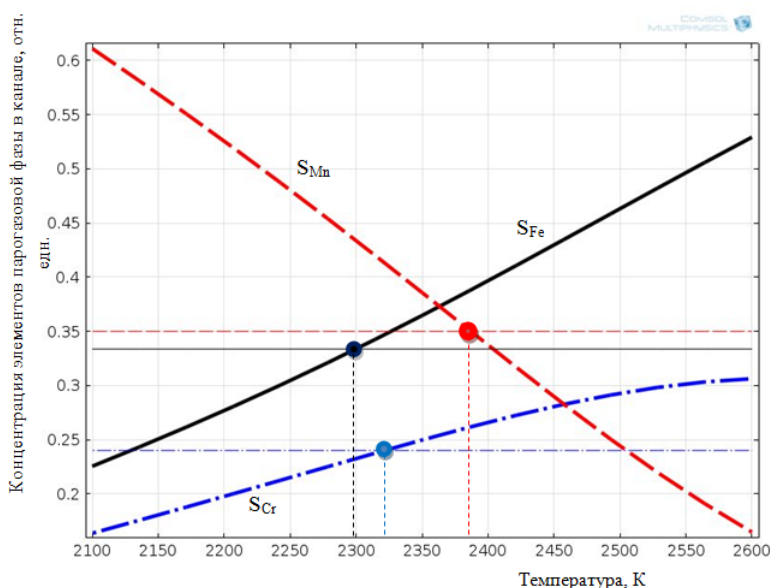


Рисунок 2 - Зависимость концентрация железа, марганца и хрома в парогазовом канале от температуры для стали 12X18H10T: кривыми показаны расчетные значения концентраций; точками обозначены экспериментальные значения

На кривых изменения концентрации испаряющихся элементов по точкам, соответствующим концентрации осажденных элементов, полученным экспериментально, возможно определение эффективной температуры и давления паров в парогазовом канале (Рисунок 2). Все расчеты проводились в математическом пакете прикладного программного обеспечения *Comsol Multiphysics*.

В третьей главе описываются результаты исследования особенностей

испарения, расчет интегральной температуры, давления, состава паров в парогазовом канале и формирование химического состава сварных швов полученных при ЭЛС с продольной и поперечной осцилляцией ЭЛ стали 12X18H10T и алюминиевого сплава АМг 6.

При моделировании процессов испарения и формирования конечного химического состава сварных соединений из стали 12X18H10T было установлено, что при ЭЛС со статическим лучом обеднение Mn составляет 5%, при ЭЛС с продольной осцилляцией - 9 %, при ЭЛС с поперечной осцилляцией 7%. При этом расчетные значения содержания Mn, Cr, Fe не выходят из области допустимых значений. Определены интегральная температура и давление паров в канале для

стали 12X18H10T, которые составили, соответственно, 2610 К и 11 кПа, а для сплава АМг-6 – 1850 К и 5,5 кПа.

При проведении рентгенофлуоресцентного анализа определялся химический состав металла в отдельных зонах сварного шва (Рисунок 4).

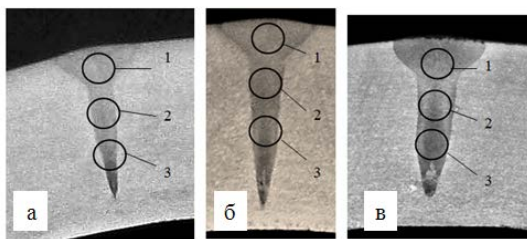


Рисунок 4 - Поперечные макрошлифы, выполненные статическим лучом (а), продольной (б) и с поперечной (в) осцилляцией ЭЛ при ЭЛС стали 12X18H10T

Полученная концентрация марганца в сварных швах примерно на 10-15% ниже, чем в основном металле, но она не выходит за допустимое значение. В средней части зон проплавления наблюдается повышенное содержание Mn по сравнению с другими зонами (верхней и корневой частями шва) как при продольной, так и при поперечной осцилляции ЭЛ. После статистической обработки данных по химическому составу были получены

зависимости концентрации марганца от изменения параметров режимов сварке, приставленные на Рисунке 5.

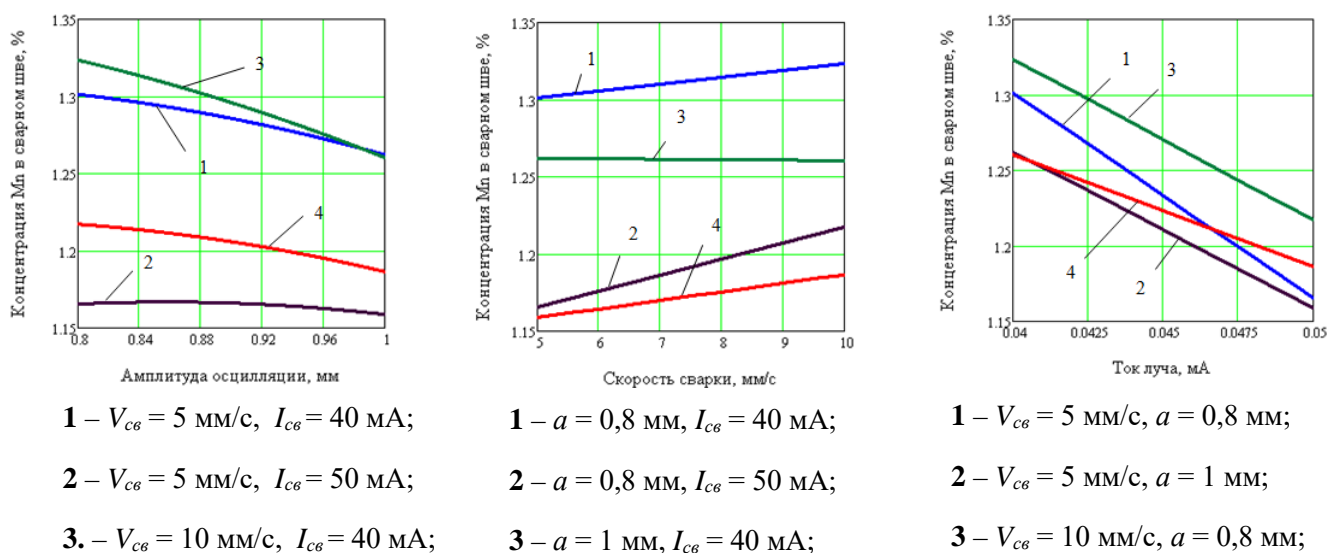


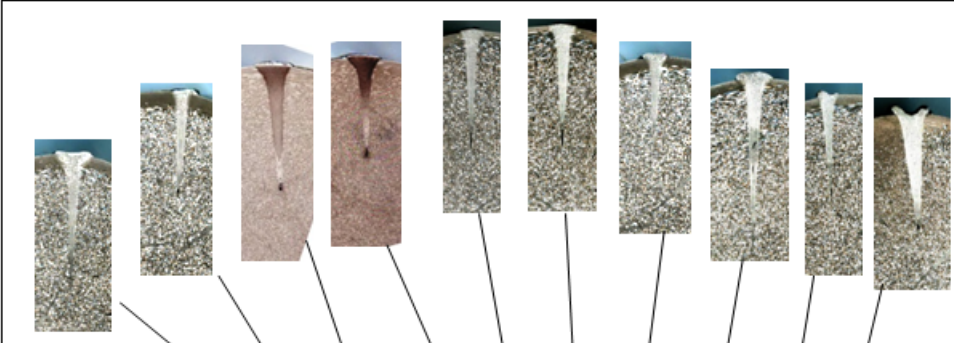
Рисунок 5 - Зависимость концентрации марганца в сварном шве от изменения параметров режимов ЭЛС с поперечной осцилляцией стали 12X18H10T: концентрация Mn в основном металле составляет 1,4 %

С увеличением амплитуды осцилляции концентрация марганца в сварном шве уменьшается, и следовательно, интенсивность процесса испарения выше из-за увеличения площади парогазового канала. Подобные зависимости были получены для всех параметров режимов ЭЛС. С увеличением скорости сварки концентрация марганца в сварном шве увеличивается и это единственный параметр, с увеличением которого интенсивность испарения уменьшается. С увеличением амплитуды колебаний при осцилляции концентрация Mn в сварном шве

уменьшается. Это наблюдается для швов, выполненных как с продольной, так и с поперечной осцилляцией ЭЛ.

С увеличением скорости сварки концентрация Mn в сварном шве увеличивается примерно на 3 %, а с увеличением тока луча концентрация Mn в сварном шве уменьшается на 10 % для швов, выполненных с поперечной осцилляцией, и приблизительно на 6% для швов, выполненных с продольной осцилляцией. При сравнении полученных значений концентрации Mn в сварных швах, выполненных на одинаковых режимах, но при различных видах осцилляции, наблюдается снижение концентрации Mn при сварке с продольной осцилляцией приблизительно на 10%. При сравнении расчетных концентраций в сварных соединениях и полученных в ходе эксперимента погрешность расчетов не превысила 3-7%.

Для исследования изменения химического состава сварных швов при ЭЛС алюминиевого сплава АМг-6 с осцилляцией ЭЛ были выполнены сварочных проходы на различных режимах (Рисунок 6).



Номер режима	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I _{св} , мА	40	40	50	50	40	40	50	50	40	40	50	50
V _{св} , мм/с	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10
Вид воздействия электронного луча	Статический луч				С продольной осцилляцией, A=0,5 мм				С поперечной осцилляцией, A=0,5 мм			

Рисунок 6 - Макроструктура сварных швов, выполненных ЭЛС на различных режимах

По данным рентгенофлуоресцентного анализа сварных швов, максимальное обеднение Mg наблюдается в верхней части сварного соединения. С увеличением тока луча происходит уменьшение концентрации Mg в шве, однако, с увеличением скорости сварки, концентрация Mg увеличивается примерно на 2-3%. При сравнении концентрации Mg в швах, выполненных статическим лучом и ЭЛС с осцилляцией, наблюдается снижение концентрации Mg при осцилляции ЭЛ примерно на 4 %. При ЭЛС статическим лучом наблюдается истощение Mg в пределах 7% от первоначального содержания в сплаве, для ЭЛС с осцилляцией ЭЛ

составляет примерно 10%, причем траектория перемещения ЭЛ (продольная и поперечная) не влияет на интенсивность обеднения Mg. На основании полученных данных получены зависимости концентрации Mg в сварном шве от изменения параметров режимов сварки (Рисунок 7).

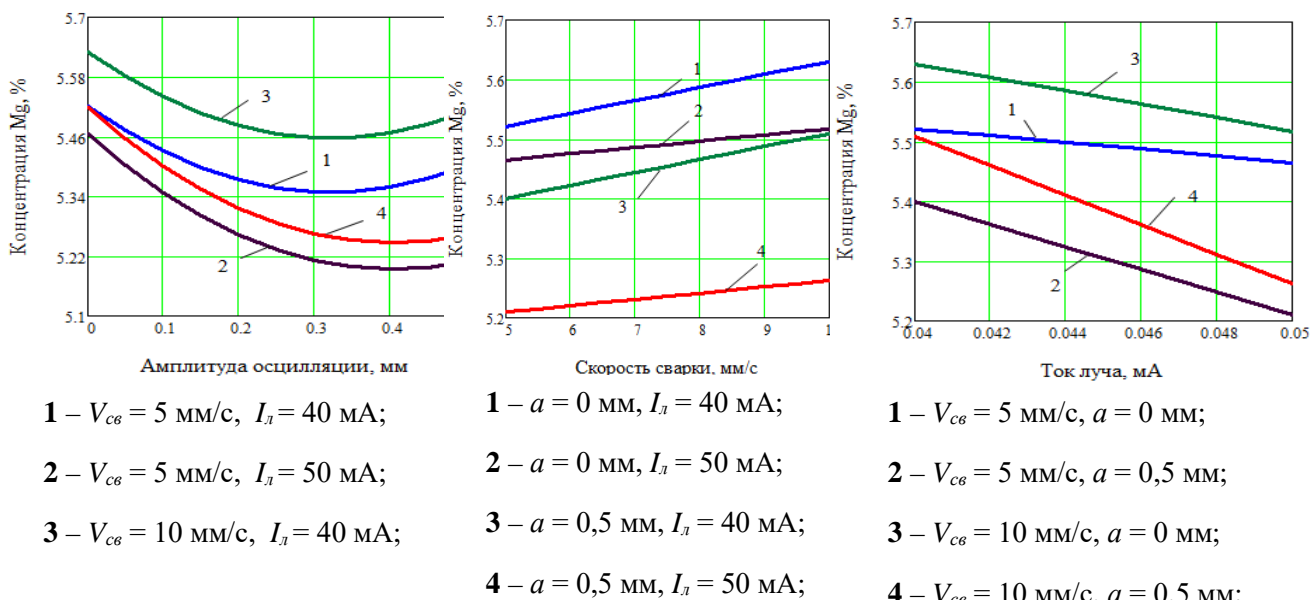


Рисунок 7 - Зависимость концентрации магния от изменения скорости сварки и амплитуды осцилляции при фиксированном значении тока луча для сварных соединений сплава АМГ-6, выполненных с поперечной осцилляцией ЭЛ

Из полученных зависимостей концентрации магния по глубине сварного шва следует, что в верхней части сварного шва происходит истощение магнием в большей степени, чем в средней и корневой части. Также, на изменение концентрации влияет тока луча и скорость сварки.

Сравнение расчетных концентраций магния и полученных в ходе экспериментов, показало, что погрешность расчетов не превышает 4-6 %.

В четвертой главе описаны исследования связанные с влиянием динамического расщепления ЭЛ на изменения формирования концентрации Mg в сварных соединениях. До настоящего времени отсутствует информация об исследованиях связанных с применением динамического расщепления ЭЛ на несколько каналов при ЭЛС алюминиевых сплавов. Поэтому важной задачей являлось определение оптимальных геометрических параметров сварных соединений, получаемые по данной технологии. На основе экспериментальных данных были определены критерии, характеризующие формирование бездефектных сварных швов конусообразной формы со скругленным корнем шва. Для количественного описания формы сварного шва определялись коэффициент формы K_f и коэффициент полноты проплавления K_s :

$$K_f = B/H, \quad (5)$$

$$K_s = S/(B \cdot H), \quad (6)$$

где B – ширина сварного шва; H – глубина сварного шва; S – площадь сварного шва. На рис. 8 показаны примеры получившихся сварных соединений. При сопоставлении формы сварных швов и наличия дефектов с рассчитанными коэффициентами установлено, что бездефектные сварные швы имеют $K_f \sim 0,7$ и $K_s \sim 0,5$, например, шов №2 на рисунке 8.

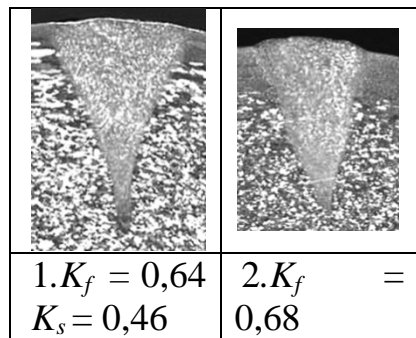


Рисунок 8 - Макрошлифы поперечного сечения швов, выполненных с расщеплением луча при ЭЛС алюминиевого сплава АМг 6

Для получения оптимальных параметров режимов ЭЛС с динамическим расщеплением ЭЛ определялся обобщенный параметр оптимизации по двухсторонней функции Харинтона, который позволил определить интервал значений $K_f = 0,65 - 0,75$ и $K_s = 0,47 - 0,53$. По полученным значениям коэффициентов определялись оптимальные параметры режимов сварки двумя способами: решение обратной задачи в MathCad или графическим методом. Результат решений представлен в таблице 1.

После установления возможности получения качественных сварных соединений проводились

расчеты по модели, описанной в главе 2, результаты представлены на рисунке 9. Для сравнения были выбраны несколько образцов, изготовленных на оптимальных

режимах и на режимах с получением неправильной формы сварного соединения (рис. 10). При рассмотрении полученных зависимостей концентрации Mg в сварных швах можно выявить общую закономерность, наибольшее истощение происходит в

Таблица 1 - Оптимальные параметры режимов ЭЛС

$I \cdot 10^{-3}$	V	L	H	Ks	Kf	
50	8,8	4,16	10,02	0,487	0,7	H=10
55	10,3	4,51	10,013	0,5	0,701	
60	11,46	4,78	10,002	0,513	0,7	
40	11,63	4,94	5,001	0,47	0,699	H=5
45	12,93	5,128	5	0,489	0,699	
50	13,94	5,315	4,999	0,507	0,701	
40	12,8	5,12	4,024	0,471	0,697	H=4
45	13,9	5,3	4,024	0,492	0,7	

верхней части сварных швов, а в средней и корневой части оно выравнивается и достигает допустимых значений (0,058 – 0,068). С увеличением тока луча увеличивается истощение магнием в верхней части швов примерно на 10% при глубине проплавления 10 мм. Однако, для меньших толщин 5 и 4 мм не наблюдается перепада концентрации магния по глубине сварного шва.

Если сравнивать истощение сварных швов, выполненных на разных технологиях ЭЛС, то при динамическом расщеплении ЭЛ интенсивность истощения на 10% выше, чем на аналогичных режимах при продольной и поперечной осцилляции ЭЛ.

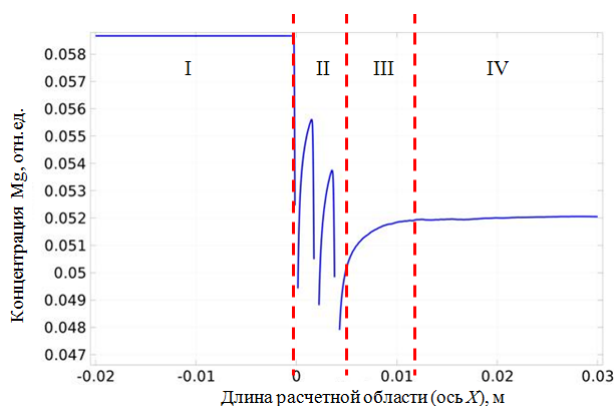


Рисунок 9 - Расчетные значения изменения концентрации Mg в сплаве вдоль стыка при расщеплении ЭЛ I – основной Me, II – зона испарения, III – жидкий Me, IV – закристаллизовавшийся Me.
(скорость сварки $V_{св} = 5$ мм/с, расстояние межлч тепловыми источниками $L = 7$ мм)

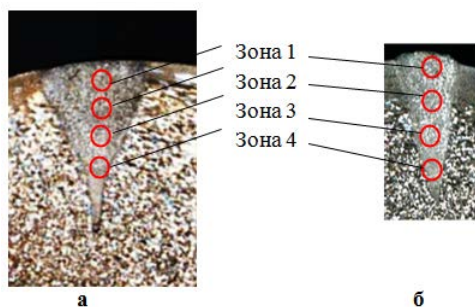


Рисунок 10 - Схематичное изображение исследуемых зон при рентгенофлуоресцентном анализе; а – зона проплавления с нарушением условий конусообразной формы; б – зона проплавления без нарушения условий конусообразности (увеличение X 50)

В приложение представлен акт внедрения результатов работы на ОАО «Пермский моторный завод».

Заключение

По итогам выполнения диссертационной работы можно сформулировать следующие выводы, рекомендации и перспективы дальнейшего разработки темы:

1. Разработанная модель позволяет прогнозировать эффективный химический состав сварных соединений, выполненных при ЭЛС с динамическим воздействием на ЭЛ. Данная модель адаптирована как для сталей, так и для цветных сплавов, процессы испарения в парогазовом канале которых при ЭЛС существенно отличаются. Погрешность при расчете концентраций легкоиспаряемых легирующих компонентов в сплавах не превышает 6%.

2. Получены закономерности формирования химического состава сварных соединений при ЭЛС с осцилляцией ЭЛ при изменении параметров режимов сварки. Данный вид динамического воздействия на ЭЛ не приводит к истощению легкоиспаряемыми компонентами, которое в этом случае составляет порядка 5-7%.

3. Определены оптимальные параметры режимов ЭЛС с динамическим расщеплением ЭЛ для сплава АМг 6, обеспечивающие условие конусообразности и бездефектное формирование сварных соединений.

4. Получены закономерности формирования химического состава сварных соединений при ЭЛС с динамическим расщеплением ЭЛ на различных параметрах режимов. Данный вид динамического воздействия на ЭЛ приводит к истощению легкоиспаряемыми компонентами в верхней части сварных соединений, которое в этом случае составляет порядка 10-15%. При многопроходной сварке истощение составляет 15-20%, поэтому целесообразно использование технологии ЭЛС с расщеплением ЭЛ.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- проведение экспериментально-теоретических исследований с динамическим влиянием на электронный луч при электронно-лучевой сварке титановых сплавов и электронно-лучевая сварка разнородных материалов (хромоникелевого и титанового сплавов);
- применение технологий электронно-лучевой сварки с динамическим воздействием на электронный луч с научно-обоснованным выбором параметров режимов, обеспечивающих получение качественных сварных соединений при изготовлении деталей ответственного назначения на предприятии ОАО «Пермский моторный завод»;
- использование полученных математических моделей испарения и формирования химического состава сварного шва при подготовке бакалавров и магистров по направлению 150700.68 «Машиностроение».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Саломатова, Е.С. Влияние параметров режимов сварки на изменения химического состава сварных соединений при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного луча / Е.С. Саломатова, Т.В. Олышанская, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Г.М. Младенов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2015. – Т. 14. – № 4. – С. 29-43 (0,25 п.л./0,07 п.л.).

2. Саломатова, Е.С. Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке с динамическим позиционированием электронного пучка / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, А.И. Цаплин, В.Я. Беленький, Г.М. Младенов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – Вып. 6. – Ч. 2. – С. 124-134 (0,69 п.л./0,16 п.л.).

3. Саломатова, Е.С. Оценка температуры в канале проплавления при электронно-лучевой сварке / Д.Н. Трушников, Е.С. Саломатова, В.Я. Беленький, У. Рейсген // Сварочное производство. – 2015. – № 2(963). – С. 18-22 (0,31 п.л./0,11 п.л.).

4. Саломатова, Е.С. Оценка температуры в канале проплавления при электронно-лучевой сварке разнородных материалов / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, С.В. Варушкин // электрон. научн. журн. Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12653> (дата обращения: 19.11.2015) (0,37 п.л./0,15 п.л.).

5. Саломатова, Е.С. Моделирование температуры в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 11. – С. 514-515 (0,125 п.л./0,068 п.л.).

6. Саломатова Е.С. О температуре в канале проплавления при электронно-лучевой сварке / Д.Н. Трушников, Е.С. Саломатова, В.Я. Беленький, Г.М.

Младенов, Е.Г. Колева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 6(2). – С. 505-511 (0,44 п.л./0,09 п.л.).

7. Саломатова, Е.С. Математическое описание и анализ сварочных высококонцентрированных тепловых источников / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Е.С. Саломатова, В.М. Язовских // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – № 3(55). – С. 46-50 (0,31 п.л./0,08 п.л.).

8. Саломатова, Е.С. Термодинамическая оценка влияния теплофизических свойств легирующих элементов на давление паров в канале проплавления при электронно-лучевой сварке высоколегированных сталей / Е.С. Саломатова, В.Я. Беленький // Сварка и диагностика. – 2011. – № 2. – С. 22-25 (0,25 п.л./0,125 п.л.).

Публикации в других изданиях:

9. Саломатова, Е.С. Математическая модель давления паров и состава пара в канале проплавления при электронно-лучевой сварке высоколегированных сталей / В.Я. Беленький, Е.С. Саломатова, М.Е. Малюкеева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2011. – Т. 13. – № 1. – С. 80-86 (0,375 п.л./0,175 п.л.).

10. Salomatova, E.S. Estimation of the Temperature in the Weld Penetration Channel in Electron Beam Welding / E.S. Salomatova, V.Ya. Belenkiy, D.N. Trushnikov // Journal of Power and Energy Engineering (JPEE). – 2013. – Vol. 1. – № 7. – pp. 23-25 (0,19 п.л./0,09 п.л.).

11. Саломатова, Е.С. Исследование процессов испарения при электронно-лучевой сварке / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, А.И. Цаплин, В.Я. Беленький // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении: материалы 2-ой Международной науч.-практ. конф., Пермь, 29 сентября – 3 октября 2014 г. – Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2014. – С. 56-59 (0,25 п.л./0,09 п.л.).

12. Саломатова, Е.С. Электронно-лучевая сварка - от изобретения до наших дней / Е.С. Саломатова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2013. – Т. 15. – № 1. – С. 57-62 (0,37 п.л.).

13. Саломатова, Е.С. Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, А.И. Цаплин, В.Я. Беленький // Технологии и оборудование ЭЛС-2014: доклады Санкт-Петербургской междунар. науч.-техн. конф., 24-26 июня 2014 г., СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 103-111 (0,56 п.л./0,15 п.л.).

14. Саломатова, Е.С. Применение параллельных вычислений для исследования испарения при электронно-лучевой сварке / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, А.И. Цаплин, В.Я. Беленький // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Аэрокосмическая техника». – 2014. – № 39. – С. 96-108 (0,81 п.л./0,35 п.л.).

15. Саломатова, Е.С. Исследование геометрических характеристик и микроструктуры сварных швов при электронно-лучевой сварке стали 12Х18Н10Т с осцилляцией электронного пучка / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, В.Я.

Беленький, Т.В. Олышанская // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2012. – Т. 14. – № 3. С. 36-42 (0,44 п.л./0,11 п.л.).

16. Саломатова, Е.С. Исследование влияния осцилляции электронного пучка на химический состав металла сварного шва при электронно-лучевой сварке стали 12X18H10T / Е.С. Саломатова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2012. – Т. 14. – № 4. – С. 57-62 (0,38 п.л.).

17. Salomatova E.S. Simulation Evaporation Processes in Electron Beam Welding / E. S. Salomatova, D. N. Trushnikov, A.Iv. Tsaplin, V. Ya. Belenkiy // Electrotechnica & Electronica E+E. – 2014. – Vol. 49. – № 5-6. – pp. 34-40 (0,375 п.л./0,09 п.л.).