Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Беленький Владимир Яковлевич

Екатеринбург – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…… 5
Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ…… 13
1.1 Процессы формирования парогазового канала при воздействии …
электронного луча на металл…… 15
1.2 Моделирование процессов, протекающих при……
электронно-лучевой сварке…… 23
1.3. Процессы испарения и конечный химический состава сварных……
соединений при электронно-лучевой сварке…… 28
1.4. Влияния динамического воздействия на электронный луч……
на процессы при электронно-лучевой сварке…….. 30
1.5. Обобщение литературных данных и задачи исследования…… 40
Глава 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ…….. 42
2.1. Постановка задачи, основные уравнения и краевые условия…….
математической модели испарения и ……
изменения химического состава сварных швов…… 42
2.2. Методика определения давления и химического состава паров……
в парогазовом канале в процессе испарения…… 51
2.3. Экспериментальная методика определения давления ……
и интегральной температуры в парогазовом канале……
при электронно-лучевой сварке…… 53
2.4. Методика проведения металлографических исследований…… 55
2.5. Система расщепления электронного луча при сварке……. 57
Выводы по главе 2…… 59
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСЦИЛЛЯЦИИ……..
ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ…….....
СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ…… 60

3.1. Математическое моделирование испарения и изменения……..
химического состава сварных швов при электронно-лучевой……..
сварке с осцилляцией электронного луча…… 60
3.2. Определение давления, интегральной температуры……
и химического состава паров в парогазовом канале……
в процессе испарения при электронно-лучевой сварке…….. 67
3.3. Исследование химического состава сварных швов образцов…….
стали12Х18Н10Т на различных режимах……. 71
3.4. Экспериментальные исследования химического состава сварных ..
соединений из сплава АМг 6……. 83
Выводы по главе 3……. 92
Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО……
РАСЩЕПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА…….
НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СВАРНЫХ ШВОВ……..
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ…… 94
4.1. Построение матрицы с планом проведения экспериментов……. 96
4.2. Металлографический анализ сварных соединений…… 98
4.3. Построение математических моделей, связывающих параметры…
расщепления луча при электронно-лучевой сварке……
с геометрией сварного шва…… 100
4.4. Определение оптимальных режимов…….
электронно-лучевой сварки алюминиевого сплава…….
с расщеплением электронного луча…….. 110
4.4.1. Оптимизация процесса электронно-лучевой сварки с…….. ..
расщеплением луча с применением шкалы желательности…… 110
4.4.2 Определение оптимальных режимов…….
электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов……
с динамическим расщеплением электронного луча……
с помощью номограмм……... 118

4.4.3 Определение оптимальных режимов электронно-лучевой сварки ..
алюминиевых сплавов с расщеплением электронного луча……
с помощью решения системы уравнений……. 122
4.5. Численное моделирование процесса испарения …….
при электронно-лучевой сварке с динамическим расщеплением…..
электронного луча…….. 125
4.6. Определение влияния параметров режимов……...
электронно-лучевой сварки с расщеплением электронного луча…
на химический состав сварных швов…… 127
Выводы по главе 4……. 132
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ……. 134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……. 136
ПРИЛОЖЕНИЕ 1…….. 155
ПРИЛОЖЕНИЕ 2…….. 156

ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевая сварка имеет ряд отличий по сравнению с традиционными способами сварки плавлением. При электронно-лучевой сварке возможно получение глубоких и узких сварных швов с минимальной зоной термического влияния, что позволяет сваривать большие толщины за один проход. Также значительное преимущество электронно-лучевой сварки заключается в том, что процесс сварки ведется в вакууме, который обеспечивает защиту зону сварки от воздействия различных газов.

В последнее время широко используются технологии электронно-лучевой сварки с различными динамическими воздействиями на электронный луч, которые обеспечивают улучшенное формирование сварного шва и полное отсутствие дефектов. К таким динамическим воздействиям относится осцилляция электронного луча по различным траекториям, а также, расщепление электронного луча путем его динамического позиционирования.

Применение таких технологических приемов способствует получению бездефектных сварных соединений с отсутствием пикообразования в корневой части сварного шва (колебаний глубины шва в продольном сечении), формированию однородной структуры сварных швов при сварке разнородных материалов, отсутствию пористости сварных швов при электронно-лучевой сварке цветных металлов и сплавов.

Физические процессы, протекающие в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч, мало изучены и представляют интерес с точки зрения создания оптимальных условий для формирования качественного сварного шва. Высокая плотность мощности электронного луча при электронно-лучевой сварке способствует интенсивному испарению металла, и в расплаве формируется глубокий и узкий парогазовый канал. При электронно-лучевой сварке изделий из сплавов, содержащих легкоиспаряемые легирующие элементы, значительный интерес представляют процессы испарения металла. Доказано, что эти процессы оказывают

существенное влияние на формирование парогазового канала, и при интенсивном испарении легкоиспаряемых компонентов может уменьшаться глубина проплавления, а следовательно, и геометрические характеристики сварного соединения. Так же процессы испарения могут оказывать влияние и на конечный химический состав и, соответственно, на эксплуатационные характеристики сварного шва.

На протяжении последних лет ведутся попытки математически описать процессы, протекающие в парогазовом канале. Существуют адекватные математические модели, описывающие физические процессы в парогазовом канале, но все они разработаны применительно к электронно-лучевой сварке статическим лучом, и малоприменимы в случае периодического воздействия электронного луча на металл.

При электронно-лучевой сварке статическим лучом установлено, что истощение легкоиспаряемыми легирующими элементами сплава, при интенсивном испарении не превышает 5%. Этот факт указывает на преимущество электронно-лучевой сварки статическим лучом перед другими способами сварки, однако в этом случае в сварных соединениях возникают дефекты в корневой части шва.

До настоящего времени в литературе практически отсутствуют данные о процессах испарения и истощения сварных швов легкоиспаряемыми легирующими элементами при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч.

Степень разработанности темы исследования

Электронно-лучевые технологии применяют свыше 50 лет. В работах отечественных и зарубежных ученых изучено влияние осцилляции электронного луча на макро и микроструктуру сварных швов, процессы кристаллизации и устранения корневых дефектов в сварных соединениях. Исследовано влияние расщепления электронного луча с формированием нескольких тепловых источников на характер получаемых сварных соединений с различными вариациями процесса, такими как: электронно-лучевой сварке одновременно в

нескольких зонах свариваемого изделия, электронно-лучевая сварка 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 электронно-лучевой сварки и лазерной сварки, но законченные общепринятые модели до настоящего времени отсутствуют. Особенно следует отметить отсутствие динамических моделей, описывающих процессы в канале проплавления при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч. 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 электронно-лучевая сварка ведется в вакууме, и данное допущение при моделировании процесса электронно-лучевой сварке необоснованно.

Процессы испарения при электронно-лучевой сварке статическим электронным лучом достаточно полно исследованы. При этом установлено, что истощение легкоиспаряемыми легирующими элементами сплава не превышает 5 %. Этот факт указывает на преимущество электронно-лучевой сварки статическим электронным лучом 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 электронный луч при электронно-лучевой сварке до настоящего времени не проводились, хотя процессы, протекающие в парогазовом канале в этом случае, существенно отличаются от процессов при электронно-лучевой сварке статическим электронным лучом. Существенным отличием в данном случае являются размеры выходного сечения парогазового канала при осцилляции электронного луча и формирование нескольких каналов

при динамическом расщеплении электронного луча на несколько тепловых источников.

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. Разработка математических моделей, которые позволят описывать процессы испарения и изменения химического состава сварных соединений при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч.
3. Исследование влияния параметров режимов сварки при осцилляции электронного луча на формирование химического состава сварных соединений и верификация с экспериментальными данными.
4. Исследование влияния параметров режимов сварки при динамическом расщеплении электронного луча на формирование химического состава сварных соединений и верификация с экспериментальными данными.

Научная новизна

1. Предложена численная модель процессов испарения и изменения химического состава сварных швов, полученных при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч.

2. Разработана методика определения интегральной температуры, давления и состава паров в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке с осцилляцией и динамическим расщеплением электронного луча на основе изучения процессов испарения и осаждения.

3. Получены закономерности формирования химического состава сварных швов при динамическом расщеплении электронного луча на три тепловых

источника с образованием трех парогазовых каналов при электронно-лучевой сварке 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 электронно-лучевой сварке 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 электронного луча.

Определены оптимальные параметры режимов электронно-лучевой сварки с динамическим расщеплением электронного луча 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».

Методология и методы исследования

Для реализации технологий динамического воздействия на электронный луч в диссертационной работе использовалась специально разработанная высокоскоростная система управления электромагнитным отклонением электронного луча при электронно-лучевой сварке, содержащая низкоиндуктивную отклоняющую систему, широкополосный усилительный тракт с цифроаналоговым интерфейсом. Исследования химического состава сварных соединений проводилось при помощи рентгенофлюоресцентного 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 электронно-лучевой сварке с осцилляцией и динамическим расщеплением электронного луча.

2. Экспериментальная методика определения давления и интегральной температуры в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч, 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 электронный луч.

Степень достоверности и апробации 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 электронно-лучевой сварки. Полученные результаты расширили представления о протекающих в парогазовом канале процессах испарения и формировании конечного состава сварных соединений при электрнно-лучевой 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, 2014г.; 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 было опубликованы 22 работы, из них 8 статей – в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ; 9 – в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

По результатам исследования было опубликовано 17 работы.

Диссертация состоит из четырех глав.

Первая глава посвящена анализу состояния научных исследований в области изучения процессов, протекающих при электронно-лучевой сварке, моделированию процессов испарения при электронно-лучевой сварке статическим лучом и экспериментальным исследованиям в данной области.

Во второй главе описываются разработанные методики проведения исследований и математическая модель испарения и изменения химического состава сварных шов при ЭЛС с динамическим воздействием на электронный луч, применяемое уникальное оборудование и программное обеспечение для управления параметрами режима электронно-лучевой сварки, используемые математические пакеты прикладного программного обеспечения.

В третьей главе исследованы особенности испарения, рассчитаны интегральные значения температуры, давления, состава паров в парогазовом канале и химический состав сварных швов полученных при электронно-лучевой сварке с продольной и поперечной осцилляцией электронного луча. Анализ полученных экспериментальных данных, с построением уравнения регрессии описывающего влияние скорости сварки на химический состав сварных швов.

В четвертой главе исследованы особенности испарения, рассчитаны интегральные значения температуры, давления, состава паров в парогазовом канале и химический состав сварных швов, полученных при электронно-лучевой сварке с расщеплением электронного луча. Так как, данные подходы были использованы впервые, то определялись критерии, характеризующие формирование бездефектных соединений конусообразной формы с более скругленным корнем и оптимальные параметры режимов сварки с помощью решения системы уравнений для заданной толщины свариваемого материала.

В приложение представлены акты внедрения некоторых результатов работы на промышленных предприятиях.

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Широкие возможности автоматизации процесса электронно-лучевой сварки, ведение процесса в вакууме, что обеспечивает высокую чистоту обрабатываемого материала, концентрация энергии в электронном луче до значений, недоступных для традиционных источников тепла при сварке (сварочная дуга, электрошлаковая ванны и т.д.), способствовали внедрению электронно-лучевой сварки в различные отрасли промышленности, такие как приборостроение, автомобилестроение, судостроение, аэрокосмическая отрасль.

На протяжении более 50 лет ученые из разных стран занимаются исследованиями закономерностей, механизмов образования парогазового канала и сопутствующими процессами при электронно-лучевой сварке, без знания которых затруднительно использование электронного луча при соединении материалов. Большой вклад в изучение процессов, протекающих при электронно-лучевой сварке, внесли такие советские и российские исследователи как, Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. [1, 2], Назаренко О. К., Кайдалов А. А. [3, 4], Башенко В. В., Миткевич Е. А. [5, 6], Лесков Г. И., Нестеренков В. М. [7, 8], Туричин Г.А [9, 10], Судник В.А., Ерофеев В.А. [11, 12], Браверман В.Я. [13], Драгунов В.К. [14, 15], Язовских В. М. [16, 17], Беленький В. Я. [18, 19], А. Каплан [20, 21], а так же зарубежные исследователи – Р. Рай, Т. Деброй [22], Ч. Ванг [23] и др.

Электронный луч является практически безынерционным источником тепловой энергии, что позволяет осуществлять быструю управляемость током, отклонением и положением фокуса луча. С развитием новых систем управления электронным лучом и программирования режимов электронно-лучевой сварки, появились возможности совершенствования технологических приемов сварки, обеспечивающие почти неограниченное разнообразие режимов воздействия луча на поверхность свариваемой детали. К таким технологическим приемам можно отнести динамическое воздействие на электронный луч, включающее в себя

осцилляцию луча по различным траекториям и расщепление электронного луча на несколько тепловых источников.

При электронно-лучевой сварке статическим лучом образуются специфические дефекты, среди которых наиболее характерным и трудноустроняемым являются пикообразование, проявляющееся в периодическом изменении глубины сварного шва по его длине. Пикообразование влечет за собой ряд сопутствующих дефектов – несплавлений и пустот в корне сварного шва. Подобные дефекты приводят к резкому снижению эксплуатационных характеристик сварных соединений.

Динамическое воздействие на электронный луч позволяет при сварке получать практически бездефектные сварные соединения. Сварные соединения, полученные при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного луча имеют более однородную структуру по глубине [26-29], происходит устранение специфических дефектов в корне шва и формируется более закругленная форма корневой части шва.

В то же время при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов с осцилляцией электронного луча в сварном шве образуются поры [30], а влияние расщепления электронного луча на формирование данных дефектов не изучалось.

В литературе содержатся данные о влиянии статического электронного луча на процессы испарения и химический состав сварных соединений, полученных при электронно-лучевой сварке [24, 25], а эти данные применительно к электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч отсутствуют.

Исходя из этого, актуальным являются исследования процессов испарения и прогнозирование конечного химического состава сварных соединений, полученных при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч. Важным, также, является определение влияния расщепления электронного луча на пористость сварных швов из алюминиевых сплавов.

1.1. Процессы формирования парогазового канала при воздействии электронного луча на металл

Фундаментальными вопросами при исследовании физических процессов, протекающих при электронно-лучевой сварке, является механизм глубокого внедрения электронного луча в металл свариваемого изделия, в ходе которого происходит образование парогазового канала, заполненного парами металла и плазмой, и поведение жидкого металла вокруг образовавшегося канала.

На сегодняшний день можно выделить несколько механизмов образования парогазового канала.

Первый механизм, или так называемая «взрывная» гипотеза, состоит в том, что электроны проникают в поверхностный слой металла на глубину свободного пробега и выделяют свою энергию в приповерхностном слое металла. Кинетическая энергия электронов, проникающих в приповерхностный твердый или жидкий слой металла, трансформируется в энергию электронной подсистемы свободных электронов решетки металла за время порядка 10^{-14} с. Значительная часть этой энергии передается металлу в результате неупругих взаимодействий проникающих электронов с отдельными атомами кристаллической решетки, а небольшая часть этой энергии возбуждает тормозное рентгеновское излучение. За время порядка 10^{-10}с электронная и атомная подсистемы металла достигают состояния равновесия, и переданная электронным лучом энергия обусловливает локальное повышение температуры металла. В результате этого нагрева в зоне взаимодействия электронного луча с металлом наблюдается локальное расплавление металла и его поверхностное испарение, которое при большой плотности мощности луча носит характер взрывоподобного абляционного вскипания и выброса мелких частиц или капель жидкого металла. Поверхность жидкой ванны металла деформируется, и электронный луч проникает в созданное им углубление. В течение некоторого времени это углубление трансформируется в парогазовый канал, заполненный ионизированными и нейтральными атомами металла. В местах, где наклон поверхности передней стенки парогазового канала

меньше (рис. 1.1), возникает перегрев, и электронный луч адиабатически нагревает, плавит и испаряет металл свариваемого изделия.

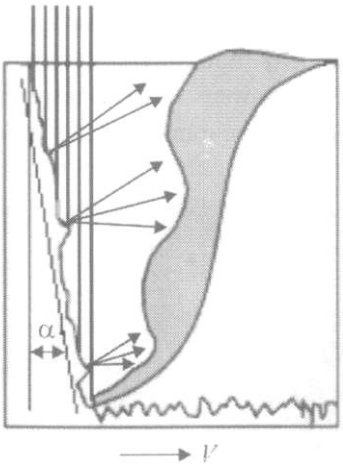


Рисунок 1.1 – Создание микропотоков пара и продуктов абляции в парогазовом канале [31]

Здесь угол α – усредненный угол наклона передней стенки парогазового канала, а V – скорость сварки. На местах выпуклостей на передней стенке канала наклон поверхности жидкого металла уменьшается, что приводит к увеличению локальной плотности мощности электронного луча. В результате этого возникают участки перегрева металла и возникающие микропотоки пара и продуктов абляции металла взаимодействуют с электронным лучом и соответствующим элементом задней стенки парогазового канала [31]. Данная гипотеза получило подтверждение в ряде экспериментальных работ [58-62].

Второй механизм глубокого проплавления при электронно-лучевой сварке, описывает процессы, протекающие при внедрении электронного луча в металл без взрывного вскипания, следующим образом. При электронно-лучевой сварке энергия, выделяющаяся при торможении быстрых электронов в металле, расходуется на ионизацию внутренних электронных оболочек. Выбитые из этих оболочек электроны (δ-электроны) теряют свою энергию также, как и первичные, но, обладая меньшей энергией, проходят значительно меньшие пути до полной термализации. Относительно небольшая часть энергии быстрых электронов, пропорциональная отношению количества валентных электронов к полному количеству электронов в атоме, расходуется на возбуждение

плазменных колебаний электронов проводимости (плазмонов). Взаимодействие электрических полей бегущих волн плотности электронного газа с ионами мишени (электрон-фононное взаимодействие) приводит к перекачке энергии плазменных колебаний в энергию колебаний ионов (теплоту) за времена ~ 10^{-15} с. Ионы с дополнительным зарядом (с "дырками” во внутренних оболочках) в момент ионизации скачками изменяют свои потенциалы взаимодействия с окружающими ионами, что приводит к возмущению их колебательного движения, то есть их нагреву. Время жизни “дырки” во внутренней оболочке определяется быстротой протекания релаксационных процессов и составляет 10^{-12} – 10^{-14} с. Образующиеся в результате рекомбинации электромагнитные кванты и оже-электроны также термализуются по описанному выше механизму.

Таким образом, для процессов длительностью более 10^{-12}-10^{-10}с электронный луч является обычным источником нагрева, так как его энергия успевает за это время полностью термализоваться. Отсутствие подповерхностного максимума энерговыделения и малая (~ 1 мкм) толщина зоны торможения быстрых электронов позволяет не рассматривать при малых углах встречи и длительностях воздействия более 10^{-5}с детальную структуру зоны энерговыделения и описывать нагрев металла электронным лучом в условиях глубокого проплавления как нагрев падающими на поверхность тепловым потоком. В связи с этим различные модели, использующие для описания электронно-лучевой сварки с глубоким проплавлением понятия подповерхностного максимума температуры и взрывного вскипания, к случаю глубокого проплавления неприемлемы [32]. Подтверждение данной «без взрывной» гипотезы отразились в работах [63-66].

Ерофеев В.А в своей работе [33] рассматривает дальнейшие процессы, протекающие при воздействии электронного луча с металлами. Парогазовый канал является неустойчивым образованием, наблюдаются быстрые (с периодом порядка 0,2–2,0 мс) флуктуации глубины проникновения луча в металл. Возникновение автоколебаний вызвано тем, что зона интенсивного

испарения сосредоточена на дне канала, боковая поверхность которого выводится из зоны действия луча при заглублении в металл. Поэтому силы поверхностного натяжения в горловине канала стягивают входное отверстие канала, когда испарение в горловине прекращается и сосредоточивается в глубине металла. Стягивание горловины перемещает зону испарения на поверхность листов, после чего следует новое заглубление луча. Основными факторами этого явления являются капиллярное давление в канале и давление реактивной отдачи пара (рис. 1.2), находящиеся в нестационарном равновесии.

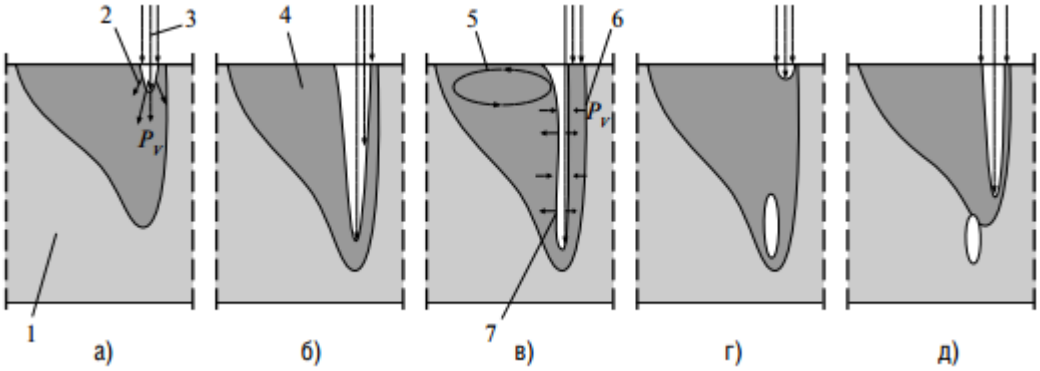


Рисунок 1.2 – Физические явления при ЭЛС: а - заглубление луча под действием давления пара; б – прекращение испарения; в – стягивание канала капиллярным давлением; г – остаточный канал в корне шва; д – фиксация пустоты кристаллизующимся металлом (1 – свариваемый металл; 2 – сила реактивной отдачи пара; 3 – электронный луч; 4 – расплав; 5 – термокапиллярное течение; 6 – капиллярные силы; 7 – силы инерции) [33]

Оба фактора, особенно давление пара, зависят от температуры плавления свариваемого металла. При сварке сплавов это давление определяется также количеством легкокипящих примесей. Для сплавов алюминия такими легкокипящими компонентами являются цинк и магний. При их содержании более 5 % давление пара определяется их температурой кипения. Данная температура определяет температуру металла на поверхности канала. Температура определяется соотношением между интенсивностью тепловыделения в зоне падения луча, теплопроводностью и теплоемкостью металла. На теплопередачу в расплаве значительно влияет перемещение

расплава, вызванное периодическим изменением глубины канала. При увеличении глубины расплав начинает перемещаться в направлении входного отверстия канала. Кроме того, у горловины канала на теплопередачу влияет движение металла, вызванное термокапиллярным эффектом [33]. Таким образом, В.А. Ерофеев разработал упрощенную модель схлопывания парогазового канала при электронно-лучевой сварке, в котором глубина проплавления и формирование парогазового канала определялось по балансу температуры канала и температуры кипения легкоиспаряющихся компонентов сплава. Решение уравнений модели имело колебательный характер относительно глубины канала, но вследствие высокой частоты колебаний и инерционности тепловых процессов температурное поле за пределами сварочной ванны за период колебаний не изменялось. Соответствие расчетных профилей поперечного сечения шва макрошлифов достигалось введение калибровочных коэффициентов для учета влияния перемешивания расплава и погрешностей данных по температуре кипения (интенсивного парообразования). Значения коэффициентов определены для конкретного сплава при сравнении расчетных и опытных значений ширины шва и глубины проплавления [35].

Существуют два характерных вида канала: геометрически стабильный и пульсирующий. Первому виду соответствуют более низкие плотности потока и отношение глубины к диаметру на поверхности канала. Переход стабильного канала в пульсирующий происходит при некотором значении силы тока фокусировки, при определенном значении последней резко изменяется отношение глубины к диаметру, сопровождаемое значительными колебаниями глубины. В работах [34, 35, 49] авторы при помощи численного моделирования процессов испарения и конденсации паров металла в канале подтвердили возникновение периодических колебаний радиуса и глубины парогазового канала, с частотой порядка 10 кГц. На рис. 1.3 изображены результаты расчетов, представляющие эволюцию поперечного сечения парогазового канала во времени.

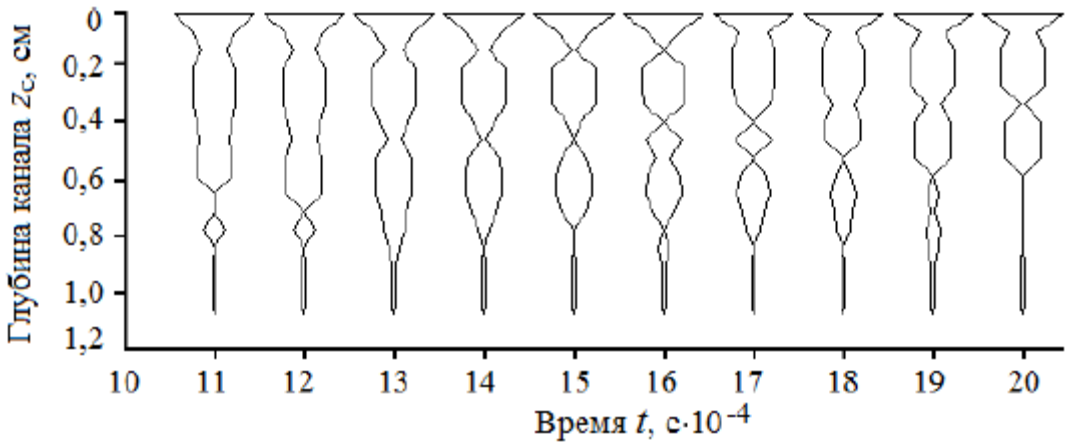


Рисунок 1.3 – Эволюция канала с момента после 0,1 мс воздействия электронного луча [35]

Поверхность канала быстро меняет свое пространственное положение, при котором формируются гофры. Канал часто схлопывается на разной глубине. В нижней части канала часто образуются изолированные газовые полости (остатки канала), которые в случае быстрой кристаллизации являются корневыми пустотами.

Экспериментальным изучением особенностей поведения канала в жидкой металлической фазе занималось большое количество исследователей. Эксперименты проводились воздействие струи воздуха на различные материалы: ртуть, прозрачные жидкости (вода, глицерин, вазелиновое масло) [36]. Проводились эксперименты по изучению воздействия электронного луча на вакуумное масло (выбор обусловлен его прозрачностью и низкой упругостью паров), и с помощью скоростной киносъемки установлено, что при воздействии электронного луча на масло в нем формируется узкий канал с картиной свечения, характерной для газового разряда высокого давления [1, 2].

За полувековую историю существования электронно-лучевой сварки изучено большое количество процессов, протекающих при взаимодействии электронного луча с металлом, которые условно изображены на рис. 1.4.

Рисунок 1.4 – Схематичное изображение процессов, протекающих при взаимодействии электронного луча (ЭЛ) с металлом при электронно-лучевой сварке (ЭЛС): парогазовый канал (ПГК)

Из рисунка 1.4 видно, что в парогазовом канале и его поверхности происходит большое количество взаимосвязанных процессов, подтверждением которых являются опубликованные исследования.

Большое количество работ [50-56] посвящены гидродинамическим процессам в зоне воздействия электронного луча при электронно-лучевой сварке. В настоящее время доказано существование переноса жидкого металла с фронта плавления к задней стенке парогазового канала. Этот перенос проходит по передней и боковым стенкам канала одновременно и имеет колебательный

характер. Неустойчивое капиллярно-волновое перемещение на фронте плавления приводит к тому, что на поверхность возмущения жидкого металла воздействует часть луча с большей плотностью мощности, чем при отсутствии возмущений. Истечение паров с высокой скоростью из канала, действуют на возмущенный участок и движение на нем ускоряется. При этом скатывающаяся на дно волна оголяет твердые слои металла на передней стенке, после чего повторяются процессы плавления и переноса. Соотношение потоков жидкого металла на передней стенке канала в двух преимущественных направлениях (по передней и боковым стенкам канала) неодинаково на различной глубине и определяется соотношением азимутальной и вертикальной составляющей реакции отдачи. Так в верхней части канала, где угол наклона фронта плавления по отношению к оси луча наибольший, металл в большей степени переносится по боковым стенкам канала, чем в других областях. Перемещающиеся вдоль фронта плавления складки жидкого металла достигают дна канала. Здесь реакция отдачи паров резко возрастает, и металл выталкивается со дна канала на поверхность сварочного соединения. Основная часть жидкого металла выталкивается по задней стенке канала [38], однако с уменьшением скорости сварки часть металла выталкивается на поверхность впереди электронного луча [57].

В работах [37, 38], при проведение экспериментов, было обнаружено, что движение канала в жидкости сопровождается загибом его нижней части в сторону, обратную направлению движения. Загиб обусловлен инерционными силами и происходит тем сильнее, чем больше скорость движения канала.

Также большое количество работ посвящено исследованию образованию специфических дефектов, таких как пористость сварного шва [67, 68], образование хампов [69, 70].

Ряд работ связан с изучением возможности оперативного управления процессами при электронно-лучевой сварке по вторичному току плазмы. В работе [122] разработана модель расчета температуры в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке, которая, в сочетании с уравнением для термоэлектронной эмиссии и дополненная предположением о существовании

перегревов в области взаимодействия луча со стенками канала проплавления образует, в совокупности, модель, описывающую формирование термоэлектронного сигнала. Установлено, что амплитуда высокочастотных колебаний вторичного тока в плазме характеризует термоэлектронную эмиссию из области взаимодействия электронного луча с металлом в канале проплавления и зависит от свариваемого материала. При сварке меди и бронз амплитуда на порядок снижается по сравнению с ее значениями при сварке сталей. Установлено, что при сварке сталей с медью температура в парогазовом канале принимает промежуточное значение между ее величиной при сварке сталей и величиной при сварке меди (или бронзы). Величина вторичного тока в плазме при этом со стороны стали снижается, а со стороны меди (бронзы) повышается. Установлено, что величина перегрева в области взаимодействия луча электронов со стенками канала проплавления составляет величину порядка 400 К относительно интегральной температуры в канале. Разработана математическая модель формирования вторичного сигнала при электронно-лучевой сварке разнородных металлов. Проанализировано изменение параметров вторичного тока в плазме при изменении смещения электронного луча относительно стыка. Зависимость параметров вторичного тока в плазме от смещения электронного луча относительно стыка при электронно-лучевой сварке разнородных материалов и сплавов, использована для разработки методов оперативного контроля [91-100].

1.2. Моделирование процессов, протекающих при электронно-лучевой сварке

Для анализа процесса электронно-лучевой сварки широко используется математическое моделирование. Моделирование охватывает разработку математических моделей для лучшего понимания исследования сварочного процесса и прогнозирования свойств соединений, а так же создание моделей для управления процессами [41]. Поэтому рассмотрение математических моделей,

созданных для исследования процессов в парогазовом канале при электронно-лучевой сварки представляет значительный интерес.

Свойства сварного соединения зависят от его геометрии и микроструктуры, которые определяются по распределению температуры и термическим циклам в изделии. Экспериментальное измерение температуры с помощью термопар не дают точных значений в связи с высокими температурами и температурными градиентами в зоне сварки. Поэтому численное моделирование тепломассопереноса в заготовке может быть использовано как дополнение к экспериментальным исследованиям. После проверки экспериментальной проверки численные модели могут сэкономить время и затраты за счет снижения потребности в дополнительных экспериментах. Они также могут расширить представления о температурах и термических циклах во всех точках расчетной области. Нужно отметить, что перечисленные выше физические процессы протекают при электронно-лучевой сварке одновременно, влияя друг на друга, и описывать такие процессы возможно лишь с помощью самосогласованной модели.

В то время как многие численные модели теплообмена и гидродинамики в парогазовом канале были разработаны для лазерной сварки [71-81], очень немногие модели предназначены для расчета теплообмена и гидродинамики для электронно-лучевой сварки [82-87]. Авторы работы [88] рассчитывали параметры проплавления, используя энергетический баланс на стенках парогазового канала, предполагая, что поглощение электронов в плазме незначительно, и электроны полностью проникают в стенки парогазового канала, и температура на стенках канала равна температуре кипения сплава.

Д.В. Элмер с соавторами [84] предложил три модели теплопроводности для электронно-лучевой сварки на основе распределенных точечных или линейных источников тепла, в зависимости от плотности мощности и путем сравнения рассчитанных и измеренных геометрий сварных швов. Модель точечного источника тепла прогнозирует соотношение сторон, равное 1. Соотношение менее 1 означает, что тепло распределяется на поверхности и соответственно, может

быть использована распределенная модель теплового источника. Для соотношения сторон значительно выше, чем 1, глубина проплавления превышает половину ширины сварочной ванны, и в таких случаях используется модель с линейным источником.

Х. Наммер и О. Гроунд [85] использовали аналитическую модель теплопроводности, предполагая, что парогазовый канал имеет цилиндрическую форму с предварительной температурой поверхности. П. С. Вэй и Я. Т. Чоу [86] изучали влияние фокусировки электронного луча и легирующих элементов в сплаве на форму парогазового канала. В данной модели предполагалось, что в любом горизонтальном разрезе канал имеет форму окружности и изменение температуры стенки по окружности на любой глубине превышает температуру на поверхности канала. Кроме того, в работе пренебрегалось скрытой теплотой плавления и испарения, и не учитывались потери отраженных электронов и конвекция жидкой фазы канала. Из баланса между поверхностным натяжением и давлением паров была получена температура поверхности парогазового канала. На рисунке 1.5 показано изменение температур стенок парогазового канала при электронно-лучевой сварке алюминиевого сплава при мощности луча 4.34 кВт и скорости сварки 8 мм/с. Расчетные значения обозначены сплошной линией. Измеренные температуры стенок парогазового канала в работе [89] с использованием узкополосного инфракрасного пирометра приведены пунктирной линией. Рассчитанные значения температур стенок парогазового канала для алюминиевого сплава от значения 1100К на поверхности канала существенно изменяются с глубиной (на 600К).

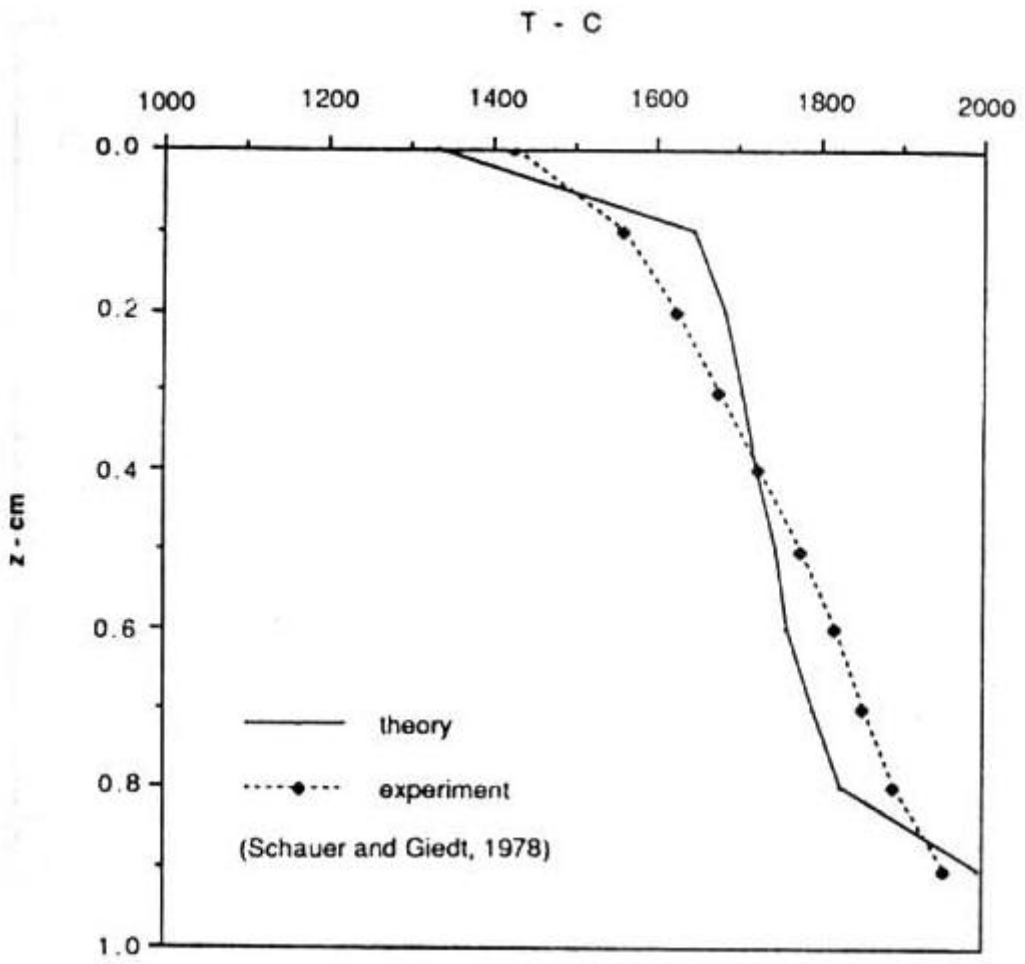


Рисунок 1.5 – Изменение температуры стенок парогазового канала при электронно-лучевой сварке алюминиевого сплава 1100 при потребляемой мощности 4,34 кВт, скорость сварки 8 мм/с, 0,005 рад расхождение, -4 мм расфокусировка, и 0,7 мм размер фокусного пятна [89]

Эффект влияния легкоиспаряемых элементов в малых содержаниях на температуру стенок парогазового канала показан на рис. 1.6. Рассчитанная температура стенки парогазового канала на дне составляет около 2300 К для чистого алюминия, что близко к значению, полученному из экспериментальных наблюдений [89]. Добавление небольших количеств (0,1% по весу) легкоиспаряемого элемента (цинк), приводит к значительному падению рассчетных температур поверхности канала (~ 400 К) по сравнению с чистым алюминием и, как следствие, увеличению глубины проплавления. Температура стенок парогазового канала рассчитываются через баланс между давлением

паров, которое сильно возрастает с повышением температуры и поверхностным натяжением. Общее давление паров значительно увеличивается в присутствии летучих легирующих элементов. Таким образом, общее давление пара становится достаточно высоким, чтобы сбалансировать поверхностное натяжение при более низких температурах.

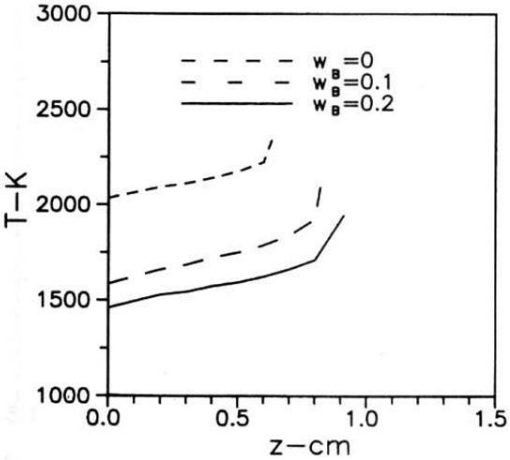


Рисунок 1.6 – Влияние летучих легирующих элементов на расчетные значения температуры стенок парогазового канала для алюминия с различными весовыми процентами легирующих элементов: мощность луча 3 кВт, скорость сварки 20 мм/с [89]

Авторами работы [87] предложена 2D модель теплопередачи и модели гидродинамических процессов с вычислением свободной температуры поверхности, толщины слоя жидкости и касательных скоростей свободной поверхности жидкости, предполагая, что градиент поверхностного натяжения является основной движущей силой для потока жидкости. Были изучены число Рейнольца, поверхностное натяжение, конвекцию и проводимость по температуре поверхности и толщину слоя жидкости.

Вэй и Шиян [90], используя аналитическую 3D модель теплопроводности предположили, что парогазовый канал имеет форму параболоида вращения и рассчитали глубину проникновения электронного луча и температуры поверхности. Для учета конвективного теплообмена коэффициент температуропроводности в направлении потока был увеличен в пять раз. Из

расчетов определялись: радиус парогазового канала, мощность луча, значение числа Пекле и параметры аппроксимации конвекции. Сравнивая температуры, рассчитанные в жидкости и зоны термического влияния с экспериментальными наблюдениями в работе [89], они показали, что решения с помощью точечных и линейных источников дают недостоверную информацию.

1.3. Процессы испарения и конечный химический состава сварных соединений при электронно-лучевой сварке

Как уже было отмечено, перечисленные выше физические процессы протекают при электронно-лучевой сварке одновременно, влияя друг на друга, и описывать такие процессы возможно лишь с помощью самосогласованной модели.

Первая самосогласованная модель по температуре в парогазовом канале и диаметру канала, представленная в работах [43, 44], позволяла учитывать неравновесное испарение со стенок парогазового канала, баланс давлений паров, гидродинамического, капиллярного и инерционного давлений, что в свою очередь позволило найти форму и размеры парогазового канала, а также определить давление и температуру в нем.

В работах [12, 42], авторы усовершенствовали модель Кросса и впервые рассчитали КПД процесса поглощения энергии на основе фундаментальных принципов поглощения излучения и потерь энергии, в которые вошли многократные отражения луча в канале и процессы образования плазмы.

А.Ф. Каплан и др. [45]предложили аналитическую модель схлопывания или коллапса парогазового канала при импульсной лазерной сварке, расчеты по которой сравнивали с результатами просвечивающей рентгеновской микроскопии. Хорошее соответствие параметров теоретического и экспериментально полученного парогазового канала позволило авторам предложить модель процесса, в котором учитывается повторная конденсация при

быстром охлаждении потока защитного газа в парогазовом канале в период паузы воздействия лазерного луча.

И.В. Кривцун и др. [46] разработали самосогласованные математические модели процессов испарения металла, поверхностной конденсации и газодинамики металлических паров внутри парогазового канала, формирующегося в расплавленном металле при лазерной сварке с глубоким проплавлением. Исследовали влияние газодинамических процессов на состояние пара в парогазовом канале, его давление на стенке канала, теплообмен в ванне расплава за счет процессов испарения и конденсации на ее свободной поверхности. Авторы показали, что имеются составляющие теплового потока, направленного на стенки парогазового канала (нагрев за счет поверхностной конденсации пара и выделяющейся при этом энергии связи атомов в расплаве), и составляющие, где пар уносит энергию (охлаждение поверхности расплава в результате испарения).

Г.А. Туричин и др. в своих работах [32, 47] построили модель, которая решает задачу о распределении примесей в два этапа. На первом этапе определялась концентрация примеси на поверхности парогазового канала, а на втором, с учетом полученных поверхностных концентраций, поле концентрации в объеме сварочной ванны. Данные процессы были рассмотрены для алюминиевых сплавов, для которых процессы формирования парогазового канала при электронно-лучевой сварке существенно отличаются от процессов формирования канала для сталей. При сварке сталей канал в основном заполнен парами основного компонента (железа), то при сварке алюминиевых сплавов канал заполнен парами компонентов с большей энтальпией испарения. Поэтому формирование химического состава металла шва определяется совместным протеканием процессов испарения и диффузии примесей. В ходе экспериментальных работ было установлено следующее. Поскольку свойства алюминиевых сплавов в значительной мере зависят от содержания легирующих добавок, то металл шва отличается по своим параметрам от основного металла. Изменяется размер зерна. Предел прочности уменьшается, а пластичность

сварного соединения увеличивается. Изменяется также стойкость металла шва к воздействию агрессивных сред. Также отмечено, что испарение является причиной значительных изменений формы и размеров зоны проплавления. Испарение примесей влияло на форму проплавления не только через изменение условий баланса давления. Столь значительное изменение концентрации приводит к изменению свойств материала, таких как теплопроводность, теплоемкость, электропроводность (влияющая на коэффициент отражения). Расчеты показали, что с увеличением диаметра пятна нагрева резко увеличиваются потери за счет увеличения площади испарения. В ходе экспериментов обнаружилось, что при увеличении скорости сварки потери легирующих компонентов уменьшаются.

Подобный вывод об уменьшении потерь летучих компонентов с увеличением скорости сварки сделан в работе [48]. В ходе экспериментов были исследовано распределение легколетучих примесей в сварном шве в продольном и поперечном сечении, выполненных на оптимальных режимах при электронно-лучевой сварке. Так же установлено, что количество легколетучих примесей в шве при последующих проходах уменьшается, и это необходимо учитывать при сварке сплавов, содержащих элементы с большой упругостью паров. Так же указано, что применение присадочной проволоки при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов способствует снижению потерь на испарение легколетучих элементов.

1.4. Влияния динамического воздействия на электронный луч на процессы при электронно-лучевой сварке

Электронный луч является практически безынерционным источником тепловой энергии. Возможность тонкой регулировки мощности, фокусировки и положения луча на поверхности изделия позволяет широко использовать системы управления лучом и программирования режимов сварки, необходимых для формирования сварного шва [101].

Системный подход при электронно-лучевой сварке позволяет изменять определенные параметры колебательного воздействия, в частности, амплитуду, частоту колебаний и возможность расщепления электронного луча на несколько тепловых источников, одновременно анализируя их воздействие на геометрию сварного шва.

Используя системы управления лучом и программирование режимов сварки, возможно создание новых технологических решений, в основе которых лежит расщепление луча, позволяющее электронному лучу одновременно воздействовать в нескольких обрабатываемых зонах, или совмещать такие процессы, как сварка и термообработка [102].

На сегодняшний день ведется большое количество работ, рассматривающих возможность динамического воздействия на электронный луч и влияние параметров этого воздействия на геометрию сварного шва. Выделяют три основных технологических приема:

- осцилляция электронного луча;
- сканирование фокуса электронного луча;
- расщепление электронного луча.

Колебательные перемещения луча предоставляют дополнительную возможность влиять на процесс сварки, а значит, и на образование сварного шва. При этом луч, обладающий неизменной удельной мощностью, последовательно воздействует на ряд точек в непосредственной окрестности центра сварки [101].

В электронно-лучевой установке осцилляция осуществляется за счет использования отклоняющей системы, которая представляет собой две пары пространственно ориентированных катушек. При подаче на катушки постоянного тока получается постоянное магнитное поле, которое будет отклонять электронный луч на определенный постоянный угол. Если же подать на катушки переменный ток, то получается переменное магнитное поле, которое и создает колебания электронного луча.

Если частота осцилляции луча мала, то паровой канал практически не изменяется в размере, при более высокой частоте происходит его расширение. В

результате колебания луча усиливается дегазация металла ванны, что способствует уменьшению пористости шва и подавлению корневых дефектов [101, 103].

Амплитуда осцилляции электронного луча при сварке находится в пределах 1 - 3 мм, а частота колебаний – 50 - 500Гц. Стоит обратить внимание на то, что при любом варианте осцилляции проплавляющая способность луча падает, и для сохранения требуемой глубины проплавления необходимо увеличивать ток луча.

Характер колебаний луча может быть самым разным, наиболее применяемыми являются круговые, синусоидальные, прямоугольные и Х-образные. Эффект от развертки проявляется в изменении мгновенного и усредненного по периоду распределения плотности мощности электронного луча. Соответственно меняются характер гидродинамических процессов и конфигурация сварочной ванны [104, 105]. Исследованиям влияние траектории осцилляции на формирование сварных швов посвящен ряд работ [106-111], в которых отмечается образование более скругленной формы корня шва при отсутствии дефектов, выравнивание структуры металла по глубине шва.

Электронно-лучевая сварка с вращением электронного луча по круговой траектории позволяет добиться существенного уменьшения образования корневых дефектов, однако ввиду того, что плотность мощности в центральной части зоны нагрева мала, использование круговых колебаний приводит к значительному уменьшению глубины проплавления [114] по сравнению со сваркой статическим лучом.

Колебания электронного луча по Х–образной траектории целесообразно производить при оптимальной фокусировке, обеспечивающей при заданных режимах сварки максимальную глубину проплавления (рис. 1.7). Такая фокусировка может быть установлена по максимальному значению амплитуды колебаний переменной составляющей спектра тока в цепи свариваемого изделия или коллектора с частотой в диапазоне 3-15 кГц как при неподвижном, так и при осциллирующем луче [111].

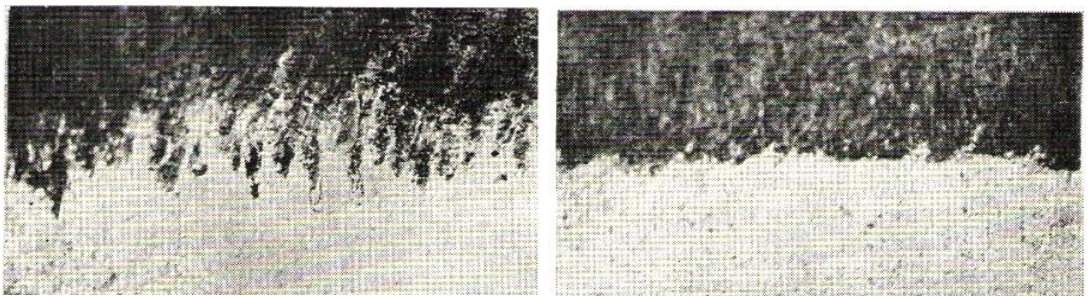


Рисунок 1.7 – Продольные макрошлифы корневой части швов, полученных: слева – без колебаний луча; справа – с колебаниями по Х–образной траектории [111]

Выбор вида осцилляции, ее частоты и амплитуды при управлении формированием сварного шва осуществляется только на основании экспериментальных данных. Строго обоснованного объяснения предпочтения той или иной формы развертки перед остальными на данный момент не существует [101, 102].

Авторы работы [112] провели исследования, посвященные изучению процесса электронно-лучевой сварки с глубоким проплавлением с применением осцилляции электронного луча, где рассматривается влияние продольной осцилляции на форму канала проплавления, протекание процессов тепломассопереноса и параметры швов для разработки методических рекомендаций. Представлена численная трёхмерная математическая модель электронно-лучевой сварки на основе уравнений теплопроводности и Навье-Стокса, с учётом фазовых переходов на границе раздела твёрдой жидкой фазы и термокапилляной конвекции (эффект Марангони). Форма канала проплавления определяется на основе экспериментальных данных по параметрам вторичного сигнала, с помощью метода синхронного накопления [113].

Расширение возможностей электронной оптики и отклоняющей системы позволят использовать технологию расщепления луча с изменяемым фокусным расстоянием при непрерывно выполняемой осцилляции, как сварку, приводящую к более качественному формированию шва и улучшенному удалению газов из расплава, по сравнению с обычной технологией ЭЛС сварки.

Расщепление электронного луча – это технологический прием, позволяющий вести сварку, например, на разных высотах. Типичный пример данной технологии показан на рис. 1.8 [115, 116].

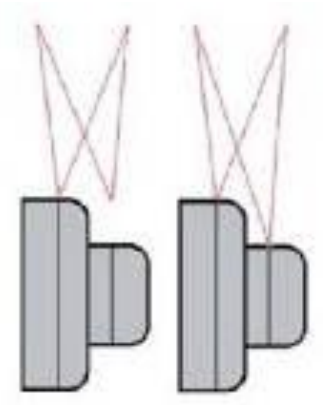
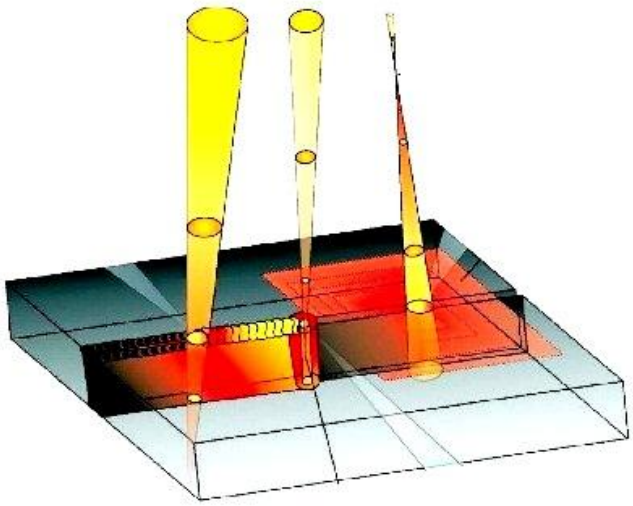


Рисунок 1.8 – Электронно-лучевая многофокусная сварка: слева – без изменяемой фокусировки, справа - с изменяемой фокусировкой, сварка происходит одновременно в двух местах [116]

При рассмотренном процессе расщепления электронного луча пористость составляет 0,76 % от сварного шва, в то время как при электронно-лучевой сварке с использованием одного луча она увеличивается до 5,05 % [103]. При сварке алюминия и его сплавов данная технология расщепления электронного луча с изменяемым фокусным расстоянием (рис. 1.9) способствует улучшению формы шва и более быстрому удалению газов из расплава, одновременно снижая степень перегрева ванны и уменьшая концентрацию энергии в пятне [117, 101]. Разницу между данными способами изображена на рис. 1.10.



.

Рисунок 1.9 – Схема электронно-лучевой сварки при одновременном воздействии трех электронных лучей с различной фокусировкой

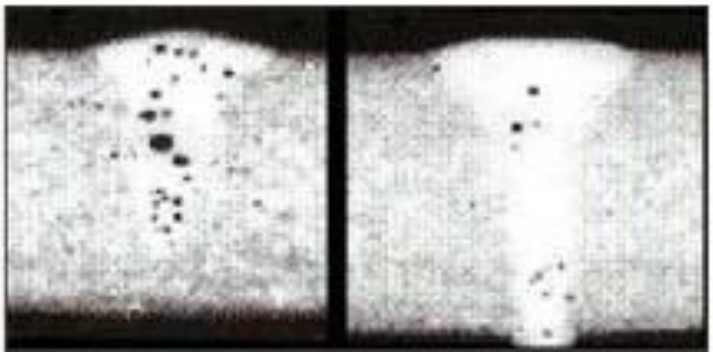


Рисунок 1.10 – Электронно-лучевая сварка алюминия: одним лучом (слева); с использованием многофокусной сварки (справа)

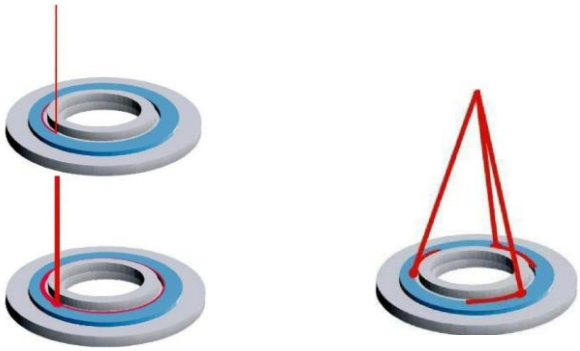
Однопроходная сварка электронным лучом, развернутым по круговой траектории, осложняется проблемой несимметричности деформаций в процессе сварки от начала ввода луча и до момента замыкания шва. Так же в технологическом процессе на первом этапе могут быть предусмотрены прихваточные швы для двух заготовок, а затем их сварка (Рис.1.11 и Рис.1.12,а). Использование данных процессов сказывается на изменении зазора в стыке за счет усадки начальной части сварного шва и на изменении размеров сварочной ванны и, соответственно, шва за счет влияния автоподогрева к концу рабочего прохода. При рассмотренной технологии, практически не удается избежать таких

дефектов как: несплавление кромок, неравномерность глубины проплавления, коробление детали [101-104].

Рисунок 1.11 – Зубчатое колесо, изготовленное с помощью электронно-лучевой сварки [104]

Данную технологию можно усовершенствовать, используя многованновую электронно-лучевую сварку.

Электронный луч быстро отклоняется и перемещается от одного канала проплавления к другому и обратно таким образом, что в период отсутствия луча канал проплавления сохраняется и не разрушается. Следовательно, сварка происходит вдоль одного и того же сварного шва с несколькими сварочными ваннами одновременно в различных точках (рис.1.12.б) [104].



а) б)

Рисунок 1.12 – Виды сварки электронным лучом:

а) стандартная ЭЛС в 2 прохода: 1) прихваточный шов, 2) сварной шов; б) использование технологии расщепления электронного луча при сварки

По сравнению с вышеуказанной двухступенчатой технологией, время сварки снижается до одной трети, а также сводятся к минимуму деформации из-за уменьшенного нагрева деталей [118].

При использовании электронно-лучевой сварки продольных швов с несколькими парогазовыми каналами один и тот же электронный луч с постоянной мощностью отклоняется с очень высокой частотой от одной сварочной ванны к другой, при этом предварительный подогрев в самой сварочной ванне происходит благодаря близлежащим ваннам, затвердевающих в направлении сварки (рис.1.13).

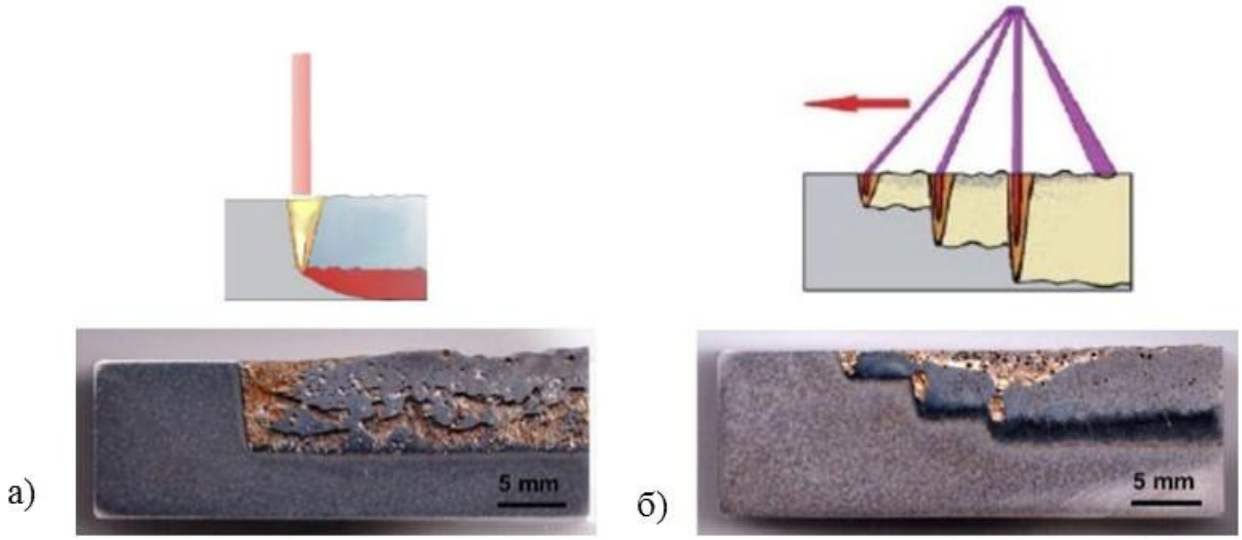


Рисунок 1.13. Сравнение вариантов электронно-лучевой сварки и качества сварного шва:

а) одна сварочная ванна; б) использование расщепление электронного луча [105]

При сравнении качества сварных швов, выполненных одним электронным лучом с одной сварочной ванной и технологией с тремя парогазовыми каналами, видно, что при сварке первым способом имеются большие скопления пор (рис.13.а), а при технологии с несколькими парогазовыми каналами наблюдается однородный сварной шов с незначительными изолированными порами (рис.1.13.б) [105, 115].

Технология расщепления луча на концентрированные тепловые источники открывает широкий диапазон использования, и в частности, для совмещения таких процессов как сварка и термообработка [120]. Электронный луч может использоваться для предварительного и сопутствующего нагрева при сварке, а также для косметической обработки наплавленного валика. Например, часть электронного луча для предварительного подогрева может двигаться впереди сварочного луча с целью повышения температуры, затем основной сварочный луч проплавляет стык, выполняя сварной шов (рис.1.14) [115].

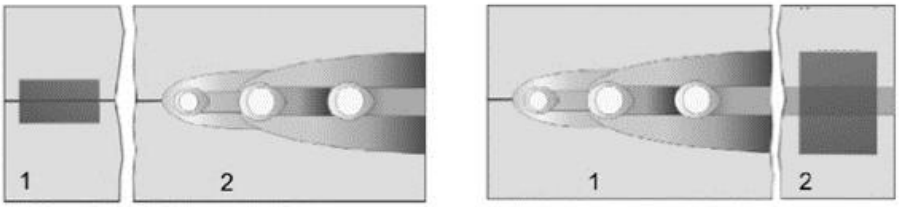


Рисунок 1.14 – Технология электронно-лучевой сварки с расщеплением луча на концентрированные тепловые источники тепла [115]

Путем выборочного или одновременного нагрева в различных местах свариваемых заготовок, можно добиться значительного прогресса в предотвращении образования пор и других дефектов [121].

Важными факторами для успешного применения электронно-лучевой сварки с расщеплением являются:

- число сварочных ванн (зависит от размера и геометрии детали) и распределение энергии
- расстояние между сварочными ваннами
- частота отклонения электронного луча [115, 118, 119].

По данной технологии получены качественные сварные соединения из разнородных металлов [120]. Исследования подобных соединений без применения описанной выше технологии показали взаимосвязь межкристаллитного проникновения меди в сталь и появление в стали горячих трещин и межкристаллитное проникновение меди в сталь (рис. 1.15) [121].

Рисунок 1.15 – Межкристаллитное проникновение меди в сталь [121]

При этом избежать появления указанных дефектов при сварке для многих марок сталей без применения специальных технологических приемов не удается. В то же время технологические приемы, обеспечивающие отсутствие горячих трещин в стали, способствуют и предотвращению межкристаллитного проникновения меди в сталь.

Применение электронно-лучевой сварки для получения сварных соединений сталей с медными сплавами позволяет решить многие проблемы, например уменьшения пористости меди, подавления образования в ней эвтектики Cu + Cu2O. Это обусловлено тем, что сварка происходит в высоком вакууме. В том числе благодаря высококонцентрированному вводу тепловой мощности и возможности точного позиционирования электронного пучка, сварные швы получаются с высокими значениями отношения глубины к его ширине, обеспечиваются минимальные размеры зоны термического влияния и высокие механические характеристики сварных соединений [121].

Следовательно, при ЭЛС сталей с бронзами в режиме глубокого проплавления независимо от режима сварки и толщины свариваемых изделий будет наблюдаться неоднородность структуры металла шва по глубине и ширине, а соответственно, и неоднородность механических и эксплуатационных свойств. Для уменьшения степени неоднородности структуры металла шва необходимо, чтобы жидкая сварочная ванна имела однородный, гомогенный состав. В этом случае кристаллизация будет происходить с внутрикристаллической ликвацией

меди, т.е. в первую очередь во всем объеме сварочной ванны будет происходить кристаллизация стали, а бронза будет заполнять междендритное пространство, с формированием затвердевшей однородной смеси двух систем – стали и бронзы [121].

Условиями получения однородной сварочной ванны являются ее интенсивное перемешивание и увеличение времени пребывания ее в жидком состоянии. При этом также необходимо снижение градиента температур между сталью и бронзой для обеспечения одинаковой скорости отвода тепла в оба металла. Подобное воздействие на сварочную ванну возможно при использовании таких технологических приемов, как осцилляция электронного пучка, сопутствующий подогрев бронзы, использование разделения электронного пучка на несколько тепловых источников [121].

1.5. Обобщение литературных данных и задачи исследования

На протяжении многих лет ведутся интенсивные экспериментальные и теоретические исследования процессов, протекающих при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением. Доказано существование парогазового канала в металле. Предложено большое количество моделей, описывающих явления в канале. Во всех работах указывается стохастический характер и сложность этих процессов, а также большое количество факторов, влияющих на их протекание. Отмечается необходимость более детального изучения явлений, сопровождающих электронно-лучевую сварку с глубоким проплавлением.

На данный момент достигнуты значительные успехи в моделирование процессов формирования сварного соединения при электронно-лучевой сварке и процессов испарения. Известны два механизма испарения, связанные с градиентом концентрации и градиентом давления, и разработаны теории процессов испарения при лучевых способах сварки. При моделировании сходной с электронно-лучевыми процессами лазерной сварки температуру в канале проплавления принимают обычно равной температуре кипения при атмосферном

давлении, но использование данного допущения при моделировании процесса электронно-лучевой сварки невозможно, так как электронно-лучевая сварка ведется в вакуумной среде.

В литературе содержатся данные о влиянии статического электронного луча на процессы испарения и химический состав сварных соединений, полученных при электронно-лучевой сварке, влияния осцилляции и расщепления электронного луча отсутствуют.

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. Разработка математических моделей, которые позволят описывать процессы испарения и изменения химического состава сварных соединений при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч.
3. Исследование влияния параметров режимов сварки при осцилляции электронного луча на формирование химического состава сварных соединений и верификация с экспериментальными данными.
4. Исследование влияния параметров режимов сварки при динамическом расщеплении электронного луча на формирование химического состава сварных соединений и верификация с экспериментальными данными.

Глава 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Постановка задачи, основные уравнения и краевые условия математической модели испарения и изменения химического состава сварных швов

При построении модели процессов испарения и изменения химического состава сварных швов при электронно-лучевой сварке были приняты следующие предположения:

– форма парогазового канала аппроксимируется цилиндром при его образовании статическим лучом и при динамическом позиционировании электронного луча, а при продольной и поперечной осцилляции поперечное сечение канала аппроксимируется эллипсом;

– поверхность парогазового канала считается изотермической;

– перенос тепла и массы вещества вдоль оси канала считается несущественным;

– коэффициент диффузии в расплаве зависит от температуры расплава;

– истощение легирующими элементами в расплаве происходит в тонком слое у поверхности парогазового канала;

– из-за высокого давления в парогазовом канале скорость паров металла на выходе из канала равна местной скорости звука;

Таким образом, задача сводится к двумерной, и расчетная область содержит жидкую фазу. Для решения задачи был использован численный метод, позволяющий учесть процессы испарения, конденсации и диффузии элементов в расплаве. Расчетные схемы представлены на рис. 2.1. Из рис. 2.1 видно, что расчетные схемы отличаются от формы парогазового канала, полученного статическим электронным лучом, выпуклой формой парогазового канала для случая с поперечной (б) и продольной (в) осцилляцией, и количеством парогазовым каналов (г), для случая с расщеплением электронного луча.

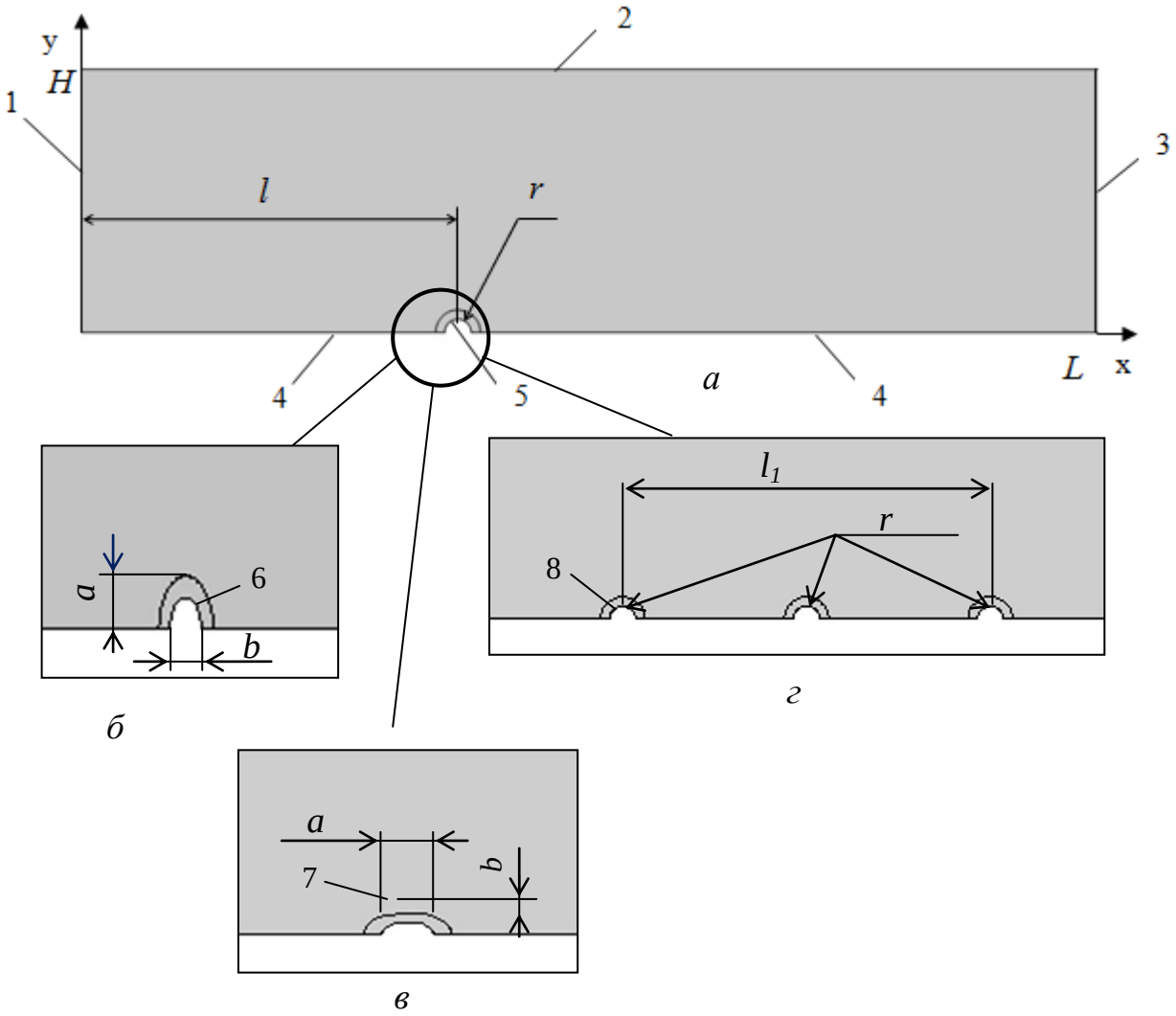


Рисунок 2.1 – Расчетная схема. 1 – входная граница; 2 – боковая граница; 3 – выходная граница; 4 – ось симметрии; 5 – парогазовый канал, образованный статическим лучом; 6 – парогазовый канал, образованный электронным лучом с поперечной осцилляцией; 7 – парогазовый канал, образованный электронным лучом с продольной осцилляцией; 8 – три парогазовых канала, образованных при динамическом позиционировании электронного луча; r – радиус парогазового канала; a – большая полуось эллипса; b – малая полуось эллипса

При построении геометрии парогазового канала, полученного при осцилляции электронного луча, будем руководствоваться следующим. Парогазовый канал при электронно-лучевой сварке имеет достаточно сложную, меняющуюся со временем форму. Аппроксимируем форму канала усеченным

конусом с полусферическим дном и принимаем, что размер верхней части парогазового канала равен известной амплитуде колебаний и имеет форму эллипса, а его большая полуось равна половине значения амплитуды колебания электронного луча. Для моделирования процессов испарения необходимо определить средний размер парогазового канала для чего значение большой полуоси эллипса, находящегося в средней части канала определим путем деления амплитуды колебаний на четыре. Значение малой полуоси эллипса соответствует среднему значению диаметра электронного луча.

Система уравнений (2.1-2.3), описывающая процессы испарения при электронно-лучевой сварке, включает:

– уравнение переноса импульса (уравнение Навье - Стокса)

$$(\vec{U}\cdot\nabla)\vec{U} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu\nabla^2\vec{U}, \tag{2.1}$$

– уравнение переноса энергии

$$\rho c_p\vec{U}\cdot\nabla T = \nabla(\lambda\nabla T), \tag{2.2}$$

– уравнение переноса примеси

$$\vec{U}\cdot\nabla S = D(\nabla^2 S), \tag{2.3}$$

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 – 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 принята в соответствии с работой [123] экспоненциальной.

$$D = D_0 exp(Q/8{,}31\cdot T), \tag{2.4}$$

где D_0 – амплитудное значение диффузии i-го элемента расплава; Q – энергия активации i-го компонента сплава.

Фазовый переход из жидкого в твердое состояния описывается следующим способом. В теплофизической постановке задачи прописывается модуль Heat Transfer with Phase Change с основным уравнением:

$$D(T) = \begin{cases} 1 & T > T_L \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & T_s \leq T \geq T_L \\ 0 & T < T_S \end{cases} \tag{2.5}$$

$$D_{1\to 2} = D_s \cdot \exp\left(-\frac{Q_1}{(T \cdot 8{,}31)}\right) \cdot F(T) + D_L \cdot \exp\left(-\frac{Q_2}{(T \cdot 8{,}31)}\right) \cdot (1 - F(T)) \tag{2.6}$$

где D_S и D_L – это коэффициент диффузии *i*-го элемента расплава для твердой и жидкой фазы соответственно, а функция *F(T)* имеет вид

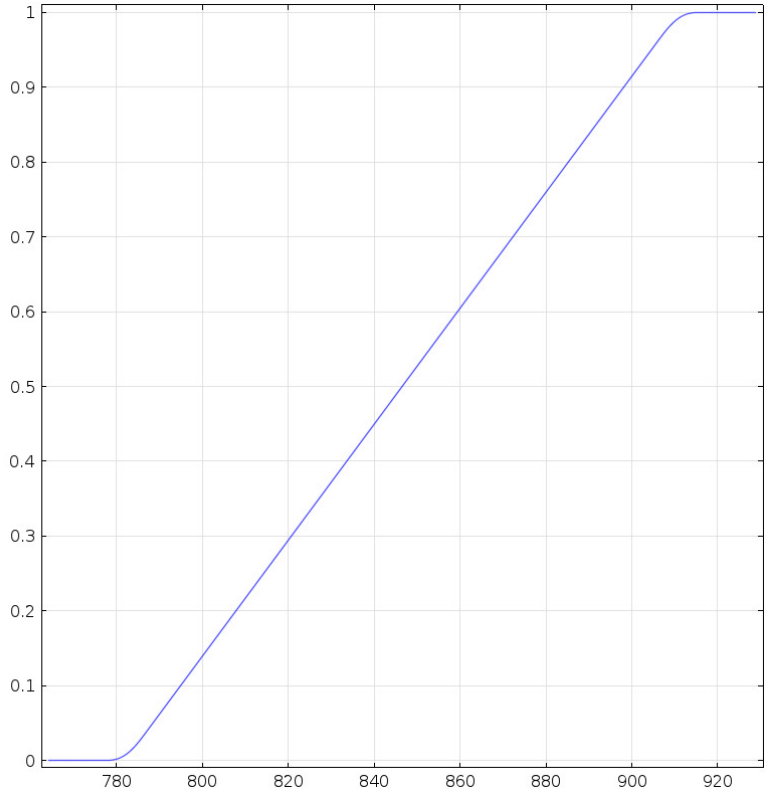


Рисунок 2.2 – Графическое изображение изменения функции *F(T)* пример для температурного интервала сплава АМг-6

На рисунке 2.2 изображен температурный диапазон, учитывающий температуру плавления сплава АМг-6.

Изменения концентрации легирующих элементов с учетом диффузионных процессов недостаточно для математического моделирования фазового перехода, поэтому вводиться следующее уравнение:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p U + \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q, \tag{2.7}$$

где $\lambda = \theta\lambda_{\text{фаза 1}} + (1-\theta)\lambda_{\text{фаза 2}}$;

$c_p = \theta c_{p,\text{фаза 1}} + (1-\theta) c_{p,\text{фаза 2}} + L\frac{d\alpha}{dT}$, L – это скрытая теплота плавления;

$$\rho = \frac{\theta\rho_{\text{фаза 1}} c_{p,\text{фаза 1}} + (1-\theta)\rho_{\text{фаза 2}} c_{p,\text{фаза 2}}}{\theta c_{p,\text{фаза 1}} + (1-\theta) c_{p,\text{фаза 2}}}$$

θ – массовая доля рассматриваемой фазы; ρ – плотность сплава.

Плотность потока массы i-го легирующего элемента на стенке парогазового канала определяется алгебраической суммой плотностей потоков, обусловленных испарением (J_{ev}) и конденсацией (J_c)

$$J = J_{ev} + J_c. \tag{2.8}$$

Плотность потока, обусловленного испарением J_{ev} i-го элемента, прямо пропорциональна концентрации примеси

$$J_{ev} = J_0 \left({}^{S}/_{S_0} \right), \tag{2.9}$$

где J_0 – плотность потока испарения чистого i-го элемента; S_0, S – соответственно начальная и текущая концентрации i-го элемента в сплаве, последнее определяется из решения уравнения (2.3).

В свою очередь плотность диффузионного потока испарения i-го элемента определяется по формуле [10]:

$$J_0 = \mu \cdot J_v = \mu \cdot A \cdot \left(P(T) / \sqrt{\mu \cdot T} \right), \tag{2.10}$$

где μ – масса в молях i-го элемента сплава; J_v – мольный поток i-го элемента сплава; A – размерный коэффициент; $P(T)$ – парциальное давление i-го компонента расплава, которое можно определить по методике, описанной в п. 2.2.

Плотность потока испарения неоднородна по поверхности парогазового канала и пропорциональна концентрации элемента. В предположении полного перемешивания парогазовой смеси в канале примем плотность потока конденсации на стенке постоянной. Введем коэффициент конденсации k ($0 < k < 1$, для насыщенного пара $k = 1$)

$$k \cdot \int j_{ev}\, dS = J_c \cdot S_{канала}. \tag{2.11}$$

где $S_{канала}$ – это площадь поперечного сечения парогазового канала; dS – элементарная площадь поверхности канала.

Тогда плотность потока, конденсирующегося из парогазовой фазы на стенке канала J_c, пропорциональна средней концентрации элементов в парах:

$$J_c = J_0 \cdot k \cdot \langle S \rangle / S, \tag{2.12}$$

Где $<S>$ – среднее значение концентрации на поверхности парогазового канала i-го элемента.

Таким образом, задача сводиться к совместному решению уравнений (2.1-2.3) и обеспечению баланса суммарного потока массы на стенках парогазового канала $\sum J$ потоку массы, уносимой через его выходное сечение (условие (2.13) в сочетании с условием (2.14)):

$$\sum_{i=1}^{N} (J_{ev} + J_c) \cdot S_{\text{канала}} = \frac{\partial m}{\partial t}, \tag{2.13}$$

где $\partial m / \partial \mathrm{t}$ – поток массы паров металла, уносимых через выходное сечение парогазового канала, определяемый из условия достижения на выходе из парогазового канала местной скорости звука [124]:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \sqrt{\gamma \cdot P_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{к}}} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1+\gamma}{2(\gamma-1)}} \cdot S_{\text{канала}}, \tag{2.14}$$

где γ – показатель адиабаты; $P_{\text{К}}$ и $\rho_{\text{К}}$ – соответственно, давление и плотность паров в критическом сечении на выходе из парогазового канала. При этом обеспечение данного условия (равенства) достигалось определением коэффициента конденсации паров k методом последовательных приближений.

Система дифференциальных уравнений замыкается краевыми условиями, включающими начальное распределение температуры и концентрации примесей $T(t=0)=T_0$, $S(t=0)=S_0$ и граничные условия. На входной границе задано постоянное значение концентрации и температуры $S(x=0;\ y) = S_0$ и $T(x=0;\ y) = T_П$. На выходной границе – условия постоянства плотности теплового потока:

$$\partial^2 T/_{\partial x^2}(x=L,y)=0 \tag{2.15}$$

и плотности потока массы

$$\partial^2 S_i/_{\partial x^2}(x=L,y)=0 \tag{2.16}$$

Боковая граница 2 и ось симметрии (y=0) являются адиабатическими и закрытыми, на них заданы нулевые значения плотности теплового потока

$$\partial T(x,y=H)/_{\partial y}=0;\ \frac{\partial T}{\partial y}=0 \tag{2.17}$$

и плотности потока массы, соответственно

$$\partial S(x,y=H)/_{\partial y}=0;\ \frac{\partial S}{\partial y}=0. \tag{2.18}$$

Поверхность парогазового канала (граница 5) принята изотермической, с заданной плотностью потока массы

$$T=T_П,\quad D\frac{\partial S}{\partial x}=J. \tag{2.19}$$

где $T_П$ – температура на поверхности парогазового канала.

В случае моделирования процессов испарения при динамическом позиционировании электронного луча, считаем, что все парогазовые каналы существуют одновременно и не разрушаются. Таким образом, необходимо рассматривать вводимые мощности в каждом парогазовом канале (рис. 2.3).

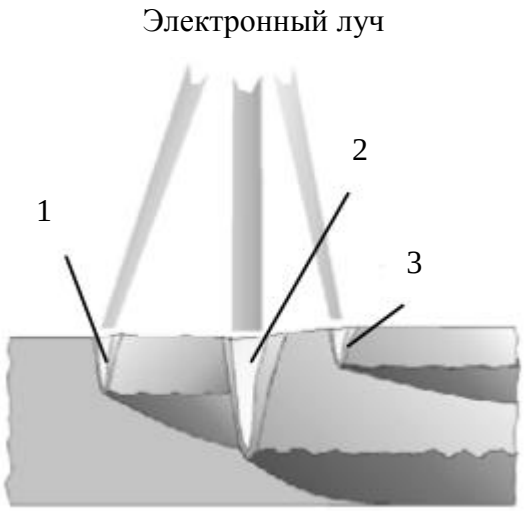


Рисунок 2.3 – Схематичное изображение расщепления электронного луча на три с одновременным существованием трех парогазовых каналов

Из рис. 2.3 видно, что глубина всех парогазовых каналов различная и зависит от времени воздействия электронного луча в каждой точке, обрабатываемого материала, и соответственно, мощности (W) в каждом канале будут отличаться друг от друга и зависеть от времени воздействия электронного луча $W \sim t$. Следовательно, мощность теплового потока, вводимого, например, в первом канале, определяется по следующей формуле:

$$W_1 = W \cdot \frac{t_1}{t_1 + t_2 + t_3}. \quad (2.20)$$

Для решения задачи тепло- и массопереноса, включающей уравнения переноса импульса, энергии, массы, использовался пакет Comsol Multiphysics. Одним из входных параметров модели являлась температура стенок парогазового канала. Для каждого значения этого параметра из решения сопряженной системы уравнений, описывающих испарение, конденсацию, диффузию, тепло- и массоперенос, определялись концентрация легирующих элементов в жидкой и твердой фазе, давление и концентрация химических элементов в парах, поля температур, концентраций и скоростей [148, 149].

Расчеты проводились с использованием COMSOL Multiphysics – пакета моделирования для решения задачи из области электромагнетизма, теории

упругости, динамики жидкостей и газов и химической газодинамики. Данный пакет дает возможность решить задачу как в математической постановке в виде системы уравнений, так и в физической, путем выбора физической модели (например, модели процесса диффузии). Безусловно, в любом случае будет решаться система уравнений, и различие состоит лишь в возможности использовать физические системы единиц и физическую терминологию. В так называемом физическом режиме работы можно использовать заранее определенные уравнения для большинства явлений, имеющих место в науке и технике, таких как перенос тепла и электричества, теория упругости, диффузия, распространение волн и поток жидкости (рис. 2.4).

Пакет COMSOL Multiphysics позволяет моделировать практически все физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями. Программа содержит различные решатели, которые позволяют быстро справиться даже с самыми сложными задачами, а простая структура приложения обеспечивает простоту и гибкость использования. Сильной стороной программы является ее возможность одновременно учитывать различные виды физических взаимодействий. Дополнительные модули позволяют реализовать моделирование процессов переноса массы и энергии с учетом кинетики химических реакций (модуль chemical engineering), движения жидкостей и газов в пористых средах и под землей (модуль earth science), электромагнитных взаимодействий (модуль electromagnetics) и процессов теплопередачи (heat transfer), а также обеспечить решение проектных задач в области микроэлектромеханики (MEMS) и анализа структурных деформаций (structural mechanics) и т.д.

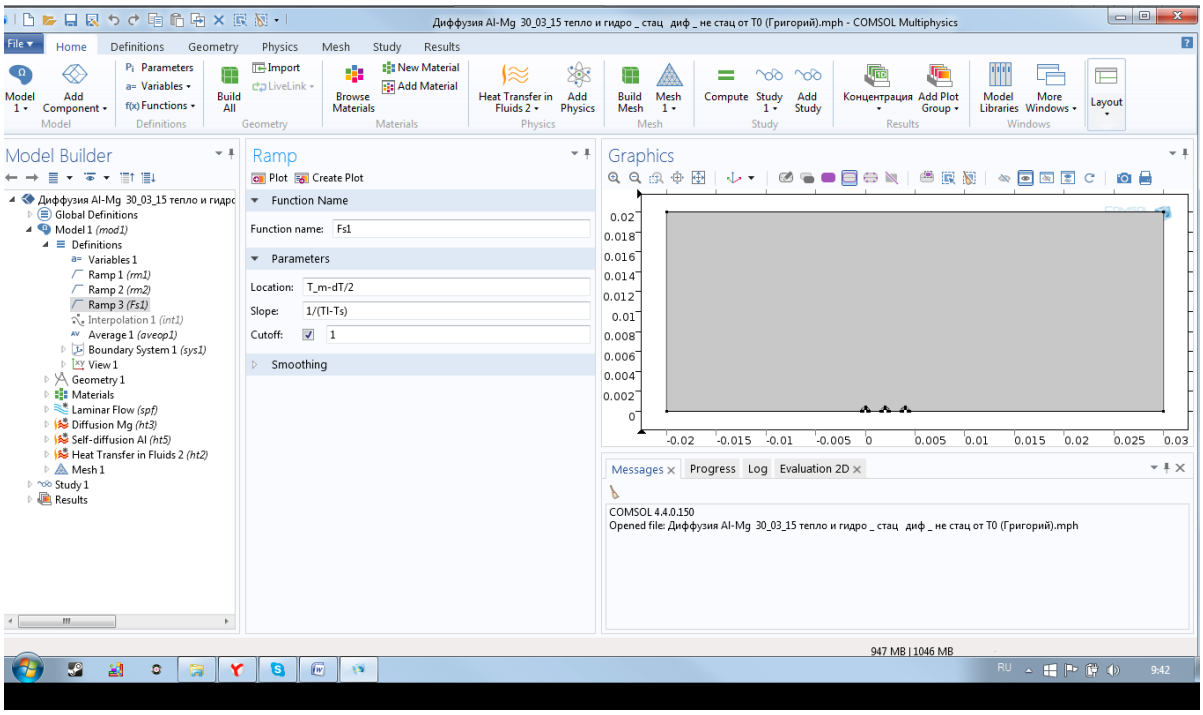


Рисунок 2.4 – Пользовательский интерфейс программы Comsol Multiphysics

Пакет COMSOL Multiphysics предназначен для решения задач в терминах дифференциальных уравнений, решение осуществляется методом конечных элементов.

2.2. Методика определения давления и химического состава паров в парогазовом канале в процессе испарения

Испарение сплавов в вакууме обладает рядом особенностей по сравнению с испарением чистых металлов. При испарении сплавов в вакууме нельзя рассматривать каждый компонент изолированно, независимо от наличия других компонентов. Скорость испарения чистого вещества определяется его температурой. При рассмотрении сплава, в котором находиться несколько компонентов, скорость испарения изменяется, так как парциальное давление паров металлов над сплавом отличается от давления чистого металла (при одной и той же температуре испарения) [125].

В первом приближении при испарении сплавов справедлив закон Рауля, согласно которому упругость пара компонента P_1 пропорциональна его молярной доле C_1 в сплаве: $P_1 = C_1P_{01}$, где P_{01} – давление паров чистого металла. У всех реальных сплавов наблюдается отклонение от закона Рауля. Для применения этого закона к реальным сплавам вводят коэффициенты активности компонентов *a*, представляющие собой отношение реального давления паров к давлению над идеальным сплавом, удовлетворяющим закону Рауля.

В общем случае коэффициент активности зависит от концентрации, и наибольшие отклонения от закона Рауля наблюдаются при малых концентрациях.

Равновесное давление паров в канале зависит от температуры и химического состава свариваемого металла. Равновесное давление при определенной температуре является суммой парциальных равновесных давлений паров железа и легирующих элементов.

$$P_{общ} = \sum_{1}^{n} P_i \qquad (2.21)$$

Парциальное равновесное давление пара химического элемента, входящего в состав сплава, определяется по формуле

$$P_i = P_i^0 \cdot a_i \qquad (2.22)$$

где P_i^0 - парциальное давление насыщенного пара элемента i над чистым элементом, представлено в виде уравнения Клапейрона – Клаузиуса.

$$\lg P_i^0 = -\frac{\Delta H_{испi}}{2.3 \cdot RT} + B_i \qquad (2.23)$$

Активность элементов в сплаве

$$a_i = X_i \cdot \gamma_i \qquad (2.24)$$

где X_i – атомная доля i; γ_i – коэффициент активности элемента i в сплаве.

Ограничиваясь первым параметром взаимодействия, получаем

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^0 + \sum_{i=2}^{n} \varepsilon_i^j \cdot X_j \qquad (2.25)$$

$\gamma_i^0 = \gamma_i$ в разбавленном растворе на базе основы сплава;

ε_i^j - параметр взаимодействия элементов j и i в сплаве.

Пересчет e_i^j на ε_i^j выполняется по уравнению

$$\varepsilon_i^j = 230\frac{M_j}{M_1}\cdot e_i^j + \frac{M_! + M_J}{M_j} \qquad (2.26)$$

Оценка γ_i и ε_i^j для T ≠ 1873.

Состав пара {% об.$_i$} определяем по формуле

$$\{\%об._i\} = \frac{P_i}{P_{общ}}\cdot 100 \qquad (2.27)$$

Так же необходимо при расчетах учитывать, что для стали парогазовый канал преимущественно будет содержать пары основного компонента (железа), а для цветных сплавов – пары легкоиспаряемых компонентов.

Данный расчет позволяет определить температуру, при которой равновесное давление паров металла при сварке легированных сплавов достигает величины, уравновешивающие гидростатическое давление столба жидкого металла и давление, связанное с поверхностным натяжением [126].

2.3. Экспериментальная методика определения давления и интегральной температуры в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке

Основой экспериментальной методики являлось определение температуры в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке по данным о химическом составе паров, образующихся над зоной сварки. Для экспериментальной оценки состава паров на электронно-лучевой установке с энергетическим агрегатом ЭЛА-6ВЧ фирмы «SELMI» (Украина) производились проходы осциллирующим электронным лучом по образцам из различных материалов. Вблизи зоны воздействия электронного луча на образец (на расстоянии 15 мм) была установлена стеклянная пластина. Материал пластины был выбран из соображения минимального совпадения его химического состава с химическим составом исследуемых материалов. Мощность электронного луча в

экспериментах составляла 3,6 кВт (ускоряющее напряжение 60 кВ), скорость сварки, частота и амплитуда осцилляции луча зависят от исследуемого материала.

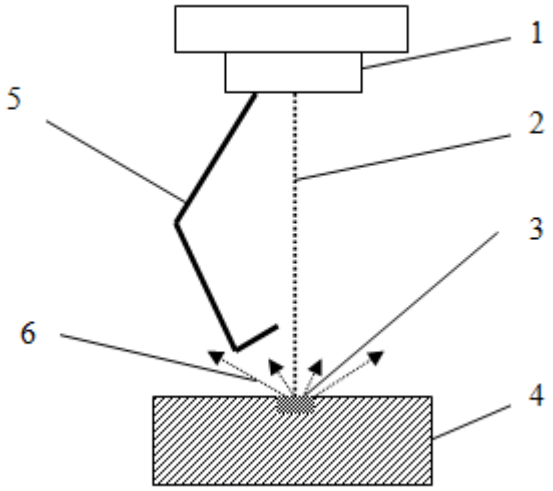


Рисунок 2.6 – Схема эксперимента по анализу испарения элементов из сплавов при воздействии электронного луча:

1 – электронная пушка; 2 – электронный луч; 3 – расплавленный металл; 4 – исследуемый материал; 5 – алюминиевая пластина; 6 – пары металла из зоны воздействия электронного луча

Схема эксперимента приведена на рис. 2.6. В процессе воздействия электронного луча на исследуемый образец в режиме кинжального проплавления происходило испарение элементов сплава и последующее их осаждение на стеклянную пластину.

Необходимо отметить, что основной особенностью испарения сплава в вакуум от одного источника нагрева (применимо для стационарного и динамически позиционированного электронного луча) является фракционирование, обусловленное различием скоростей испарения компонентов, образующих сплав. Формирующееся на стеклянной пластине покрытие имеет неоднородный состав по толщине, так как начальные слои обогащены легколетучими компонентами, а в последующем преобладают вещества с малой упругостью паров [125].

Основные физические явления, происходящие на пути атомов, покинувших испаряемый металл, в процессе осаждения сводятся к следующему: 1 – атомы

металла в результате столкновения с другими атомами металла может вновь вернуться в парогазовый канал; 2 – атомы движутся рассеяно (в результате многочисленных столкновений) по всем направлениям; 3 – происходит процесс ионизации части атомов испарившегося металла в результате столкновений с электронами, атомами и ионами плазмы; 4 – при взаимном столкновение атомов испарившегося металла может произойти их агломерация, образуются мелкие частички (~10 нм), которые заряжаются в плазме разряда. Поверхности стекленной пластина атомы металла достигают, обладая большой энергией, и могут проникать в пластину [150, 151].

Далее проводились анализы химического состава полученного осажденного слоя на стеклянной пластине, и полученные результаты сопоставлялись с расчетными.

2.4. Методика проведения металлографических исследований

Для проведения металлографического анализа сварных соединений были вырезаны образцы в поперечном сечении шва. Подготовка макрошлифов проводилась в несколько этапов. На первом этапе шлифование ручным способом в несколько стадий с использованием наждачной бумаги различной зернистости по ГОСТ 3647-80. На втором - полировка на сукне с применением алмазной пасты с размером частиц 0,3 мкм. На последнем, третьем этапе производилось травление, которое осуществлялось методом нанесения раствора травителя на поверхность образца в течение 10-20 секунд, после чего образцы промывались спиртом и просушивались фильтровальной бумагой. Состав травителя: HCl (γ=1,19) – 45 мл, HF (конц.) – 15 мл, HNO_3 (γ=1,49) – 15 мл, H_2O (дист.) – 25 мл.

Подготовленные образцы исследовались на стереоскопическом микроскопе МБС-10. Далее они фотографировались для исследования в программе ВидеоТест–Размер.

При определении ширины и глубины шва использовалось линейное измерение размеров с автоматическим отображением значений в таблице (рис.2.7).

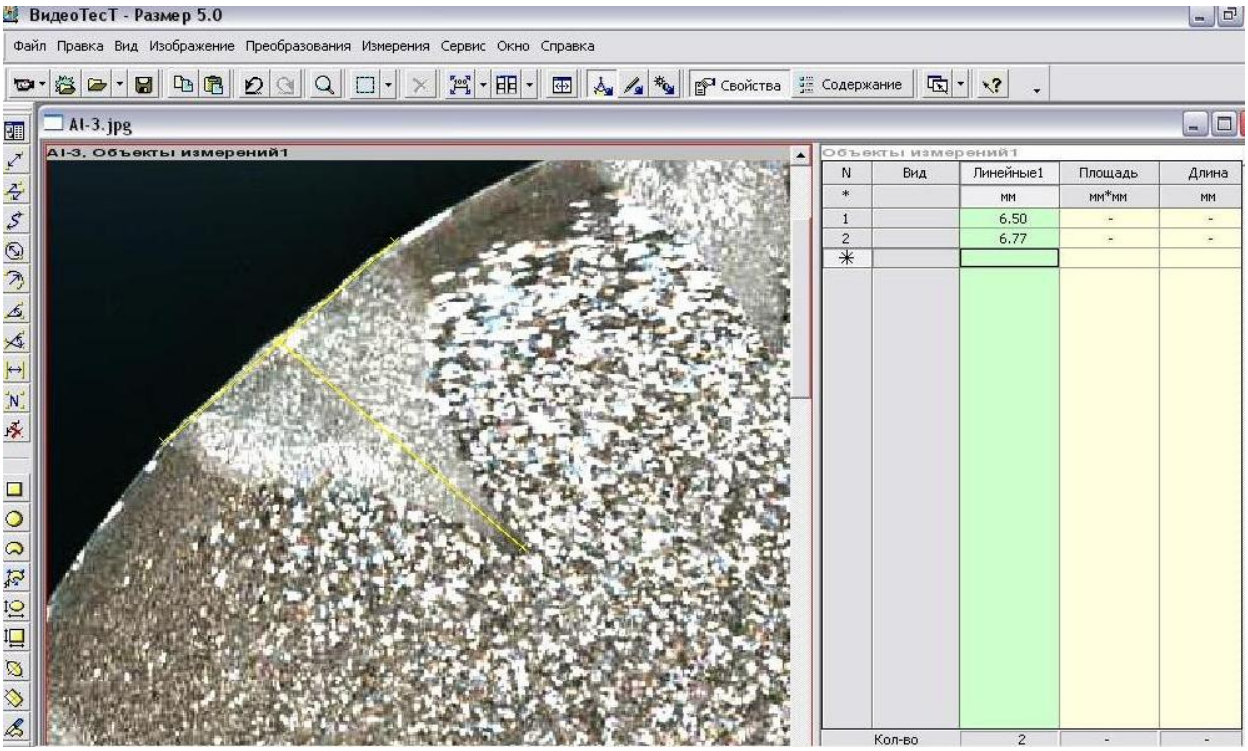


Рисунок 2.7 – Определение ширины и глубины сварного шва

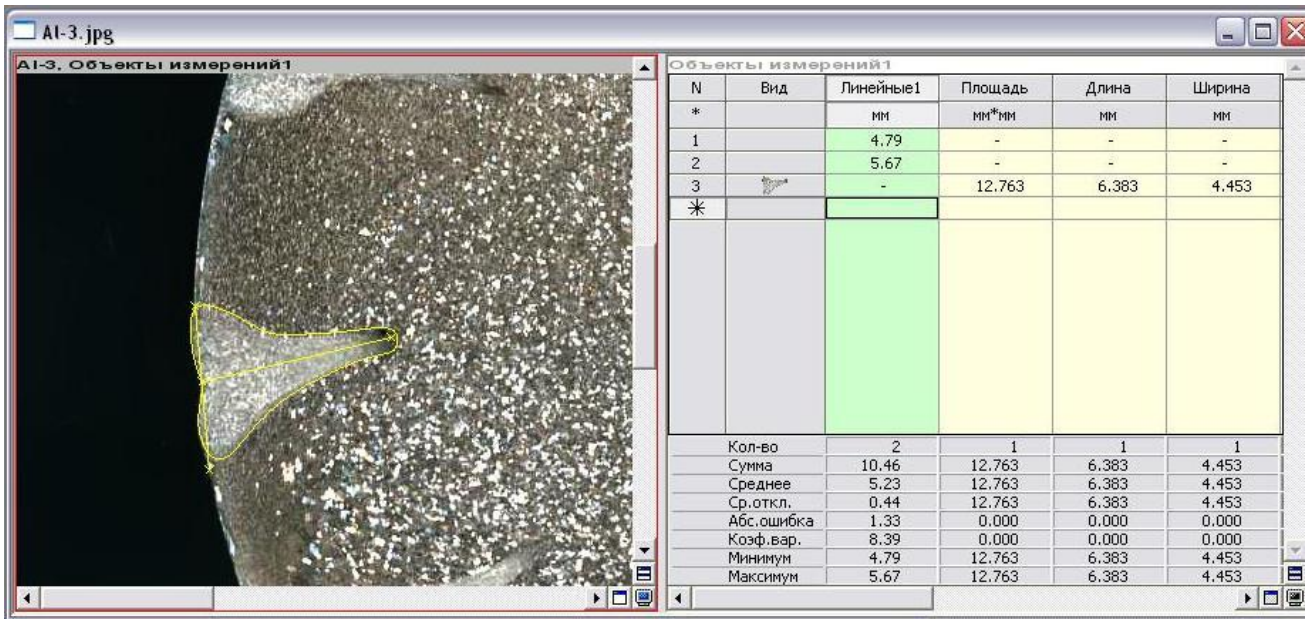


Рисунок 2.8 – Измерение площади сварного шва

Для определения площади рассматриваемых сварных швов, контуры объекта выделялись сплайн – линией (рис.2.8), и программа автоматически рассчитывала площадь обозначенной поверхности. Данные измерения были поведены для каждого сварного шва.

2.5. Система расщепления электронного луча при сварке

Для динамического управления местоположением электронного луча при электронно-лучевой сварке использовали систему, обеспечивающую высокую скорость отклонения электронного луча за счет использования дополнительных отклоняющих катушек (рис.2.9), которые подключалась к двухканальному широкополосному усилителю тока с верхней границей полосы пропускания 200 кГц.

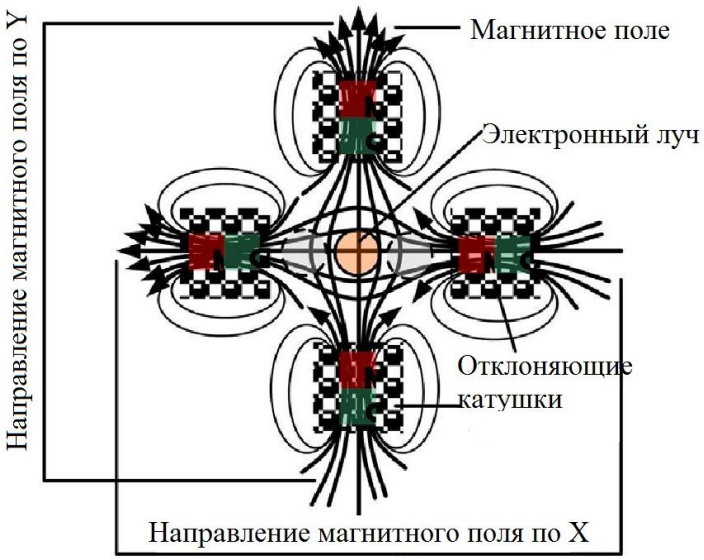


Рисунок 2.9 – Отклоняющая система

На входы усилителя через цифроаналоговый интерфейс подавались сигналы с компьютерной системы, работающей под управлением разработанной программы и обеспечивающей заданные пространственно-временные

характеристики теплового воздействия на свариваемый образец. Скриншоты программы показаны на рис. 2.10.

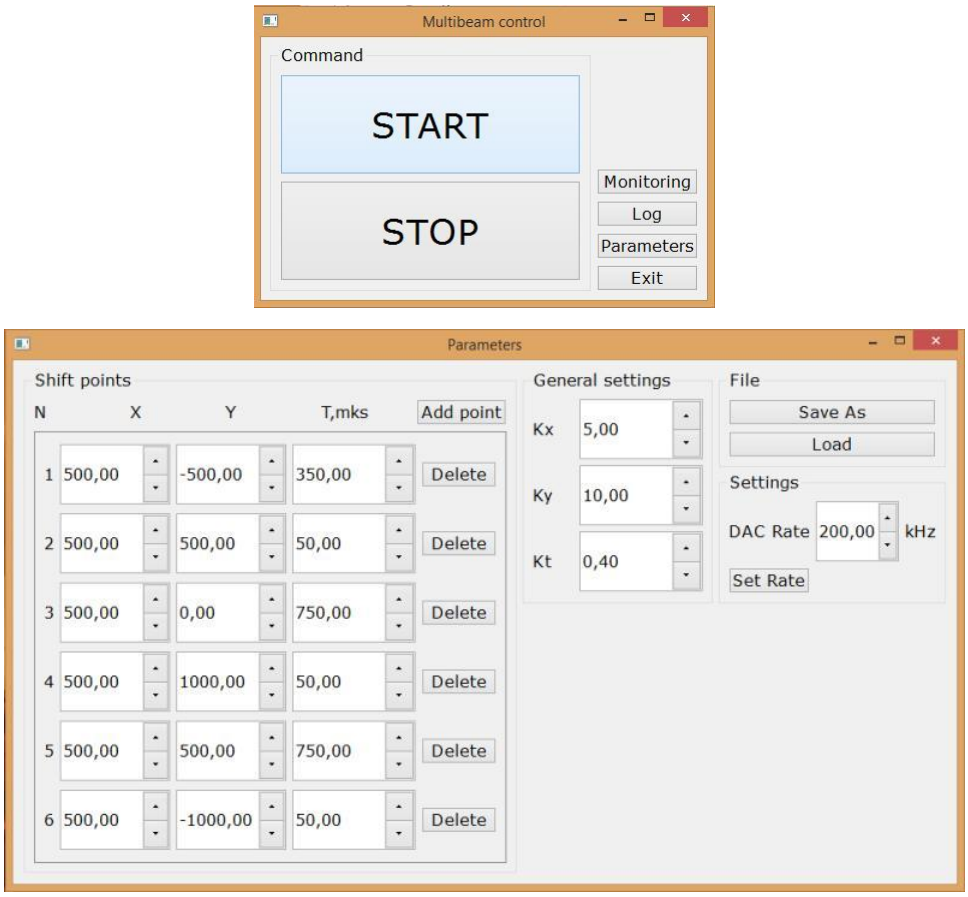


Рисунок 2.10 – Окна программного обеспечения, позволяющего проводить расщепление электронного луча при сварке

При помощи разработанной программы, возможно, задавать расстояние между элементами расщепленного электронного луча, время воздействия луча в каждой точке и частоту его колебаний.

Выводы по главе 2

1. Построена математическая модель, которая позволяет описывать неравновесные процессы в жидкой и твердой фазах свариваемого металла с учетом испарения химических элементов со стенок парогазовых каналов, конденсации элементов сплава на стенки канала и диффузии элементов в расплаве при электронно-лучевой сварке с динамическим позиционированием электронного луча. Также, при помощи данной модели возможно прогнозировать химический состав сварных швов, выполненных с динамическим позиционированием электронного луча при электронно-лучевой сварке.

2. Предложена методика определения давления и химического состава паров в парогазовом канале, которая основана на измерении концентрации паров над зоной сварки с использованием химического анализа пленки, осажденной на установленную вблизи зоны сварки стеклянную пластину. При помощи данной методики определялись интегральные значения температуры и давление паров в канале.

3. Для проведения экспериментов была разработана специализированная система и программное обеспечение, которые позволяют осуществлять динамическое воздействие на электронный луч, в частности производить продольную и поперечную осцилляцию луча и расщепление луча на три тепловых источника.

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСЦИЛЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

Кроме статического отклонения луча при электронно-лучевой сварке, ему можно придать при помощи отклоняющей системы различные колебательные движения, в результате чего появляется возможность изменять форму пятна нагрева на изделии, отличную от круглой, традиционной для других сварочных источников.

В последнее время в производстве появились источники питания, позволяющие программировать все энергетические параметры электронного луча, в том числе ток луча, а так же токи фокусирующей и отклоняющей систем, что дает возможности при помощи электронного луча создавать пятно нагрева практически любой формы. Это еще более расширяет технологические возможности электронного луча при решении различных технологических задач при электронно-лучевой сварке.

3.1. Математическое моделирование испарения и изменения химического состава сварных швов при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного луча

Численное исследование процесса испарения химических элементов со стенок каналов, конденсации элементов сплава на стенках парогазовых каналов, диффузии элементов в расплаве и изменения химического состава сварных швов при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча проводилось для расчетной области, изображенной на рис. 3.1 (б – с продольной осцилляцией, в – с поперечной осцилляцией) и с использованием уравнений, которые описаны в п. 2.1.

Расчетная область имела следующие геометрические параметры: $H = 5 \cdot 10^{-2}$ м; $L = 2 \cdot 10^{-2}$ м; $r = 2{,}5 \cdot 10^{-4}$м; $l_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $l_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ м.

В качестве исследуемых материалов использовались высоколегированная сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т и алюминиевый сплав АМг-6. Теплофизические характеристики и составляющие характеристики коэффициента диффузии для основных компонентов сплавов для стали 12Х18Н10Т и сплава АМг-6 представлены в табл. 3.1-3.4.

Таблица 3.1 – Теплофизические характеристики сплава АМг-6

Характеристики, размерность	Значение	
	Жидкая фаза	Твердая фаза
Плотность ρ, кг/м^3	2490	2640
Теплопроводность μ, Вт/(м·К)	110	155
Теплоемкость при постоянном давлении c_p, кДж/(кг·К)	1,050	0,922
Температуры liquidus и solidus, К	911	783
Начальная концентрация элементов в сплаве до сварки, %	Al = 93,6	Mg = 5,84

Таблица 3.2 – Составляющие характеристики коэффициента диффузии для основных компонентов сплава АМг-6 [127]

Характеристики, размерность	Основные элементы сплава АМг-6	
	Al (liquid/solid)	Mg (liquid/solid)
D_0, м^2/с	$0{,}1 \cdot 10^{-5}$ / $17 \cdot 10^{-5}$	$9{,}9 \cdot 10^{-5}$/ $1 \cdot 10^{-4}$
Q, кДж/моль	128,0 / 143,0	71,6 / 130,0

Таблица 3.3 – Теплофизические характеристики стали 12Х18Н10Т

Характеристики	Значение
Плотность (кг/м^3)	7810
Теплопроводность (Вт/(м·К))	30,6
Теплоемкость при постоянном давлении (кДж/(кг·К))	0,830

Динамическая вязкость (Па·с)	$1 \cdot 10^{-3}$
Рассчитанный коэффициент конденсации	0,97
Начальная температура на стенках канала проплавления ($T_П$, K)	1800

Таблица 3.4 – Составляющие характеристики коэффициента диффузии для легирующих компонентов стали 12Х18Н10Т [123]

Составляющие характеристики коэффициента диффузии	Основные легирующие элементы стали 12Х18Н10Т	
	Cr	Mn
$D0_i \left[\frac{м^2}{с}\right]$	$1{,}318 \cdot 10^{-7}$	$2{,}515 \cdot 10^{-7}$
$Q_i \left[\frac{кДж}{кг}\right]$	3,92	3,99

Для расчета поставленной задачи использовалась мелкая сетка во всем объеме расчетной области и сгущенная в зоне парогазового канала (рис. 3. 1).

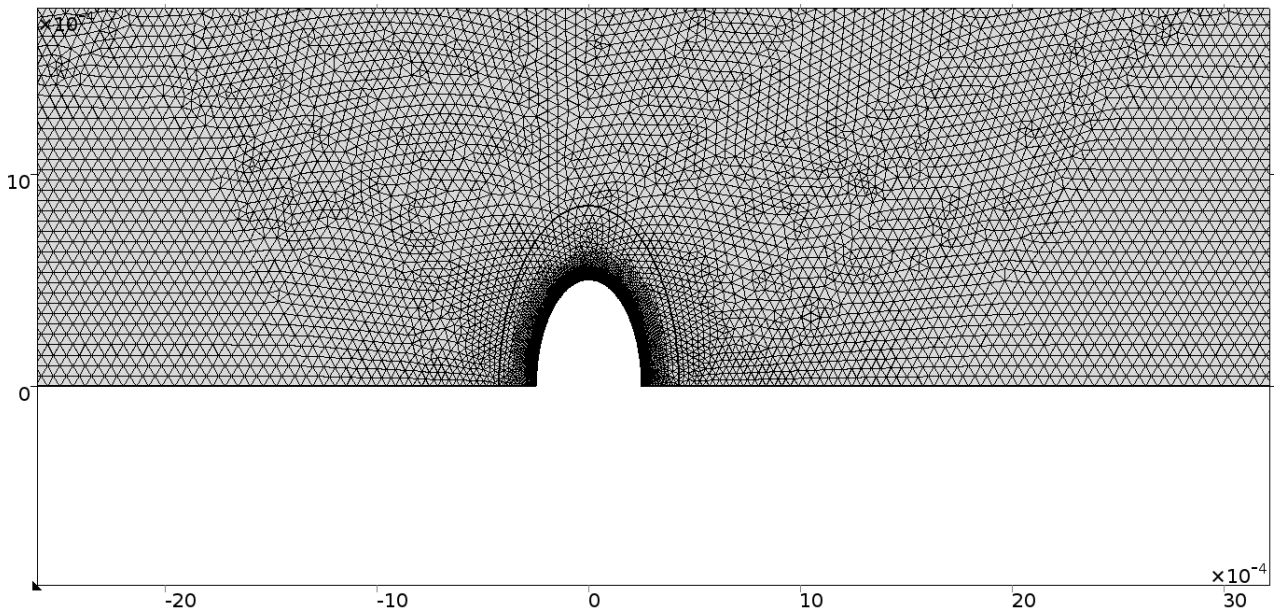


Рисунок 3. 1 – Сгущенная сетка вокруг парогазового канала, количество элементов сетки составляет величину 189879

Численное решение задачи может содержать спектр ошибок, связанных с дискретным представлением исходных уравнений. Поэтому для устранения ошибки аппроксимации уравнения переноса решение выполнялось с использованием последовательно сгущающейся сетки.

Расчеты были выполнены с учетом изменения скорость сварки $V_{св}$ от 5 до 10 мм/с и амплитуды от 0,8 до 1 мм, режимы представлены в табл. 3.5.

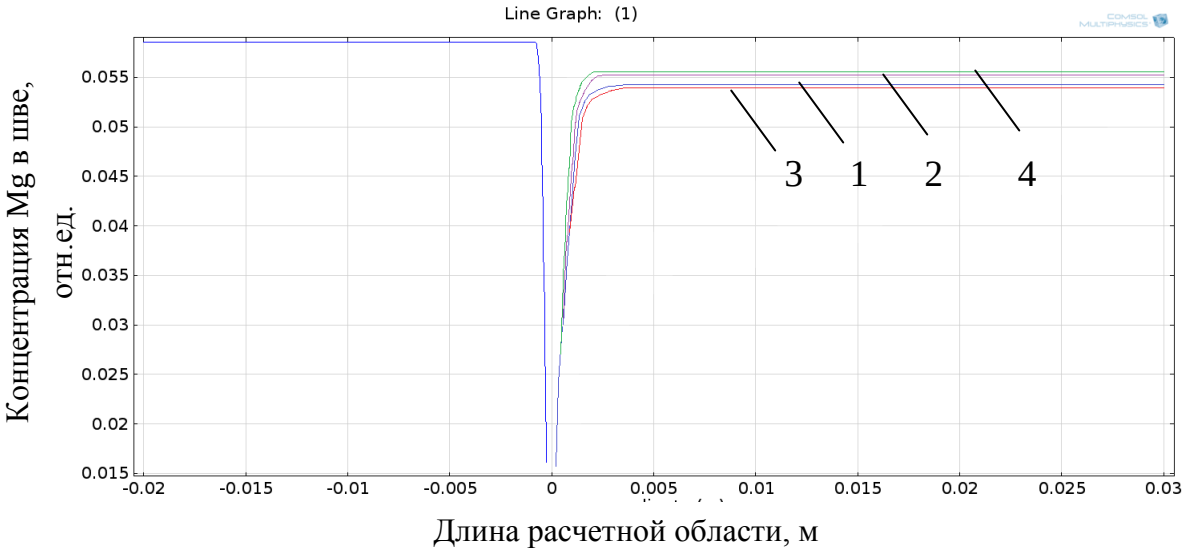
Таблица 3.5 – Параметры режимов сварки для АМг-6

Номер режима	Амплитуда осцилляции электронного луча, мм	скорость сварки $V_{св}$, (мм/с)
1	0,8	5
2	1,0	10
3	1,0	5
4	0,8	10

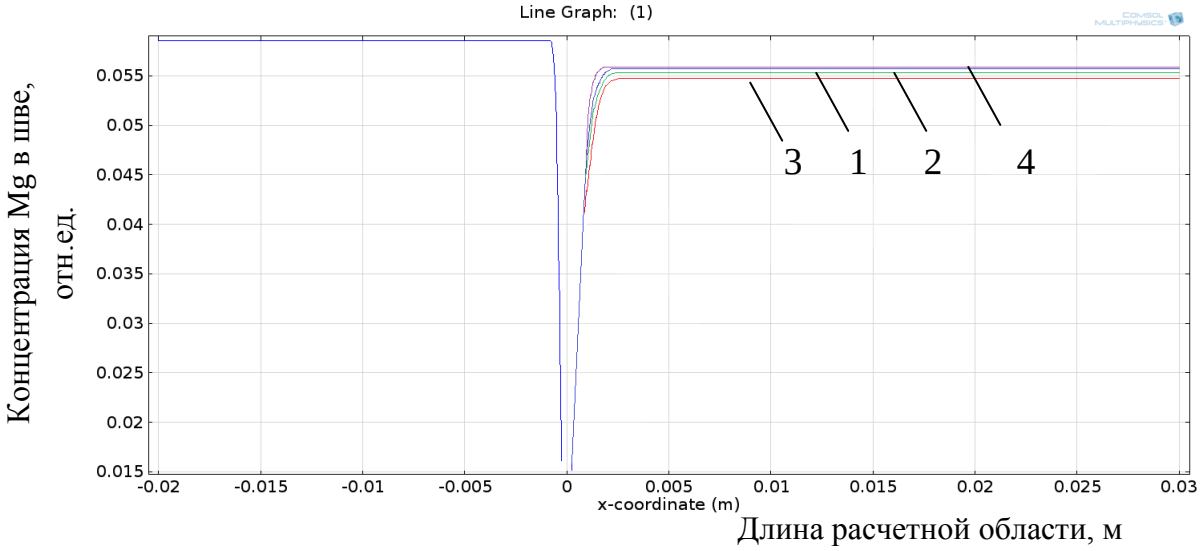
Результаты расчетов изменения химического состава сварного шва с учетом продольной и поперечной осцилляции электронного луча представлены на рис. 3.2 (а, б) для сплава АМг-6 и на рис. 3.4 для стали 12Х18Н10Т.

Из рис. 3.2 (а, б) видно, что истощение легкоиспаряющегося компонента Mg более интенсивно происходит при продольной осцилляции электронного луча, так как конечная расчетная концентрация Mg в сплаве АМг-6 составила примерно 0,045 отн. ед., в то время сварки с поперечной осцилляцией луча она составляет 0,05 отн.ед.

Далее производилось сравнение расчетных значений изменения химического состава сварных швов, полученных с осцилляцией электронного луча, с расчетными значениями изменения химического состава сварных швов, выполненных со статическим лучом (рис. 3.3 для сплава АМг-6).



а



Б

Рисунок 3.2 – Расчетные значения изменения концентрации Mg вдоль стыка сварного прохода для сплава АМг-6, а - для поперечной осцилляции, б – для продольной осцилляции; 1, 2, 3, 4 – режимы, указанные в табл. 3.5.

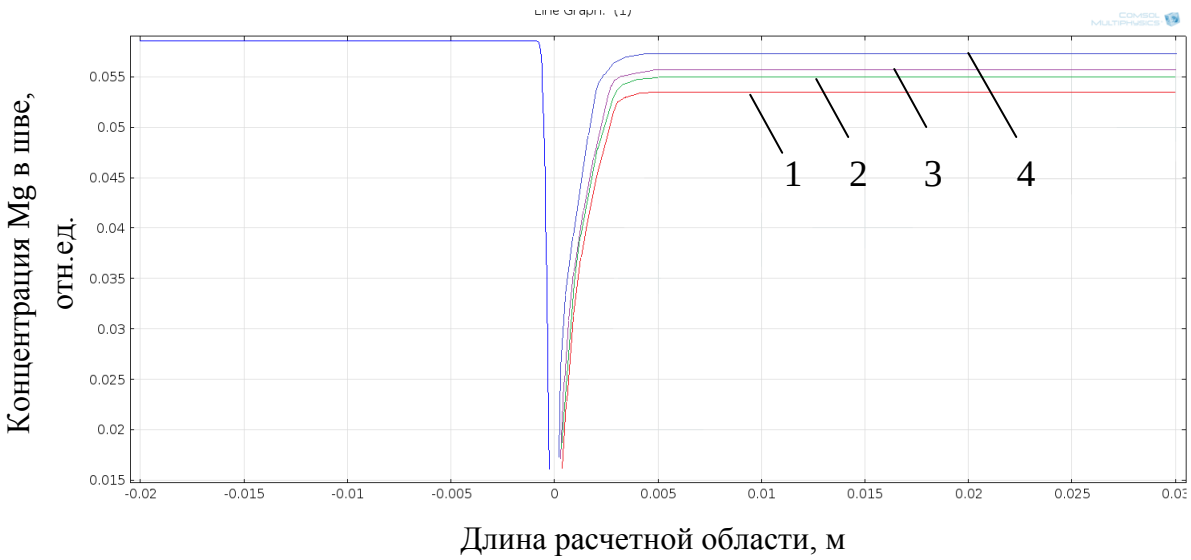


Рисунок 3.3 – Расчетные значения изменения концентрации Mg вдоль стыка для сплава АМг-6, выполненного статическим лучом; 1- скорость сварки 5 мм/с, 2 – 6 мм/с, 3- 9 мм/с, 4 – 10 мм/с

Полученные данные сведены в единую таблицу (табл. 3.6).

Таблица 3.6 – Расчетное содержание магния в сварных соединениях, выполненных при электронно-лучевой сварке

№	Вид воздействия электронного луча	Содержание Mg в сварном шве, отн. ед.	Первоначальное содержание Mg в основном металле, отн.ед.	Допустимое содержание Mg в сплаве АМг-6 (ГОСТ 4784-97), отн. ед.
1	Продольной осцилляцией	0,0563	0,0584	0,058-0,068
2	Поперечной осцилляцией	0,0543		
3	Статический луч	0,0567		

Полученные результаты свидетельствуют о наличии отклонения концентрации Mg от химического состава основного металла, которое составляет порядка 4-7 % при сварке с осцилляцией электронного луча. При этом рассчитанное значение обеднения Mg для сварных соединений, выполненных с продольной осцилляцией электронного луча, меньше на 3,5%, чем рассчитанное

обеднение Mg при сварке с поперечной осцилляцией луча. Рассчитанное содержание Mg при сварке статическим лучом составило 3%, что не противоречит результатам экспериментальных исследований, согласно которым испарение этого компонента не превышает 5 % [1-4].

Также из полученных расчетов можно сделать вывод о влиянии увеличения скорости сварки на уменьшение интенсивности испарения и изменение химического состава сварных швов.

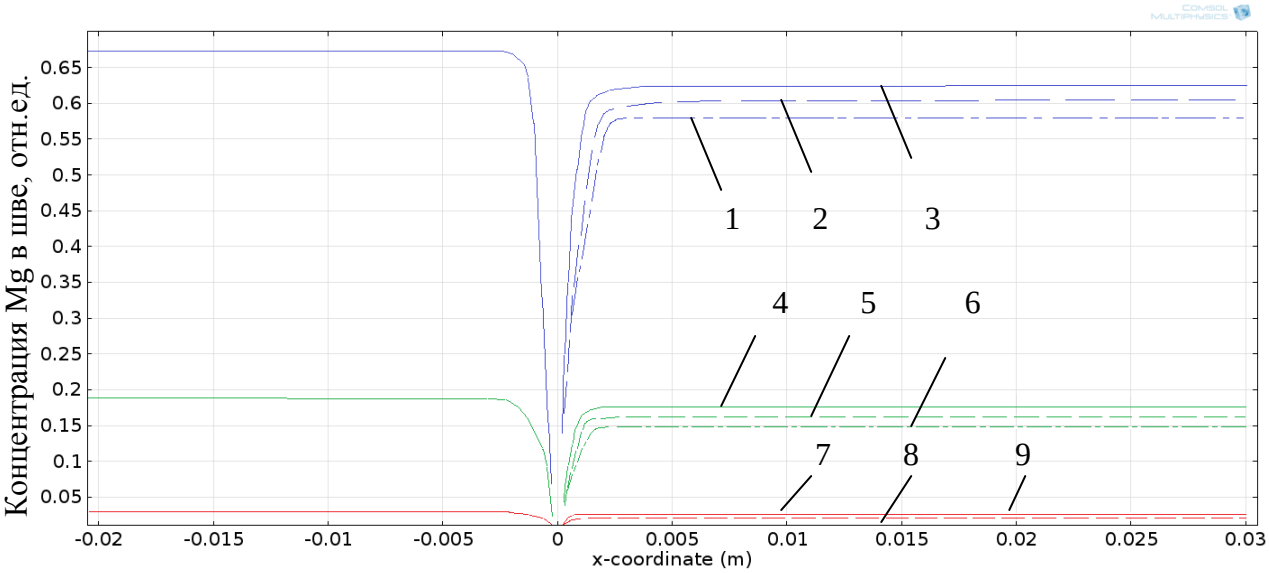


Рисунок 3.4 – Расчетные значения изменения концентрации Mn (7, 8, 9), Cr (4, 5, 6), Fe (1, 2, 3) вдоль стыка для стали 12Х18Н10Т;

прямые линии – расчеты для статического луча; штриховые – расчеты для поперечной осцилляции электронного луча, штрихпунктирные – для продольной осцилляции электронного луча

На рис. 3.4 изображено изменение концентрации Fe, Mn и Cr вдоль стыка при электронно-лучевой сварке статическим лучом, а также, сварке с продольной и поперечной осцилляцией электронного луча стали 12Х18Н10Т. Расчеты представлены для скорости сварки 5 мм/с и амплитуды осцилляции 0,8 мм. Отклонения содержания элементов в шве от их содержания в основном металле не превышает 5% (данные представлены в табл. 3.7) [160].

Таблица 3.7 – Расчетное содержание Mn, Cr, Fe в сварных соединениях, выполненных электронно-лучевой сваркой

Элементы сплава	Содержание элемента в сварном шве при сварке статическим лучом, отн.ед.	Содержание элемента в сварном шве при сварке с продольной осцилляцией, отн.ед.	Содержание элемента в сварном шве при сварке с поперечной осцилляцией, отн.ед.	Содержание элемента в основном металле, отн.ед.	Допустимое содержание элемента в сплаве (ГОСТ 5632-72), отн. ед.
Mn	0,0136	0,0117	0,0127	0,0142	до 0,02
Cr	0,189	0,182	0,178	0,19	0,17-0,19
Fe	0,63	0,59	0,60	0,676	примерно 0,67

При сравнении полученных данных видно, что при сварке статическим лучом обеднение Mn составляет 5%, при сварке с продольной осцилляцией луча - 18 %, при сварке с поперечной осцилляцией луча - 11%. При этом расчетные значения содержания Mn, Cr, Fe не выходят за область допустимых значений.

3.2. Определение давления, интегральной температуры и химического состава паров в парогазовом канале в процессе испарения при электронно-лучевой сварке

На рис. 3.5 представлены результаты расчетов концентрации химических элементов в парогазовой фазе. Для определения температуры парогазовой фазы в канале результаты расчетов сопоставлялись с данными, полученными при экспериментальных исследованиях. Методика экспериментальных исследований подробно описана в п. 2.3.

При экспериментальных исследованиях производились проходы электронным лучом по металлическим образцам с осаждением паров компонентов сплава на стеклянной пластине. Далее проводился рентгенофлуоресцентный анализ полученного осажденного слоя, результаты которого для стали 12Х18Н10Т представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8 – Содержание элементов в осажденном покрытии

Элементы	Концентрация (отн. ед.)	
	в основном металле	полученного покрытия
Железо	0,676	0,336
Марганец	0,02	0,350
Хром	0,19	0,240

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, в процессе электронно-лучевого воздействия на образец из стали 12Х18Н10Т происходит интенсивное испарение железа, хрома и марганца.

Далее, для оценки температуры в парогазовом канале, полученные экспериментальные данные сопоставлялись с результатами термодинамического расчета, описанного в п. 2.2.

На рис. 3.5 представлены результаты расчетов концентрации химических элементов в парогазовой фазе канала для стали 12Х18Н10Т.

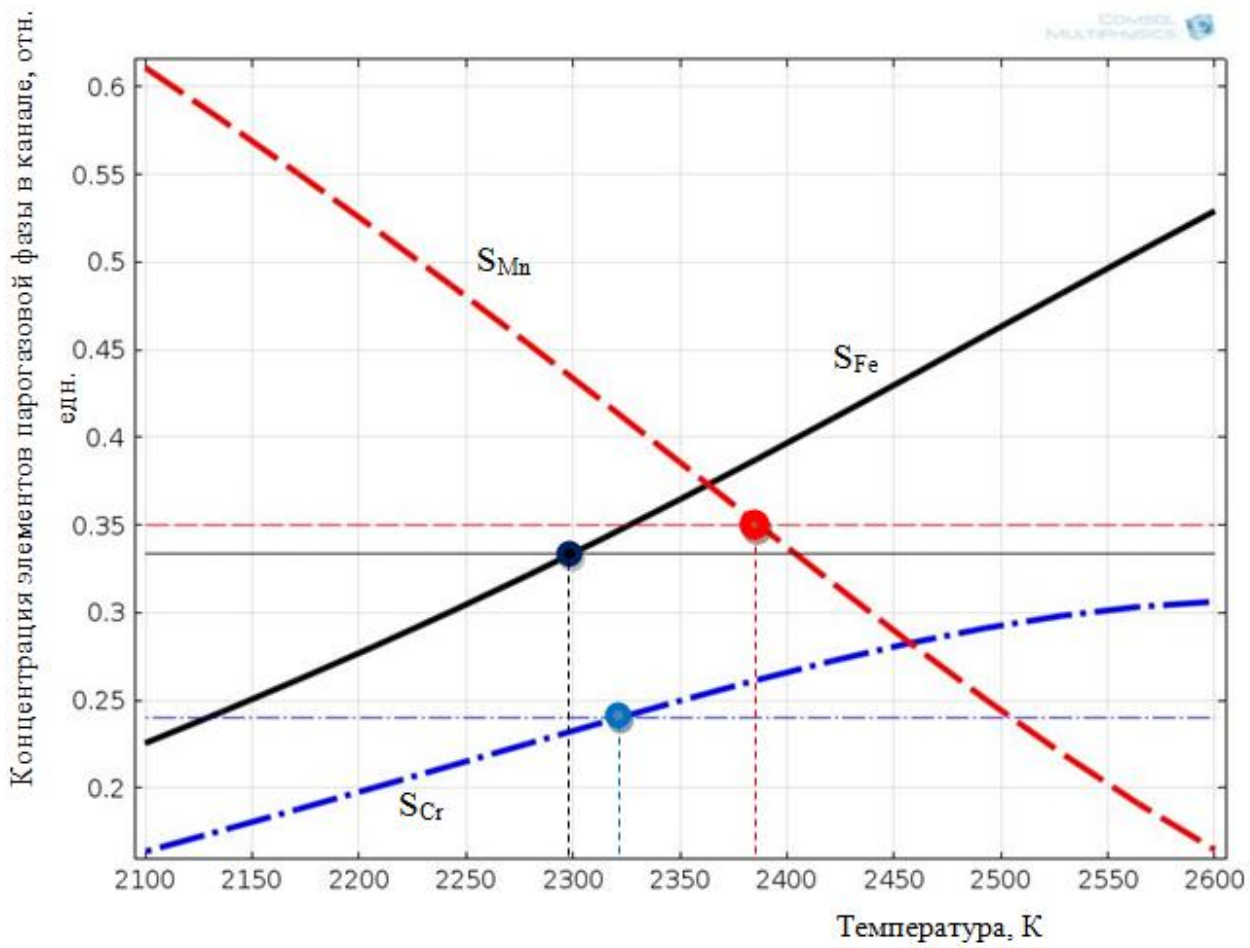


Рисунок 3.5 – Зависимость концентрация железа, марганца и хрома в парогазовом канале от температуры для стали 12Х18Н10Т: кривыми изображены расчетные значения концентраций; точками обозначены экспериментальные значения концентраций

Далее из расчетных кривых были взяты точки с ординатой из табл. 3.8, и по соответствующей абсциссе определялись значения температуры парогазовой фазы в канале, которые составили: 2320 К (для Fe), 2340 К (для Cr) и 2410 К (для Mn). Если принять, что средняя температура парогазовой фазы в канале составляет 2360 К, разброс данных для различных химических элементов не превышает 3%. Давление паров при этой температуре составляет примерно 2кПа (рис. 3.6). Полученный разброс значений температур обусловлен косвенностью методики, при которой определялась эффективная температура парогазового канала.

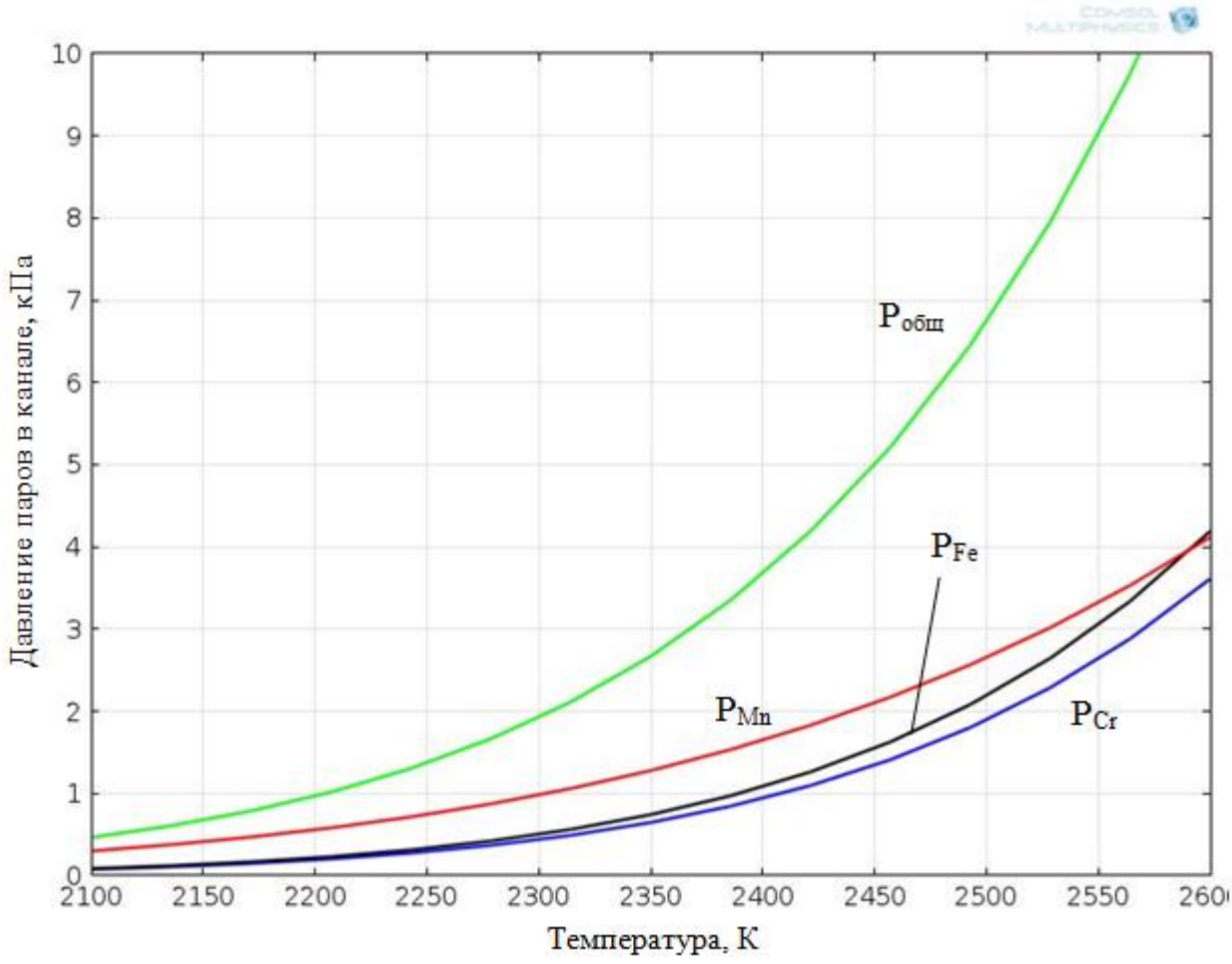


Рисунок 3.6 – Расчетные зависимости давления химических элементов в парах от температуры для стали 12Х18Н10Т

При сопоставлении результатов, полученных в работах [128,129], где пренебрегали описанием диффузионных процессов, обнаруживается существенное расхождение температуры и давления парогазовой фазы в канале, которые в указанных работах составили, соответственно 2610 К и 11 кПа. Это свидетельствует о том, что термодинамическая модель, учитывающая диффузионные процессы, дает меньшие значения температуры и давления паров в канале по сравнению с моделью, построенной без учета этих процессов [152-154, 163].

По данной методике были определены, также, давление паров и температура в канале для сплава АМг-6, которые составили соответственно 1850 К и 5,5 МПа.

3.3. Исследование химического состава сварных швов образцов стали 12Х18Н10Т на различных режимах

При проведении экспериментов выполнялись сварочные проходы при различных параметрах режима сварки с использованием статического и осциллирующего электронного луча.

Сварка образцов проводилась при острой фокусировке электронного луча без его осцилляции и с использованием продольной и поперечной осцилляции луча. Под острой фокусировкой электронного луча подразумевается значение тока фокусирующей линзы электронной пушки, при котором достигается максимальная глубина проплавления.

Режимы электронно-лучевой сварки стали 12Х18Н10Т при острой фокусировке электронного луча без осцилляции, с поперечной и продольной осцилляцией луча приведены в табл. 3.9, 3.10, 3.11.

Таблица 3.9 – Режимы электронно-лучевой сварки при острой фокусировке электронного луча без осцилляции

№ шва	1	2	3	4
Сварочный ток $I_{св}$, мА	40	40	50	50
Скорость сварки $V_{св}$, мм/с	5	10	5	10

Таблица 3.10 – Режимы электронно-лучевой сварки при острой фокусировке электронного луча с поперечной осцилляцией

№ шва	5	6	7	8	9	10	11	12
Сварочный ток $I_{св}$, мА	40	40	40	40	50	50	50	50
Скорость сварки $V_{св}$, мм/с	5	10	5	10	5	10	5	10
Амплитуда осцилляции, мм	0,8	0,8	1	1	0,8	0,8	1	1

Таблица 3.11 – Режимы электронно-лучевой сварки при острой фокусировке электронного луча с продольной осцилляцией

№ шва	13	14	15	16	17	18	19	20
Сварочный ток $I_{св}$, мА	40	40	40	40	50	50	50	50
Скорость сварки $V_{св}$, мм/с	5	10	5	10	5	10	5	10
Амплитуда осцилляции, мм	0,8	0,8	1	1	0,8	0,8	1	1

Конфигурация зон проплавления приведена на рис. 3.7. Швы с №1 по №4 выполнены статическим лучом на различных режимах, а швы с №5 по №12 выполнены с поперечной осцилляцией электронного луча, швы с №13 по №20 выполнены с продольной осцилляцией. Каждый последующий сварочный проход выполнялся после охлаждения предыдущего, что обеспечивало чистоту эксперимента [130].

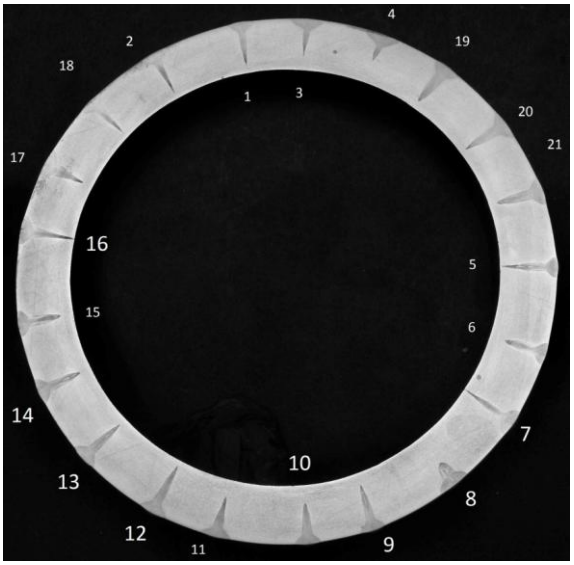


Рисунок 3.7 – Конфигурация зон проплавления металла электронным пучком при электронно-лучевой сварке стали 12Х18Н10Т

Рентгенофлуоресцентный анализ проводился в отдельных зонах поперечных шлифах, как представлено на рис. 3.8. Данное разделение на зоны было связано с неравномерностью макроструктуры по глубине сварного шва [108].

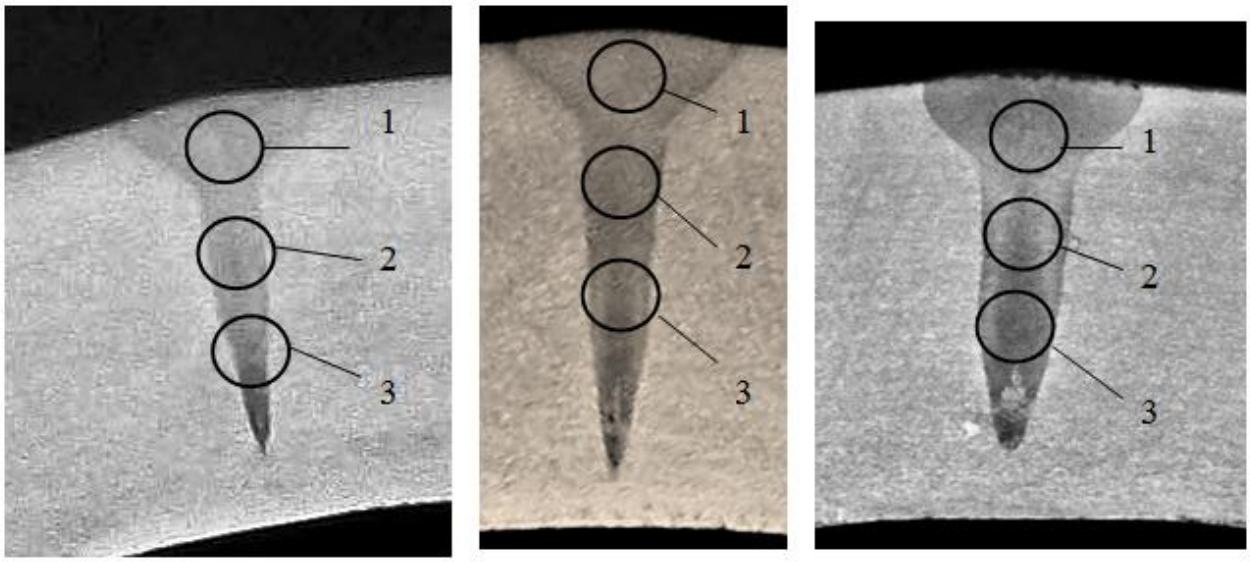


Рисунок 3.8 – Поперечные макрошлифы, выполненные статическим лучом (а), продольной (б) и с поперечной (в) осцилляцией электронного луча при ЭЛС стали 12Х18Н10Т [161]

Данные по химическому анализу сварных швов представлены в табл. 3.12

Таблица 3.12 – Химический анализ сварных швов для различных режимов ЭЛС

Номер шва	Содержание элементов в зоне 1 x 10^{-2}, отн. ед.		Содержание элементов в зоне 2 x 10^{-2}, отн. ед.		Содержание элементов в зоне 3 x 10^{-2}, отн. ед.		Содержание элементов в основном металле, x 10^{-2}, отн. ед.		Допустимые значения элементов в сплаве, x 10^{-2} отн. ед.	
	Mn	Cr	Mn	Cr	Mn	Cr	Mn	Cr	Mn	Cr
Швы, выполненные статическим лучом										
1	1,0134	18,630	1,130	18,155	1,064	18,144	1,4184	17,845	до 2	17-19
2	1,3157	18,794	1,284	18,341	1,203	18,201				
3	0,9936	18,449	0,8761	18,253	0,8231	18,045				
4	1,0075	18,846	0,9956	18,562	0,9524	18,172				
Швы, выполненные с продольной осцилляцией электронного луча										
5	1,1776	18,5968	1,2148	18,658	1,1254	18,982	1,4184	17,845	до 2	17-19
6	1,1801	18,625	1,2059	18,821	1,0847	18,982				
7	1,1578	18,518	1,1872	18,782	1,1325	18,891				

Продолжение Таблицы 3.12

Номер шва	Содержание элементов в зоне 1 x 10^{-2}, отн. ед.		Содержание элементов в зоне 2 x 10^{-2}, отн. ед.		Содержание элементов в зоне 3 x 10^{-2}, отн. ед.					
	Mn	Cr	Mn	Cr	Mn	Cr				
Швы, выполненные с продольной осцилляцией электронного луча										
8	1,1482	18,452	1,2341	18,652	1,0452	18,934				
9	1,1482	18,524	1,2511	18,705	1,2031	18,813				
10	1,1463	18,484	1,2461	18,654	1,1852	18,742				
11	1,1549	18,557	1,8941	18,568	1,1461	18,724				
12	1,1586	18,541	1,8758	18,581	1,1502	18,815				
Швы, выполненные с поперечной осцилляцией электронного луча										
13	1,2105	18,624	1,2841	18,795	1,1895	18,657	1,4184	17,845	до 2	17-19
14	1,2052	18,637	1,2413	18,821	1,1872	18,672				
15	1,2581	18,426	1,2813	18,628	1,1952	18,701				
16	1,2462	18,465	1,2824	18,542	1,1961	18,684				
17	1,1831	18,541	1,2062	18,651	1,1582	18,802				
18	1,1829	18,533	1,2057	18,632	1,1542	18,792				
19	1,1924	18,602	1,2106	18,642	1,1584	18,795				
20	1,1915	18,597	1,2104	18,648	1,1524	18,805				

Для наглядности полученные данные представлены в виде графиков с разделением по параметрам режимов сварки (рис. 3.9). На рис. 3.9. изображено изменение концентрации марганца по глубине сварного шва. Режимы 1-3 относятся к сварке статическим лучом, 5-9 – к сварке с продольной осцилляцией луча, 13-17 – к сварке с поперечной осцилляцией луча. Пунктирными линиями изображены режимы с током луча 50 мА. При ЭЛС статическим лучом концентрация марганца меньше, чем при ЭЛС с осцилляцией луча, и с увеличением тока луча происходит незначительное истощение Mn. При рассмотрении кривых, относящихся к режимам, выполненных с осцилляцией луча наблюдается, что сила тока луча практически не влияет на концентрацию Mn в сварном шве. Стоит отметить, что в средней зоне сварных швов наблюдается некоторое увеличение концентрации Mn. Минимальное содержание Mn - корневая часть сварного шва [162].

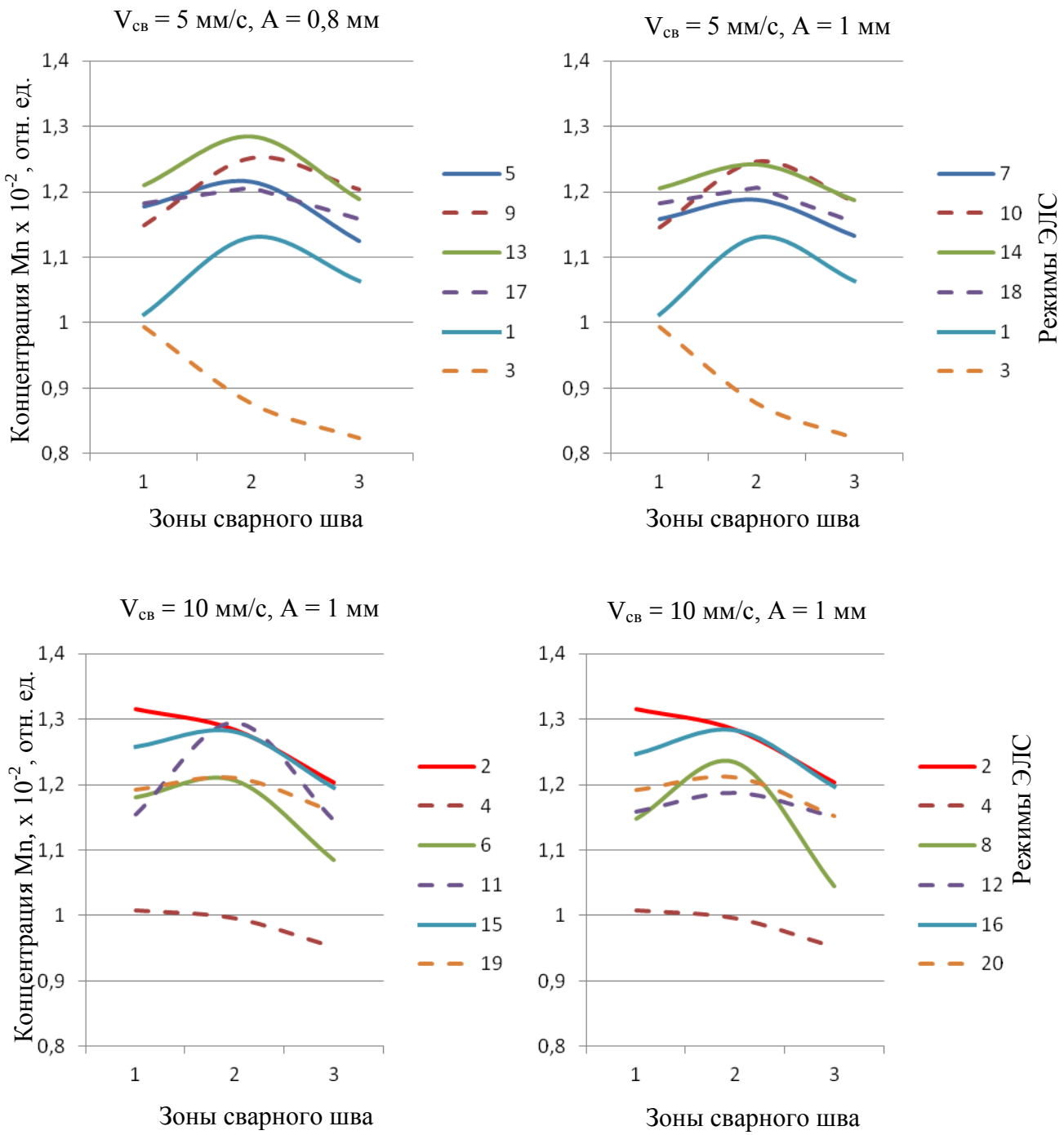


Рисунок 3.9 – Графики изменения концентрации марганца по глубине сварного шва

Хотя полученная концентрация марганца в сварных швах примерно на 10-15% ниже, чем в основном металле, но за допустимое значение, регламентированные ГОСТом 5632-72 (табл. 3.13), она не выходит.

Из табл. 3.12 и рис. 3.9. следует, что в средней части сварного соединения наблюдается повышенное содержание марганца по сравнению с другими зонами (верхней и корневой частями сварного соединения) как при продольной, так и при поперечной осцилляции электронного луча. При статистической обработке данных по химическому составу в средней части сварных соединений были получены регрессионные уравнения (3.1, 3.2) и построены зависимости концентрации марганца в шве от изменения параметров режимов сварки (рис. 3.10, 3.11).

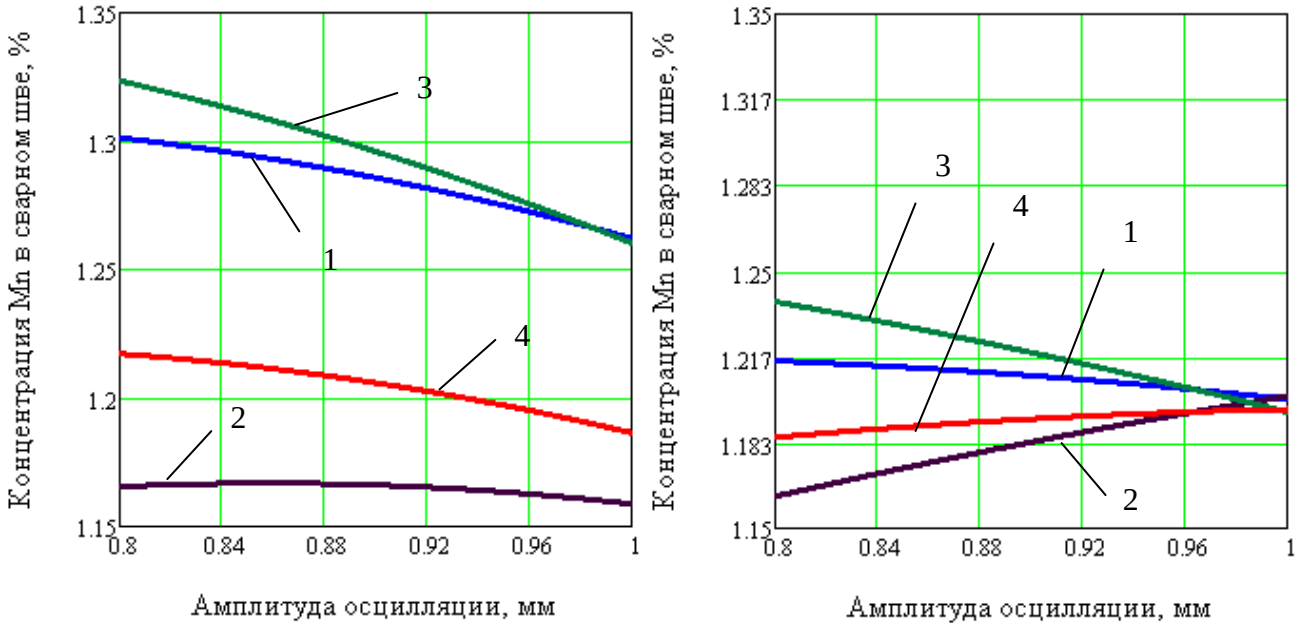
Регрессионное уравнение для содержания Mn в сварном соединении, полученного при продольной осцилляции электронного луча имеет вид:

$$SMn_{\text{прод}} = 2{,}077 - 26{,}815 \cdot I_{\text{л}} + 0{,}591 \cdot I_{\text{л}} \cdot V_{\text{св}} + 16{,}2 \cdot I_{\text{л}} \cdot A - \\ -0{,}024 \cdot V_{\text{св}} \cdot A - 0{,}402 \cdot A^2 \qquad (3.1)$$

Регрессионное уравнение для содержания Mn в сварном соединении, полученного при поперечной осцилляции электронного луча имеет вид:

$$SMn_{\text{попер}} = 2{,}077 - 26{,}815 \cdot I_{\text{л}} + 0{,}027 \cdot V_{\text{св}} - 0{,}707 \cdot A - 0{,}028 \cdot V_{\text{св}} \cdot A + \\ +26{,}921 \cdot I_{\text{л}} \cdot A - 0{,}169 \cdot A^2 \qquad (3.2)$$

где $SMn1$ *и* $SMn2$ – концентрация марганца в сварных соединениях, полученных при продольной и поперечной осцилляции электронного луча, соответственно, %; $I_л$ – ток луча, мА; $V_{св}$ – скорость сварки, мм/с; A – амплитуда осцилляции, мм.

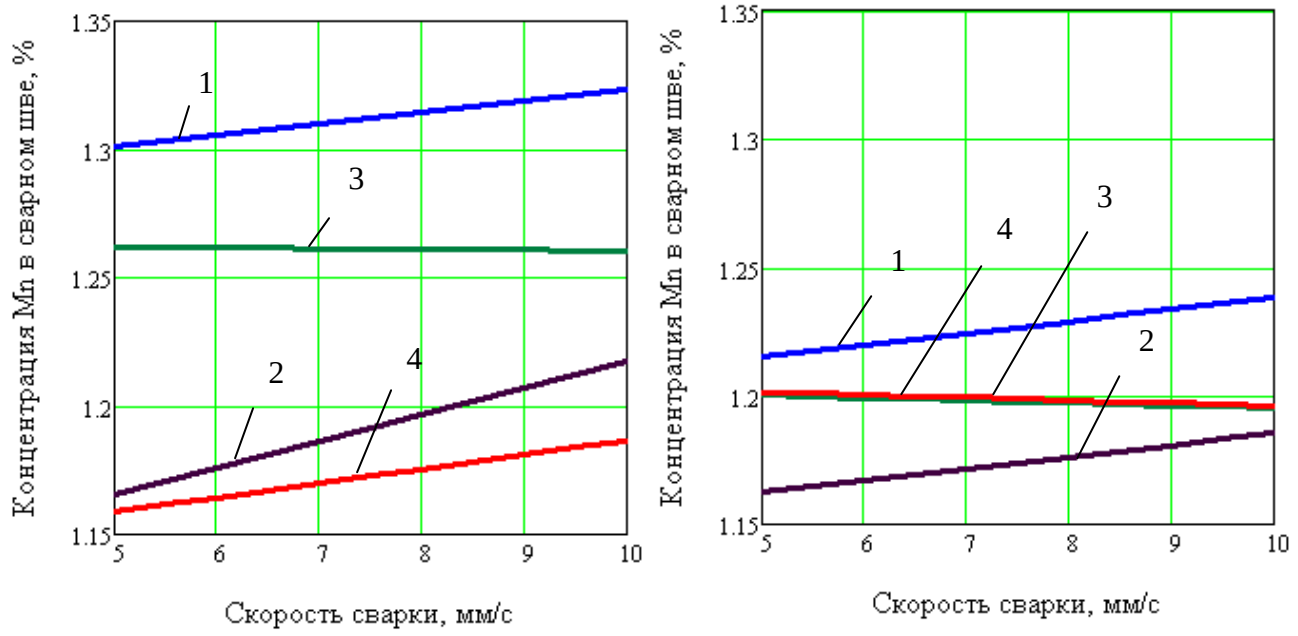


а б

I. 1 – $V_{св}$ = 5 мм/с, $I_{св}$ = 40 мА; **2** – $V_{св}$ = 5 мм/с, $I_{св}$ = 50 мА;

3 – $V_{св}$ = 10 мм/с, $I_{св}$ = 40 мА; **4** – $V_{св}$ = 10 мм/с, $I_{св}$ = 50 мА;

a изменяется от 0,8 мм до 1 мм.

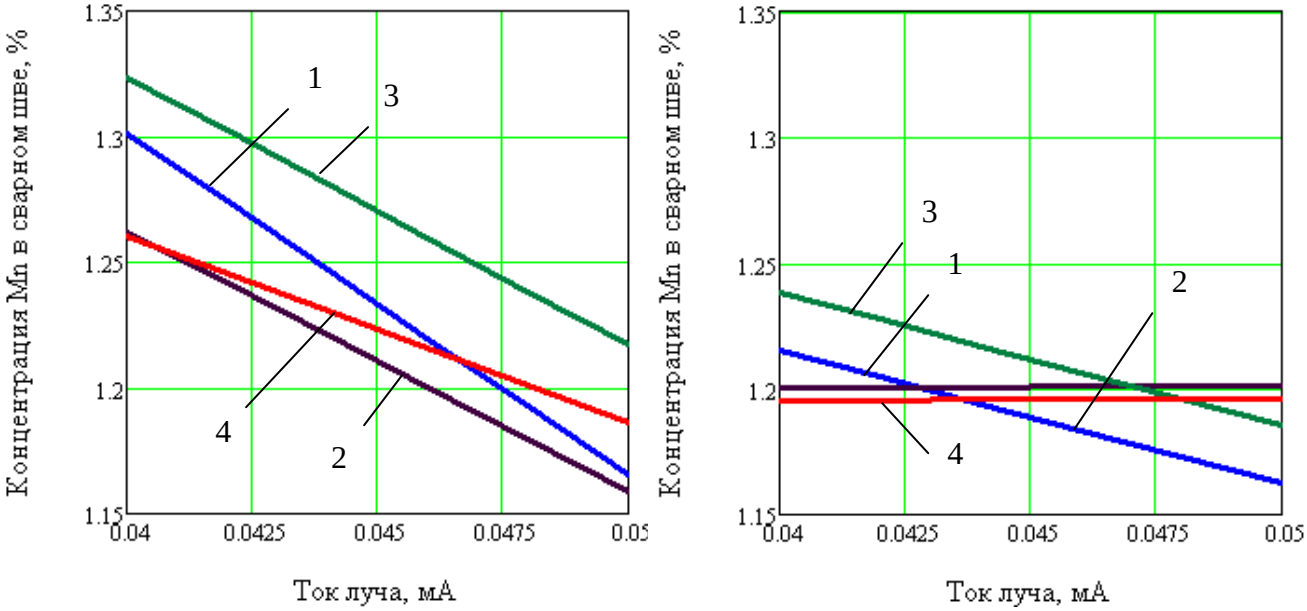


а б

II. 1 – a = 0,8 мм, $I_{св}$ = 40 мА; **2** – a = 0,8 мм, $I_{св}$ = 50 мА;

3 – a = 1 мм, $I_{св}$ = 40 мА; **4** – a = 1 мм, $I_{св}$ = 50 мА;

$V_{св}$ изменяется от 5 мм/с до 10 мм/с.



III. 1 – $V_{св}$ = 5 мм/с, a = 0,8 мм; **2** – $V_{св}$ = 5 мм/с, a = 1 мм;

3 – $V_{св}$ = 10 мм/с, a = 0,8 мм; **4** – $V_{св}$ = 10 мм/с, a = 1 мм;

$I_{св}$ изменяется от 40 мА до 50 мА.

Рисунок 3.10 – Зависимость концентрации марганца от изменения параметров режима электронно-лучевой сварки; а – графики для поперечной осцилляции электронного луча, б – графики для продольной осцилляции электронного луча

С увеличением амплитуды колебаний (рис. 3.10.А) концентрация Mn в сварном шве уменьшается. Это наблюдается для швов, выполненных как с продольной, так и с поперечной осцилляцией электронного луча. С увеличением скорости сварки концентрация Mn в сварном шве увеличивается примерно на 3 % (рис. 3.10.Б). С увеличением тока луча (рис. 3.10.В) 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 электронного луча, наблюдается снижение концентрации Mn при сварке с продольной осцилляцией приблизительно на 10%.

Для комплексной оценки совместного влияния параметров режимов сварки, таких как тока луча, скорости сварки и амплитуды осцилляции на изменение

концентрации Mn, были построены номограммы, представленные на рис. 3.11 и 3.12.

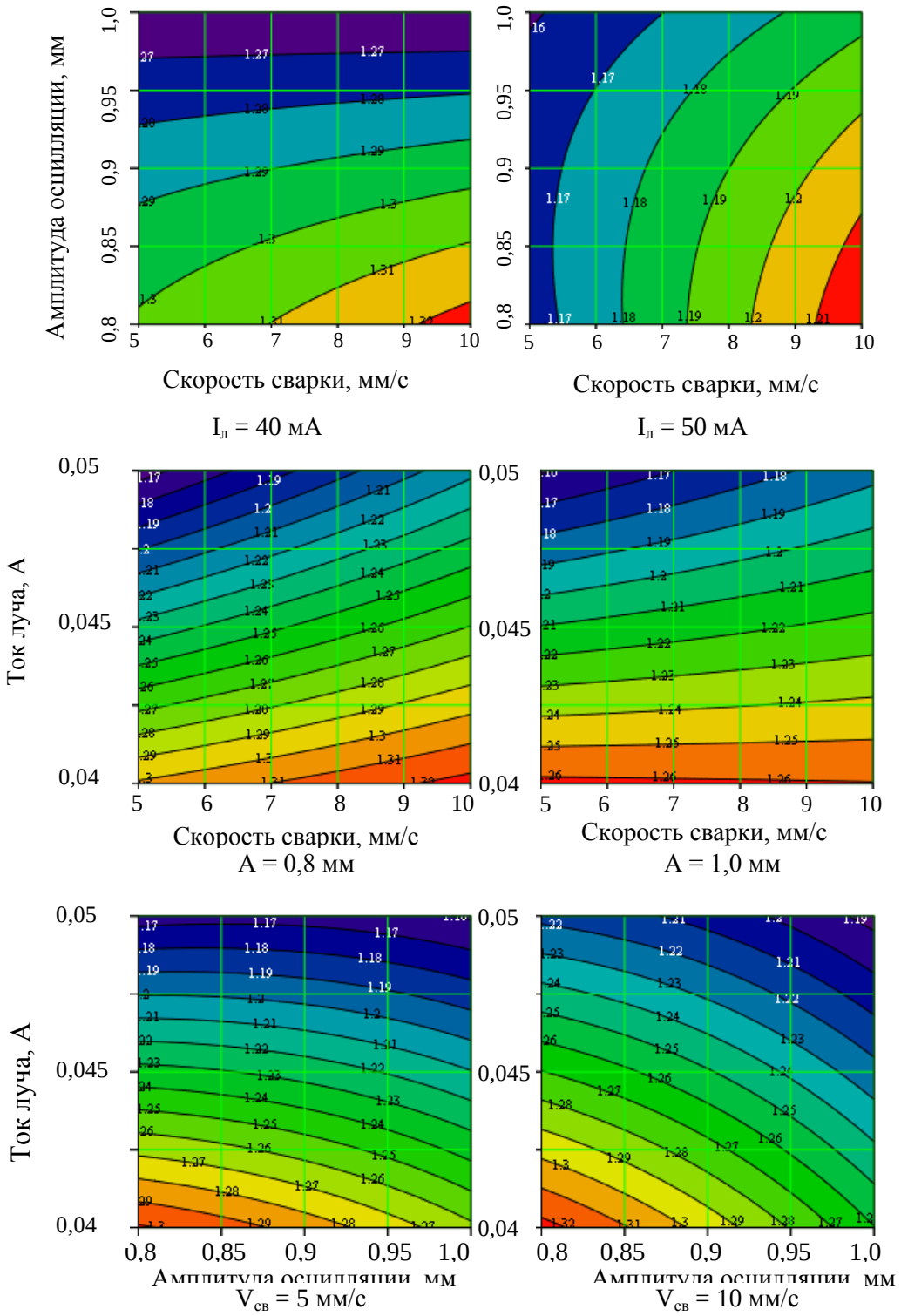


Рисунок 3.11 – Номограммы изменения концентрации Mn в сварном соединении в зависимости от тока луча ($I_л$, А), скорости сварки ($V_{св}$, мм/с) и амплитуды поперечной осцилляции (A, мм) луча

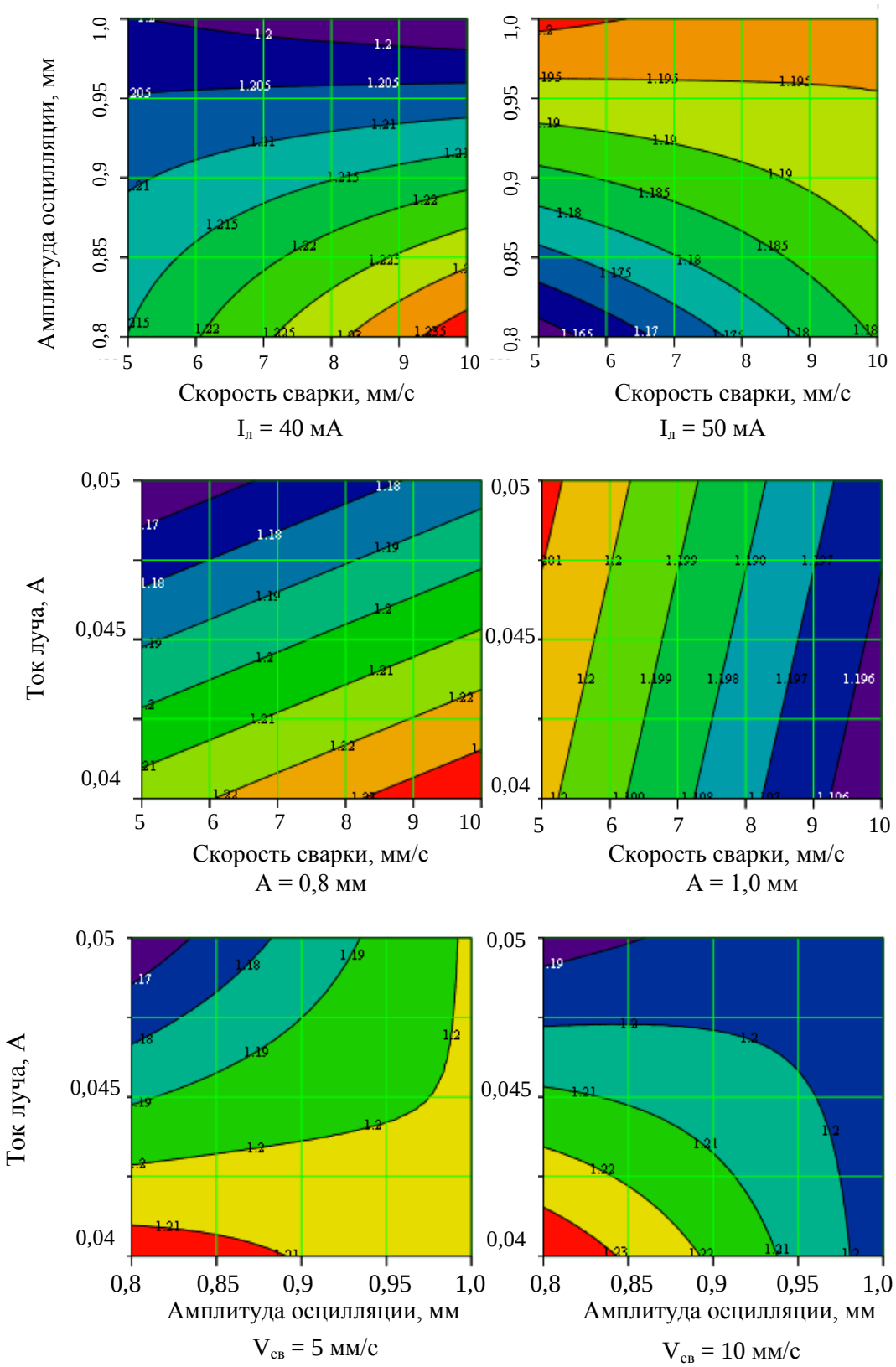


Рисунок 3.12 – Номограммы изменения концентрации Mn в сварном соединении в зависимости от тока луча ($I_л$, А), скорости сварки ($V_{св}$, мм/с) и амплитуды продольной осцилляции (A, мм) луча

Полученные данные не выходят за границы допустимых значений, регламентированных ГОСТом 5632-72 (Табл. 3.13).

Таблица 3.13 – Табличный химический состав стали 12Х18Н10Т

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	-
до 0,12	до 0,8	до 2	9 - 11	до 0,02	до 0,035	17 - 19	до 0,3	(5 C - 0.8) Ti, остальное Fe

Таблица 3.14 – Химический состав основного металла стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti
0,1024	0,4792	1,4184	10,6471	-	-	17,8456	-	0,5934

Сравним полученные результаты химического анализа сварных швов с расчетными значениями концентраций для стали 12Х18Н10Т для различных режимов (табл. 3.15).

При сравнении расчетных и экспериментальных результатов из табл. 3.15, видно, что погрешность модели составляет в основном от 2 до 7 %.

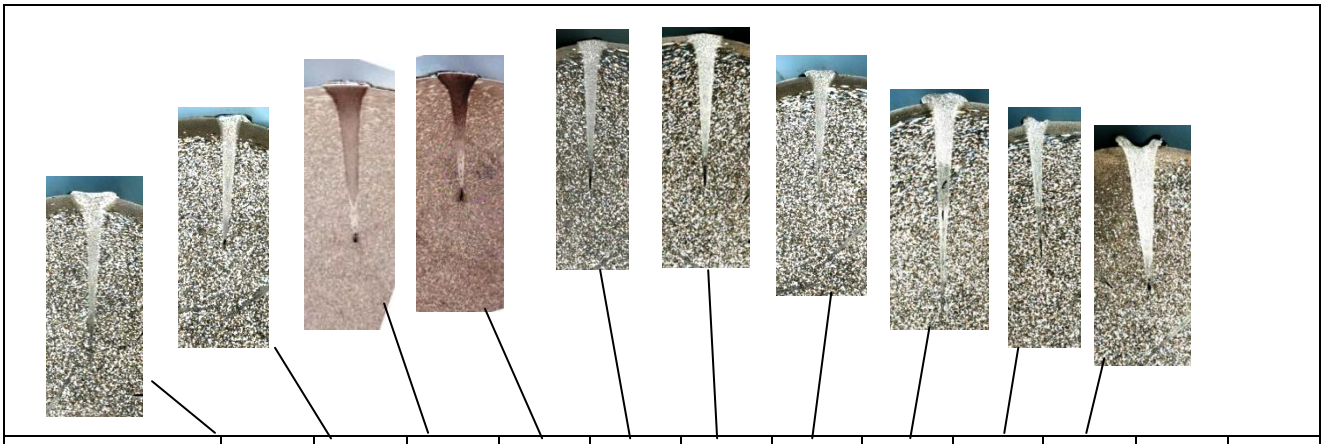
Таблица 3.15 – Результаты химического анализа и расчетные значения

Режимы ЭЛС	Расчетное содержание элемента в сварном шве, отн.ед.		Среднее измеренное содержание элемента в сварном шве, отн.ед.		Погрешность расчетов, %	
	Mn	Cr	Mn	Cr	Mn	Cr
Швы, выполненные статическим лучом						
1	0,0107	0,1831	0,0113	0,1907	6	4
2	0,0086	0,1844	0,0089	0,1715	3	7
3	0,0089	0,1825	0,0094	0,1921	5	5
4	0,0098	0,1853	0,0102	0,1815	4	2
Швы, выполненные с продольной осцилляцией электронного луча						
5	0,0117	0,1874	0,0109	0,1780	6	5
6	0,0116	0,1881	0,0120	0,1824	4	3
7	0,0116	0,1873	0,0122	0,1951	5	6
8	0,0116	0,1868	0,0109	0,1793	6	4
9	0,0120	0,1868	0,0111	0,1718	7	8
10	0,0119	0,1862	0,0122	0,1939	3	4
11	0,0139	0,1861	0,0143	0,1767	3	5
12	0,0139	0,1864	0,0132	0,1789	5	4
Швы, выполненные с поперечной осцилляцией электронного луча						
13	0,0123	0,1869	0,0120	0,1794	2	4
14	0,0121	0,1871	0,0111	0,1777	8	5
15	0,0124	0,1858	0,0129	0,1783	4	4
16	0,0124	0,1856	0,0117	0,1893	5	2
17	0,0118	0,1866	0,0126	0,1791	7	4
18	0,0118	0,1865	0,0122	0,1771	4	5
19	0,0119	0,1867	0,0113	0,1829	5	2
20	0,0118	0,1868	0,0125	0,1793	6	5

3.4. Экспериментальные исследования химического состава сварных соединений из сплава АМг-6

Для верификации построенной математической модели были проведены исследования по схеме, описанной в п. 3.2, применительно к сплаву АМг-6. Для сварочных проходов были выбраны параметры режимов электронно-лучевой сварки, представленные в табл. 3.16. В данной таблице, также, изображена макроструктура зон проплавления.

Таблица 3.16– Макроструктура зон проплавления и режимы, на которых они были получены



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, А=0,5 мм				С поперечной осцилляцией, А=0,5 мм			

Далее проводился рентгенофлуоресцентный анализ поперечных шлифов, с разделением шва на три участка, как указано в п. 3.2.

Таблица 3.17 – Результаты рентгенофлуоресцентного анализа поперечного сечения зон проплавления

№ режима	Содержание Mg в зоне 1, отн. ед.	Содержание Mg в зоне 2, отн. ед.	Содержание Mg в зоне 3, отн. ед.	Среднее содержание Mg с шве, отн. ед.	Содержание Mg основной металл, отн. ед.	Допустимые значения Mg в сплаве, отн. ед.
Швы, выполненные статическим лучом					0,0584	От 0,058-0,068
1	0,0540	0,0541	0,0554	0,0545		
2	0,0541	0,0543	0,0557	0,0547		
3	0,0537	0,0539	0,0546	0,0541		
4	0,0539	0,0541	0,0550	0,0543		
Швы, выполненные с продольной осцилляцией электронного луча						
5	0,0519	0,0537	0,0549	0,0535		
6	0,0535	0,0542	0,0551	0,0542		
7	0,0516	0,0520	0,0539	0,0525		
8	0,0520	0,0523	0,0542	0,0528		
Швы, выполненные с поперечной осцилляцией электронного луча						
9	0,0518	0,0535	0,0547	0,0533		
10	0,0532	0,0539	0,0549	0,0540		
11	0,0514	0,0521	0,0542	0,0526		
12	0,0517	0,0526	0,0557	0,0533		

Для наглядности полученных данных результаты экспериментов представлены в виде графиков с разделением по параметрам режимов сварки (рис. 3.13). На рис. 3.11 изображены изменения концентрации магния по глубине зоны проплавления. Режимы №1 - №4 относятся к сварке статическим лучом, №5 - №8 – к сварке с продольной осцилляцией и №9 - №12 – к сварке с поперечной осцилляцией электронного луча. Пунктирными линиями изображены режимы с током электронного луча 50 мА.

Из полученных зависимостей концентрации магния по глубине зоны проплавления видно, что в верхней части сварного шва происходит истощение магнием в большей степени, чем в средней и корневой части. Так же, на изменение концентрации влияет ток электронного луча и скорость сварки.

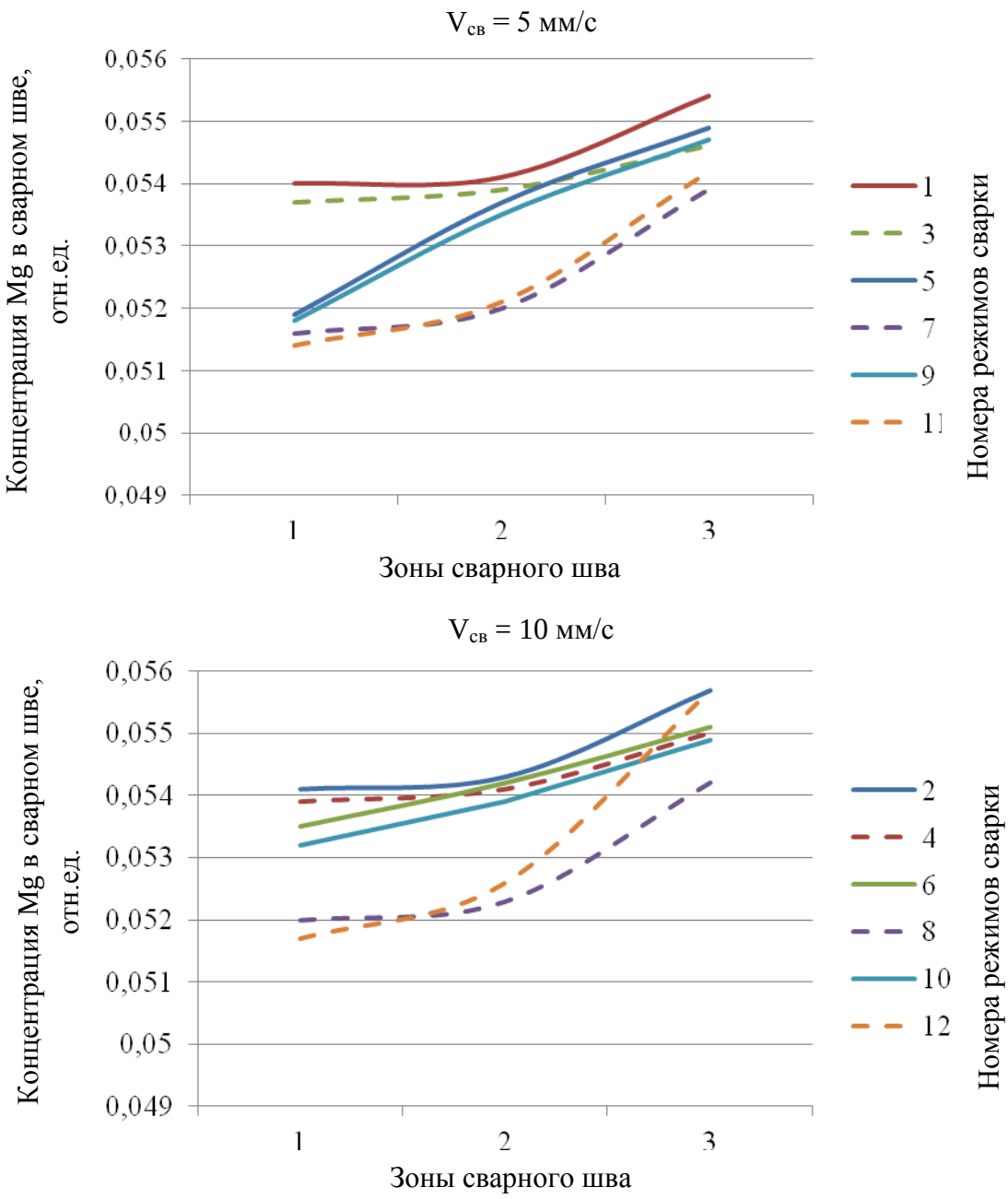


Рисунок 3.13 – Графики изменения концентрации магния по глубине сварного шва в зависимости от изменения параметров режимов ЭЛС

С увеличением тока луча происходит уменьшение концентрации магния в шве, однако, с увеличением скорости сварки концентрация магния увеличивается примерно на 2-3%.

При сравнении концентрации магния в швах выполненных статическим и осциллирующим электронным лучом наблюдается снижение концентрации магния примерно на 4 % при использовании осциллирующего электронного луча.

При сварке статическим электронным лучом наблюдается истощение магния в пределах 7% от первоначального содержания в сплаве, а при сварке с осцилляцией электронного луча оно составляет примерно 10%, причем траектория перемещения электронного луча (продольная и поперечная) не влияет на интенсивность обеднения сплава магнием.

На основании полученных данных были построены регрессионные зависимости концентрации Mg в швах при электронно-лучевой сварке с различными видами осцилляции электронного луча и при различных параметрах режима сварки (3.3, 3.4).

Регрессионное уравнение для определения содержания Mg при электронно-лучевой сварке с продольной осцилляцией луча имеет вид:

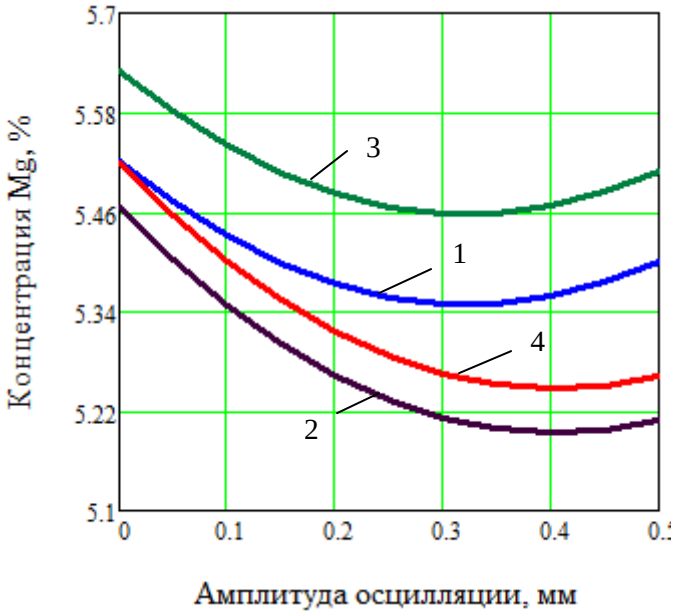
$$SMg = 5{,}412 + 0{,}067 \cdot V_{св} - 1{,}129 \cdot I_{л} \cdot V_{св} - 32{,}355 \cdot I_{л} \cdot A + 2{,}164 \cdot A^2 \quad (3.3)$$

Для электронно-лучевой сварки с поперечной осцилляции луча это уравнение имеет вид:

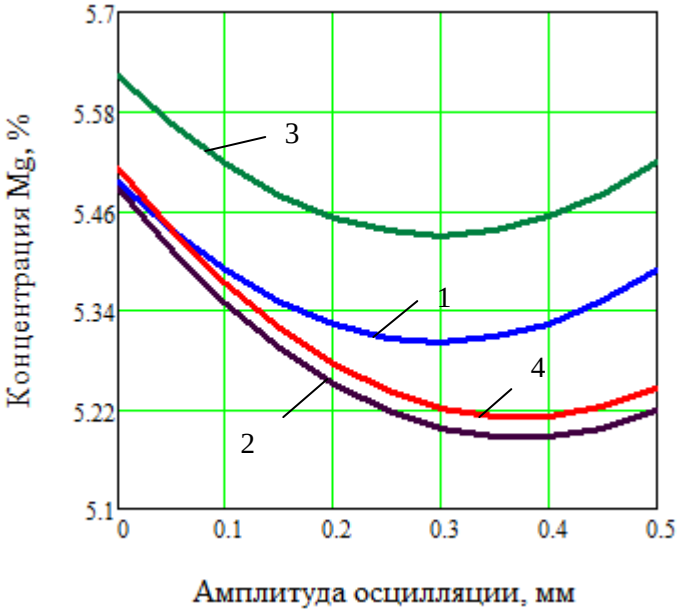
$$SMg = 4{,}979 + 9{,}675 \cdot I_{л} + 0{,}109 \cdot V_{св} - 2{,}081 \cdot I_{л} \cdot V_{св} - 32{,}355 \cdot I_{л} \cdot A + \\ +2{,}164 \cdot A^2 \quad (3.4)$$

где SMg – концентрация магния, %; $I_л$ – ток луча, мА; $V_{св}$ – скорость сварки, мм/с; A – амплитуда осцилляции электронного луча, мм.

По полученным регрессионным уравнениям зависимости концентрации магния от параметров режимов сварки были построены графики, которые приведены на рис. 3.14.



а

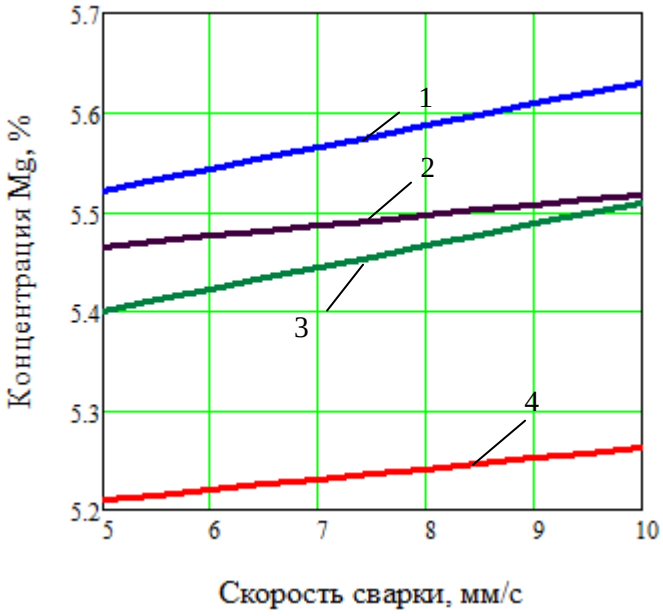


б

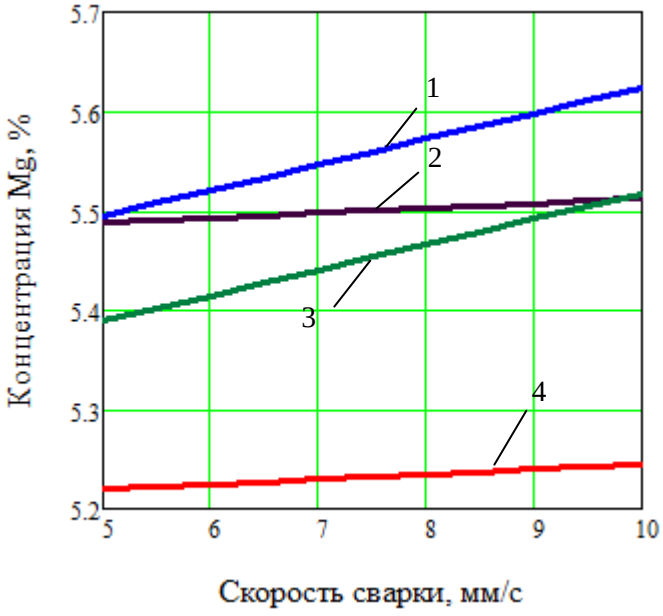
I. 1 – $V_{св}$ = 5 мм/с, $I_{св}$ = 40 мА; **2** – $V_{св}$ = 5 мм/с, $I_{св}$ = 50 мА;

3 – $V_{св}$ = 10 мм/с, $I_{св}$ = 40 мА; **4** – $V_{св}$ = 10 мм/с, $I_{св}$ = 50 мА;

А изменяется от 0 мм до 0,5 мм.



а

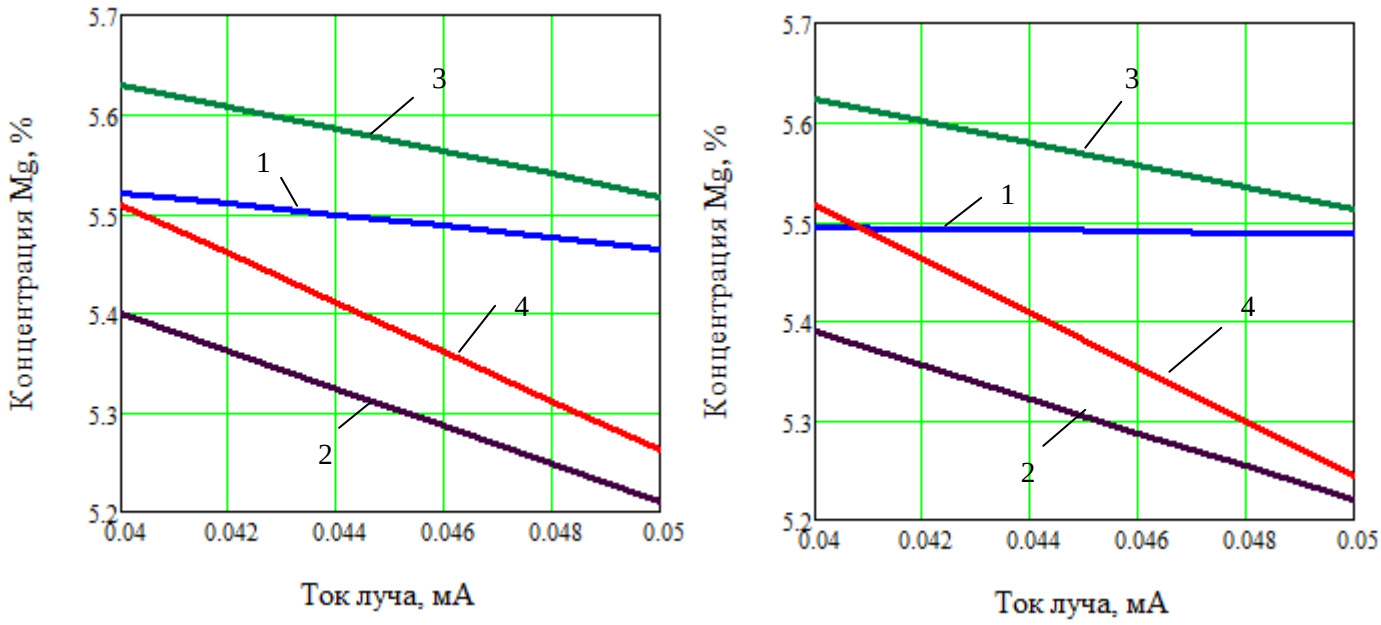


б

II. 1 – a = 0 мм, $I_{св}$ = 40 мА; **2** – a = 0 мм, $I_{св}$ = 50 мА;

3 – a = 0,5 мм, $I_{св}$ = 40 мА; **4** – a = 0,5 мм, $I_{св}$ = 50 мА;

$V_{св}$ изменяется от 5 мм/с до 10 мм/с.



III. 1 – $V_{св}$ = 5 мм/с, a = 0 мм; **2** – $V_{св}$ = 5 мм/с, a = 0,5 мм;

3 – $V_{св}$ = 10 мм/с, a = 0 мм; **4** – $V_{св}$ = 10 мм/с, a = 0,5 мм;

$I_{св}$ изменяется от 40 мА до 50 мА.

Рисунок 3.14 – Влияние параметров режимов ЭЛС на изменение концентрации Mg в сварных соединениях, полученных с продольной (а) и поперечной (б) осцилляцией электронного луча

Для наглядного представления совместного влияния параметров режимов сварки на изменение химического состава сварных соединений были построены номограммы, которые приведены на рис. 3.15 и 3.16.

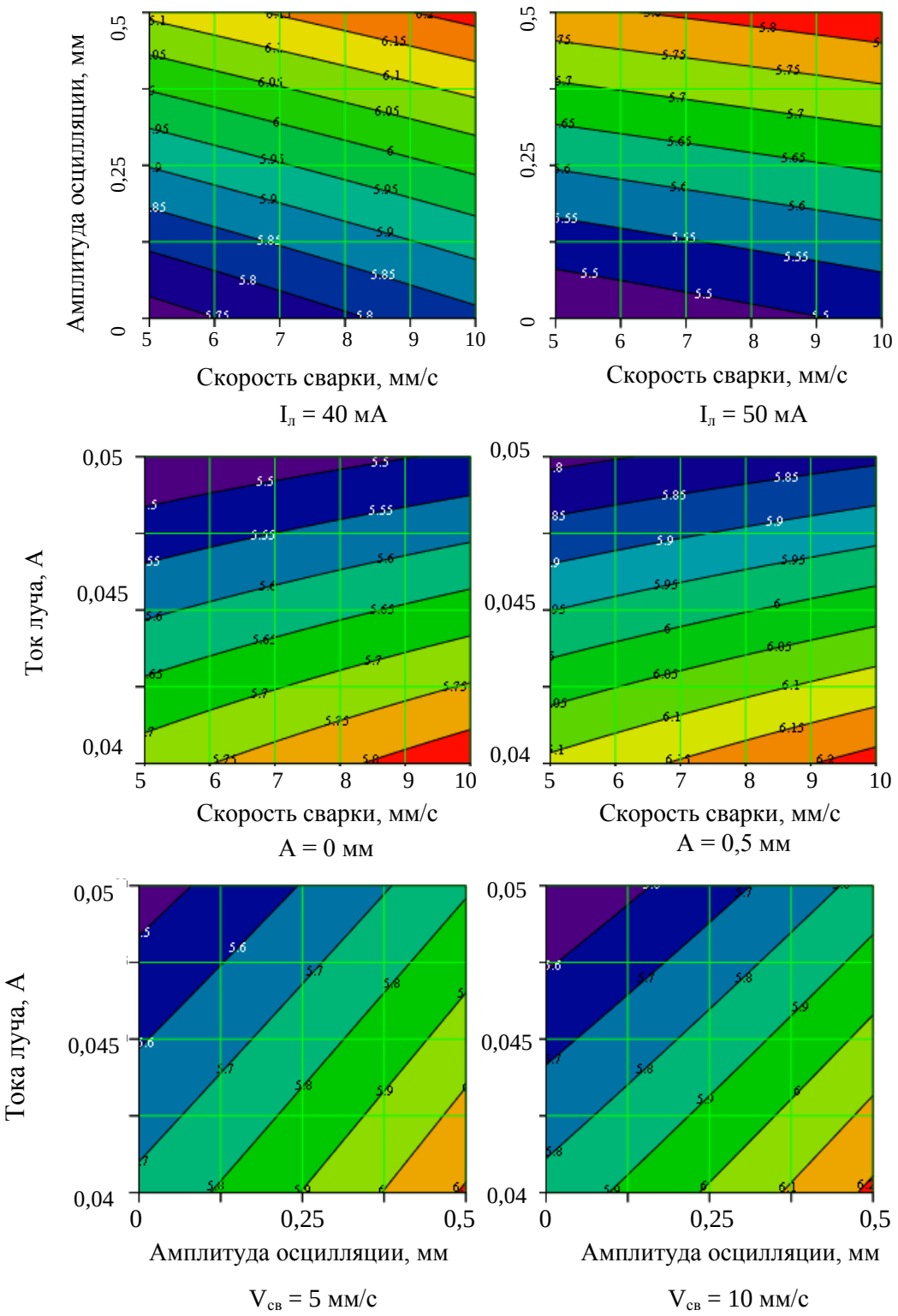


Рисунок 3.15 – Номограммы изменения концентрации Mg в сварном соединении в зависимости от силы тока луча ($I_л$, А), скорости сварки ($V_{св}$, мм/с) и амплитуды продольной осцилляции (A, мм) электронного луча с поперечной осцилляцией

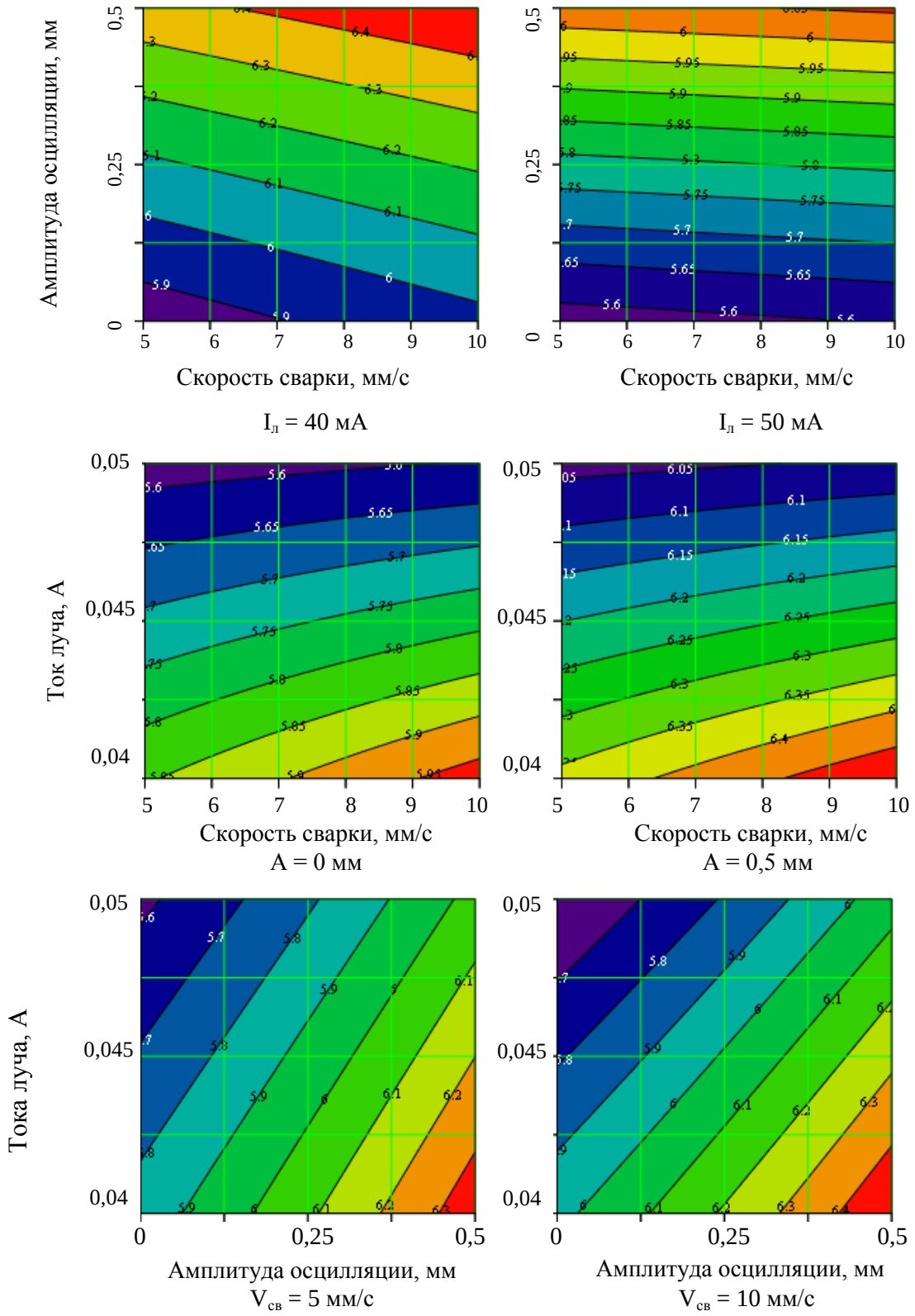


Рисунок 3.16 – Номограммы изменения концентрации Mg в сварном соединении в зависимости от силы тока луча ($I_л$, А), скорости сварки ($V_{св}$, мм/с) и амплитуды продольной осцилляции (A, мм) электронного луча с продольной осцилляцией

Полученные номограммы на рис. 3.15 и 3.16 иллюстрируют влияние параметров режимов сварки на изменение концентрации легкоиспаряемого компонента Mg.

Для верификации математической модели было проведено сравнение значений расчетных концентраций в сварном шве с результатами, полученными при рентгенофлуоресцентном анализе (табл. 3.18).

Таблица 3.18

Сопоставление рассчитанной и измеренной концентрации Mg в сварных соединениях

№ режима	Среднее расчетное содержание Mg в сварном шве, отн.ед.	Среднее измеренное содержание элемента в сварном шве, отн.ед.	Погрешность расчетов, %
Швы, выполненные статическим лучом			
1	0,0567	0,0545	4
2	0,0558	0,0547	2
3	0,0557	0,0541	3
4	0,0571	0,0543	5
Швы, выполненные с продольной осцилляцией электронного пучка			
5	0,0563	0,0535	5
6	0,0558	0,0542	3
7	0,0546	0,0525	4
8	0,0561	0,0528	6
Швы, выполненные с поперечной осцилляцией электронного пучка			
9	0,0543	0,0533	2
10	0,0556	0,0540	3
11	0,0547	0,0526	4
12	0,0561	0,0533	5

Погрешность расчетных результатов не превышает 6 %, по сравнению с результатами рентгенофлуоресцентного анализа.

Выводы по главе 3:

1. В главе исследованы процессы испарения легкоимпаряемых компонентов сплавов для стали 12Х18Н10Т – Mn и алюминиевого сплава АМг-6 – Mg при электронно-лучевой сварке с продольной и поперечной осцилляцией электронного луча. По расчетным и измеренным значениям концентраций легкоиспаряемых компонентов для стали наблюдается снижение Mn в корневой части сварного соединения и максимальная концентрация Mn в средней части сварного шва, что связано, скорее всего, с интенсивным перемешиванием, за счет осцилляции электронного луча. Для алюминиевого сплава – концентрация Mg в верхней части сварного шва минимальна и к корневой части она выравнивается и достигает допустимых значений.

2. С увеличение амплитуды колебаний концентрация Mn в сварном шве уменьшается. Это наблюдается для швов, выполненных как с продольной, так и с поперечной осцилляцией электронного луча. С увеличение скорости сварки концентрация Mn в сварном шве увеличивается в среднем на 3 %. 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%.

3. С увеличением тока луча, происходит уменьшение концентрации Mg в шве, однако, с увеличением скорости сварки, концентрация магния увеличивается приблизительно на 2-3%. При сравнении концентрации Mg в швах выполненных статическим и осциллирующим лучом, наблюдается снижение концентрации Mg при осцилляции электронного луча в среднем на 4 %. При электронно-лучевой сварке статическим лучом наблюдается истощение магния в пределах 7% от первоначального содержания в сплаве, а в случае осцилляции электронного луча составляет приблизительно 10%, причем траектория перемещения электронного

луча (продольная и поперечная) не влияет на интенсивность обеднения сплава легкоиспаряющимся компонентом - магнием.

4. Получены регрессионные зависимости концентрации Mg в сплаве АМг-6 и Mn в стали 12Х18Н10Т в швах при электронно-лучевой сварке с различными видами осцилляции электронного луча при различных параметрах режима сварки.

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

В последние годы в качестве новых технологических приемов электронно-лучевой сварки стала применяться сварка с динамическим расщеплением электронного луча на несколько тепловых источников. При этом обеспечивается одновременный ввода тепла в свариваемые заготовки в нескольких участках, расположенных друг от друга на некотором расстоянии.

Динамическое расщепление электронного луча позволяет проводить сварку одновременно в нескольких участках свариваемого изделия, либо сварку с образованием нескольких сварочных ванн, следующих друг за другом (многованновая сварка), или совместить в едином процессе сварку и термообработку полученного сварного соединения [138].

Технология динамического расщепления электронного луча на несколько концентрированных тепловых источников, наряду с повышения производительности процесса, позволяет повысить качество сварных соединений таких трудно свариваемых материалов, как чугуны и титановые сплавы [139], а так же разнородных материалов, например бронзы и стали [121, 140-142]. Применение данной технологии приводит к снижению пористости в сварных швах, уменьшению вероятности образования трещин, получению более однородной структуры сварных швов из разнородных материалов.

Наиболее перспективной является электронно-лучевая сварка с динамическим расщеплением электронного луча на три концентрированных тепловых источника, действующих последовательно друг за другом. В этом случае электронный луч динамически позиционируется относительно поверхности свариваемого изделия с высокой частотой (5 кГц и более) по трем точкам, от одной к другой и обратно, которые расположены друг от друга на расстоянии L (рис. 4.1). При этом мощность электронного пучка в каждой точке не меняется, а изменяется лишь время его воздействия. Соответственно, в каждой

точке формируется свой парогазовый канал и отдельная сварочная ванна. Благодаря высокой частоте позиционирования электронного луча в период его отсутствия в каждой из точек воздействия парогазовый канал сохраняет свои исходные параметры, и формирование сварного шва производится тремя сварочными ваннами одновременно.

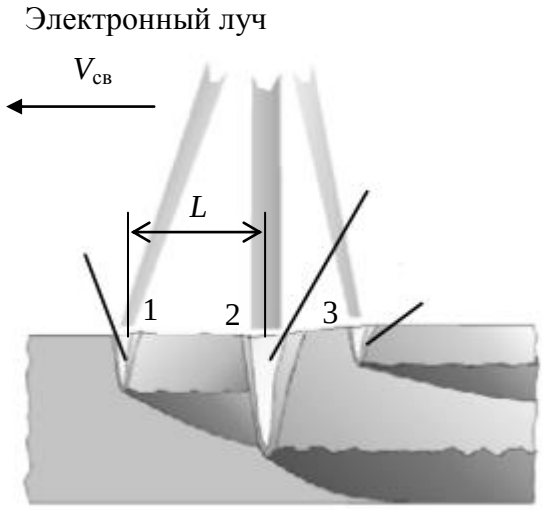


Рисунок 4.1 – Динамическое позиционирование электронного луча с расщеплением и образованием трех парогазовых каналов

Близость парогазовых каналов, формируемых расщепленным электронным лучом, приводит к изменению термического цикла сварки, который существенно отличается от термического цикла электронно-лучевой сварки статическим лучом. Кроме того, в этом процессе происходит дополнительный переплав металла шва последующим тепловым источником. Это факт расширяет технологические возможности сварки материалов, при электронно-лучевой сварке которых не всегда удается получить качественное сварное соединение.

Одним из таких материалов, при электронно-лучевой сварке которого возникает ряд проблем, являются алюминий и сплавы на его основе [143-146]. Основной проблемой, возникающей при сварке изделий большой толщины, является образование пор в сварном шве и несплавлений в центральной части сварного шва. Образование пор обусловлено, как специфическими особенностями

электронно-лучевой сварки (наличием вакуума, высокой удельной плотности энергии, испарением металла в парогазовом канале), так и теплофизическими характеристиками алюминиевых сплавов (низкой температурой плавления, высокой теплопроводностью, наличием на поверхности тугоплавкой оксидной пленки). Их сочетание создает благоприятные условия для образования пор в сварном шве, появлению которых способствуют: глубокая и узкая сварочная ванна, малое время пребывания сварочной ванны в жидком состоянии, высокие температурные градиенты, большая скорость кристаллизации. Все это затрудняет перемещение газовых пузырьков в сварочной ванне, и приводит к неполной ее дегазации. Для снижения вероятности образования дефектов в сварном шве электронно-лучевую сварку в ряде случаев осуществляют в несколько проходов, что обеспечивает дополнительный подогрев свариваемого метала.

При использовании динамического расщепления электронного луча на несколько концентрированных тепловых источников при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов существенно повышается вероятность обеднения металла сварного шва легкоиспаряемыми легирующими элементами. В соответствии с этим, важным является исследование влияния параметров динамического расщепления электронного луча при сварке алюминиевых сплавов на геометрию сварных швов и их химический состав.

4.1. Построение матрицы с планом проведения экспериментов

В связи с тем, что технология динамического расщепления электронного луча при сварке алюминиевого сплава АМг-6 используется впервые, и данные об оптимальных режимах сварки, обеспечивающих получение качественных сварных швов, отсутствуют, на первом этапе исследований были определены оптимальные параметры режима электронно-лучевой сварки при динамическом расщеплении электронного луча.

Проходы расщепленным электронным лучом выполнялись на электронно-лучевой установке с энергетическим агрегатом ЭЛА-6ВЧ производства фирмы

«SELMI» (Украина). Для обеспечения высоких скоростей отклонения электронного луча при его динамическом позиционировании на электронную пушку была установлена дополнительная низкоиндуктивная отклоняющая система, которая подключались к двухканальному широкополосному усилителю тока с верхней границей полосы пропускания более 200 кГц. На вход этого усилителя через внешний цифроаналоговый интерфейс подавались сигналы с компьютера, работающего под управлением специально разработанной программы (рис. 2.9) и обеспечивающего заданные пространственно-временные характеристики теплового воздействия расщепленного электронного луча на свариваемые образцы.

Параметры сварки (скорость сварки, распределение энергии в луче, расстояние между расщепленными лучами) варьировались в соответствие с матрицей планирования эксперимента. После выполнения сварочных проходов были изготовлены поперечные макрошлифы зон проплавления.

Факторные планы широко используются в экспериментах с несколькими факторами, когда необходимо проанализировать их совместное воздействие на отклик. В данном исследовании – k факторов с тремя уровнями каждый, называемый факторным планом типа 3^k. Без потери общности три уровня факторов можно назвать нижним, промежуточными и верхним, обозначив их цифрами 0,1 и 2. [132-135].

Таким образом, в качестве плана реализации эксперимента выбран некомпозиционный план с частичным смешиванием второго порядка для 6 факторов, варьируемых на 3-х уровнях. При составлении матрицы планирования эксперимента были выбраны следующие факторы: I – сила тока электронного луча; V – скорость сварки; L – расстояние между близлежащими точками; t_1, t_2, t_3 – время воздействия электронного луча в каждой точке. Частота, в данном случае, зависит от суммарного времени воздействия электронного луча в трех точках, и определяется как $F = 1/(t_1+t_2+t_3)$. Время воздействия луча в каждой точке определялось исходя из схем воздействий электронного луча на обрабатываемый

материал. Кодированные и натуральные значения факторов для трехуровневого эксперимента представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения факторов трех уровневого эксперимента

№	Факторы	Значения фактора	
		кодированные	натуральные
1	Сила тока электронного луча	0 1 2	40 мА 60 мА 80 мА
2	Скорость сварки	0 1 2	5 мм/с 7,5 мм/с 10 мм/с
3	Расстояние между близлежащими токами	0 1 2	2 мм 3,5 мм 5 мм
4	Время воздействия электронного луча в каждой точке	0 1 2	40 μс 80 μс 120 μс

Кодированные значения были использованы для составления матрицы эксперимента, в которой варьировались все 6 факторов по 3 уровням. В соответствии с полученной матрицей была произведена электронно-лучевая сварка динамически расщепленным электронным лучом серии экспериментальных образцов.

4.2. Металлографический анализ сварных соединений

Металлографический анализ сварных соединений проводился на образцах, вырезанных из поперечного сечения сварных швов.

Макроструктурные исследования показали, что в зависимости от варьирования различных параметров электронно-лучевой сварки с расщеплением электронного луча возможно получения разнообразной формы поперечного сечения швов (рис. 4.3). Внешнее отличие сварных швов заключается в ширине, глубине шва и характере формирования верхней и корневой части шва.

Некоторые образцы имеют типичную для электронно-лучевой сварки «кинжальную» форму сварного шва. На некоторых наблюдается увеличение размеров расширенной верхней части, также, есть швы, имеющие конусообразную форму.

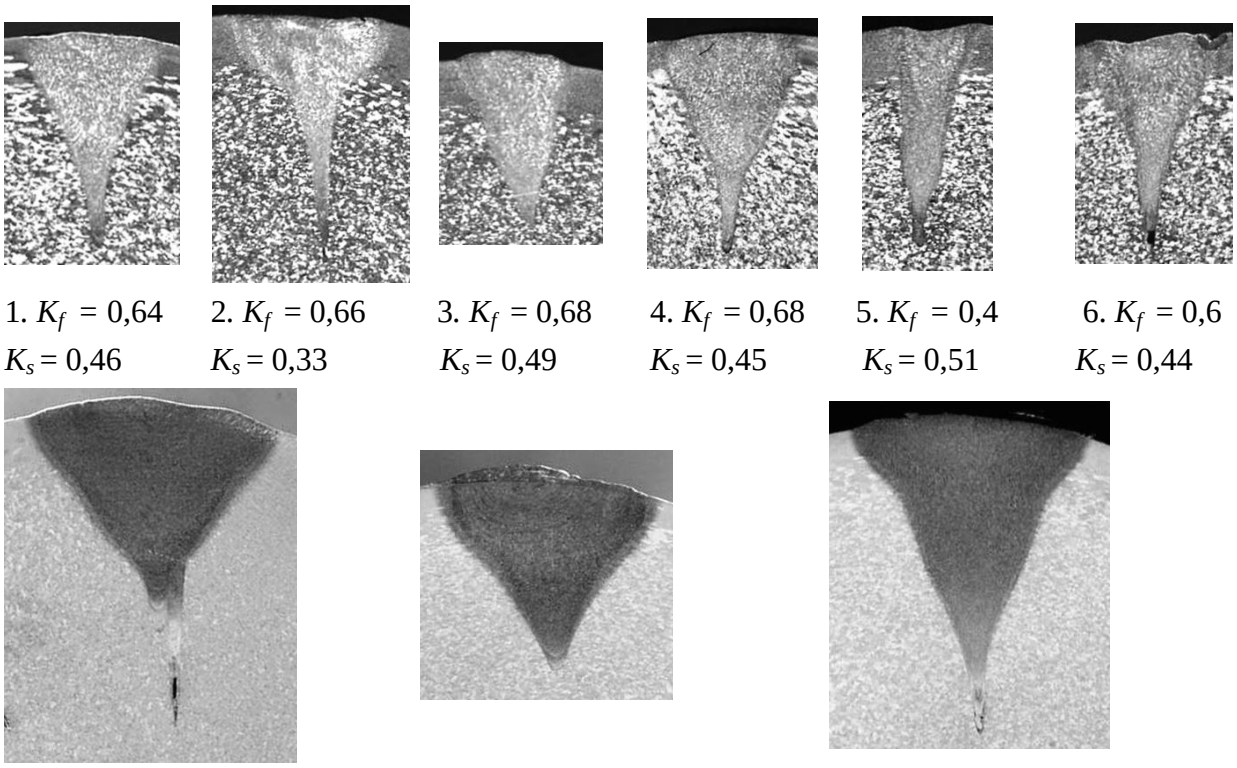
Эксперименты показали, что в сварных швах, где формируется узкая корневая часть, наблюдается наличие пор и несплавлений. В швах, у которых корень имеет более скругленную форму, дефекты отсутствуют.

Для количественного описания формы сварного шва были определены коэффициент формы K_f и коэффициент полноты проплавления K_s:

$$K_f = B/H, \tag{4.1}$$

$$K_S = S/(B \cdot H), \tag{4.2}$$

где B – ширина сварного шва; H – глубина сварного шва; S – площадь сварного шва.



1. K_f = 0,64 K_s = 0,46
2. K_f = 0,66 K_s = 0,33
3. K_f = 0,68 K_s = 0,49
4. K_f = 0,68 K_s = 0,45
5. K_f = 0,4 K_s = 0,51
6. K_f = 0,6 K_s = 0,44
7. K_f = 0,8 K_s = 0,36
8. K_f = 1,14 K_s = 0,52
9. K_f = 0,75 K_s = 0,4

Рисунок 4.3 – Макрошлифы поперечного сечения швов с различной формой

При сопоставлении формы сварных швов и наличия дефектов с рассчитанными коэффициентами установлено, что бездефектные сварные швы имеют K_f~0,7 и K_s~0,5, например, образец под номером 3 на рисунке 4.3.

4.3. Построение математических моделей, связывающих параметры расщепления луча при электронно-лучевой сварке с геометрией сварного шва

Для получения математических моделей, описывающих влияние параметров расщепления луча при электронно-лучевой сварке на геометрические характеристики сварных швов сплава АМг6, был проведен дисперсионный анализ матрицы планирования эксперимента и четырех основных выходных параметров – параметров оптимизации *Y*: глубина сварного шва *H*, ширина шва в верхней части *B*, коэффициент формы проплавления K_f, коэффициент полноты проплавления K_s. В результате проведенного анализа были определены уравнения регрессии второго порядка.

Учитывая, что динамически расщепленный электронный луч в каждой точке воздействия имеет постоянную мощность, а изменяется только его время воздействия, количество теплоты, выделяемое в данном канале проплавления в данный момент времени, определяется по выражению:

$$q_i = U \cdot I \cdot t_i, \tag{4.3}$$

где *U* – ускоряющее напряжение, кВ; *I* – ток электронного луча, мА; t_i – время воздействия электронного луча в точке, μсек.

Принимая во внимание, что ускоряющее напряжение при сварке остается неизменным (в данном случае 60 кВ), было принято решение, что при составлении уравнений регрессии необходимо ввести обобщенный фактор, учитывающий количество электричества в каждом парогазовом канале:

$$Q_i = I_л \cdot t_i\,. \tag{4.4}$$

Таким образом, факторами при определении уравнений регрессии стали: V – скорость сварки; L – расстояние между близлежащими точками; Q_1, Q_2, Q_3 – количество электричества в 1, 2 и 3 парогазовом канале, соответственно. Это позволило уменьшить количество факторов (с 6 до 5) и число коэффициентов уравнений при определении регрессионных зависимостей.

В общем виде математическая модель представляет собой полином второй степени, позволяющий определить влияние не только каждого фактора отдельно на параметр оптимизации, но и их совместное влияние [132-135]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{1 \le i \le k} \beta_i x_i + \sum_{1 \le i < j \le k} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \le i \le k} \beta_{ii} x_i^2 + \cdots \qquad (4.5)$$

где Y – параметр оптимизации, $\beta_0, \beta_j, \beta_{ij}$ – коэффициенты регрессии, x_i, x_j – значения факторов.

Вычисление коэффициентов уравнений регрессии производилось с помощью программного пакета Mathcad. При помощи функции *F=polyfitstat (X,Y,n,conf)* выводится матрица, которая предоставляет статистический анализ многомерной полиномиальной регрессии (дисперсионный анализ, коэффициенты регрессии, стандартные ошибки коэффициентов регрессии, T–статистику для них, статистику Дарбина-Ватсона). Где X – матрица, в которой каждый столбец представляет собой независимую переменную; Y – матрица с изменяемыми результатами в каждой строке; N – число, определяющее порядок полинома; *conf* – доверительный интервал, определяемый коэффициенты регрессии.

Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии производится с помощью критерия Стьюдента, с учётом погрешности α=10 %, по выражению:

$$t_{\text{р}} = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}}, \qquad (4.6.)$$

где $S(b_i)$ – средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов регрессии;

$$S(b_i) = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}}, \qquad (4.7)$$

где N – число строк или опытов в матрице планирования; S_y^2 – дисперсия воспроизводимости, определяемая выражением:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{n=1}^{n}(y_u - y_{\text{ср}})^2}{n_0 - 1}, \tag{4.8}$$

где n_0 – число параллельных опытов в нулевой точке; y_u – значение параметра оптимизации на u–м опыте; $y_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в n_0 параллельных опытах.

Значение $t_{\text{р}}$ сравнивают с табличным $t_{\text{т}}$. Коэффициент значим, если $t_{\text{р}}$>$t_{\text{т}}$. Критерий Стьюдента t вычисляется для каждого коэффициента регрессии. Статически незначимые коэффициенты исключаются.

После определения значимых коэффициентов создается повторная матрица, для коэффициентов которой проводится повторная проверка по критерию Стьюдента. Если все коэффициенты значимы, то проверяем адекватность модели по F-критерию Фишера.

$$F_{\text{р}} = \frac{S_a^2}{S_y^2}, \tag{4.9}$$

$$S_a^2 = \frac{1}{N-(k+1)} \sum_{j=1}^{N} (y_j + y_{\text{ср}j})^2, \tag{4.10}$$

где S_a^2 – дисперсия адекватности; y_j – значение параметра оптимизации в j – ом опыте; $y_{\text{ср}j}$ – значение параметра оптимизации, вычисленное по модели для условий j – ого опыта; f – число степеней свободы $f = N - (k + 1)$, где k – число факторов.

Полученная величина $F_{\text{р}}$ сравнивается с табличной величиной F-критерия. Таким образом, можно дать оценку адекватности модели: если рассчитанное значение F-критерия не превышает F-табличного для выбранного уровня значимости, то есть когда $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$, то модель считают адекватной [135].

На основе расчёта коэффициентов регрессии получены следующие уравнения, адекватно описывающее процесс влияния параметров расщепления

луча при электронно-лучевой сварке на геометрические характеристики сварных швов сплава АМг6:

$$H = -12{,}117 + 2{,}827 \cdot L - 3{,}039 \cdot W_1/k + 7{,}015 \cdot W_2/k +$$
$$+2{,}125 \cdot W_3/k + 0{,}25 \cdot V \cdot W_1/k - 0{,}813 \cdot L \cdot W_2/k -$$
$$-0{,}452 \cdot L \cdot W_3/k - 0{,}043 \cdot V^2 + 0{,}119 \cdot {W_2}^2/k - 0{,}127 \cdot {W_3}^2/k \quad (4.11)$$

$$B = 0{,}016 - 1{,}732 \cdot V + 0{,}609 \cdot L - 0{,}789 \cdot W_1/k +$$
$$+4{,}974 \cdot W_2/k - 0{,}152 \cdot W_3/k + 0{,}197 \cdot L \cdot W_1/k -$$
$$-0{,}696 \cdot L \cdot W_2/k + 0{,}099 \cdot V^2 + 0{,}158 \cdot L^2 \quad (4.12)$$

$$K_f = 0{,}678 - 0{,}142 \cdot L + 0{,}197 \cdot W_1/k - 0{,}013 \cdot V \cdot W_1/k +$$
$$+0{,}022 \cdot L \cdot \frac{W_1}{k} - 0{,}013 \cdot L \cdot \frac{W_2}{k} + 7{,}589 \cdot 10^{-3} \cdot L \cdot \frac{W_3}{k} +$$
$$+0{,}025 \cdot L^2 - 0{,}019 \cdot {W_1}^2/k \quad (4.13)$$

$$K_s = 0{,}37 + 0{,}047 \cdot \frac{W_1}{k} - 4{,}891 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot L + 0{,}011 \cdot L \cdot \frac{W_1}{k} - 0{,}011 \cdot L \cdot \frac{W_2}{k}$$
$$+ 0{,}02 \cdot L \cdot \frac{W_3}{k} + 1{,}126 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 - 9{,}682 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{{W_1}^2}{k} -$$
$$-6.48 \cdot 10^{-3} \cdot {W_3}^2/k \quad (4.14)$$

Так же, был выполнен расчет коэффициента корреляции и среднеквадратичной ошибки для геометрических характеристик шва, рассчитанных для данных моделей (табл. 4.2).

Анализ полученных уравнений показал, что наибольшие влияние на размеры сварного шва (глубину и ширину в верхней части) оказывает время воздействия электронного луча в формируемых при расщеплении луча каналах проплавления. При этом, наиболее существенно влияет время воздействия во втором канале (набольший коэффициент при Q_2 в уравнениях 4.11 и 4.12).

Таблица 4.2 – Значения ошибки для геометрических характеристик шва, рассчитанных по построенной модели

	Геометрические характеристики шва			
	H	B	K_f	K_s
Коэффициент корреляции	0,972	0,988	0,914	0,936
Средняя квадратичная ошибка	0,628 мм	0,334 мм	0,078	0,033

Анализ полученных уравнений показал, что наибольшие влияние на размеры сварного шва (глубину и ширину в верхней части) оказывает время воздействия электронного луча в парогазовых каналах. При этом, наиболее существенно влияет время воздействия во втором канале (набольший коэффициент при Q_2 в уравнениях 4.11 и 4.12). Так, для получения наибольшей глубины проплавления время воздействия электронного луча во втором канале должно быть значительно больше, чем в первом. Знак «-» перед коэффициентом Q_1 показывает, что увеличение времени воздействия луча в первом канале относительно второго и третьего, приводит к уменьшению глубины проплавления. Ширина шва в верхней части так же определяется, в большей степени, временем воздействия луча во втором канале.

С целью исследования влияния параметров расщепления луча при электронно-лучевой сварке на геометрические характеристики сварных швов по полученным уравнениям 4.11 – 4.14, были построены графические зависимости изменения H, B, K_f и K_s от тока луча, скорости сварки и расстояния между точками для различных схем воздействия луча (время воздействия в каждом канале). При составлении схем воздействия электронного луча использовались следующие условные обозначения: цифре **1** соответствует время воздействие луча в точке 40 μс, цифре **2** – 80 μс, цифре **3** – 120 μс.

С учетом проведенного анализа уравнений были рассмотрены следующие схемы сканирования электронного луча:

1-2-1; 1-2-2; 2-2-1; 1-2-3; 1-3-2; 2-3-1; 3-2-1.

На рис. 4.4 приведены результаты исследования влияния параметров режима и характеристик расщепленного электронного луча на глубину сварного шва. Было установлено, что увеличение тока луча приводит к значительному увеличению глубины проплавления (рис. 4.4, а). При этом динамика увеличения зависит от схемы воздействия электронного луча. Наибольшая глубина проплавления достигается при схемах расщепления луча 1-3-2 и 2-3-1, когда время действия луча во втором канале проплавления максимальное, а наименьшая глубина проплавления была получена при схеме расщепления луча 3-2-1.

Изменение скорости сварки в пределах от 5 до 10 мм/с приводит к незначительному уменьшению глубины сварного шва практически для всех схем расщепления электронного луча (рис. 4.4, б). В тех случаях, когда время действия луча в первом канале больше, чем во втором (3-2-1) или они одинаковы (2-2-1), увеличение скорости сварки приводит к незначительному повышению глубины шва.

Увеличение расстояния между расщепленными лучами снижает глубину сварных швов при всех схемах расщепления (рис. 4.4, в). На ширину сварного шва в верхней части значительно влияет схема расщепления луча. Наибольшая ширина достигается, когда время воздействия луча во втором канале максимально (1-3-2 и 2-3-1). В остальных случаях схема расщепления электронного пука практически не оказывает влияние на ширину проплавления (рис. 4.5).

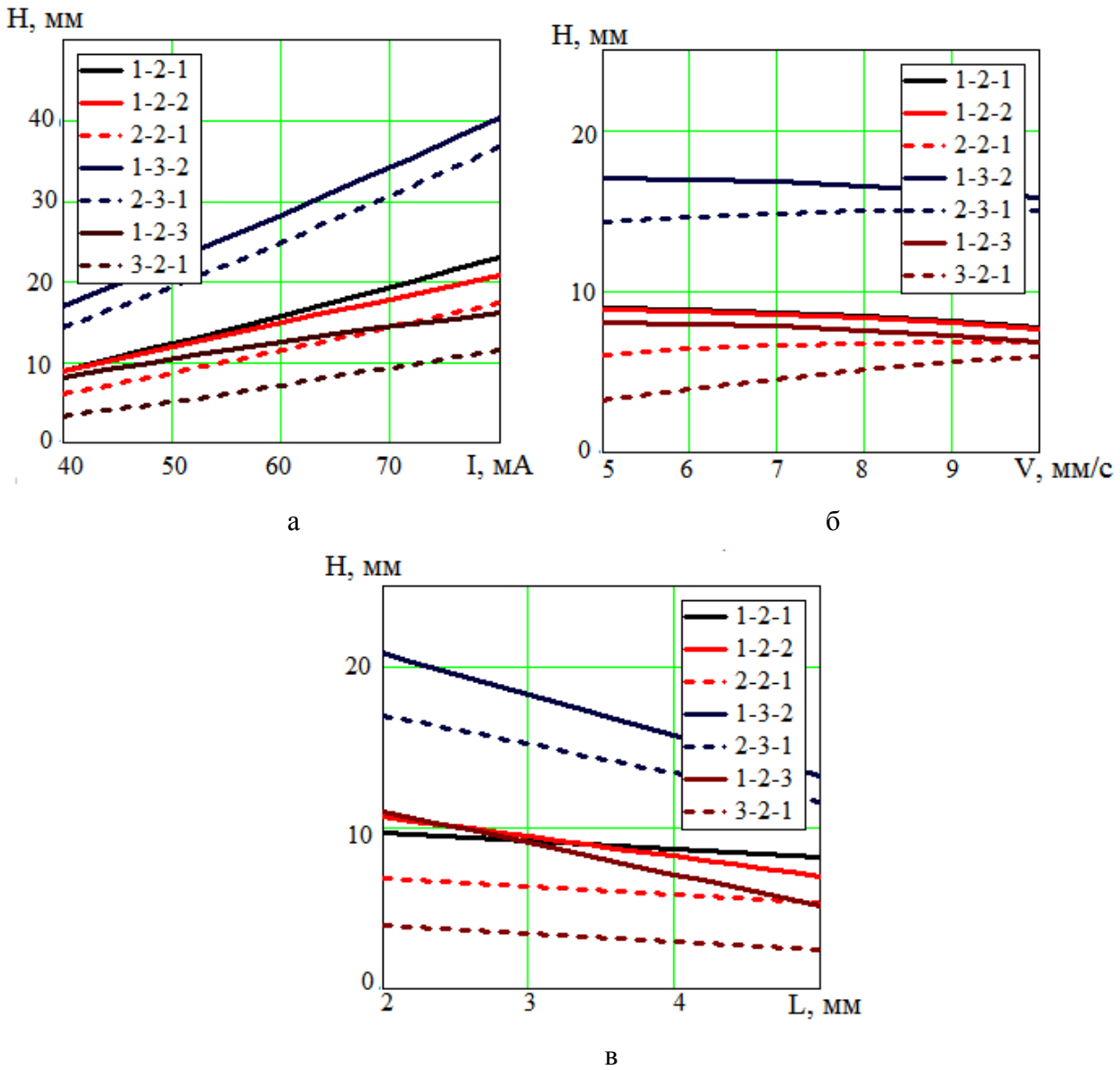


Рисунок 4.4 – Влияние параметров расщепления луча при электронно-лучевой сварке на глубину сварного шва: а – влияние силы тока луча, при V = 5 мм/с и L = 3,5 мм; б – влияние скорости сварки, при I = 40 мА и L = 3,5 мм; в – влияние расстояния между лучами при I = 40 мА и V = 5 мм/с

Увеличение тока луча приводит к увеличению ширины сварного шва (рис. 4.5, а). Увеличение скорости сварки до 8 мм/с приводит к небольшому уменьшению ширины шва, а при дальнейшем повышении скорости ширина не меняется (рис. 4.5, б). Увеличение расстояния между расщепленными лучами приводит к уменьшению ширины шва, особенно сильно при схемах расщепления

луча 1-3-2 и 2-3-1, незначительно при схемах – 1-2-1; 1-2-2; 1-2-3 и несколько увеличивается при схемах расщепления – 2-2-1, 3-2-1.

Влияние параметров режима и характеристик расщепления луча на коэффициент формы и полноты сварного шва заключается в следующем. Ток луча оказывает неоднозначное влияние на коэффициент формы проплавления (рис.4.6, а). В зависимости от схемы расщепления луча может наблюдаться как увеличение значения K_f, так и уменьшение (3-2-1).

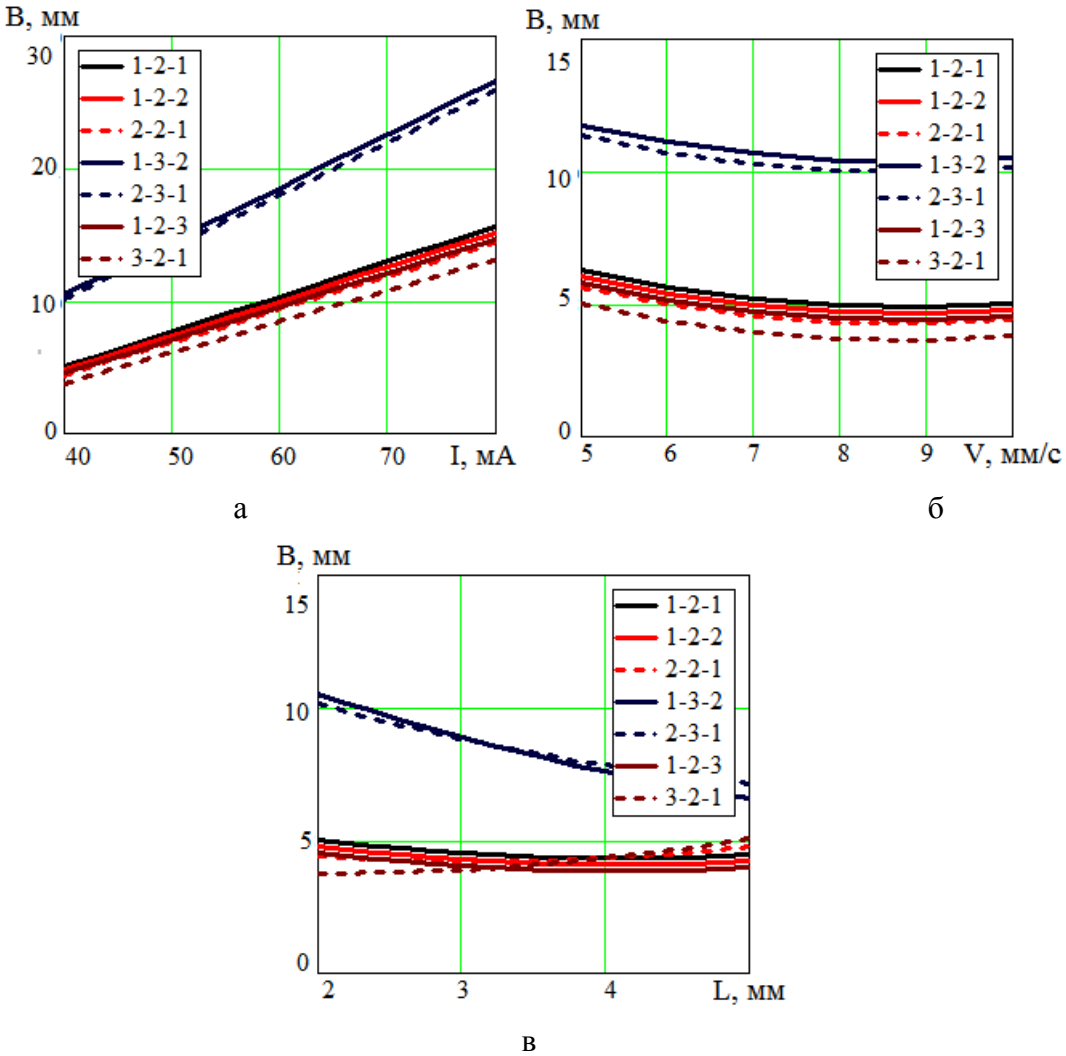


Рисунок 4.5 – Влияние параметров расщепления луча при электронно-лучевой сварке на ширину сварного шва в верхней части: а – влияние силы тока луча, при V = 7,5 мм/с и L = 2 мм; б – влияние скорости сварки, при I = 40 мА и L = 2 мм; в – влияние расстояния между лучами при I = 40 мА и V = 7,5 мм/с

Повышение скорости сварки во всех случаях приводит к уменьшению коэффициента формы проплавления, характер уменьшения зависит так же от схемы расщепления луча (рис. 4.6, б). Увеличение расстояния между элементами расщепленного луча, в целом, повышает K_f (рис. 4.6, в).

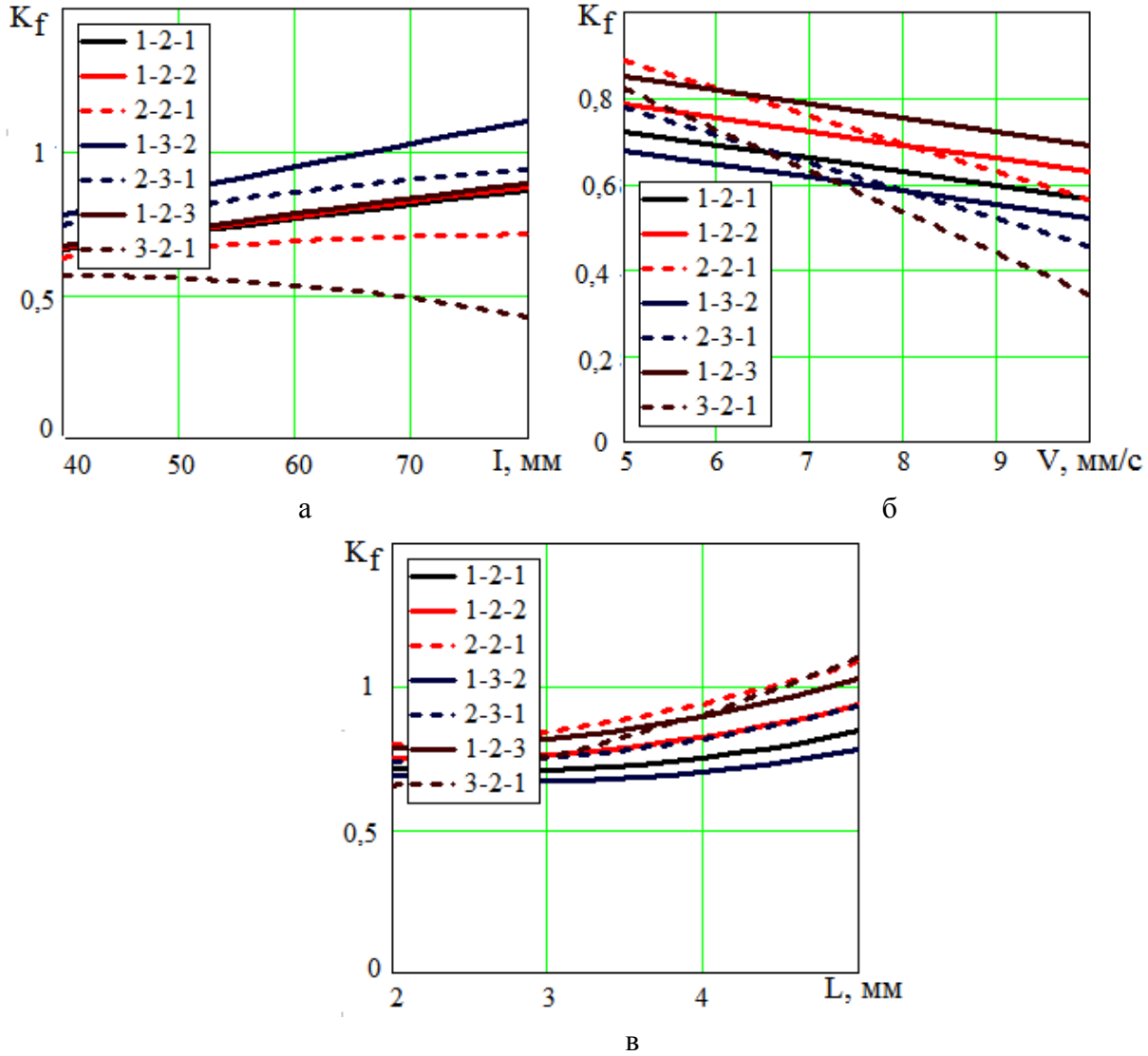
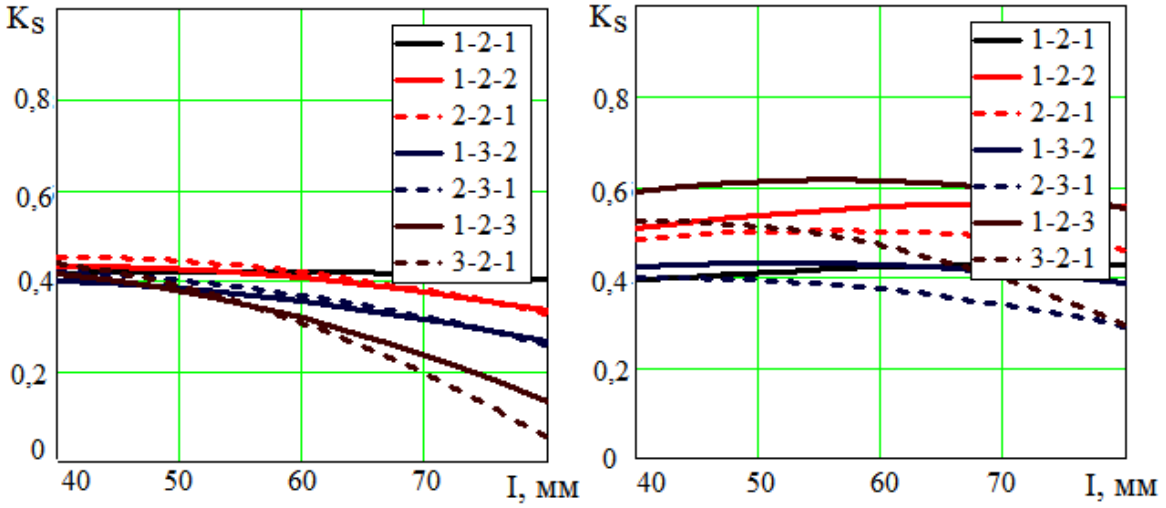
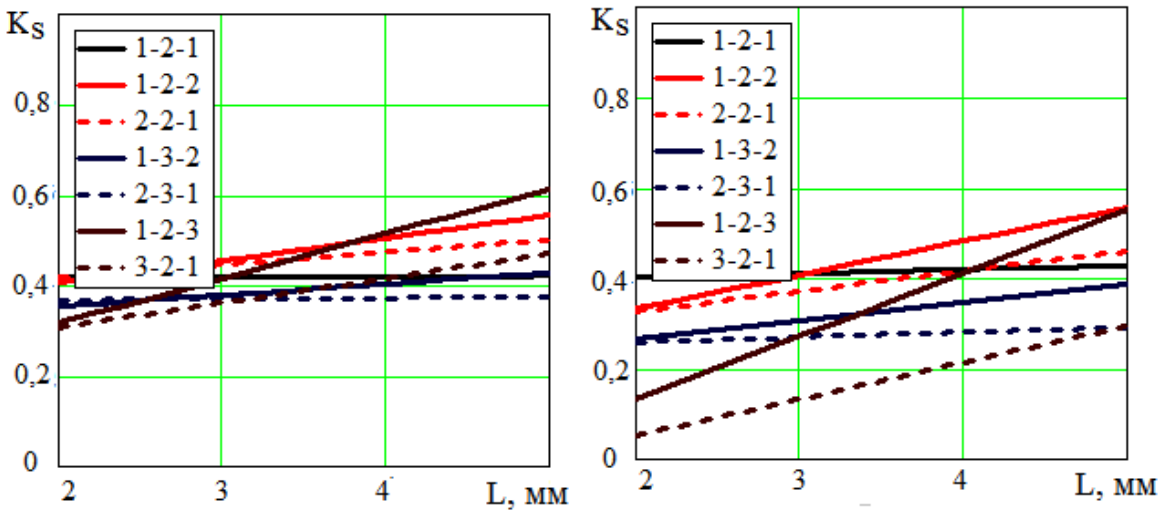


Рисунок 4.6 – Влияние параметров расщепления луча при электронно-лучевой сварке на коэффициент формы проплавления части: а – влияние силы тока луча, при V = 5 мм/с и L = 3,5 мм; б – влияние скорости сварки, при I = 60 мА и L = 3,5 мм; в – влияние расстояния между лучами при I = 60 мА и V = 5 мм/с



а б

Рисунок 4.7 – Влияние тока луча при электронно-лучевой сварке с расщепления луча на коэффициент полноты проплавления части при V = 5 мм/с: а – L = 2мм; б –L = 5 мм



а б

Рисунок 4.9 – Влияние расстояния между расщепленными пуками при ЭЛС с расщепления луча на коэффициент полноты проплавления части при V = 5 мм/с: а – I = 60 мА; б – I = 80 мА

Коэффициент полноты проплавления более сложно зависит от параметров расщепления луча. Если изменение скорости сварки при прочих равных параметрах не влияет на K_s, то влияние схемы расщепления электронного луча, тока луча и расстояние между расщепленными лучами нужно рассматривать при

их совместном взаимодействии. На рис. 4.7 и рис. 4.8 приведены отдельные примеры влияния этих параметров на коэффициент полноты проплавления.

4.4. Определение оптимальных режимов электронно-лучевой сварки алюминиевого сплава с расщеплением электронного луча

4.4.1. Оптимизация процесса электронно-лучевой сварки с расщеплением луча с применением шкалы желательности

Множество оптимизационных задач в сварочных технологиях формулируется как задачи многокритериальные. В данном исследовании предполагалось определить условия, обеспечивающие бездефектное образование сварного шва и провести анализ влияния определённых параметров сварки на геометрию шва. Сравнение нескольких показателей, имеющих разные единицы измерения, затрудняет выбор наилучшего сочетания из опытных данных [137].

Одним из вариантов «свертки» критериев при решении многокритериальных задач оптимизации, позволяющим избежать вычислительных трудностей, является функция желательности, предложенная Харрингтоном.

Функция желательности Харрингтона обладает следующими качествами:

– непрерывностью, гладкостью и монотонностью;

– адекватностью, статистической чувствительностью и эффективностью [135].

Для построения обобщённой функции желательности D предполагается преобразовать измеренные значения критериев y в безразмерную шкалу желательности d. Шкала желательности, в которую преобразуются значения частных критериев, является безразмерной шкалой. Она устанавливает соответствие между натуральными значениями критериев шкал и параметрами – субъективными оценками желательности того или иного значения

соответствующего критерия. Шкала устроена так, что более предпочтительному значению критерия соответствует большее значение желательности.

В основе построения обобщенной функции лежит идея преобразования полученных значений в различных единицах измерения в безразмерную шкалу желательности. Для перевода значений критерия в шкалу желательности множество значений каждого критерия разделяется на подмножества, относительно которых можно сказать, что качество объекта на каждом из них близко к оценке «хорошо», «удовлетворительно», «плохо» (градаций может быть и больше) [136-137].

Для построения шкалы желательности удобно использовать метод количественных оценок с интервалом значений желательности d от нуля до единицы. Значение d=0 (или D=0) соответствует абсолютно неприемлемому значению критерия, а d=1 (или D=1) – самому лучшему значению, причем дальнейшее улучшение критерия или невозможно, или не представляет интереса [136]. Промежуточные значения желательности и соответствующие им числовые отметки приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Базовые отметки шкалы желательности

Количественная отметка на шкале желательности d	Желательность значения критерия y
0,80-1,00	Очень хорошо
0,63-0,80	Хорошо
0,37-0,63	Удовлетворительно
0,20-0,37	Плохо
0,00-0,20	Очень плохо

Такой выбор числовых отметок объясняется удобством вычислений, поскольку $d=0,6\approx1-1/e$, а $d=0,37\approx1/e$.

Построенная шкала d представляет собой безразмерную шкалу, при помощи которой любой отклик может быть преобразован так, чтоб его можно было интерпретировать в терминах полезности или желательности для любого специфического применения.

Функции желательности могут относиться к одному из двух типов:

1. Часто качество возрастает с увеличением значений признака, но не безгранично (не выше 100%) или, наоборот, при увеличении признака качество снижается (до 0%). Такие зависимости будут названы «односторонними» (рис.29).

2. Иногда отклонения некоторого признака от его оптимального значения (в любую сторону) приводят к снижению качества. Такие зависимости являются «двусторонними» (рис.4.10) [137].

Для односторонних ограничений вида $y < y_{max}$ или $y \geq y_{min}$ более удобной формой преобразования y в d служит экспоненциальная зависимость:

$$d = \exp\left[-\exp\left(-y'\right)\right], \tag{4.15}$$

где d – частная функция желательности, а y' вычисляется по формуле:

$$y' = b_0 + b_1 y', \tag{4.16}$$

Коэффициенты b_0 и $b_1 y'$ можно определить, если задать для двух значений y соответствующие значения желательности, предпочтительно в интервале $0{,}2 < d < 0{,}8$.

Частная функция желательности при одностороннем ограничении имеет вид:

$$d=0,\ y<y_{min},$$

$$d=1,\ y\geq y_{min}$$

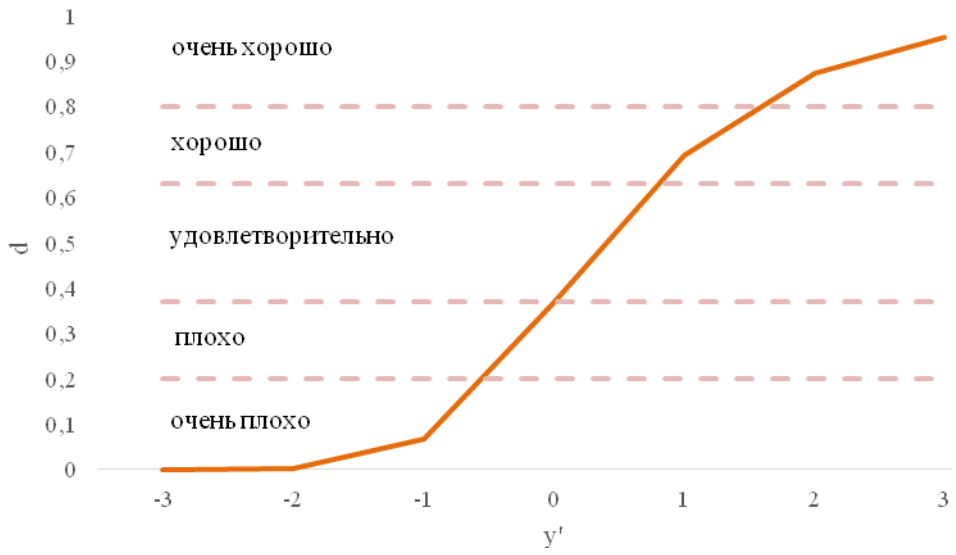


Рисунок 4.10 – Функция желательности для одностороннего ограничения

Если для данного свойства существует двухстороннее ограничение, то:

$$d=0,\ y < y_{min} \text{ и } y > y_{max},$$

$$d=1,\ y_{min} \le y \le y_{min}$$

Преобразование измеренного критерия *y* в шкалу *d* производится при помощи выражения:

$$d = \exp\,(-|y'|)^n, \tag{4.17}$$

где *n* – положительное число, не обязательно целое;

$$y' = \frac{2y-(y_{max}+y_{min})}{y_{max}-y_{min}}, \tag{4.18}$$

Показатель степени *n* можно вычислить, задав измеряемому значению *y* соответствующее значение желательности, предпочтительно в интервале
0,6 < *d* < 0,9, по формуле

$$n = \frac{ln(ln\frac{1}{d})}{ln|y'|}, \tag{4.19}$$

Задавая при помощи контрольной точки крутизну кривой желательности, можно учесть особую важность отдельных критериев, при которых *n* будет иметь большое значение. При этом малому изменению критерия вблизи ограничивающих пределов будет соответствовать резкое изменение желательности. Показатель степени *n* определяет наклон кривой.

Имея несколько критериев, преобразованных в шкалу желательности *d*, можно ввести обобщенный показатель качества процесса и показателей *D* как свертку частных функций желательности [136-137].

$$D = \sqrt[q]{\prod_{i=1}^{q} d_i}, \tag{4.20}$$

$$D = \sqrt[q]{d_1 d_2 .. d_q}, \tag{4.21}$$

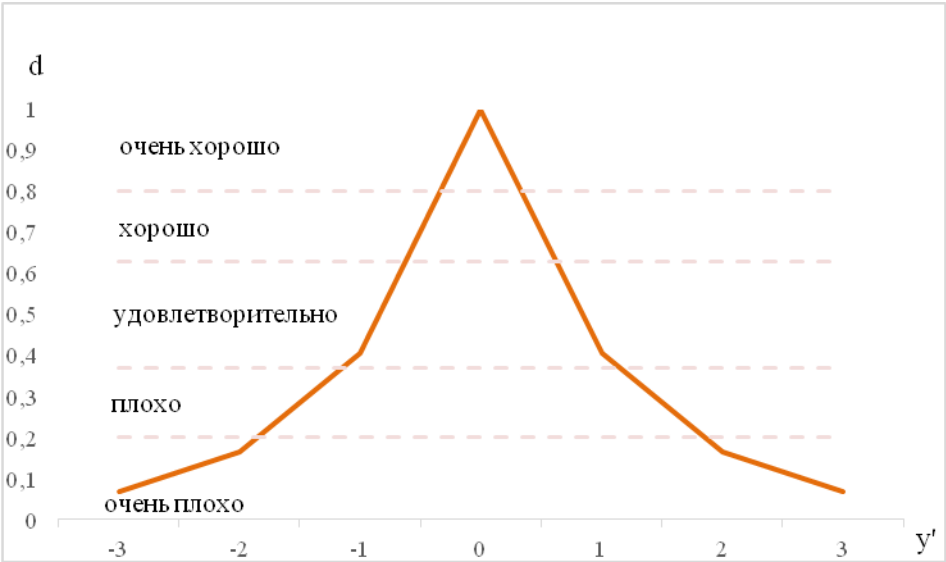


Рисунок 4.11 – Функция желательности для двухстороннего ограничения

Параметрами оптимизации для получения бездефектных швов при электронно-лучевой сварке динамически расщепленным электронным лучом были приняты коэффициент формы проплавления K_f и коэффициент полноты проплавления K_S.

Оценка указанных выше параметров осуществляется при помощи функции желательности $d(y_1)$ и $d(y_2)$, определяющие значимость полученных данных, где y_1 – коэффициент формы проплавления, y_2 – коэффициент полноты проплавления.

Диапазон оптимальных значений:

- для коэффициента формы проплавления $0{,}4 \leq y_1 \leq 1$. При значениях $0{,}4 \geq y_1$ шов будет слишком узким, так же при коэффициенте формы превышающим значение 1 – слишком широкий. Оптимальным значением будем считать коэффициент равный 0,66.

- для коэффициента полноты проплавления $0{,}35 \leq y_2 \leq 0{,}65$. Оптимальным значением будем считать коэффициент равный 0,47.

Функция желательности для двухстороннего ограничения:

$$d = \exp\left(-|y_1{}'|\right)^n, \tag{4.22}$$

$$d = \exp\left(-|y_2{}'|\right)^n, \tag{4.23}$$

Для определения величины $y_1{}'$ и $y_2{}'$ используем указанные ниже выражения:

1. Для коэффициента формы проплавления:

$$y_1{}' = \frac{2y_1 - (y_{1max} + y_{1min})}{y_{1max} - y_{1min}}, \tag{4.24}$$

где y_{1max} и y_{1min} – соответственно максимальное и минимальное значения рассматриваемого коэффициента.

Значение коэффициента n определяется, предварительно задавшись значением функции желательности для некоторого значения коэффициента формы проплавления.

$$n_1 = \frac{ln(ln\frac{1}{d_1})}{ln|y_1{}'|}, \tag{4.25}$$

Пусть для y_1=0,66; d_1(0,66) =0,8, тогда:

$$y_1{}' = \frac{2*0,66-(1+0,4)}{1-0,4} = -0,133; \quad (4.26)$$

$$n_{d_1=0,8}^{y_1{}'=-0,133} = \frac{ln(ln\frac{1}{0,8})}{ln|-0,133|} = 0,744 \quad (4.27)$$

В этом случае функция желательности будет иметь вид:

$$d_1 = \exp\,(-|y_1{}'|)^{0,744}, \quad (4.28)$$

2. Для коэффициента полноты проплавления:

$$y_2{}' = \frac{2y_2-(y_{2max}+y_{2min})}{y_{2max}-y_{2min}}, \quad (4.29)$$

где y_{2max} и y_{2min} – соответственно максимальное и минимальное значения рассматриваемого коэффициента.

Значение коэффициента *n:*

$$n_2 = \frac{ln(ln\frac{1}{d_2})}{ln|y_2{}'|}, \quad (4.30)$$

Пусть для y_2=0,47; d_2(0,7) =0,8, тогда:

$$y_2{}' = \frac{2*0,47-(0,65+0,35)}{0,65-0,35} = -0,2; \quad (4.31)$$

$$n_{d_2=0,8}^{y_2{}'=-0,2} = \frac{ln(ln\frac{1}{0,8})}{ln|-0,2|} = 0,932 \quad (4.32)$$

В этом случае функция желательности будет иметь вид:

$$d_2 = \exp\,(-|y_2{}'|)^{0,932}, \quad (4.33)$$

На основе анализа значений коэффициентов формы и полноты проплавления, полученных в результате экспериментальных исследований при электронно-лучевой сварке алюминиевого сплава АМг6 с динамическим расщеплением электронного луча, с помощью определенных для них функций желательности была составлена таблица (табл. 4.4), показывающая желательность для каждого коэффициента.

Обобщенная функция желательности является количественным, однозначным и универсальным показателем качества исследуемого объекта.

Для определения обобщенной функции использовалась формула:

$$D = \sqrt{d_1 d_2}, \tag{4.34}$$

где d_1 – частная функция желательности для коэффициента формы проплавления,d_2 - частная функция желательности для коэффициента полноты проплавления.

Таблица 4.4 – Экспериментальные данные и расчетные значения желательности

Эксперимент форма	d форма	Эксперимент полнота	d полнота	Обобщенный параметр
0,64	0,74	0,46	0,747	0,74
0,9	0,47	0,41	0,537	0,50
0,95	0,418	0,48	0,858	0,60
0,65	0,768	0,42	0,573	0,66
0,81	0,623	0,45	0,698	0,66
0,71	0,924	0,42	0,573	0,73
0,66	0,8	0,33	0,325	0,51
0,68	0,875	0,49	0,923	0,90
0,68	0,875	0,45	0,698	0,78
0,78	0,688	0,43	0,612	0,65
0,66	0,8	0,54	0,747	0,77
0,62	0,688	0,43	0,612	0,65
0,69	0,924	0,4	0,504	0,68
0,62	0,688	0,37	0,417	0,54
0,8	0,643	0,36	0,392	0,50
0,76	0,74	0,38	0,444	0,57
Эксперимент форма	d форма	Эксперимент полнота	d полнота	Обобщенный параметр
1,14	0,265	0,52	0,858	0,48
1,03	0,342	0,59	0,537	0,43
0,75	0,768	0,4	0,504	0,62
1,01	0,359	0,38	0,444	0,40
0,49	0,464	0,47	0,8	0,61
0,7	1	0,52	0,858	0,93
0,87	0,519	0,46	0,747	0,62
0,7	1	0,38	0,444	0,67
0,8	0,643	0,44	0,653	0,65
0,68	0,875	0,45	0,698	0,78
0,71	0,924	0,39	0,473	0,66
0,4	0,368	0,51	0,923	0,58
0,6	0,643	0,44	0,653	0,65

очень хорошо
хорошо
удовлетворительно
плохо
очень плохо

Используя функцию желательности Харрингтона возможно построение графика (рис.4.12), позволяющий установить, к какому значению желательности относится выбранный нами эмпирический коэффициент.

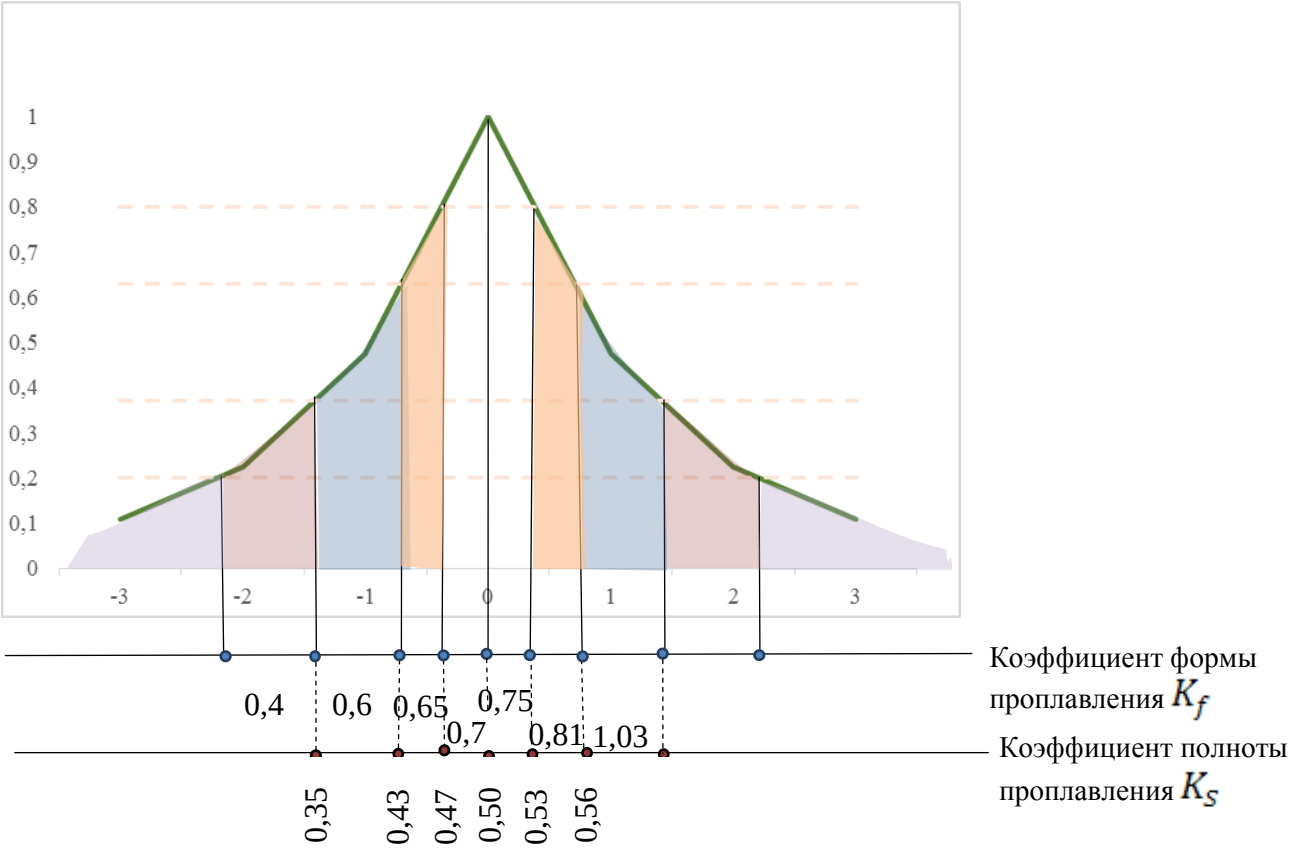


Рисунок 4.12 – Функция желательности Харрингтона для K_f и K_s

При использовании функции желательности Харрингтона не было выявлено коэффициентов, частная и обобщенная функции желательности которых относились к критерию «очень плохо».

Коэффициент формы проплавления:

- удовлетворительно: от 0,4 до 0,6; от 0,81
- хорошо: от 0,6 до 0,65; от 0,75 до 0,81
- очень хорошо: от 0,65 до 0,75

Коэффициент полноты проплавления:

- удовлетворительно: от 0,35 до 0,43
- хорошо: от 0,43 до 0,47; от 0,53 до 0,56
- очень хорошо: от 0,47 до 0,53

Из этого следует, что при электронно-лучевой сварке алюминиевого сплава АМг6 с динамическим расщеплением электронного луча полученные расчетные значения коэффициентов формы и полноты проплавления допустимы.

4.4.2 Определение оптимальных режимов электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов с динамическим расщеплением электронного луча с помощью номограмм

Значения коэффициентов формы и полноты проплавления дают общую характеристику геометрии шва и позволяют обозначить условия получения бездефектных швов. Поэтому оптимальным будет считаться тот режим сварки, при котором каждый из рассчитанных коэффициентов K_f и K_s по уравнениям (4.13 и 4.14) будут входить в диапазон значений «очень хорошо» полученных по шкале желательности: для K_f от 0,65 до 0,75, для K_s от 0,47 до 0,53.

Для определения оптимальных режимов электронно-лучевой сварки с динамическим расщеплением электронного луча можно воспользоваться графическими зависимостями K_f и K_s от скорости сварки и расстояния между расщепленными лучами, построенными в виде изолиний по уравнениям регрессии (4.13 и 4.14) для различных схем расщепления луча. Для анализа использовались те же схемы расщепления электронного луча, что и в п.4.2: 1-2-1; 1-2-2; 2-2-1; 1-2-3; 1-3-2; 2-3-1; 3-2-1. Графические зависимости строились для следующих значений тока луча 40, 60 и 80 мА. Ниже представлен алгоритм построения номограмм для определения оптимальных параметров режима электронно-лучевой сварки с динамическим расщеплением электронного луча.

1. Для выбранной схемы расщепления электронного луча и заданного значения тока луча с использованием пакета MathCad по полученным ранее уравнениям регрессии (4.11 – 4.14) строятся номограммы (графические зависимости в виде изолиний), показывающие изменение коэффициентов

полноты K_S, формы проплавления K_f, глубины и ширина шва от скорости сварки *V* и расстояния между расщепленными лучами *L*.

2. На полученных графиках K_S и K_f (рис. 4.13) выделяются области, значения которой попадают в интервал количественной отметки на шкале желательности *d* = 0,8-1, т.е. «очень хорошо».

K_S: 0,47 – 0,53

K_f: 0,65 – 0,75

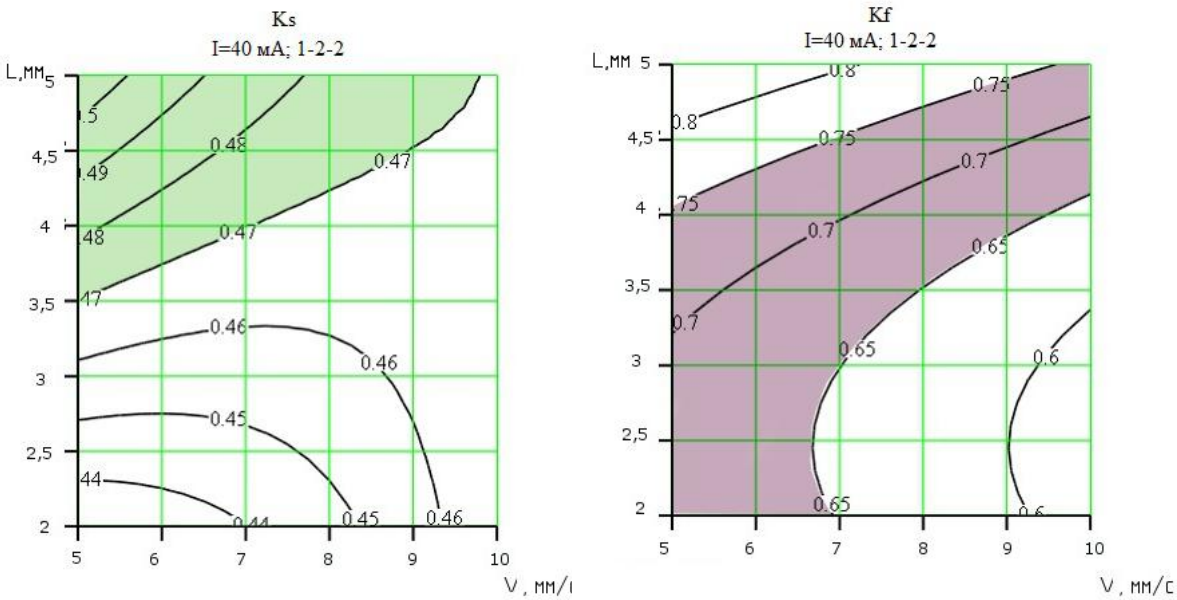


Рисунок 4.13 – Графики с выделенной областью, соответствующей отметке на шкале желательности «очень хорошо»: слева – коэффициент формы проплавления; справа – коэффициент полноты проплавления для схемы расщепления электронного луча 1-2-2 и тока луча 40 мА

3. Производится наложение графиков K_S и K_f друг на друга для определения области пересечения желаемых коэффициентов (рис.4.14), Полученная область показывает, при каких значениях скорости сварки *V* и расстоянии между расщепленными лучами *L*, возможно получение бездефектного шва. Таким образом, определяется обобщенный параметр качества.

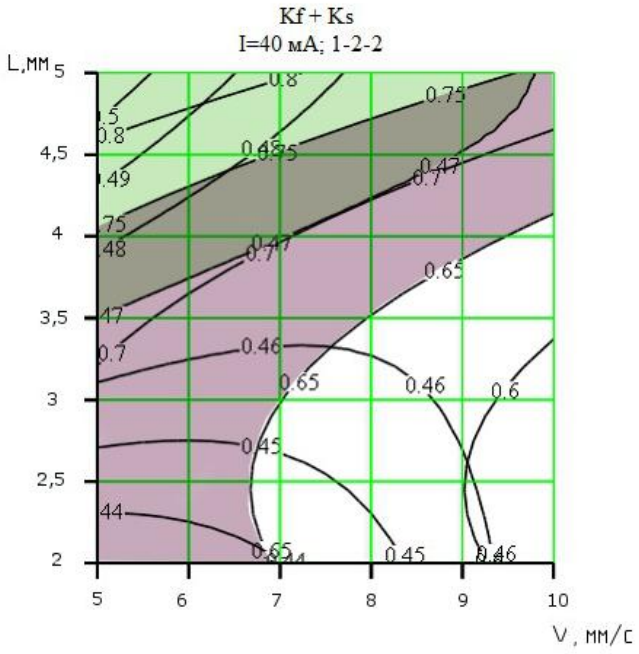


Рисунок 4.14 – Результат наложения графиков K_s и K_f

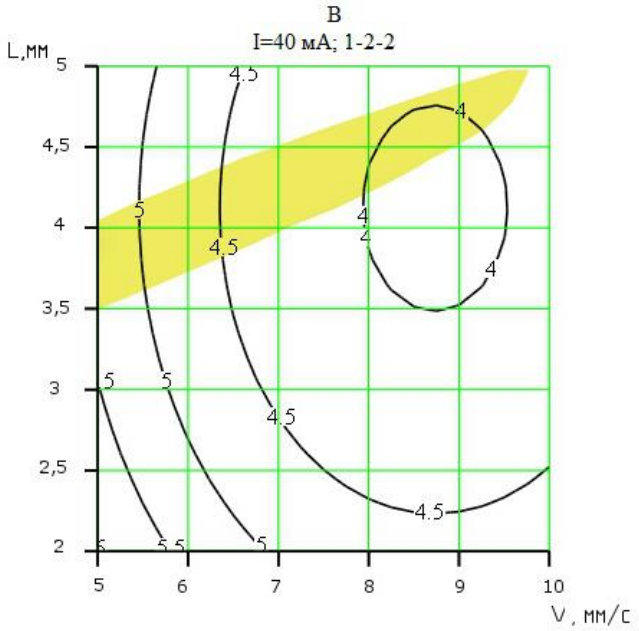
Схемы расщепления электронного луча, на графиках которых не было зафиксировано пересечение, исключались из дальнейшего исследования.

После анализа всех пересечений, остались следующие схемы воздействия электронного луча:

I=40 мА	I=60 мА	I=80 мА
1-2-2	1-2-2	1-2-2
1-2-3	1-2-3	
2-2-1		

4. Обозначенная область пресечения K_s + K_f переносится на построенные графики глубины и ширины шва для выбранной схемы сварки (например, 1-2-2, *I*=40 мА на рис.4.15), По полученным номограммам можно определить режимы сварки для получения бездефектных швов и их геометрические размеры. Например, при скорости сварки *V* = 6 и расстоянии между ближайшими точками *L* = 4,2 получаем сварной шов с глубиной *H* = 8 и шириной *B* = 4,7. Эти значения

находятся в области пересечения графиков K_S + K_f, что указывает на возможность получения бездефектного шва.



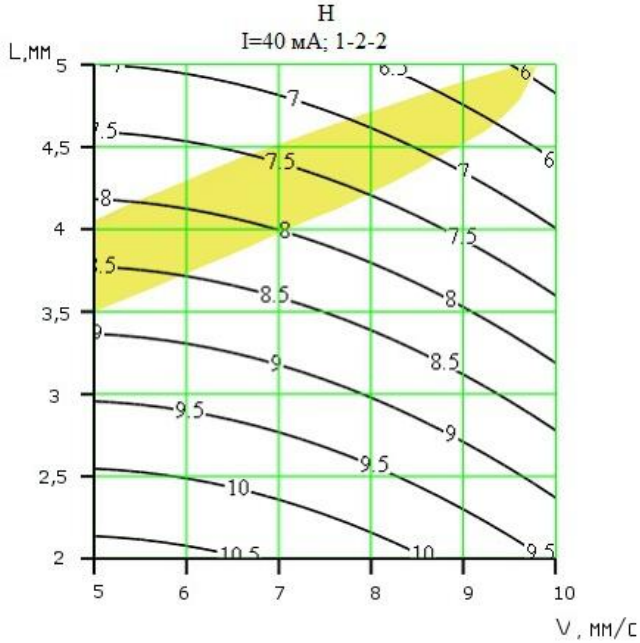


Рисунок 4.15 – Графики глубины и ширины шва при схеме сварки 1-2-2, I = 40мА

4.4.3 Определение оптимальных режимов электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов с расщеплением электронного луча с помощью решения системы уравнений

Часто возникает необходимость получения сварных швов конкретной глубины, однако представленные выше номограммы построены для ограниченных значений тока луча, и могут не иметь данных для заданной толщины сварного соединения.

Для определения режимов сварки для заданной глубины проплавления металла можно воспользоваться решением системы уравнений, включающих уравнения для глубины сварного шва (4.11) и коэффициентов формы (4.13) и полноты проплавления (4.14).

В этих уравнениях H, K_f, K_s приравниваются к необходимым значениям. Например, при H = 10; K_f = 0,7; K_s = 0,5. При данных значениях K_f и K_s наблюдается отсутствие дефектов в сварном шве.

Система уравнений хорошо решается в пакете Mathcad с помощью вычислительного блока *Given – Find*. Перед решением необходимо задать начальные приближенные значения для всех неизвестных. После ключевого слова *Given* вводятся уравнения, входящие в систему. Между левой и правой частями уравнения ставится знак логического равенства. Функция *Find (x,y,z)*, где *x, y, z* - неизвестные, выводит решение в виде вектора. Если система уравнений не имеет точного решения, для приближенного решения существует функция *minerr*.

Таким образом были определены оптимальные параметры режима электронно-лучевой сварки алюминиевого сплава АМг6 с динамическим расщеплением электронного луча для толщин *H* = 10; 5; 4 (табл. 4.5). При необходимости определения ширины шва *B* полученные значения скорости сварки, расстояния между точками и глубины подставляются в соответствующее уравнение регрессии (4.12).

Листинг решения системы уравнений для определения режимов 3-х ванновой электронно-лучевой сварки с динамическим расщеплением луча в пакете Mathcad 15 имеет вид:

$rows(data1) = 12$ $\quad data1 := READPRN("H3.prn")$ $\quad data2 := READPRN("Ks3.prn")$ $\quad rows(data2) = 10$

$data3 := READPRN("Kf3.prn")$ $\quad rows(data3) = 10$

$$A := \begin{pmatrix} data1_1 \\ data1_2 \\ data1_3 \\ data1_4 \\ data1_5 \\ data1_6 \\ data1_7 \\ data1_8 \\ data1_9 \\ data1_{10} \\ data1_{11} \end{pmatrix}$$

A =

	0
0	-12.12
1	2.827
2	-3.039
3	7.015
4	2.125
5	0.25
6	-0.813
7	-0.452
8	-0.043
9	0.119
10	-0.127

$$C := \begin{pmatrix} data3_1 \\ data3_2 \\ data3_3 \\ data3_4 \\ data3_5 \\ data3_6 \\ data3_7 \\ data3_8 \\ data3_9 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 0.678 \\ -0.142 \\ 0.197 \\ -0.013 \\ 0.022 \\ -0.013 \\ 7.589 \times 10^{-3} \\ 0.025 \\ -0.019 \end{pmatrix} \quad D := \begin{pmatrix} data2_1 \\ data2_2 \\ data2_3 \\ data2_4 \\ data2_5 \\ data2_6 \\ data2_7 \\ data2_8 \\ data2_9 \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} 0.37 \\ 0.047 \\ -4.891 \times 10^{-3} \\ 0.011 \\ -0.011 \\ 0.02 \\ 1.126 \times 10^{-3} \\ -9.682 \times 10^{-3} \\ -6.48 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$T1 := 40 \quad T2 := 80 \quad T3 := 120$

<u>Схема 1-2-2</u>

Given

$i := 55 \cdot 10^{-3} \quad v := 10.3 \quad l := 4.51 \quad T1 := 40 \quad T2 := 80 \quad T3 := 120$

$q1 := i \cdot T1 \quad q2 := i \cdot T2 \quad q3 := i \cdot T2$

$$H := A_0 + A_1 \cdot l + A_2 \cdot q1 + A_3 \cdot q2 + A_4 \cdot q3 + A_5 \cdot v \cdot q1 + A_6 \cdot l \cdot q2 + A_7 \cdot l \cdot q3 + A_8 \cdot v^2 + A_9 \cdot q2^2 + A_{10} \cdot q3^2 = 10.013$$

$$Ks := D_0 + D_1 \cdot q1 + D_2 \cdot v \cdot l + D_3 \cdot l \cdot q1 + D_4 \cdot l \cdot q2 + D_5 \cdot l \cdot q3 + D_6 \cdot v^2 + D_7 \cdot q1^2 + D_8 \cdot q3^2 = 0.5$$

$$Kf := C_0 + C_1 \cdot l + C_2 \cdot q1 + C_3 \cdot v \cdot q1 + C_4 \cdot l \cdot q1 + C_5 \cdot l \cdot q2 + C_6 \cdot l \cdot q3 + C_7 \cdot l^2 + C_8 \cdot q1^2 = 0.701$$

$$\begin{pmatrix} V \\ L \\ I \end{pmatrix} := Find(v, l, i) \qquad \begin{pmatrix} V \\ L \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.3 \\ 4.51 \\ 0.055 \end{pmatrix}$$

$$I := 55 \cdot 10^{-3}$$

$$T1 := 40 \qquad T2 := 80 \qquad T3 := 120$$

$$Q1 := I \cdot T1 \quad Q2 := I \cdot T2 \quad Q3 := I \cdot T2 \qquad V := 10.3 \quad L := 4.51$$

Given

$$H \quad A_0 + A_1 \cdot L + A_2 \cdot Q1 + A_3 \cdot Q2 + A_4 \cdot Q3 + A_5 \cdot V \cdot Q1 + A_6 \cdot L \cdot Q2 + A_7 \cdot L \cdot Q3 + A_8 \cdot V^2 + A_9 \cdot Q2^2 + A_{10} \cdot Q3^2 = 10$$

$$Ks \quad D_0 + D_1 \cdot Q1 + D_2 \cdot V \cdot L + D_3 \cdot L \cdot Q1 + D_4 \cdot L \cdot Q2 + D_5 \cdot L \cdot Q3 + D_6 \cdot V^2 + D_7 \cdot Q1^2 + D_8 \cdot Q3^2 = 0.5$$

$$Kf \quad C_0 + C_1 \cdot L + C_2 \cdot Q1 + C_3 \cdot V \cdot Q1 + C_4 \cdot L \cdot Q1 + C_5 \cdot L \cdot Q2 + C_6 \cdot L \cdot Q3 + C_7 \cdot L^2 + C_8 \cdot Q1^2 = 0.7$$

$$\begin{pmatrix} v \\ l \\ i \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(V, L, I) \qquad \begin{pmatrix} v \\ l \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.334 \\ 4.511 \\ 0.055 \end{pmatrix}$$

Таблица 4.5 – Оптимальные значения параметров электронно-лучевой сварки алюминиевого сплава АМг6 с динамическим расщеплением луча, полученные при помощи решения системы уравнений

$I \cdot 10^{-3}$	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	

4.5. Численное моделирование процесса испарения при электронно-лучевой сварке с динамическим расщеплением электронного луча

Численное исследование процесса испарения химических элементов со стенок каналов, формируемых расщепленным электронным лучом, конденсации элементов сплава на стенках парогазовых каналов и диффузии элементов в расплаве проводилось для следующей расчетной области: $H = 5 \cdot 10^{-2}$ м; $L = 2 \cdot 10^{-2}$ м; $r = 2{,}5 \cdot 10^{-4}$м; $l_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $l_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ м. В качестве материала, для которого моделировалась электронно-лучевая сварка расщепленным электронным лучом, был выбран сплав АМг6, теплофизические характеристики которого представлены в табл. 3.1. Для расчета в задаче использовалась сгущенная сетка вокруг парогазовых каналов, формируемых в металле расщепленным электронным лучом.

На рис. 4.2 представлены результаты расчетов концентрации химических элементов в парогазовой фазе каналов и затвердевшей части сварного шва при электронно-лучевой сварке с расщеплением электронного луча (скорость сварки $V_{св} = 5$ мм/с, расстояние между тепловыми источниками $L = 7$ мм).

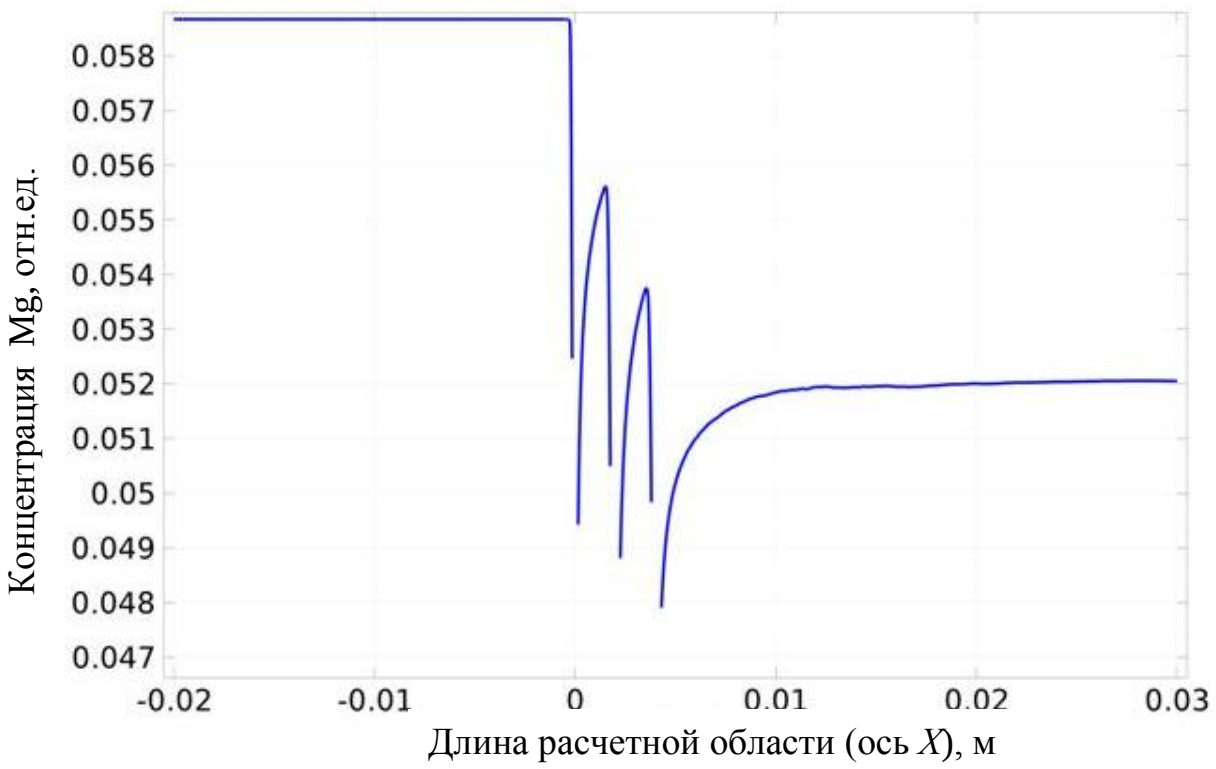


Рисунок 4.2 – Расчетные значения изменения концентрации Mg в сплаве вдоль стыка при расщеплении луча

График на рис. 4.2 можно условно разбить на четыре области по оси *X*. Первая область (от -0,02 м до 0 м) – это основной металл. Вторая область (от 0 до 0,004 м) отвечает за процессы парообразования. В третьей области (от 0,004 до 0,01 м) существует жидкая сварочная ванна, а в четвертой области – закристаллизовавшийся сварной шов. Во второй области, где существуют парогазовые каналы, концентрация Mg падает с 0,058 до 0,048 отн. ед., что связано с интенсивным процессом испарения. Далее в жидкой сварочной ванне концентрация Mg возрастает за счет диффузионных процессов в жидкости, а в твердой фазе концентрация Mg выравнивается, и становиться постоянной равной 0,052 отн. ед. [155-158].

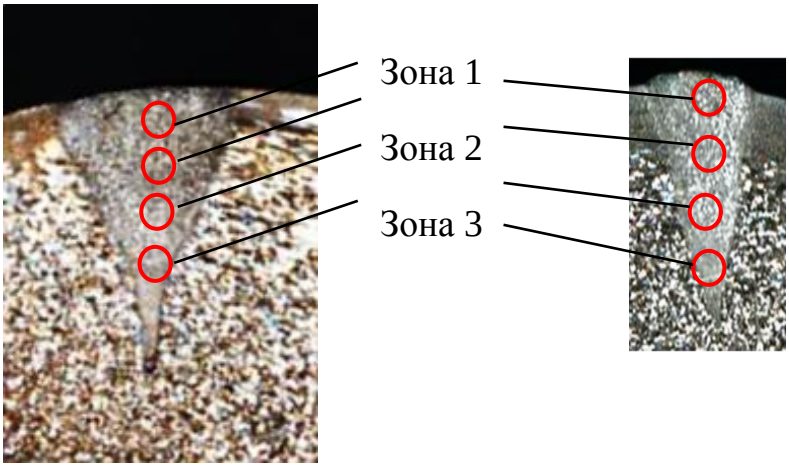
4.6. Определение влияния параметров режимов электронно-лучевой сварки с расщеплением электронного луча на химический состав сварных швов

Для исследования влияния параметров режима электронно-лучевой сварки с динамическим расщеплением электронного луча на химический состав сварного шва на алюминиевом сплаве АМг6 выполнялись сварочные проходы с ранее определенными оптимальными режимами сварки (табл. 4.5). Далее были изготовлены макрошлифы по методике, описанной в п. 2, и проведен рентгенофлюоресцентный анализ на энергодисперсионном рентгеновском флуоресцентном спектрометре EDX-800HS2 (Shimadzu, Япония) со следующими условиями анализа: атмосфера – вакуум, коллиматор размером 5 мм, рентгеновская трубка с родиевым анодом, напряжение на трубке 15 кВ, ток 100 мкА.

Таблица 4.6 – Оптимальные режимы сварки сплава АМг-6 с динамическим расщеплением электронного луча и макроструктура полученных зон проплавления (Н = 10 мм)

Макрошлифы			
Номер режима	1	2	3
$I_{св}$, мА	50	55	60
$V_{св,}$ мм/с	9	10	11
L, мм	4	5	5
K_f/ K_s	0,66/0,54	0,65/0,51	0,68/0,49
H, мм	10		

Исследование химического состава экспериментально полученных зон проплавления осуществлялось по схеме, изображенной на рис. 4.16.



а **б**

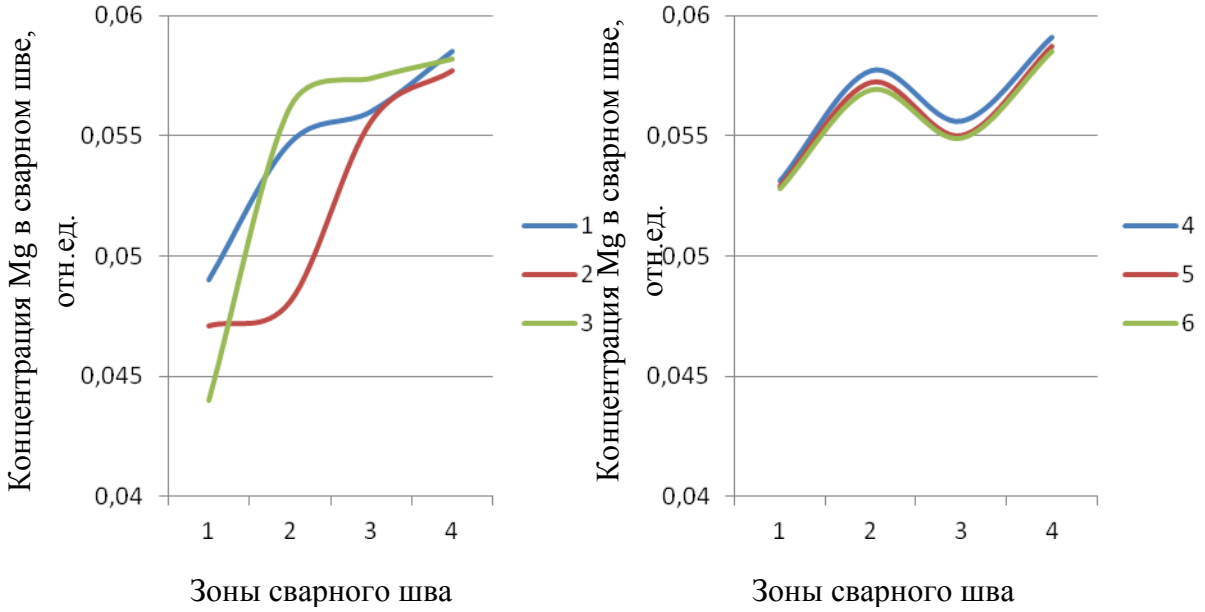
Рисунок 4.16 – Схема исследуемых зон при рентгенофлюоресцентном анализе; а – сварочный проход, выполненный с нарушением условий конусообразной формы; б – сварочный проход, выполненный без нарушения условий конусообразности (увеличение Х 50)

Таблица 4.12 – Результаты химического анализа зон проплавления, полученных при сварочных проходах с оптимальными режимами электронно-лучевой сварки с динамическим расщеплением электронного луча

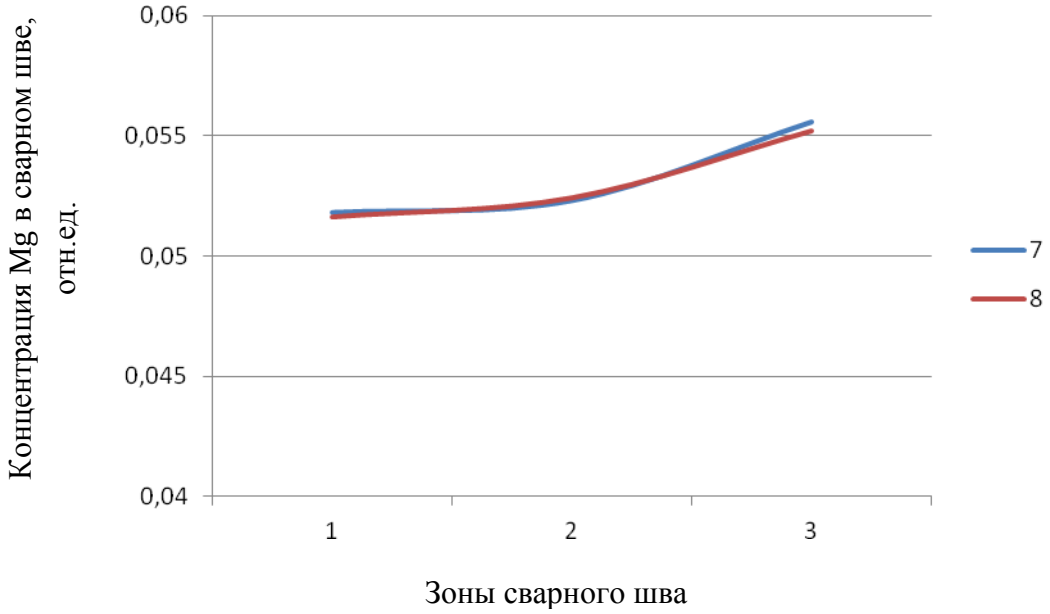
№ режима	Содержание Mg в зоне 1, отн. ед.	Содержание Mg в зоне 2, отн. ед.	Содержание Mg в зоне 3, отн. ед.	Содержание Mg в зоне 4, отн. ед.	Среднее содержание Mg с шве, отн. ед.	Содержание Mg основной металл, отн. ед.	Допустимые значения Mg в сплаве, отн. ед.
1	0,0490	0,0547	0,0560	0,0585	0,05455	0,0582	0,058-0,068
2	0,0471	0,0481	0,0556	0,0577	0,05213		
3	0,0440	0,0562	0,0574	0,0582	0,05395		
4	0,0531	0,0577	0,0556	0,0591	0,05638		
5	0,0529	0,0572	0,0550	0,0587	0,05595		
6	0,0528	0,0569	0,0549	0,0585	0,05578		
7	0,0518	0,0523	0,0556	-	0,05323		
8	0,0516	0,0524	0,0552	-	0,05306		

В связи с небольшой глубиной проплавления (4 мм) при рентгенофлюоресцентном анализе зон проплавления, полученных на режимах 7, 8, удалось провести анализ только 3-х зон.

На рис. 4.17 приведены графические зависимости концентрации Mg от глубины проплавления (рис. 4.7).



а б



в

Рисунок 4.17 – Зависимость распределения концентрации Mg в сварном шве от параметров режимов электронно-лучевой сварки: а – для сварных швов с глубиной проплавления 10 мм; б – для сварных швов с глубиной проплавления 5 мм; в – для сварных швов с глубиной проплавления 4 мм

Из полученных зависимостей видно, что в верхней части швов происходит более интенсивное истощение сплава магнием, чем в средней и корневой части швов. Истощение сплава магнием при переходе от верхней части сварных швов к средней и корневой частям шва плавно снижается и достигает допустимых значений (0,058 – 0,068).

Для швов, выполненных на режимах 1-3 (с глубиной поправления 10 мм), наблюдается зависимость концентрации магния от тока луча. С увеличением тока луча увеличивается истощение сплава магнием в верхней части швов примерно на 10%. Однако, для меньших толщин 5 и 4 мм перепад концентрации магния по глубине сварного шва не наблюдается.

В табл. 4.13 приведены концентрации магния в сварных швах, полученные расчетным и экспериментальным путем.

Таблица 4.13 – Среднее содержания магния в сварных швах, полученных при расчетным и экспериментальным путем

№ режима	Расчетное содержание Mg в сварном шве, отн.ед.	Измеренное содержание элемента в сварном шве, отн.ед.	Погрешность расчетов, %
1	0,05455	0,05423	1
2	0,05213	0,05284	1
3	0,05395	0,05561	3
4	0,05638	0,05753	2
5	0,05595	0,05828	4
6	0,05578	0,05691	2
7	0,05323	0,05487	3
8	0,05306	0,05414	2

Из таблицы 4.13 видно, что расчетное и экспериментально определенное содержание магния в металле сварных швов, полученных при электронно-лучевой

сварке алюминиевого сплава АМг6 с динамическим расщеплением электронного луча, отличаются не более, чем на 4%.

Для сравнения были исследованы образцы с нарушение условий конусообразной формы и имеющие значения, несоответствующие K_f ~ 0,7 и K_s ~ 0,5.

На рис. 4.16 изображена макроструктура зон проплавления, полученных при сварочных проходах электронным лучом на режимах, приведенных в табл. 4.14.

Таблица 4.14 – Режимы электронно-лучевой сварки сплава АМг6 с динамическим расщеплением электронного луча

	I, мА	Vсв, мм/сек	L, мм	Время действия, мсек	Площадь проплав., мм*мм	Коэфф. формы проплав.	Коэфф. полноты проплав., Fпр/(B*H)
а	42	10	4	80/80/40	21,01	0,64	0,46
б	50	9	4	40/80/80	17,15	0,69	0,49

Результаты химического анализа зон проплавления приведены в табл. 4.15.

Таблица 4.15 – Результаты химического анализа зон проплавления

	Содержание Mg, отн. ед.			
	в зоне 1	зоне 2	зоне 3	зоне 4
а	0,0420	0,0456	0,0510	0,0585
б	0,0490	0,0547	0,0560	0,0585

На рис. 4.18 приведены зависимости изменения концентрации магния по глубине сварного шва.

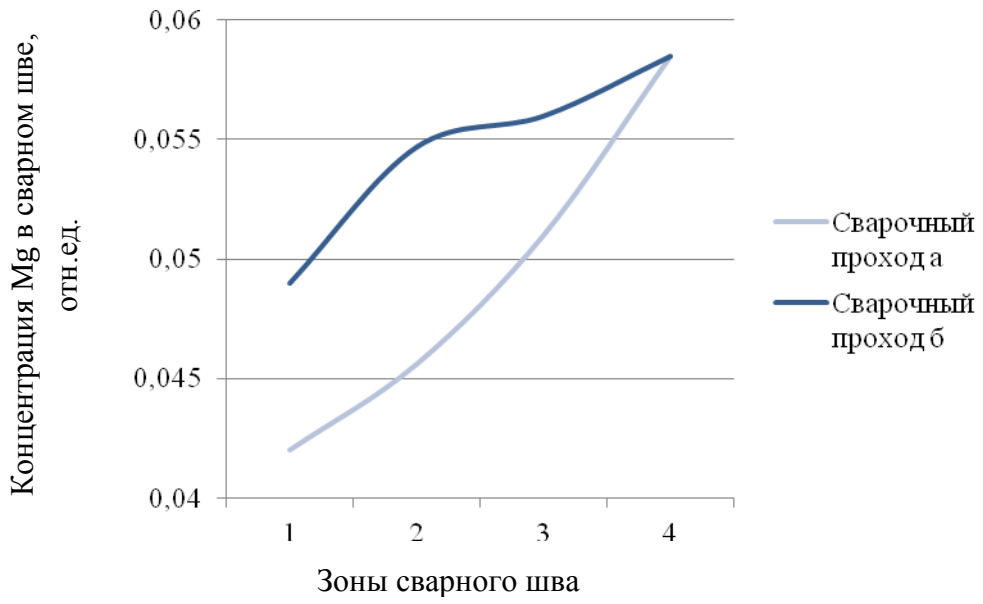


Рисунок 4.18 – Изменение концентрации магния по глубине сварного шва, полученного при сварке с расщеплением электронного луча

Как видно из полученных данных, соблюдение условия конусообразности зоны проплавления в сварных швах обеспечивает не только отсутствие дефектов в сварных соединениях, но и максимальную концентрацию магния, по сравнению с сварными швами с нарушением условий конусообразности. При этом максимальное истощение сплава легкоиспаряемым компонентом – магнием наблюдается в верней части шва имеет место при режиме «а», а при режиме «б» концентрация магния на 5 % выше.

Выводы по главе 4

1. Применение технологии динамического расщепления электронного луча при сварке обеспечивает получение бездефектных сварных соединений при сварке алюминиевых сплавов.
2. Определены критерии, характеризующие формирование бездефектных сварных соединений с конусообразной формой зоны проплавления и

скругленным корнем сварного шва: коэффициент формы проплавления K_f~0,7 и коэффициент полноты проплавления K_s~0,5.

3. Определены режимы электронно-лучевой сварки алюминиевого сплава АМг6 с динамическим расщеплением электронного луча для конкретных свариваемых толщин.

4. Разработана модель, описывающая тепломассоперенос при электронно-лучевой сварке с динамическим расщеплением электронного луча и позволяющая с высокой точностью прогнозировать химический состав получаемых сварных швов.

5. Проведена верификация модели путем сопоставления с результатами анализа химического состава зон проплавления в металле, полученными экспериментальным путем.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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

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

3. Определены оптимальные параметры режимов электронно-лучевой сварке с динамическим расщеплением электронного луча для сплава АМг 6, обеспечивающие условие конусообразности и бездефектное формирование сварных соединений.

4. Получены закономерности формирования химического состава сварных соединений при электронно-лучевой сварке с динамическим расщеплением электронного луча на различных параметрах режимов. Данный вид динамического воздействия на электронный луч 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 электронно-лучевой сварке с расщеплением электронного луча.

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 (стали и титанового сплава);

- применение технологий электронно-лучевой сварки с динамическим воздействием на электронный луч с научно-обоснованными 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 направлению150700.68 «Машиностроение».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев, И.В. Основы электронно-лучевой обработки материалов: Учебное пособие / И.В. Зуев, Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.

2. Рыкалин, Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора– М. – 1985– 496 с.

3. Назаренко, О.К. Электронно-лучевая сварка: Учебное пособие / О.К. Назаренко, Е.И.Истомин, В.Е. Локшин - М. : Машиностроение, 1966. – 127 с.

4. Назаренко, О.К. Электронно-лучевая сварка: Учебное пособие / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко и др.; Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Наук. думка, 1987. – 256с.

5. Башенко В.В. Динамика поведения расплава в сварочной ванне при нагреве металла высококонцентрированным источником энергии / В.В. Башенко, Е.А. Миткевич, В.А. Лопота // Материалы VIII Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке. М., 1983. С. 86-94.

6. Башенко В.В. Импульсный характер потоков заряженных частиц из канала при электронно-лучевой сварке / В.В. Башенко, К.О. Мауер // Автоматическая сварка. – 1976. – №8. – С. 21 – 23.

7. Патон Б.Е. Динамические модели каналов проплавления при электронно-лучевой сварке / Б.Е. Патон, Г.И. Лесков, В.М. Нестеренков // Автоматическая сварка. – 1988. – № 1. – С. 1-6.

8. Лесков Г.И. Потоки плазмы, тепловые и гидродинамические процессы в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке металлов / Г.И. Лесков, В.М. Нестеренков // Автоматическая сварка. – 1978. – № 6. – С. 27 - 30.

9. Туричин Г.А. Механизмы влияния динамических процессов при высокоскоростной лазерной, лазерно-дуговой и электронно-лучевой сварке на формирование дефектов сварных швов / Г.А. Туричин, Е.А. Валдайцева, О.Г.

Климова, Т. Хассель, А. Беньяш, Н. Мюррэй, Х.Ю. Майер // Сварка и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 23-27.

10. Климова О.Г. Особенности структуры металла сварных соединений при электронно-лучевой сварке разнородных материалов / О.Г. Климова, Г.А. Туричин, В.А. Лопота, А.И. Шамшурин, И.А. Сизова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 2. – С. 125.

11. Васильев А.А. Возникновение колебаний глубины парогазового канала при лучевых способах сварки / А.А. Васильев, В.А. Ерофеев, В.А. Судник // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 7. – С. 130-141.

12. Судник В.А. Численная модель процесса электронно-лучевой сварки с экспериментальной проверкой / В.А. Судник, В.А. Ерофеев, К.Г. Рихтер, К.У. Хайнс // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2008. – № 2. – С. 233-243.

13. Браверман В.Я. Экспериментальные исследования рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке / В.Я. Браверман, В.С. Белозерцев, А.Н. Успенский // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2005. – № 3. – С. 196-200.

14. Терентьев Е.В. Влияние скорости сварки на формирование шва при ЭЛС со сквозным проплавлением / Е.В. Терентьев, В.К. Драгунов, А.П. Слива, А.В. Щербаков // Сварочное производство. – 2014. – № 2. – С. 25-29.

15. Драгунов В.К. Прогнозирование режимов ЭЛС при изготовлении многошовных конструкций / В.К. Драгунов, М.С. Грибков, В.Н. Мартынов, А.Г. Сысоев // Сварочное производство. – 2015. – № 1. – С. 20-22.

16. Беленький В.Я. Контроль электронно-лучевой сварки с использованием плазменных явлений в области сварочной ванны / В.Я. Беленький, В.М. Язовских // Сварочное производство. – 1997. – № 1. – С. 7-12.

17. Yazovskikh V.M. Thermodynamic evalution of the correlation between evaporation temperature and vapour pressure into the melting channel under electron-

beam joining / V.M. Yazovskikh, V.V. Utochkin // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 4. – С. 73-77.

18. Беленький В.Я. О происхождении вторичного тока при электронно-лучевой сварке / В.Я. Беленький, В.М. Язовских // Электронная обработка материалов. – 1986. – № 1. – С. 34-46.

19. Koleva E.G. Signal emitted from plasma during electron-beam welding with deflection oscilation of the beam / E.G. Koleva, G.M. Mladenov, D.N. Trushnikov, V.Y. Belenkiy // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Т. 214. – № 9. – С. 1812-1819.

20. Kaplan A. A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile / A. Kaplan // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. Vol. 27. – pp. 1805-1814.

21.Kaplan A. Analysis of the keyhole and weld pool dynamics by imaging evaluation and photodiode monitoring / A. Kaplan, P. Norman, I. Eriksson // Proceedings of LAMP2009 - the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, (2009) pp. 1-6.

22. Ray R. Heat Transfer and Fluid Flow during Electron Beam Welding of 304L Stainless Steel Alloy / R. Ray, T.A. Palmer, J.W. Elmer, T. Debroy // Welding Journal. – Mach 2009. –Vol. 88. – pp. 54-s – 61-s.

23. Tian Y. Finite element modeling of electron beam welding of a large complex Al alloy structure by parallel computations / Yanhong Tian, Chunqing Wang, Danyang Zhu, Y. Zhou // Journal of materials processing technology. – 2008– Vol. 199. – pp. 41–48.

24. Dilthey U. Developmen of a theory for alloying element losses during laser beam welding / U. Dilthey, A. Goumeniouk, V. Lopota, G. Turichin and E. Valdaitseva // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – Т. 34. – № 1. – pp. 81-86.

25. Бондарев А.А. Испарение легколетучих элементов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов / А.А. Бондарев, Д.М. Рабкин // Автоматическая сварка. – 1974. – № 3. – С. 13-16.

26. Ольшанская Т.В. Влияние осцилляции электронного пучка на формирование структуры и свойств сварного шва / Т.В. Ольшанская, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Г.М. Младенов // Сварочное производство. – 2012. – № 11. – С. 13-18.

27. Беленький В.Я. Особенности получения качественных сварных швов при электронно-лучевой сварке высокопрочных сталей большой толщины / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Г.М. Младенов, Т.В. Ольшанская // Автоматическая сварка. –2012. – № 2 (706). – С. 47-50.

28. Язовских В.М. Электронно-лучевая сварка с колебаниями луча по х-образной траектории / В.М. Язовских, В.Я. Беленький, Т.В. Ольшанская // Сварочное производство. – 1994. – № 6. – С. 5-9.

29. Язовских В.М. Влияние развертки луча на формирование макроструктуры металла шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / В.М. Язовских, Т.В. Ольшанская // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика и технология материалов и конструкций. – 1999. – № 2. – С. 225-231.

30. Туричин Г.А. Исследование формирования пористости алюминиевых сплавов при лазерной и лазерно-дуговой сварке / Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов, В.В. Сомонов, Е.А. Валдайцева // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 110. – С. 175-181.

31. Младенов Г.М. Электронно-лучевая сварка: монография / Г.М. Младенов, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Е.Г. Колева. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 374 с.

32. Туричин Г.А. Теоретические основы и моделирование процесса лучевой сварки металлов с глубоким проплавлением : дис. … доктора техн. наук. Санкт-Петербург, 2000.

33. Ерофеев В. А. Моделирование особенностей формирования парогазового канала при электронно-лучевой сварке / В.А. Ерофеев // Сварка и Диагностика. – 2009. – № 4. –С.12-18.

34. Vasilyev A. Mechanism of onset of keyhole depth fluctuations at beam welding process / A. Vasilyev, V. Erofee, V. Sudnik // Elektrotechnica & Elektronica. Vol. 49. No. 5-6/2014. P. 68-75.

35. Васильев А.А. Теория формирования корневых пустот при электронно-лучевой сварке / А.А. Васильев, В.А. Ерофеев, В.А. Судник // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 6. – Ч. 2. – С. 43-52.

36. Shi Sh. Effects of beam patterns on removal of phosphorous in silicon by electron beam melting / Shi Sh., Tan Y., Jiang D. at ed. // Elektrotechnica & Elektronica. Vol. 49. No. 5-6/2014. P. 126-132.

37. Миткевич Е. А. Формирование корневых дефектов при лучевых способах сварки / Е. А. Миткевич, И. А. Цибульский – Деп. в Информэлектро 01.10.85.

38. Миткевич Е. А. Динамика формирования канала в условиях электронно-лучевой сварки / Е. А. Миткевич, В. Е. Локшин // Автоматическая сварка. – 1980. - № 9. – С. 26 -27.

39. Трушников Д.Н. О колебательных процессах в зоне воздействия мощного концентрированного электронного пучка при электронно-лучевой сварке / Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Е.С. Саломатова, Г.М. Младенов, Е.Г. Колева // Доклады третьей СПб Междунар. научно-техн. конф. Технологии и оборудование ЭЛС-2014 (24-25 июня).:Изд. СПб политехн. ун-та. – 2014. С. 98-103.

40. Браверман, В. Я. Управление формированием сварного шва при электронно-лучевой сварке по рентгеновскому излучению из зоны сварки : автореф. дис. … д-р техн. наук : 05.03.06 / Браверман Владимир Яковлевич. – СПб., 2001. – 32 с.

41. Судник В.А. Раздел «Основы сварочного моделирования» в справочнике издательства ASM International (США)» / В.А. Судник // Сварочное производство. – 2015. – № 1. – С. 23-26.

42. Sudnik W. Computerized simulation of laser beeam welding, modeling and verification / W. Sudnik, D. Radaj, W. Erofeev // Journal Physics D: Applied Physics. 1996. Vol. 29. – pp. 2811-2817.

43. Kroos J. Dynamic behaviour of the keyhole in laser welding / J. Kroos, U. Gratzke, M. Vicanek and G. Simon // Journal of Physics D: Applied Physics. – Vol. 26. – N 3. –pp. 481-493.

44. Kroos J. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding / J. Kroos, U. Gratzke and G. Simon // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1998. – Vol. 26. – N. 3. – pp. 474-480.

45. Kaplan A.F. H. Analysis of the keyhole and weld pool dynamics by imaging evaluation and photodiode monitoring / A.F. H. Kaplan, P. Norman and I. Eriksson // Proceedings of LAMP2009 - the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, (2009) 1-6.

46. Collur M.M. Mechanism of Alloying element vaporization during laser welding / M.M. Collur, A. Paul, and T. Debroy // Metallurgical Transactions. – 1987. –Vol. 18B. – pp. 733-746.

47. Dilthey U. Developmen of a theory for alloying element losses during laser beam welding / U. Dilthey, A. Goumeniouk, V. Lopota, G. Turichin and E.Valdaitseva // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2001. – Vol. 34. – pp. 81-86.

48. Бондарев А.А. Испарение легколетучих элементов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов / А.А. Бондарев, Д.М. Рабкин // Автоматическая сварка. – l 1974. – № 3 (252). – С. 13-16.

49. Васильев А.А. Возникновение колебаний глубины парогазового канала при лучевых способах сварки / А.А. Васильев, В.А. Ерофеев, В.А. Судник // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – Вып. 7. – С. 130-141.

50. Новиков А.А. Электронно-оптическая модель канала проплавления при электронно-лучевой сварке и обработке / А.А. Новиков // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – № 1. – С. 43-48.

51. Ольшанский, Н.А. Современное состояние электронно-лучевой сварки в СССР : Учебное пособие / Н.А. Ольшанский, О.К. Назаренко // Электронно- и ионно-лучевая технология – М.: Металлургия, 1968. – С. 309-321.

52. Бондарев А.А. О силах, действующих на сварочную ванну при проплавлении алюминиевых сплавов электронным лучом / А.А. Бондарев, Н.М. Воропай // Физика и химия обработки материалов. – 1974. – № 2. – С. 50 – 55.

53. Башенко В.В. Анализ сил, действующих на сварочную ванну при электронно-лучевой сварке / В.В. Башенко, В.И. Вайнштейн // Сварочное производство. – 1970. – № 8. – С. 3-4.

54. Беленький В.Я. О колебательном перемещении области соударения электронного луча с металлом в канале проплавления при электронно-лучевой сварке / В.Я. Беленький // Электронная обработка материалов. – 1988. – №1. – С. 47 - 49.

55. Кайдалов А. А. Особенности движения металла у фронта плавления при электронно-лучевой сварке / А.А. Кайдалов, О.К. Назаренко // Автоматическая сварка. – 1974. – № 12. – С. 60 - 61.

56. Назаренко О.К. О нестабильности глубины проплавления при электронно-лучевой сварке / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, К.С. Акопьянц // Сварка электронным лучом. МДНТП, 1974. С. 26-30.

57. Трушников, Д.Н. Управление формированием сварного шва при ЭЛС по вторичной электронной эмиссии из зоны сварки : дис. … канд. техн. наук. : 05.02.10 / Трушников Дмитрий Николаевич. - П., 2002. – 153 с.

58. Зуев И. В. Оценка глубины проплавления при электронно-лучевой сварке / И.В. Зуев, Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – № 1. – С. 9 – 14.

59. Зуев И.В. О колебаниях глубины проплавления при электронно-лучевой сварке / И.В. Зуев, Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов // Физика и химия обработки материалов. – 1975. – № 1. – С. 136-141.

60. Зуев И. В. О выбросе жидкой фазы при электронно-лучевой сварке и обработке / И.В. Зуев, Н.К. Илющенко, М.А. Косых // Физика и химия обработки материалов. – 1974. – № 4. – С. 149-150.

61. Зуев И. В. О кинжальном проплавлении металлов электронным лучом / И.В. Зуев, Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов // Физика и химия обработки материалов. – 1968. – № 5. – С. 7-15.

62. Рыкалин Н.Н. Механизм сварки и обработки электронным лучом/ Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев // Сварка электронным лучом. - М., МДМТП, 1974, С. 13 – 19.

63. Трунов Е.Н. Экспериментальное определение места встречи электронного пучка с передней стенкой пародинамического канала / Е.Н. Трунов // Автоматическая сварка. – 1982. – № 2. – С. 70-72.

64. Смоляр В.А. Диффузионная теория обратного рассеяния и проникновения электронов в полубесконечную мишень, не содержащая подгоночных параметров / В.А Смоляр // Радиотехника и электрон. – 1979. – № 9. – С. 1812-1819.

65. Bishop H.E. Electron scattering in sick targets / H.E. Bishop // Brit. J. Appl. Phys. – 1967. – Vol. 18. – N 6. – pp. 703-715.

66. Воробьев, А. А. Прохождение электронов через вещество : Учебное пособие / А.А. Воробьев, Б.А. Кононов – Томск: Изд-во Том. ун -та, 1976. – 178 с.

67. Yi Luo Analysis of Bubble Flow in the Deep-Penetration Molten Pool of Vacuum Electron Beam Welding / Yi Luo, Rui Wan, Yang Zhu, Xiaojian Xie // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2015. – Vol. 46. – Issue 3. – pp. 1431-1439.

68. Туричин Г.А. Исследование формирования пористости алюминиевых сплавов при лазерной и лазерно-дуговой сварке / Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов, В.В. Сомонов, Е.А. Валдайцева // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 110. – С. 175-181.

69. Amara E.H. Humping modeling in deep penetration laser welding / E.H. Amara // Laser in Eng. – 2011. – Vol. 22. – pp. 299-308.

70. Туричин Г.А. Механизмы влияния динамических процессов при высокоскоростной лазерной, лазерно-дуговой и электронно-лучевой сварке на формирование дефектов сварных швов / Г.А. Туричин, Е.А. Валдайцева, О.Г. Климов и др. // Сварка и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 23-27.

71. Chen X. Prediction of the laser-induced plasma characteristics in laser welding: a new modelling approach including a simplified keyhole model / Chen X, Wang H.X. // J. Phys. D-Appl. Phys. – 2003. – Vol.36. – pp. 1634-1639.

72. Fabbro R. Keyhole modeling during laser welding / R. Fabbro, K. Chouf // J. Appl. Phys. – 2000. – Vol. 87. – pp. 4075-4081.

73. Cho J.H. Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole / J.H. Cho, S.J. Na // J. Phys. D-Appl. Phys. – 2006. – Vol. 39. – pp. 5372-5378.

74. Amara E.H. Modelling of vapour flow in deep penetration laser welding / E.H. Amara, A. Bendib // J. Phys. D-Appl. Phys. – 2002. – Vol. 35. – pp. 272-281.

75. Kroos J. Dynamic Behavior of the Keyhole in Laser-Welding / J. Kroos, U. Gratzke, M. Vicanek, G. Simon // J. Phys. D-Appl. Phys. – 1993. – Vol. 26. – pp. 481-493.

76. Ki H. Modeling of laser keyhole welding: Part I. Mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution / H. Ki, P.S. Mohanty, J. Mazumder // Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science. –2002. – Vol. 33. – pp. 1817-1821.

77. Wang H. Numerical simulation of laser keyhole welding processes based on control volume methods / H. Wang, Y.W. Shi, S.L. Gong // J. Phys. D-Appl. Phys. – 2006. – Vol. 39. – pp. 4722-4731.

78. Zhou J. Investigation of transport phenomena and defect formation in pulsed laser keyhole welding of zinc-coated steels / J. Zhou, H.L. Tsai, T.F.Lehnhoff // J. Phys. D-Appl. Phys. – 2006. – Vol. 39. – pp. 5338-5342.

79. Zhou J. Transport phenomena and keyhole dynamics during pulsed laser welding / J. Zhou, H.L. Tsai, P.C. Wang // Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME. –2006. – Vol. 128. – pp. 680-689.

80. Amara E.H. Modelling of gas jet effect on the melt pool movements during deep penetration laser welding / E.H. Amara, R. Fabbro // J. Phys. D-Appl. Phys. – 2008. – Vol. 41. – pp. 1235-1242.

81. Amara E.H. Modeling of the melted bath movement induced by the vapor flow in deep penetration laser welding / E.H. Amara, R. Fabbro, F. Hamadi // J. Laser Appl. – 2006. – Vol. 18. – pp. 2-14.

82. Andrews J.G. Motion of an Intensely Heated Evaporating Boundary / J.G. Andrews, D.R. Atthey // Journal of the Institute of Mathematics and Its Applications. – 1975. – Vol. 15. – pp. 59-68.

83. Klemens P.G. Mechanism of Cavity Formation in Electron-Beam and Laser-Welding / P.G. Klemens // Bulletin of the American Physical Society. – 1976. – Vol. 21. – pp. 591-563.

84. Elmer J.W. The Transition from Shallow to Deep Penetration During Electron-Beam Welding / J.W. Elmer, W.H. Giedt, T.W. Eagar // Weld. J. – 1990. – Vol. 69. – S167 – pp. 756-762.

85. Hemmer H. Prediction of penetration depths during electron beam welding / H. Hemmer, O. Grong // Science and Technology of Welding and Joining. – 1999. – Vol. 4. – pp. 219-223.

86. Wei P.S. Beam Focusing Characteristics and Alloying Element Effects on High-Intensity Electron-Beam Welding / P.S. Wei, Y.T. Chow // Metallurgical Transactions B-Process Metallurgy. – 1992. – Vol. 23. – pp. 81-96.

87. Wei P.S. Surface-Tension Gradient-Driven Flow around an Electron-Beam Welding Cavity / P.S. Wei, W.H. Giedt // Weld. J. – 1985. – Vol. 64. – S251. – pp. 1235-1245.

88. Klemens P.G. Heat Balance and Flow Conditions for Electron-Beam and Laser-Welding / P.G. Klemens // J. Appl. Phys. – 1976. – Vol. 47. – pp. 2165-2174.

89. Schauer D.A. Electron-Beam Welding Cavity Temperature Distributions in Pure Metals and Alloys / D.A. Schauer, W.H. Giedt, S.M. Shintaku // Weld. J. – 1978. – Vol. 57. –S127. – pp. 256-264.

90. Wei P.S. 3-Dimensional Analytical Temperature-Field around the Welding Cavity Produced by a Moving Distributed High-Intensity Beam / P.S. Wei, M.D. Shian // Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME. – 1993. – Vol. 115. – pp. 848-853.

91. Koleva E.G. Signal emitted from plasma during electron-beam welding with deflection oscillation of the beam / E.G. Koleva, G.M. Mladenov, D.N. Trushnikov, V.Y. Belenkiy // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Т. 214. – № 9. – С. 1812-1819.

92. Трушников Д.Н. Изучение физических процессов при электроннолучевой сварке по параметрам вторичного тока в плазме / Д.Н. Трушников // Физика и химия обработки материалов. – 2014. – № 5. – С. 36-45.

93. Trushnikov D.N. Weld formation control at electron beam welding with beam oscillations / D.N. Trushnikov, E.G. Koleva, G.M. Mladenov, A.V. Shcherbakov // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2014. – № 3 (55). – С. 224-230.

94. Варушкин С.В. Применение экранирования коллектора для контроля режима сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке / С.В. Варушкин, В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников // Современные проблемы науки и образования. –2014. – № 6. – С. 158.

95. Permyakov G.L. Modeling of electron beam welding to determine the weld joints parameters of dissimilar materials / G.L. Permyakov, T.V. Olshanskaya, V.Y. Belenkiy, D.N. Trushnikov, L.N. Krotov // Life Science Journal. – 2014. – Т. 11. – № 4. – pp. 300-307.

96. Trushnikov D.N. Effect of beam deflection oscillations on the weld geometry / D.N. Trushnikov, V.Y. Belenkiy, E.G. Koleva, G.M. Mladenov // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Т. 213. – № 9. – pp. 1623-1634.

97. Trushnikov D.N. Using the wavelet analysis of secondary current signals for investigation and controlling electron beam welding / D.N. Trushnikov // Welding International. – 2013. – Т. 27. – № 6. – pp. 460-465.

98. Trushnikov D.N. Investigation of the formation of the secondary current signal in plasma in electron Investigation of the formation of the current signal in plasma in electron beam welding with oscillation of the electron beam / D.N. Trushnikov, V.Y. Belen'kii // Welding International. – 2013. – Т. 27. – № 11. – pp. 877-880.

99. Trushnikov D.N. Controlling the electron beam focus regime and monitoring the keyhole in electron beam welding / D.N. Trushnikov, V.Ya. Belenkiy, G.M. Mladenov // Yosetsu Gakkai Ronbunshu. – 2013. – T. 31. – № 4. – pp. 91s-95s.

100. Трушников Д.Н. Модель формирования вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка / Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, В.Е. Щавлев, А.Л. Пискунов, А.Н. Лялин // Сварка и диагностика. – 2013. – № 1. – С. 39-42.

101. Глазов, С.И. Основы технологии электронно-лучевой и диффузионной сварки / С.И. Глазов, А.В. Люшинский. – ОАО«Рыбинский дом печати», 2001. - 123-233 с.

102. Литвинов, В.В. Многопараметрическое адаптивное управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки / В.В. Литвинов, А.В. Ярмилко. – Киев, Математичні машини і системи. – 2013. – № 2 – С. 130-138.

103. Masny H. Multi-Beam Technology in Electron Beam Welding / H. Masny // ISFF—Welding and Joining Institute. – 2006. – Vol. 34. – pp. 1-4.

104. Peng-Fei Fua Temperature field modeling and microstructure analysis of EBW with multi-beam for near a titanium alloy/ Peng-Fei Fua, Zhi-Yong Mao//Huazhong University of Science and Technology. – 2013. – Vol.102. – pp.54-62.

105. Zenker R. Characteristics and Prospects of Process Integrated Thermal Field Heat Treatment for Electron Beam Welding of Cast Iron/ R. Zenker// La metallurgia italiana

106. Ol'shanskaya T.V. Effect of electron beam oscillation on the formation of the structure and properties of the welded joint / T.V. Ol'shanskaya, D.N. Trushnikov, V.Y. Belen'kii, G.M. Mladenov // Welding International. – 2013. – T. 27. – № 11. – C. 881-885.

107. Язовских В.М. Расчет формы шва и направление роста кристаллов при электронно-лучевой сварке в системе MATHCAD / В.М. Язовских, Т.В. Ольшанская // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика и технология материалов и конструкций. – 2000. – № 3. – С. 156-163.

108. Ольшанская Т.В. Влияние осцилляции электронного пучка на формирование структуры и свойства сварных швов / Т.В. Ольшанская, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Г.М. Младенов // Сварочное производство. – 2012. – № 11. – С. 13-18.

109. Язовских В.М. Особенности кристаллизации металла шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / В.М. Язовских, Т.В. Ольшанская, Р.А. Мусин, В.Я. Беленький // Сварочное производство. – 1999. – № 1. – С. 3-9.

110. Язовских В.М. Влияние развертки луча на формирование макроструктуры металла шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / В.М. Язовских, Т.В. Ольшанская // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика и технология материалов и конструкций. – 1999. – № 2. – С. 225-235.

111. Язовских В.М. Электронно-лучевая сварка с колебаниями луча по Х-образной траектории / В.М. Язовских, В.Я. Беленький, Т.В. Ольшанская // Сварочное производство. – 1994. – № 6. – С. 5-10.

112. Пермяков Г.Л. Численное моделирование процесса электронно-лучевой сварки с продольной осцилляцией луча / Г.Л. Пермяков, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Т.В. Ольшанская // В сборнике: Сварка и диагностика сборник докладов международного форума. Министерство образования и науки Российской Федерации; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; Уральское отделение Российской академии наук, Институт физики металлов; Правительство Свердловской области; Администрация города Екатеринбурга. Екатеринбург. – 2015. – С. 139-145.

113. Trushnikov D. N. Investigation of the formation of the secondary current signal in plasma in electron beam welding with oscillations of the electron beam / D. N. Trushnikov , V.Ya. Belen'kii // Welding International. – 2013. – Vol. 27. – Issue 11. – pp. 877-880.

114. Volpp J. Modeling keyhole oscillations during laser deep penetration welding at different spatial laser intensity distributions / J. Volpp, F. Vollertseen // Production Engineering Research and Development. – 2015. – Vol. 9. – pp. 167-178.

115. Zenker R. Electron beam multipool welding with thermal fields of metal welds based on cast iron/ R. Zenker, M. Mangler // Institute of Materials Engineering, Freiberg, Germany

116. Libor Dupak Electron beam micromachining of nonmetalic materials / Libor Dupak// BRNO University of Technology. – 2012. – pp.10-45

117. Овчинников В.В. Сварщик на лазерных и электронно-лучевых сварочных установках / В.В. Овчинников. – М: Издательский центр «Академия», 2008- 24-34 с.

118. Thiemer S. Elektronenstrahl technologien als Dienstleistung –verzugsarm, preiswert und mit exzellentem Innovationspotential / S. Thiemer // Pro-beam AG & Co. KGaA, Neukirchen, Germany. – 2008.

119. Libor Dupak Electron beam micromachining of nonmetalic materials / Libor Dupak// BRNO University of Technology. – 2012. – pp.10-45

120. Беленький В.Я. Электронно-лучевая сварка высокопрочных сталей с бронзой с использованием динамического позиционирования электронного пучка / В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов, Т.В. Ольшанская, А.А. Абдуллин, Г.М. Младенов, Е.Г. Колева, С.И. Быков // Сварка и диагностика. – 2014. – № 1. – С. 48-49.

121. Ольшанская Т.В. Особенности кристаллизации сварных швов из разнородных материалов при электронно-лучевой сварке на примере высокохромистой стали с бронзой / Т.В. Ольшанская // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16. – № 3. – С. 43-53.

122. Трушников Д.Н. Управление формированием сварного шва при ЭЛС по вторичной электронной эмиссии из зоны сварки : дис. … канд. техн. наук : 05.03.06 / Трушников Дмитрий Николаевич. – П., 2002. – 20 с.

123. Yoichi Ono Diffusion of Chromium, Manganese, and Nickel in Molten Iron / Yoichi Ono and Shuji Matsumoto // Received April 11. – 1974. – pp.38-39.

124. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: Учебное пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. — 3-е изд., перераб. —М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. — 736 с.

125. Ройх, И.Л. Нанесение защитных покрытий в вакууме : Учебное пособие / И.Л. Ройх, Л.Н. Колтунов, С.Н. Федосов. – М. «Машиностроение». 1976. 366 с.

126. Уточкин, В.В. Физико-химические основы металлургических процессов при сварке: Учебное пособие / В.В. Уточкин. – Перм. гос. Техн. Ун-т. Пермь. 2000. 189 с.

127. Yong Du Diffusion coefficients of some solutes in fcc and liquid Al: critical evaluation and correlation / Yong Du et al. // Materials Science and Engineering. A363 (2003). pp. 140–151.

128. 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.

129. 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. 514-518.

130. Драгунов В.К. Прогнозирование режимов ЭЛС при изготовлении многошовных конструкций / В.К. Драгунов, М.С. Грибков, В.Н. Мартынов, А.Г. Сысоев // Сварочное производство. – 2015. – № 1. – С. 20-22.

131. Зайнетдинов, Р.И. Статические методы управления качеством при производстве сварных конструкций: Учебное пособие / Р.И. Зайнетдинов. – М.: МИИТ, 2001. – 56 с.

132. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981.— 83-141 с.

133. Любченко, Е.А. Планирование и организация эксперимента: Учебное пособие / Е.А. Любченко, О.А. Чуднова. – Часть 1. – Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. – 29-99 с.

134. Реброва, И.А. Планирование эксперимента: Учебное пособие / И.А. Ребров. – Омск: СибАДИ, 2010. – 68-90 с.

135. Язовских, В.М. Математическое планирование и инженерные методы расчета в сварке : Учебное пособие / В.М. Язовских. – Ч.1. Статистическая обработка и планирование эксперимента: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. тех. ун-та, 2007. – 124 с.

136. Ахназарова, С.Л. Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии: Учебно-методическое пособие / С.Л. Ахназарова, Л.С. Гордеев. – РХТУ им. Менделеева. М, 2003. 11-32 с.

137. Кондратьев, В.А. О выборе обобщенного показателя качества при проектировании технических устройств : Учебное пособие / В.А. Кондратьев. – НГТУ, Новосибирск. 2005.

138. Rüthrich K. Investigations Relating to Electron Beam Multipool Welding of Metal Welds Based on Cast Iron / K. Rüthrich, R. Zenker, M. Mangler // 64th Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding/ – Chennai (Indien). – 2011.

139. Peng-Fei Fua Temperature field modeling and microstructure analysis of EBW with multi-beam for near a titanium allo / Peng-Fei Fua, Zhi-Yong Mao // Huazhong University of Science and Technology. – 2013. – Vol.102. – pp.54-62.

140. Беленький В.Я. Электронно-лучевая сварка высопрочных сталей с бронзой с использованием динамического позиционирования электронного пучка / В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов, Т.В. Ольшанская, А.А. Абдуллин, Г.М. Младенов, Е.Г. Колева, С.И. Быков // Сварка и диагностика. – 2014. – № 1. – С. 48-49.

141. Ольшанская Т.В. Влияние осцилляции электронного пучка на формирование структуры сварных швов при электронно-лучевой сварке стали с бронзой / Т.В. Ольшанская, Г.Л. Пермяков, В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников // Доклады Санкт-Петербургской Междунар. науч.-техн. конфер. «Технологии и оборудование ЭЛС-2014». – 2014г. – С. 150-156.

142. Olshanskaya T. V. Influence of Electron Beam's Oscillations on Weld's Structure Formation of Dissimilar Materials on an Example Steel with Bronze /

T.V. Olshanskaya, G.L. Permyakov, V.Y. Belenkiy, D.N. Trushnikov // Electrotechnica & Electronica E+E. – 2014. – Vol. 49. – № 5-6. – С. 97-102.

143. Fujii H. Bubble formation in aluminium alloy during electron beam welding / H. Fujii, H. Umakoshi, Y. Aoki, K. Nogi // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – pp. 1252-1255.

144. Mathers, G. The welding of aluminium and its alloys., Published by Woodhead Publishing Limited / G. Mathers. – Abington Cambridge. – England. – 2002. – pp. 155-160.

145. Ambriz R.R. Mechanical Behavior of Precipitation Hardened Aluminum Alloys Welds / R.R. Ambriz, D. Jaramillo // InTech – 2014. – pp.35-58.

146. Щипков, М.Д. Сварка сплавов на основе алюминия и тугоплавких высокоактивных металлов / М.Д. Щипков. – Ленинград: Изд-во ЛПИ им. И.М.Калинина. Изд-во 1983. – 77 с.

147. Зусин, В.Я. Сварка и наплавка алюминия и его сплавов : Учебное пособие / В.Я. Зусин, В.А. Серенко. – Мариуполь: Рената. – 2005. – 468 с.

148. Саломатова Е.С. Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, А.И. Цаплин, В.Я. Беленький // Сварка и диагностика. – 2016. – № 1. – С. 7-10.

149. 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.

150. Трушников Д.Н. 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.

151. 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. науч. журн. Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. URL:

http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12653 (дата обращения: 19.11.2015).

152. Трушников Д.Н. 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.

153. Беленький В.Я. 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.

154. 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.

155. 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.

156. 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.

157. 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 Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2014. – С. 56-59.

158. 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.

159. 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.

160. 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.

161. 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. Ольшанская // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14. – № 3. С. 36-42.

162. Саломатова Е.С. Исследование влияния осцилляции электронного пучка на химический состав металла сварного шва при электронно-лучевой сварке стали 12Х18Н10Т / Е.С. Саломатова // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14. – № 4. – С. 57-62.

163. Беленький В.Я. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

СОЮЗ электроники, электротехники и телекоммуникаций Болгарии (CEEC)

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ БОЛГАРСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (IE BAS)
Технологический центр электронно-лучевых и плазменных технологий и техники (TC EPTT LTD)
Международная конференция
"Электронно-лучевые технологии"
(EBT 2014)

Варна, Болгария

8 - 12 июня 2014 года

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
на доклад «Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке», сделанного по материалам диссертации
Саломатовой Екатерины Сергеевны

Разработанная математическая модель процессов испарения позволяет прогнозировать конечный химический состав сварных соединений, полученных при электронно-лучевой сварке с осцилляцией и расщеплением электронного луча, имеют научную обоснованность и новизну. Представленная тема является актуальной и имеет большую практическую значимость.

Изложенные в докладе материалы позволяют рекомендовать работу для защиты в диссертационном совете.

Председатель конференции,
член - корреспондент БАН,
профессор, д.ф. н. Г. М. Младенов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Открытое акционерное общество
«Пермский Моторный Завод»
(ОАО «ПМЗ»)

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
ОАО «Пермский Моторный Завод»
_____ И.Г. Башкатов

Отдел главного сварщика

АКТ

_____ № _____

использования результатов диссертационной работы Саломатовой Екатерины Сергеевны

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационного исследования Саломатовой Е.С., представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, на предприятии ОАО «Пермский моторный завод» используются в виде технологий электронно-лучевой сварки с динамическим воздействием на электронный луч с научно-обоснованным выбором параметров режима, обеспечивающих получение качественных сварных соединений при изготовлении деталей ответственного назначения.

Использование указанных результатов позволило снизить затраты на отработку технологий электронно-лучевой сварки.

Главный сварщик
ОАО «Пермский моторный завод» М.А. Кузнецов