



ПЕРМЯКОВ Глеб Львович

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШВОВ С ПАРАМЕТРАМИ
ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ
СВАРКЕ С ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ ЛУЧА**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов»

Научный руководитель:

доктор технических наук

Трушников Дмитрий Николаевич**Официальные оппоненты:**доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Оборудование и технологии
сварочного производства» Московского
политехнического университета, г. Москва**Ластовирия Вячеслав Николаевич**кандидат технических наук,
доцент кафедры «Лазерные технологии» Санкт-
Петербургского политехнического университета
Петра Великого, г. Санкт-Петербург**Земляков Евгений Вячеславович****Ведущая организация:**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет науки и
технологий имени академика М.Ф. Решетнева»,
г. Красноярск

Защита состоится «25» декабря 2018 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 999.100.02 на базе ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» и ФГБОУ ВО ПНИПУ по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках и на сайтах ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (<http://mpei.ru/>) и ФГБОУ ВО ПНИПУ (<http://pstu.ru/>).

Автореферат разослан «19» ноября 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Е.М. Федосеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Эффективное развитие промышленности подразумевает непрерывное совершенствование имеющихся и разработку новых технологических процессов, повышение экономических, эксплуатационных показателей и надёжности изделий. Одним из направлений, существенно расширяющим технологические возможности процесса сварки, является использование высококонцентрированных источников энергии. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) является одним из методов сварки, относящихся к этому перспективному и развивающемуся направлению, и обладает рядом технологических преимуществ перед другими видами сварки. Широкие возможности автоматизации процесса ЭЛС, ведение процесса в вакууме, обеспечивающим высокую чистоту обрабатываемого материала, концентрация энергии в электронном луче (ЭЛ), позволяющая получать глубокие и узкие швы с минимальной зоной термического влияния, способствовали внедрению ЭЛС в различные отрасли промышленности, такие как приборостроение, автомобилестроение, судостроение, аэрокосмическая отрасль для производства ответственных изделий из различных металлов и сплавов с высочайшими требованиями к качеству сварных соединений.

Значительный вклад в изучение процессов, протекающих при ЭЛС, разработку теоретических основ и методических рекомендаций, внесли такие ученые, как Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А., Назаренко О. К., Кайдалов А. А., Ольшанский Н.А., Башенко В. В., Миткевич Е. А., Лесков Г. И., Нестеренков В. М., Драгунов В.К., Ластовирия В.Н., Мелюков В. В., Mladenov G. M., Язовских В. М., Туричин Г.А, Судник В.А., Ерофеев В.А., Arata Y., Mauer K.O., Kaplan A., Ray R., Debroy T., Ch. Wang и др.

При ЭЛС широкое применение находят технологические приемы, обеспечивающие улучшенное формирование сварного шва. К ним относятся осцилляции ЭЛ по различным траекториям, позволяющие устранить характерные дефекты, такие как пикообразование в корневой части шва, а также, обеспечивающие возможность управлять параметрами сварных швов за счет изменения формы парогазового канала как важнейшего технологического параметра при ЭЛС. Имеющиеся методические рекомендации по выбору осцилляций основаны на экспериментальных данных и в большинстве случаев носят противоречивый характер. В целом данная предметная область изучена недостаточно.

Для прогнозирования параметров сварных швов часто применяют математическое моделирование. Широко известны успехи, достигнутые в области численного моделирования ЭЛС. Однако все результаты связаны с моделированием сварки статическим лучом. Комплексный характер, высокая скорость протекания процессов, высокие значения градиентов температур и многофакторность процессов делают непосредственное численное моделирование в условиях периодических воздействий крайне затруднительным, даже с использованием современных вычислительных ресурсов. Основной трудностью при моделировании остается определение формы парогазового канала. В связи с этим готовые методики и законченные динамические модели ЭЛС с осцилляцией луча, которые позволяют

определять влияние осцилляций на параметры сварных швов, отсутствуют до настоящего времени.

Для лучшего понимания процессов, протекающих при ЭЛС, в том числе для определения формы парогазового канала применяют различные экспериментально-теоретические, аналитические и численные методики, основанные на регистрации и обработке сигналов рентгеновского излучения и других вторичных сигналов из зоны сварки. Основные принципы реконструкции формы парогазового канала при электронно-лучевой и лазерной сварке изложены в работах Бравермана В.Я., Лаптенка В.Д., Трушников Д.Н., Seiji Katayama и др. Данные методики позволяют изучать влияние тех или иных осцилляций на форму парогазового канала, но не позволяют оценить параметры сварных швов. Для полноценного описания взаимосвязи формы парогазового канала с параметрами сварных швов необходимо математическое моделирование процесса обтекания канала проплавления заданной формы расплавом сварочной ванны.

Целью работы является установление связи геометрических параметров швов с параметрами парогазового канала при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча с использованием анализа вторичного тормозного рентгеновского излучения для повышения воспроизводимости параметров и качества сварных соединений.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1) Анализ существующих математических моделей, экспериментальных и теоретических данных по вопросам электронно-лучевой сварки с осцилляцией луча и методов исследования процессов, протекающих при электронно-лучевой сварке.

2) Разработка методики исследования процесса электронно-лучевой сварки с осцилляцией луча и распределения энергии луча в парогазовом канале по параметрам тормозного рентгеновского излучения.

3) Экспериментальные исследования процесса электронно-лучевой сварки с осцилляцией луча с использованием параметров сигнала тормозного рентгеновского излучения.

4) Разработка математической модели, связывающей параметры проплавления при электронно-лучевой сварке осциллирующим лучом с формой парогазового канала и параметрами экспериментально определяемого теплового источника.

Методология исследования. Поставленные задачи решались с использованием экспериментально-теоретических методов с применением вычислительного эксперимента. Математическое описание моделей тепломассопереноса в процессе ЭЛС выполнялось с помощью дифференциальных уравнений в частных производных с использованием теорий теплопроводности и классической механики. Численная реализация моделей тепловых и гидродинамических процессов выполнена с использованием прикладного пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Экспериментальные исследования проводились на действующем технологическом оборудовании. Измерения параметров швов проводились с применением оптической микроскопии.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается использованием калиброванного измерительного оборудования и современных средств проведения исследований, корректностью принимаемых допущений, обоснованностью методов исследований и верификацией моделей по экспериментальным данным, полученным на действующих технологических установках для электронно-лучевой сварки.

Научная новизна работы.

1) Установлена взаимосвязь параметров вторичного сигнала тормозного рентгеновского излучения с распределением тепловой энергии луча относительно парогазового канала при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча.

2) Получены закономерности протекания турбулентных явлений в сварочной ванне от формы парогазового канала при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча.

3) Разработана численная математическая модель, описывающая зависимость параметров сварных швов при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча от формы парогазового канала и распределения в нем тепловой энергии.

Практическая значимость работы:

Разработано устройство для определения распределения плотности тока электронного луча, повышающее точность измерения за счет снижения влияния вторичных электронов.

Разработан способ определения распределения энергии луча в канале проплавления при ЭЛС с осцилляцией на основе экспериментального определения распределения плотности тока электронного луча и анализа параметров вторичного сигнала тормозного рентгеновского излучения из зоны сварки.

Разработанная математическая модель процессов тепломассопереноса при ЭЛС с осцилляцией луча на основе экспериментально определяемых формы парогазового канала и параметров теплового источника может быть использована для диагностики геометрических параметров сварных швов.

Результаты диссертационного исследования по моделированию электронно-лучевой сварки с осцилляцией луча использованы на предприятии ПАО «Протон-ПМ» при разработке технологии изготовления деталей ответственного назначения. Использование результатов исследования позволило повысить стабильность качества и свойства сварных соединений.

Поддержка работы. Диссертационная работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете в рамках грантов РФФИ №13-08-00397А «Реконструкция формы проплавления по параметрам вторичного тока в плазме при электронно-лучевой сварке», РФФИ-Урал №14-08-96008 p_урал_a «Моделирование процессов в области проплавления при электронно-лучевой сварке с периодическим воздействием на пучок», Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть) № 1201460538 «Совершенствование технологий и исследование процессов при лучевых способах сварки», Государственного задания

Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть) проект № 9.9697.2017 /8.9 «Разработка технологических основ гибридных аддитивных технологий с подачей проволочного присадочного материала» и при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (RFMEFI58317X0062) в рамках проекта BRICS «Гибридный процесс изготовления деталей для аэрокосмической отрасли: моделирование, разработка программного обеспечения и верификация».

На защиту выносятся следующие основные результаты, полученные соискателем:

1) Устройство для определения распределения плотности тока и геометрических параметров электронного луча, повышающее точность измерения за счет снижения влияния вторичных электронов.

2) Способ исследования процессов в парогазовом канале и определения распределения энергии в нем при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча по вторичному сигналу тормозного рентгеновского излучения, генерируемого в процессе сварки.

3) Результаты численного исследования влияния формы парогазового канала на интенсивность турбулентных явлений в сварочной ванне при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча.

4) Численная математическая модель процессов теплопереноса при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча на основе экспериментально определяемой формы парогазового канала и распределения в нем энергии электронного луча.

Апробация результатов. Основные результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на различных научно-практических конференциях и симпозиумах. Среди них: Всероссийская конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» НТИ-2013, г. Новосибирск, 21-24 октября 2013 г.; Международная научно-техническая конференция «Технологии и оборудование ЭЛС-2014», г. Санкт-Петербург, 24-26 июня 2014 г.; 14-ая международная научно-техническая конференция «Сварка и родственные технологии», г. Екатеринбург, 25-27 октября 2014 г.; Международный симпозиум «Visual-JW 2014», г. Осака, Япония, 26-28 ноября 2014 г.; Международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии», г. Москва, 17-20 ноября 2015 г.; Международный симпозиум «Сварка и родственные технологии», г. Минск, Беларусь, 6 апреля 2016 г.; Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2016», г. Пермь, 3-7 октября 2016 г.; X международная научно-практическая конференция «Современные проблемы машиностроения» СПМ-2016, г. Томск, 27-29 октября 2016 г.; 16-ая международная научно-техническая конференция «Сварка и родственные технологии», г. Екатеринбург, 22-23 ноября 2016 г.; Вторая международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии», г. Москва, 14-17 ноября 2017 г.; 9-я международная Конференция "Лучевые технологии и применение лазеров", г. Пушкин, 17-19 сентября 2018 г.

Личный вклад автора состоит в разработке методики проведения исследования, математическом моделировании, получении и анализе результатов, в постановке совместно с научным руководителем цели и задач исследования и формулировке положений, определяющих научную новизну работы. Основные экспериментальные работы автор диссертации выполнил в качестве инициатора или ответственного исполнителя в научном коллективе, что отражено в составе авторов опубликованных работ.

Соответствие научной специальности

Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, полностью соответствуют областям, приведенным в паспорте специальности 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии, а именно:

- 1) Физические процессы в материалах при сварке и родственных технологиях, фазовые и структурные превращения, образование соединений и формирование их свойств.
- 2) Тепловые процессы и деформации при сварке, пайке и наплавке.
- 3) Физико-химические процессы в сварочных источниках энергии – дуге, плазме, электронном, световом и лазерном луче.
- 4) Технологические основы сварки плавлением и давлением.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 17 научных трудов, в том числе 6 – входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени, и в международные базы цитирования Web of Science, Scopus, получен 1 патент РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы составляет 151 страница, включая 10 таблиц, 85 рисунков. Библиографический список использованной литературы составляет 180 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость, апробация, количество и виды публикаций, структура и объем работы.

В первой главе рассмотрены различные литературные данные в области исследования влияния осцилляций ЭЛ на процессы при ЭЛС. Выявлено, что до сих пор не разработаны методики выбора того или иного вида (формы) и параметров осцилляции, а существующие рекомендации носят противоречивый характер. Выполнен анализ процессов, сопутствующих ЭЛС и существующих исследований в области моделирования процессов тепломассопереноса в процессе сварки. Отмечено, что высокая скорость протекания процессов, высокие значения градиентов температур, многофакторность процессов и комплексный характер процесса формирования парогазового канала делают непосредственное численное моделирование в условии периодических воздействий крайне затруднительным даже с использованием современных вычислительных ресурсов. В связи с этим до настоящего времени отсутствуют

законченные модели ЭЛС с осцилляцией луча. Проведен обзор различных методик исследования процессов, протекающих при ЭЛС по вторичным сигналам из зоны сварки. Описана методика исследования процессов ЭЛС с осцилляцией луча, основанная на решении задачи реконструкции формы канала проплавления по параметрам тормозного рентгеновского излучения, генерируемого в процессе сварки. При использовании этой методики обработка сигналов производится методом синхронного накопления и каждому положению зоны взаимодействия луча со стенками парогазового канала сопоставляется среднее значение сигнала тормозного рентгеновского излучения. Это дает информацию о форме парогазового канала и может использоваться в качестве входных параметров при моделировании ЭЛС с осцилляцией луча.

Во второй главе описывается методика проведения исследований, используемое программное обеспечение, стандартное и разработанное экспериментальное оборудование. Схемы проведения экспериментов с различным расположением датчика рентгеновского излучения представлены на рисунке 1. Для регистрации рентгеновского излучения был разработан малогабаритный датчик (Рисунок 2) с использованием кремниевого фотоэлектронного умножителя и сцинтилляционного детектора на основе монокристалла активированного йодистого цезия (рисунок 3).

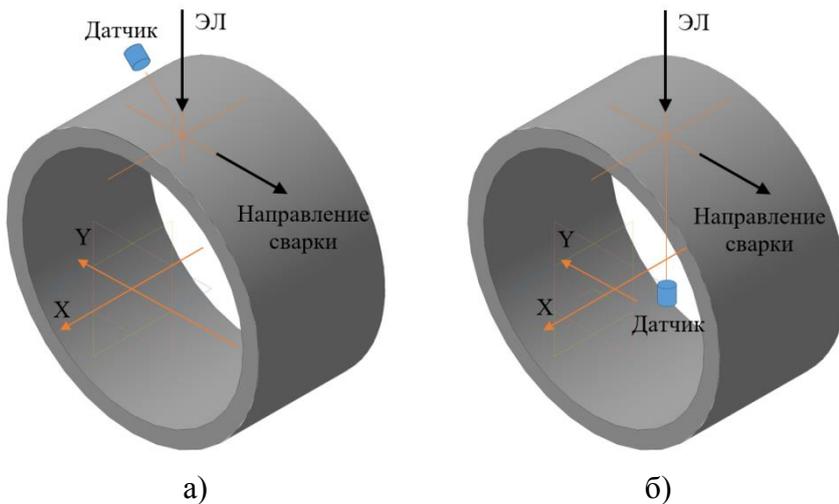


Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента с расположением датчика рентгеновского излучения со стороны ввода ЭЛ в изделие (а) и с обратной стороны (б)



Рисунок 2 – Датчик для регистрации рентгеновского излучения

При расположении датчика над зоной сварки регистрировалось тормозное рентгеновское излучение, а при нижнем расположении датчика – проходящее тормозное рентгеновское излучение. Усиленный сигнал с фотоумножителя подавался на компьютерную информационно-измерительную систему с аналого-цифровым интерфейсом на базе модуля E20-10 фирмы L-Card, и дальнейшая обработка сигнала выполнялась методом синхронного накопления.



Рисунок 3 – Компоненты датчика рентгеновского излучения:

- 1 – сцинтилляционный детектор;
- 2 – кремниевый фотоумножитель

Устройство отличается от известных аналогов формой коллектора, обеспечивающей повышение точности измерения за счет снижения влияния отраженных электронов и конструкцией щелевой диафрагмы.

Конструкция диафрагмы позволяет выполнять дифференциальные и интегральные измерения параметров луча и повышает точность измерения параметров луча малых поперечных размеров.

Схема измерения плотности тока луча представлена на рисунке 5. ЭЛ несколько раз сканирует щелевую диафрагму по круговой развертке. Сигнал от каждой из щелей, представляющий собой проекцию двумерного распределения плотности тока луча в направлении щели, обрабатывают методами компьютерной томографии и в результате получают трехмерное распределение плотности тока.

На рисунке 6 представлено восстановленное распределение плотности тока луча, использованное при разработке моделей тепловых источников при ЭЛС.

Целью экспериментальных исследований являлось установление закономерностей формирования сигнала, регистрируемого датчиком рентгеновского излучения, для построения аппроксимированной формы парогазового канала и распределения тепловой энергии относительно стенок парогазового канала.

Для устранения возможных погрешностей при использовании аппроксимированных параметров тепловых источников было разработано устройство для измерения распределения плотности мощности и геометрических параметров ЭЛ (рисунок 4).

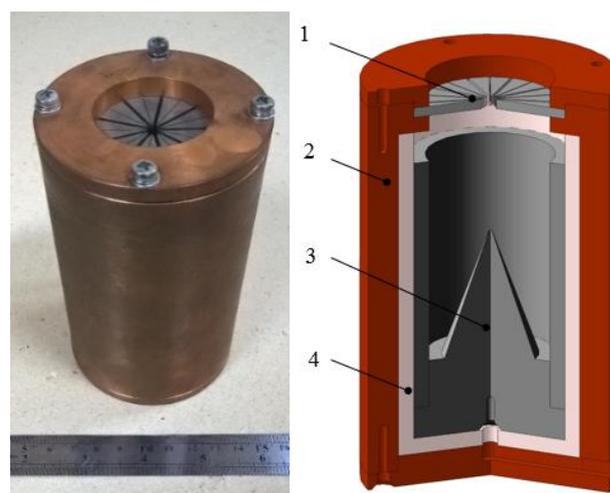


Рисунок 4 – Устройство для определения распределения плотности тока ЭЛ: 1 – диафрагма с радиальными щелями ; 2 – корпус; 3 – коллектор; 4 – изолятор

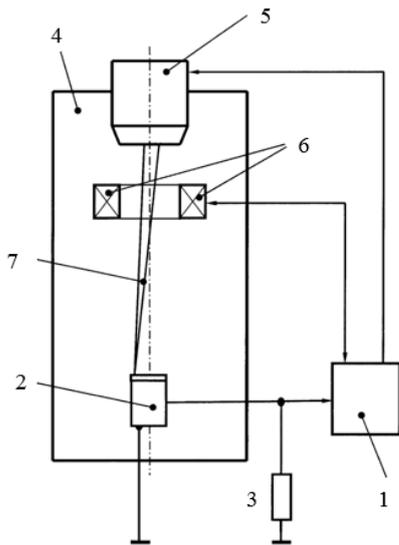


Рисунок 5 – Схема измерения плотности тока ЭЛ:
 1 – контроллер; 2 – цилиндр Фарадея; 3 – нагрузочный резистор; 4 – вакуумная камера; 5 – электронная пушка; 6 – отклоняющая катушка; 7 – ЭЛ

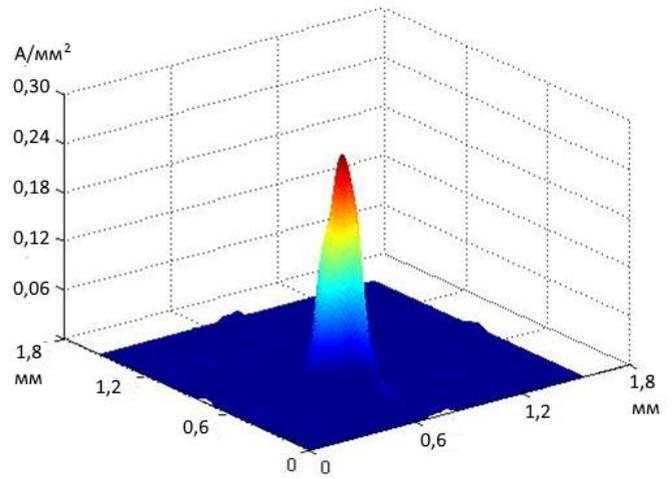


Рисунок 6 – Восстановленное трехмерное распределение плотности тока ЭЛ (ток луча 35 мА, острый фокус)

В третьей главе представлены и систематизированы результаты экспериментов по ЭЛС образцов из различных сталей и регистрации сигналов тормозного рентгеновского излучения. При расположении датчика с обратной стороны образца появляется дополнительная информация о процессах, протекающих в корневой части парогазового канала. На рисунке 7 представлена осциллограмма сигнала проходящего тормозного рентгеновского излучения при ЭЛС с продольной осцилляцией. При использовании осцилляции ЭЛ сигнал имеет упорядоченный вид.

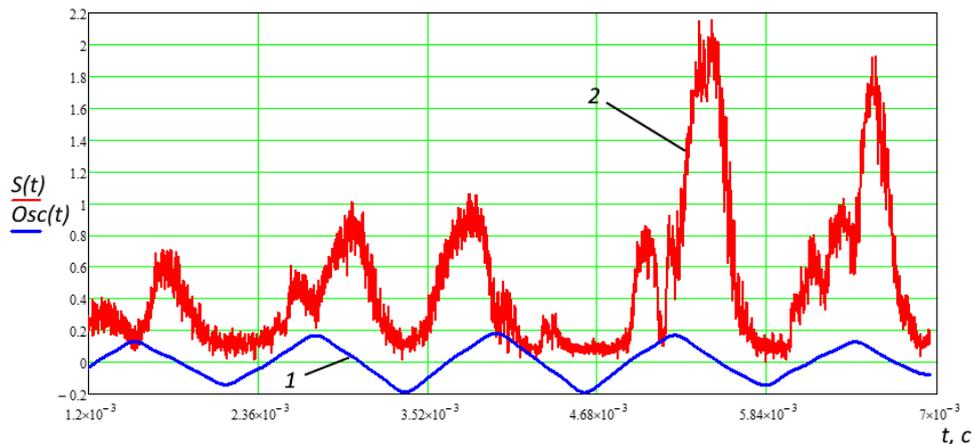


Рисунок 7 – Осциллограмма сигналов тока отклоняющей системы (1) и проходящего рентгеновского излучения (2) (ЭЛС с продольной осцилляцией: амплитуда $A=0,8$ мм, частота $f=810$ Гц, $I_{св}=45$ мА, острый фокус, скорость сварки 5 мм/с)

Обработка сигнала проходящего рентгеновского излучения методом синхронного накопления показала, что моментам времени, когда луч взаимодействует с нижними участками парогазового канала, соответствуют максимальные значения сигнала при минимальной величине недопроплава. При взаимодействии с верхними областями

парогазового канала уровень сигнала минимален. Анализ результатов обработки позволяет получить информацию распределении энергии луча относительно парогазового канала (рисунок 8).

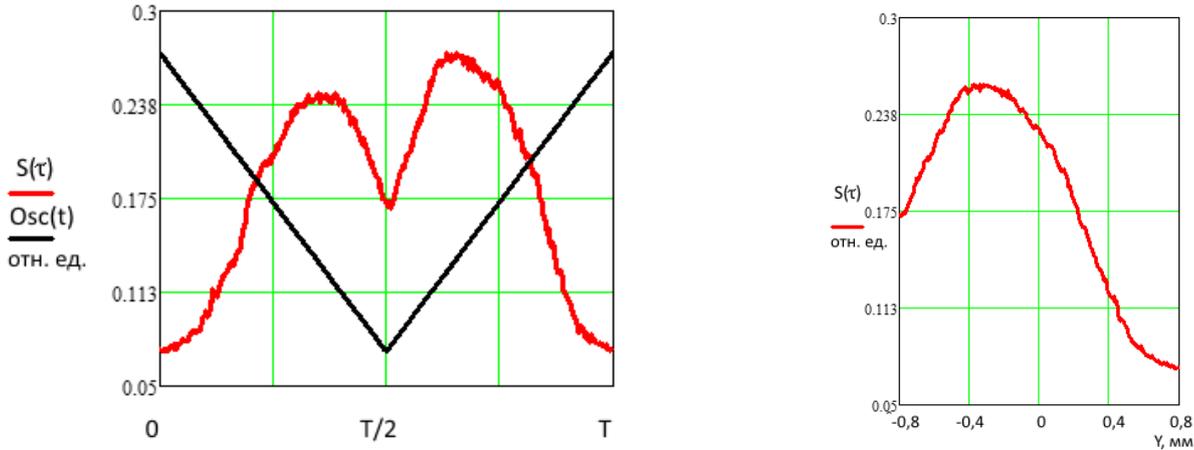


Рисунок 8 – Результаты обработки сигнала тормозного рентгеновского излучения методом синхронного накопления: а) в фазовом пространстве – сигнал-смещение, б) с усреднением по половине периода (ЭЛС с продольной осцилляцией луча: амплитуда $A=0,8$ мм, частота $f=810$ Гц, $I_{ce}=45$ мА, острый фокус, скорость сварки 5 мм/с)

Ширина графика определяется величиной размаха осцилляции, при этом существует отчетливый пик сигнала относительно центра осцилляции луча, что соответствует взаимодействию луча с корневой частью парогазового канала.

На рисунке 9 приведена зависимость параметров проходящего тормозного рентгеновского излучения от глубины проплавления. Параметр сигнала проходящего тормозного рентгеновского излучения зависит от глубины положения зоны взаимодействия ЭЛ со стенками парогазового канала. Сигнал минимален при взаимодействии с верхними областями парогазового канала и увеличивается по мере увеличения глубины парогазового канала по закону, близкому к экспоненциальному.



Рисунок 9 – Экспериментальная зависимость параметров проходящего рентгеновского излучения от глубины проплавления при ЭЛС стали 15Х5М с продольной осцилляцией луча ($P=3$ кВт, частота осцилляции $f=645$ Гц, размер развёртки $2A=1,5$ мм)

Сигнал проходящего тормозного рентгеновского излучения, полученный при ЭЛС с осцилляцией ЭЛ и обработанный методом синхронного накопления, отражает форму парогазового канала (рисунок 10). Для наглядности масштабы вдоль вертикальной и горизонтальной осей выбраны различными.

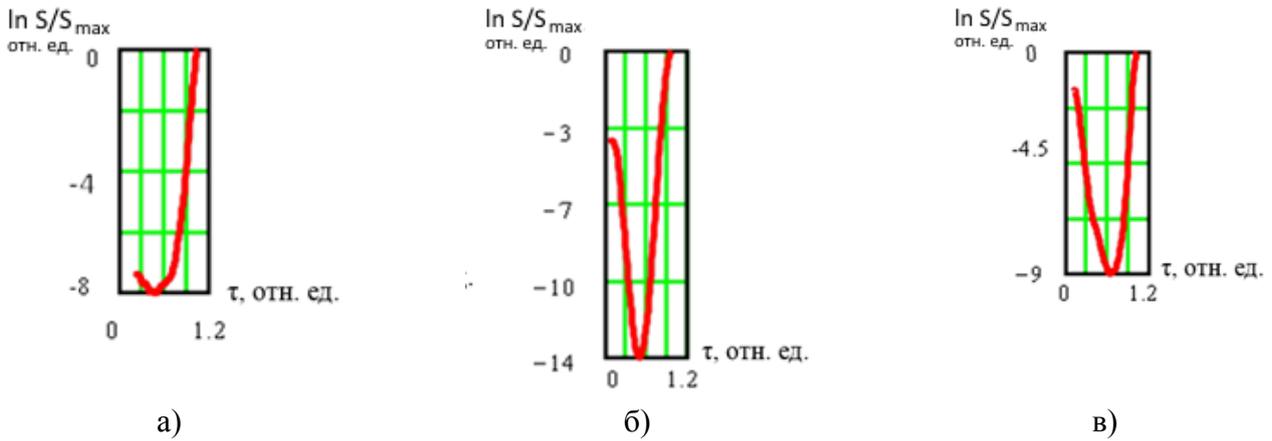


Рисунок 10 – Обработанный сигнал тормозного рентгеновского излучения (продольная проекция) полученный при ЭЛС стали 15X5M с продольной осцилляцией луча для различных режимов фокусировки: а) недофокусированный $\Delta I_f = -12$ мА; б) острый фокус $\Delta I_f = 0$ мА; в) перефокусированный $\Delta I_f = +15$ мА ($P=3$ кВт; частота осцилляции $f=630$ Гц; размер развертки $2A=1,5$ мм; $V=5$ мм/с)

Помимо изменения проплавляющей способности при изменении режима фокусировки изменяется характер взаимодействия луча со стенками канала проплавления. При сварке на недофокусированном режиме электронный луч взаимодействует в основном с передней стенкой парогазового канала, на перефокусированном режиме и острой фокусировке – с передней и задней стенками практически одинаково.

В четвертой главе представлены разработанные математические модели ЭЛС с осцилляцией луча и результаты их численной реализации методом конечных элементов с использованием прикладного пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics 4.4.

Необходимость учета турбулентности в процессе сварки оценивалась при исследовании влияния формы парогазового канала на интенсивность турбулентных явлений при ЭЛС, посредством прямого численного моделирования. Течение жидкого металла описывается системой уравнений непрерывности и движения для несжимаемой жидкости в подвижной системе координат. Для определения реакции среды на форму обтекаемого тела использовались безразмерные коэффициенты сопротивления и подъемной силы:

$$C_x = \frac{2F_c}{\rho \bar{U}^2 S}, \quad C_y = \frac{2F_n}{\rho \bar{U}^2 S}, \quad (1)$$

где F_c и F_n – сила сопротивления и подъемная сила, соответственно; ρ – плотность среды; \bar{U} – скорость набегающего потока; S – характерная площадь.

Сила сопротивления и подъемная сила рассчитываются по формулам:

$$F_c = \int_S \left(\rho v \frac{\partial v_t}{\partial n} n_y - P n_x \right) dS, \quad F_n = \int_S \left(\rho v \frac{\partial v_t}{\partial n} n_x - P n_y \right) dS, \quad (2)$$

где \vec{n} – вектор нормали к S ; n_x , n_y – компоненты вектора нормали вдоль осей X, Y соответственно; v_t – тангенциальная скорость к S .

В результате численного эксперимента были получены расчетные поля скоростей в расплаве при ЭЛС без осцилляции луча, с поперечной осцилляцией и продольной осцилляцией (рисунок 11) в диапазоне скоростей сварки (V_w) от 1 до 41 мм/с.

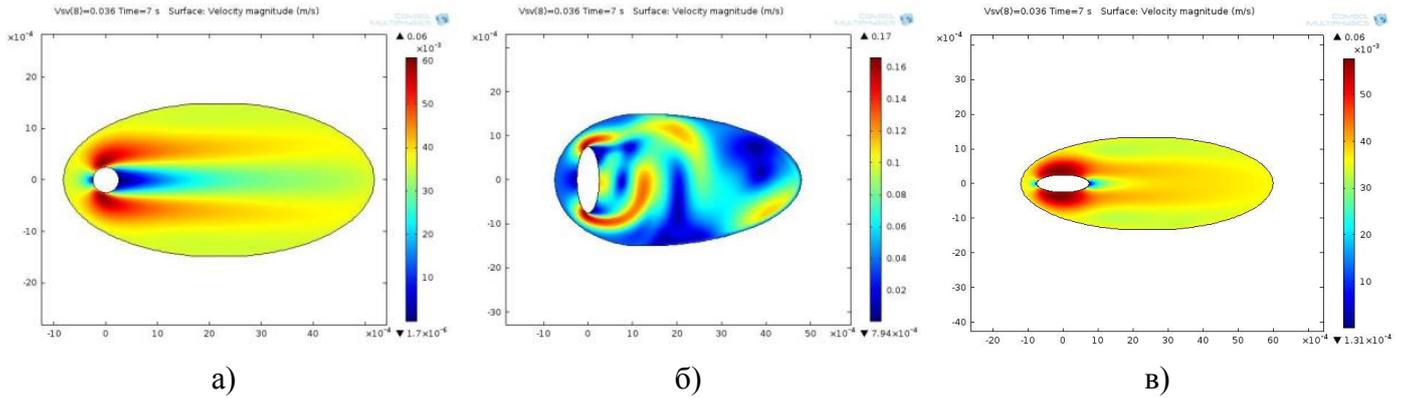


Рисунок 11 – Расчетные поля скоростей при ЭЛС с различными осцилляциями:
 а) без осцилляции луча; б) поперечная осцилляция; в) продольная осцилляция

Для всех исследуемых режимов, кроме ЭЛС с поперечной осцилляцией луча, во всем заданном диапазоне скоростей не наблюдается возникновения вихревых течений («дорожек Кармана»), в то время как при ЭЛС с поперечной осцилляцией луча при скоростях сварки более 10 мм/с наблюдается появление вихревых дорожек и переход от ламинарного режима течения расплава к турбулентному с дальнейшим развитием вихревых течений.

Расчетные зависимости безразмерных коэффициентов сопротивления и подъемной силы от времени для турбулентного течения расплава имеют периодический характер. Время перехода в установившийся режим составляет величину порядка 3,5 сек. На рисунке 12 представлены параметры колебаний расчетных зависимостей безразмерных коэффициентов сопротивления и подъемной силы от скорости сварки при ЭЛС с поперечной осцилляцией луча.

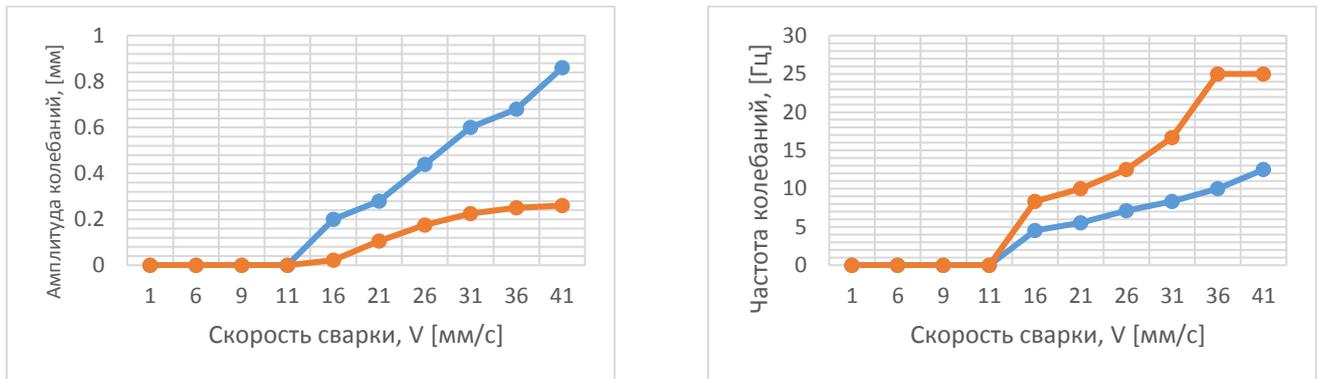


Рисунок 12 – Графики зависимости параметров колебаний безразмерных коэффициентов от скорости сварки при ЭЛС с поперечной осцилляцией луча (C_x — , C_y —)

При возникновении возмущений в сварочной ванне колебания безразмерных коэффициентов сопротивления и подъемной силы характеризуются малой частотой и амплитудой, которые увеличиваются пропорционально значению скорости сварки.

В плоскости, перпендикулярной оси канала, возможно возникновение слабых вихревых течений в области жидкого расплава за парогазовым каналом. На ослабление вихревых течений влияет форма канала проплавления и, как следствие, вид и параметры применяемого периодического воздействия. Это позволяет сделать вывод о том, что при моделировании

процессов ЭЛС турбулентность целесообразно учитывать лишь при скоростях более 10 мм/сек.

Связь формы пароголового канала и распределения энергии в нем с формой и параметрами сварных швов при ЭЛС с осцилляцией луча описывается посредством разработанной трехмерной математической модели ЭЛС с осцилляцией луча.

При моделировании были приняты следующие допущения: задача решается в квазистатической постановке; среда является несжимаемой; фазовые переходы моделируются скачком вязкости и введением скрытой теплоты плавления; используется аппроксимированная на основе экспериментальных данных форма пароголового канала и распределение тепловой энергии в нем. Расчетная схема представлена на рисунке 13.

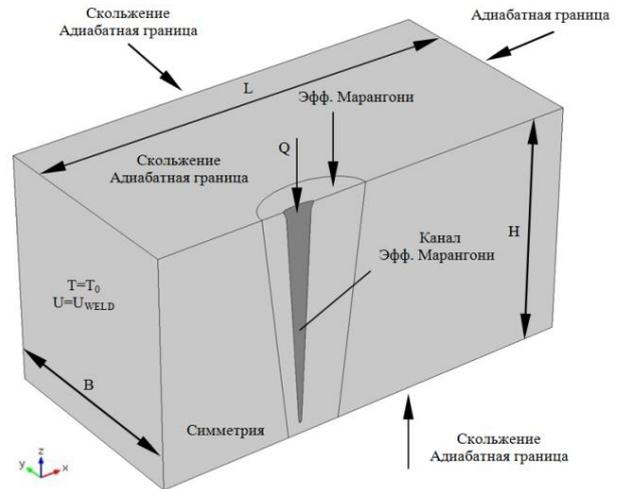


Рисунок 13 – Расчетная схема процесса ЭЛС

Модель основана на совместном решении тепловой и гидродинамической задачи обтекания жидким металлом канала проплавления в трехмерной постановке. Течение жидкого металла описывается уравнением непрерывности и уравнением движения для несжимаемой жидкости в подвижной системе координат:

$$\rho \cdot \operatorname{div} \vec{u} = 0, \quad (3)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \mu \cdot \nabla^2 \vec{u} - \nabla P + F, \quad (4)$$

где ρ – плотность, \vec{u} – вектор скорости течения расплава, μ – динамическая вязкость, P – давление, F – слагаемое, учитывающее термогравитационную конвекцию, диссипацию энергии в двухфазной зоне и перемещение среды со скоростью сварки:

$$F = \rho g \alpha (T - T_{ref}) - C \left(\frac{1 - f_L}{f_L^3 + B} \right) (\vec{u} - V_{cv}) + \rho V_{cv} \frac{\partial (\vec{u} - V_{cv})}{\partial x}, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, α – коэффициент термического расширения, T – абсолютная температура, T_{ref} – исходная температура, принятая как температура солидуса (T_S), V_{cv} – скорость сварки.

Распределение тепловой энергии источника в металле может быть описано с помощью дифференциального уравнения переноса энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \vec{u} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{q}{c\rho}, \quad (6)$$

где T – абсолютная температура, $a = \lambda / C_{eff} \cdot \rho$ – коэффициент температуропроводности, \vec{u} – вектор скорости течения расплава, c – теплоёмкость, ρ – плотность, Q – подводимая тепловая мощность.

На свободной поверхности сварочной ванны и стенках канала учитывается термокапиллярные явления (эффект Марангони):

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = f_L \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \mu \frac{\partial v}{\partial z} = f_L \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial y}; \quad \mu \frac{\partial w}{\partial z} = f_L \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

где u , v , w – компоненты скорости вдоль осей X, Y и Z соответственно, μ – динамическая вязкость, f_L – жидкая составляющая, $d\gamma/dT$ – температурный коэффициент поверхностного натяжения, T – абсолютная температура.

При осцилляции ЭЛ формируется усредненное вдоль траектории распределение плотности мощности. Плотность теплового потока в случае линейной осцилляции вдоль оси X с постоянной скоростью сканирования (Рисунок 14) описывается кусочно-заданной функцией:

$$J_{osc}(x, y) = \begin{cases} k \cdot J_b(x + Ax, y), & x < -Ax \\ k \cdot J_b(0, y), & -Ax \leq x \leq Ax \\ k \cdot J_b(x - Ax, y), & x > Ax \end{cases} \quad (8)$$

где $J_b(x, y)$ функция плотности теплового потока статического ЭЛ с максимумом функции распределения в начале координат, Ax – амплитуда осцилляции. Нормирующий коэффициент k определяется из условия:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} k \cdot J_{osc}(x, y) dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J_b(x, y) dx dy. \quad (9)$$

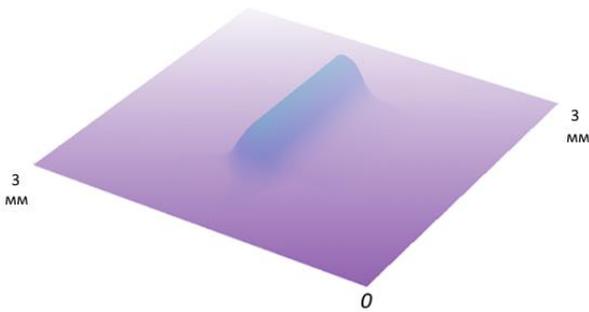


Рисунок 14 – Трехмерное распределение плотности теплового потока ЭЛ при продольной осцилляции,
 $J_{osc}(0,0)=2224$ Вт/мм²

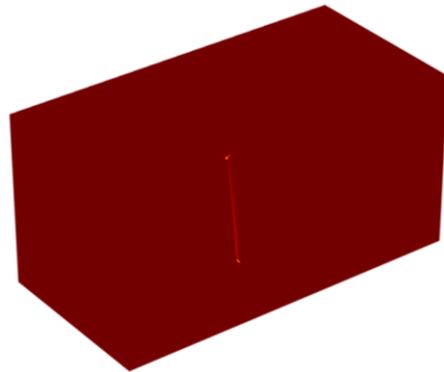


Рисунок 15 – Распределение плотности теплового потока ЭЛ при продольной осцилляции на недофокусированном режиме:
 $(\Delta I_f = -12$ мА; $P=3$ КВт; частота осцилляций $f=630$ Гц;
 Размер развертки $2A=1,5$ мм; $V_{св}=5$ мм/с)

Аппроксимированная форма парогазового канала и распределение энергии относительно его стенок определяется экспериментально с использованием предложенных методик посредством анализа параметров сигнала тормозного рентгеновского излучения (рисунок 15). Верификации предложенной модели осуществлялась сопоставлением расчетных и экспериментальных поперечных сечений сварных швов, полученных при ЭЛС стали 15X5М с продольной осцилляцией для различных режимов фокусировки (рисунок 16). Изменение ширины верхней части шва связано с изменением интенсивности конвекции Марангони и

становится максимальным при перефокусированном режиме. Экспериментальные и расчётные данные хорошо согласуются, и максимальная погрешность при расчетах не превышают 5,0 %, что позволяет судить об адекватности разработанной модели.

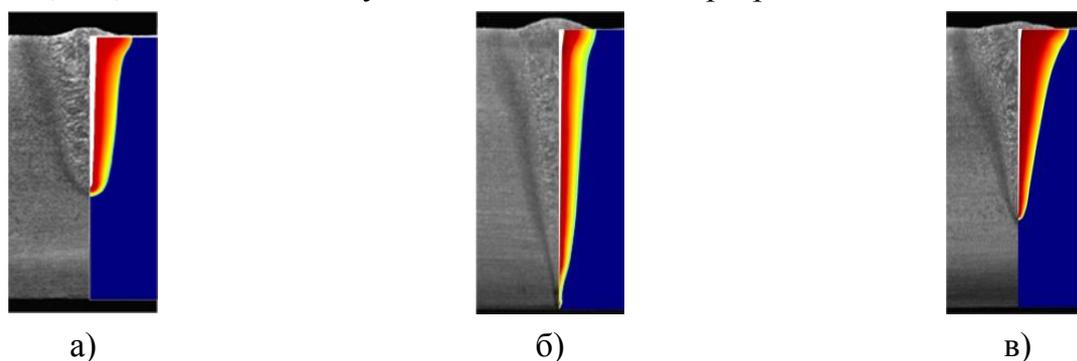


Рисунок 16 – Экспериментальные и расчетные поперечные сечения сварных швов, полученные при ЭЛС стали 15X5M с продольной осцилляцией луча при различных режимах фокусировки:

а) недофокусированный $\Delta I_f = -12$ мА; б) острый фокус $\Delta I_f = 0$ мА в) перефокусированный $\Delta I_f = +15$ мА.
($P=3кВт$ частота осцилляции $f=645Гц$, размер развёртки $2A=1,5$ мм, скорость сварки $V_{св}=5$ мм/с)

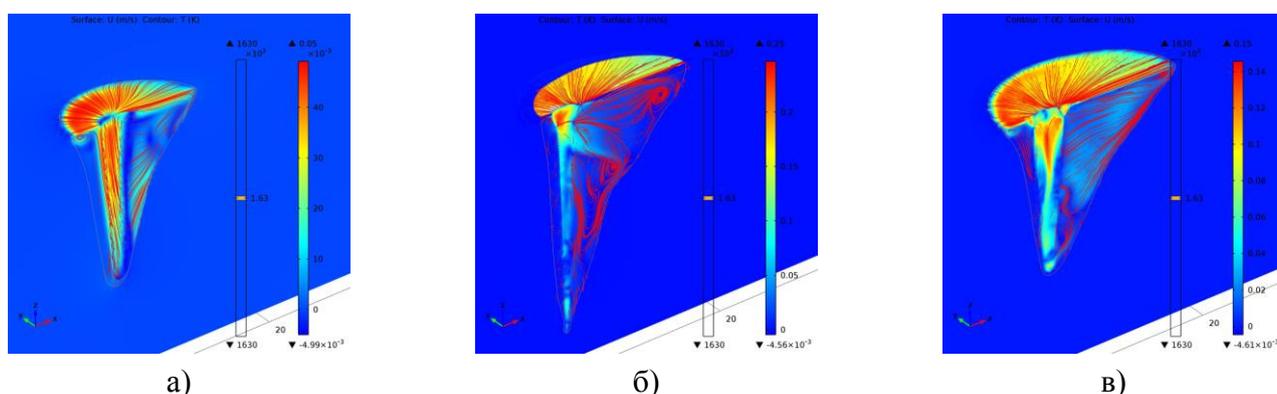


Рисунок 17 – Поля скоростей при ЭЛС с продольной осцилляцией луча для различных режимов фокусировки: а) недофокусированный $\Delta I_f = -12$ мА; б) острый фокус $\Delta I_f = 0$ мА;

в) перефокусированный $\Delta I_f = +15$ мА ($P=3кВт$ частота осцилляции $f=645Гц$, размер развёртки $2A=1,5$ мм, скорость сварки $V_{св}=5$ мм/с)

Анализ значимости различных факторов на формирование геометрии проплавления показал, что одной из причин специфической формы проплавления с уширением в верхней части являются конвективные явления в жидкой фазе (характерные значения чисел Марангони и Рэлея составили $5 \cdot 10^3$ и $2 \cdot 10^3$). Интенсивность этих явлений зависит от распределения вводимой энергии в канале проплавления и, как следствие, от режима фокусировки (рисунок 17). Установлено, что интенсивность конвективных течений, обусловленных эффектом Марангони, повышается при переходе от недофокусированного режима к перефокусированному. Интенсивность термогравитационной конвекции при этом несколько снижается. Конвективные вихревые течения раскладываются на две зоны в верхней и средней частях.

Таким образом, разработанная модель позволяет описать взаимосвязь формы проплавления с формой парогазового канала и распределением в нем энергии, что может быть использовано для верификации достижения заданных геометрических характеристик

проплава непосредственно после завершения сварочной операции без применения методов разрушающего контроля. Получаемые закономерности формирования сварных швов обеспечивают возможность формулирования рекомендаций по выбору технологических параметров процесса, а также сопутствующих технологических приемов для достижения требований к параметрам сварных швов. Сочетание предложенной модели с разработанными методами анализа сигнала тормозного рентгеновского излучения использовалось при разработке технологии ЭЛС с осцилляцией луча деталей ответственного назначения из сталей 03X12H10MTP-BД, 07X12HMBФ-Щ, 38ХС и 12X18H10T на предприятии ПАО «Протон-ПМ». В результате работ по оптимизации параметров технологических процессов для обеспечения стабильности качества и свойств сварных соединений были разработаны технологические рекомендации по выбору характеристик осцилляции ЭЛ и режима фокусировки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1) Проведен анализ существующих математических моделей, экспериментальных и теоретических данных по вопросам ЭЛС с осцилляцией луча и методов исследования процессов, протекающих при ЭЛС. Показана необходимость разработки математической модели, связывающей форму пароголового канала и распределение в нем энергии с параметрами сварных швов, сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения цели.

2) Разработано устройство для определения распределения плотности тока ЭЛ. Получение реального распределения плотности тока луча основывается на методе компьютерной томографии. Особенности конструкции является использование коллектора специальной формы, что позволяет повысить точность измерения за счет снижения влияния отраженных электронов, а использование диафрагмы с набором узких и широких радиальных щелей позволяет выполнять дифференциальные и интегральные измерения параметров ЭЛ и повышает точность измерения параметров ЭЛ малых поперечных размеров.

3) Предложен способ определения распределения энергии относительно пароголового канала по параметрам вторичного сигнала тормозного рентгеновского излучения при ЭЛС с осцилляцией луча. Установлено, что при ЭЛС с продольной осцилляцией луча на недофокусированном режиме ЭЛ взаимодействует в основном с передней стенкой пароголового канала, на перефокусированном режиме и при острой фокусировке – с передней и задней стенками практически одинаково.

4) Разработана математическая модель процессов тепломассопереноса при обтекании жидким металлом пароголового канала экспериментально определяемой формы при ЭЛС с осцилляцией луча. Модель выражает взаимосвязь геометрических параметров швов с параметрами тормозного рентгеновского излучения при ЭЛС с осцилляцией луча. Погрешность при определении геометрических характеристик шва не превышает 5%.

Проведено исследование влияния формы парогазового канала на характер течения металла при ЭЛС с осцилляцией луча.

Полученная модель в сочетании с разработанными методами анализа сигнала тормозного рентгеновского излучения использовалась при разработке технологии ЭЛС с осцилляцией луча деталей ответственного назначения на предприятии ПАО «Протон-ПМ». Использование предложенных подходов позволило снизить количество металлографических исследований и сроки выполнения работ на 50%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Входящие в базы цитирования Web of Science, Scopus и (или) рецензируемые ВАК:

- 1) Моделирование тепловых процессов при электронно-лучевой сварке разнородных материалов / Г.Л. Пермяков, Т.В. Ольшанская, В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2013. - Т. 15, № 6(2). - С. 458-463.
- 2) Численное моделирование процесса электронно-лучевой сварки с продольной осцилляцией луча на основе экспериментально определенной формы канала проплавления / Г.Л. Пермяков, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Т.В. Ольшанская // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. - 2015. - Т. 16, № 4. - С. 828-832.,
- 3) Особенности сигнала тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного луча / С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Г. Л. Пермяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. «Машиностроение, материаловедение». - 2016. - Т. 18, № 3. - С. 93-106.
- 4) The Influence of Electron Beam Oscillation on the Crystallization and Structure of Dissimilar Steel-Bronze Welds / T.V. Olshanskaya, G.L. Permyakov, V.Y. Belenkiy, D.N. Trushnikov // Modern Applied Science. - 2015. - Vol. 9, № 6. - P. 296-309.
- 5) Numerical simulation of electron beam welding with beam oscillations / D.N. Trushnikov, G.L. Permyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2017. - Vol. 177: Intern. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016, 27-29 October 2016, Tomsk, Russian Federation. - Art. 012085. 5 p.
- 6) Electron beam welding of aluminum alloy AlMg6 with a dynamically positioned electron beam / T.V. Olshanskaya, E.C. Salomatova, V.Y. Belenkiy, D.N. Trushnikov, G.L. Permyakov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2017. - Vol. 89, Iss. 9. - P. 3439-3450.

Патент:

- 7) Патент № 2580266 Устройство для определения распределения плотности энергии и контроля фокусировки электронного пучка / Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Кротова Е.Л., Пермяков Г.Л., Мусихин Н.А. [и др.], Российская Федерация, МПК В23К 15/02. № 2015100016/02; заявл. 12.01.2015; опубл. 10.04.2016 Бюл. № 10. – 13 с.