

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева»**

На правах рукописи

Курашкин Сергей Олегович

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор, А. В. Мурыгин

Красноярск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Анализ моделей и методов автоматизированного управления электронно-лучевой сваркой.....	9
1.1 Методы получения сварных соединений при электронно-лучевой сварке	9
1.2 Методы моделирования тепловых процессов при электронно-лучевой сварке	13
2 Разработка методик и модели для процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций в установившемся режиме.....	22
2.1 Выбор схемы нагреваемого тела	24
2.2 Описание теплофизических величин.....	25
2.3 Разработка математической модели для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали.....	27
2.4 Методика для оценки глубины и ширины сварного шва при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей	36
2.5 Верификация предложенной модели путем имитационного моделирования	49
2.6 Разработка методики оптимизации технологических параметров сварки с применением адаптивного управления.....	60
3 Разработка макета автоматизированной системы управления ЭЛС	68
3.1 Проектирование программной системы АСУ ЭЛС.....	70
3.2 Описание работы программной системы АСУ ЭЛС.....	79
3.3 Верификация предложенного подхода посредством натурных экспериментов	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	101
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	128

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. На сегодняшний день тонкостенные конструкции (толщина которых составляет до 2 мм) широко используются в аэрокосмической технике, судостроении, приборостроении и промышленном строительстве. Для создания неразъёмных соединений зачастую на производстве используется электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Существует проблема, заключающаяся в неизвестности оптимальных режимов сварки для тонкостенных деталей при ЭЛС в установившемся режиме при вводе новых деталей. Соединение тонкостенных деталей требует равномерности зоны нагрева стыка свариваемых деталей, так как при неравномерности их нагрева возникают дефекты сварных соединений. Требуемые параметры технологического процесса сварки обычно подбираются при помощи натурных экспериментов. Однако, проведения натурных экспериментов является материально затратным и требует большого количества времени.

Разработка новых методов и моделей для автоматизации процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных деталей с последующей реализацией программного продукта и внедрением на производство предложенного подхода, позволит снизить количество дефектов, возникающих в процессе сварки, обеспечить повторяемость технологического процесса при ЭЛС, а также снизить материальные и трудовые затраты при отработке технологического процесса ЭЛС. Таким образом, разработка новых методов и моделей для автоматизации процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций является **актуальной научно-технической задачей.**

Степень разработанности темы. Решению вопросов повышения качества процесса сварки посвящены исследования многих отечественных и зарубежных авторов (Зуев И.В., Лаптенко В.Д., Hara K., Виноградов В.А., Sasaki S., Кривенков В.А., Куцан Ю.Г., Anderl P. и др.) [1]-[5]. В своих исследованиях Родякин Р. В. [6] разрабатывает методику моделирования процесса прохождения пучка электронов через слой испаренного металла. Авторы Мотасов М. И., Довыдов Д. А., Алексеев

В. С. [7] рассматривают имитационную модель системы управления фокусировкой луча с использованием программной среды Simulink, входящей в состав пакета MATLAB. Дрозд А. А. в своем исследовании [8] использует численный метод, который позволяет моделировать процессы развития термических напряжений и деформаций при точечной электронно-лучевой сварке, в модели учитываются фазовые переходы при нагреве, плавлении, испарении и кристаллизации. Тарасова В. Н. разработала метод компьютерного моделирования, позволяющий существенно снизить временные затраты на изготовление свариваемых изделий и прогнозирующий результаты в заранее заданных условиях [9]. Авторы Мелюков В. В. и Тарабукин Д. А. предложили метод математического и численного моделирования теплового процесса сварки для определения мощности сварочного источника и для сокращения времени и объема натурного эксперимента при отладке режима [10].

У большинства имеющихся разработок имеется ряд недостатков – отсутствует возможность реализовать разработанные методы в производственных условиях, в связи с их сложностью, узконаправленность разработки, отсутствие возможности оптимизации технологических параметров при вводе в технологический процесс новых материалов. Оптимизации технологических параметров процесса сварки при вводе новых материалов, требует проведения натуральных экспериментов, что ведет к увеличению материальных и трудовых затрат. Предложенные методики и модель в данном исследовании, а также разработанная АСУ ЭЛС позволяют решить вышеуказанные проблемы, и снизить количество дефектов, возникающих в процессе сварки, как для существующих режимов сварки, так и при вводе в эксплуатацию нового изделия.

Цель диссертационной работы состоит в повышении качества сварного соединения в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей за счет определения и установления требуемых технологических параметров процесса сварки в установившемся режиме и оптимизации скорости сварки и тока луча.

Под качеством сварного соединения понимается обеспечение требуемых по технологии геометрических размеров сварного шва. Если данные размеры

соответствуют требуемым технологией, то данный сварной шов считается качественным. Под геометрическими размерами сварного шва подразумевается глубина проплавления, измеряемая от его центра на поверхности детали до дна сварной ванны и ширина сварного шва, измеряемая в самом широком месте сварной ванны.

Сформулированная цель предопределила следующую совокупность решаемых задач:

- 1) Анализ моделей и методов для автоматизации управления электронно-лучевой сваркой. Описание методов моделирования тепловых процессов при ЭЛС.
- 2) Разработка математической модели для расчета распределения температуры в установившемся режиме в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных конструкций.
- 3) Разработка методики для оценки глубины провара и ширины сварного шва при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей. Разработка метода адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме.
- 4) Разработка автоматизированной системы управления электронно-лучевой сваркой тонкостенных деталей с применением разработанных методик и модели.
- 5) Верификация созданной модели путем имитационного моделирования, сравнение результатов моделирования с получением сварных соединений на образцах-имитаторах в процессе натурных экспериментов.

Методы исследования. Для решения задач научного исследования используются методы, применяемые в рамках теории тепловых процессов, теории сварочных процессов, теории математического моделирования, теории автоматического управления, теории вероятностей и математической статистики, а также технологии и методы программирования и разработки программного обеспечения. Для моделирования используется программное обеспечение: MATLAB, COMSOL Multiphysics и ANSYS. Для реализации автоматизированной системы управления применялись средство разработки Embarcadero RAD Studio и

язык программирования C++.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Разработана новая математическая модель электронно-лучевой сварки для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей, основанная на уравнениях подвижных мгновенных источников энергии (точечного и линейного), учитывающая геометрические размеры изделия и технологические параметры процесса сварки, позволяющая с помощью траектории движения луча получать распределение температуры на поверхности свариваемой детали, обеспечивающее качество сварного соединения.

2) Разработана методика для оценки глубины провара и ширины сварного шва при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей, основанная на уравнениях быстро движущихся мгновенных источников энергии: точечного и линейного, отличающаяся тем, что она учитывает геометрические размеры и теплофизические параметры детали, а также технологические параметры процесса сварки, позволяющая получать стыковые соединения заданных геометрических размеров.

3) Разработан метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме, основанный на использовании аппарата теории тепловых процессов, отличающийся применением комплекса четырех источников нагрева, позволяющий стабилизировать подводимую энергию к зоне сварного соединения и снизить количество дефектов.

Теоретическая значимость. Разработанные методики и модель могут быть применены в теории сварочных процессов для объяснения механизма воздействия тепловых процессов при электронно-лучевой сварке для получения бездефектного соединения тонкостенных деталей.

Практическая значимость. Результаты использовались при изготовлении действующих макетов электронно-лучевого оборудования разработанного при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в

рамках государственного задания № FEFE-2023-0004 «Адаптивные методы синтеза и управления проектированием компонентов сложных систем», в рамках проекта № 20-48-242917, выполненного при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Краевого фонда науки по теме «Модели и методы управления процессом электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций, также в рамках стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2022-2024 (приказ № 38 от 20.01.2022) по теме «Разработка комплексной системы автоматизации электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения».

Разработанная автоматизированная система управления электронно-лучевой сваркой может использоваться на предприятиях ракетно-космической отрасли, применяющих электронно-лучевую сварку, таких как АО «Информационные спутниковые системы им. М. Ф. Решетнева», г. Железногорск, АО «Красноярский машиностроительные завод», а также на предприятии по изготовлению электронно-лучевого оборудования ОАО «НИТИ «Прогресс», г. Ижевск. Подтверждается актом о внедрении научных и практических результатов на АО «Информационные спутниковые системы им. М. Ф. Решетнева».

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Математическая модель электронно-лучевой сварки для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей позволяет с помощью траектории движения луча получать распределение температуры на поверхности свариваемой детали, обеспечивающее качество сварного соединения.
- 2) Методика оценки глубины провара и ширины сварного шва при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей позволяет получать стыковые соединения заданных геометрических размеров с отсутствием дефектов.
- 3) Метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме

позволяет стабилизировать подводимую энергию к зоне сварного соединения и снизить количество дефектов.

4) Разработанная автоматизированная система управления электронно-лучевой сваркой позволяет производить процесс сварки тонкостенных деталей и обеспечивать повторяемость технологического процесса за счет мониторинга процесса сварки и выбора оптимальных параметров технологического процесса.

Апробация. Процесс разработки и результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе XXI, XXII, XXIII Международных научно-практических конференциях «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2017, 2018, 2019 гг.); «Автоматизация» (г. Сочи, 2021); 4th, 5th International Conference on Computational Methods in Systems and Software – CoMeSySo (г. Злин, Чешская Республика, 2020, 2021 гг.); 9th, 10th Computer Science On-line Conference – CSOC (г. Злин, Чешская Республика, 2020, 2021 гг.); 6th International Congress on Information and Communication Technology – ICICT (г. Лондон, Англия, 2021 г.); International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing – ISM (г. Линц, Австрия, 2021 г.); IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies – GlobConET (г. Дели, Индия, 2022 г.); 21st International Symposium INFOTEN-JAHORINA (г. Яхорина, Сербия, Босния и Герцеговина, 2022 г.); III, IV международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» (г. Москва, 2019, 2021); I международной конференции «Сварка в России 2019: Современное состояние и перспективы» (г. Томск, 2019); IV Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (г. Санкт-Петербург, 2022).

Публикации. По теме данного исследования опубликованы 21 печатная работа. Из них 7 публикаций в журналах, входящий в перечень ВАК, 14 работ опубликованы в материалах конференций, индексируемых Web of Science/Scopus. Получено 8 свидетельств о регистрации программ ЭВМ.

Структура работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 173 наименования и приложений. Текст работы изложен на 126 страницах, включая 56 рисунков и 8 таблиц.

1 Анализ моделей и методов автоматизированного управления электронно-лучевой сваркой

1.1 Методы получения сварных соединений при электронно-лучевой сварке

ЭЛС относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии и обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 мм до 400 мм. Источник нагрева в виде пучка электронов сосредоточен на малом пятне диаметром в десятые и даже сотые доли миллиметра. При мощности пучка в десятки киловатт плотность энергии в нем превышает плотность энергии электрической сварочной дуги на два - пять порядков (от 10^5 до 10^9 Вт/см²). Такая концентрация энергии, достигаемая при специальной фокусировке пучка в сварочных электронных пушках, делает возможным сварку с недостижимым для электродуговых методов отношением глубины к ширине проплавления. Использование электронно-лучевой сварки обеспечивает минимальный объем переплавленного материала, минимальную деформацию изделий, а также прочность, сравнимую с прочностью основного материала. Меньший размер литого металла и кратковременность термического воздействия при ЭЛС обеспечивают наименьшие тепловые конфигурации физической формы соединяемых деталей, во множествах случаях не превосходящие допусков на механическую обработку [11]-[13].

Электронно-лучевой метод получения сварных соединений высоко технологичен так как, регулируя мощность и ширину пучка, фокусировку, траекторию движения луча в зоне шва и др. параметры, можно менять глубину и ширину сварочной ванны, тем самым добиваясь требуемых физико-механических свойств соединений в соответствии с условиями эксплуатации конструкций [14].

Одним из наиболее перспективных материалов для многих областей применения в авиакосмической технике являются титановые сплавы вследствие их высокой удельной прочности, сопротивления усталости, вязкости разрушения, коррозионной стойкости, хорошей свариваемости [15]. Целью работы [16]

является исследование особенностей получения сварного соединения в изделиях из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных аддитивными методами. Особенности ЭЛС изделий из сплава Ti-6Al-4V посвящены работы [17]-[19]. В работе [20] представлены результаты исследований влияния режимов термической обработки разнородных сварных соединений стали ЭП517 и сплава 36НХТЮ на твердость металла шва. Влияния геометрических параметров швов этих же металлов исследованы в работе [21]. Авторами работы [22] представлены результаты исследований процессов сварки стыкового соединения разнородных сталей, показаны преимущества применения ЭЛС и результаты отработки новых режимов сварки применительно к сварным соединениям. Исследованы механические свойства разнородного стыкового сварного соединения стали 20 со сталью 12Х18Н10Т, выполненного ЭЛС [23], [24]. Стоит отметить, то главным преимуществом ЭЛС магнитных сталей является высокая производительность по сравнению с другими способами сварки [25]. Авторами работы [26] представлены результаты исследований магнитных и термоэлектрических свойств перлитных, мартенситных и аустенитных сталей, а также сплавов на основе кобальта и никеля. Работа [27] посвящена отработке режимов ЭЛС на кольцевых образцах из сплава ВТ41 для их последующего внедрения в процессе изготовления крупногабаритных сварных соединений из этого сплава для компрессора высокого давления (КВД) перспективного двигателя.

ЭЛС позволяет сваривать множество различных материалов, поэтому авторы используют электронно-лучевую сварку различными способами. Например, авторы патента [28] представили ЭЛС деталей, которая включает разделку свариваемых кромок деталей, установку деталей встык по свариваемым кромкам, наведение электронного луча ориентир соединяемых деталей с расположением его оси в плоскости стыка и одновременное расплавление электронным лучом свариваемых кромок деталей. В работе [29] описано применение ЭЛС стыковых соединений из трудносвариваемых разнородных металлов и сплавов. В свою очередь исследовательским коллективом [30] было представлено изобретение, которое позволит производить многослойную лучевую

сварку. Устройство для односторонней электронно-лучевой сварки сосудов сферической и цилиндрической формы описали авторы работы [31]. Идея зонной ЭЛС (сварка производится очень узким сходящимся ленточным пучком. Плотность энергии этого пучка изменяется вдоль его оси и достигает значений порядка $10^3\text{--}10^5$ Вт/см²) рассмотрена в докладе [32]. Авторы патента [33] изобрели способ использования ЭЛС для кольцевого соединения тонкостенной обечайки с цилиндрической крышкой, выполненных из высокопрочных алюминиевых сплавов. Работы авторов [34]–[36] показывают применение ЭЛС для соединения различных сплавов (титанового, медного и молибдена). В работе [37] исследовались особенности формирования макро- и микроструктуры и механических характеристик сварных соединений алюминиевого сплава В-1579 системы Al-Mg-Sc. Свариваемость алюминиевых сплавов исследовал научный коллектив [38] для обнаружения внутренних дефектов, таких как пористость сварного шва и трещины. Работа [39] направлена на установление основных закономерностей и путей оптимизации режимов получения сварных соединений сплава Ti-TiB со сталью 12X18H10T, выяснение пути достижения необходимых механических характеристик сварных конструкций из элементов толщиной 10 мм, получаемых электронно-лучевой сваркой. В работе [40] приведены результаты металлографических исследований металла швов титанового сплава 5В, полученных с помощью ЭЛС в диапазоне скоростей сварки от 20 м/ч до 120 м/ч. Авторы работы [41] представили разработку технологического процесса электронно-лучевой сварки титана и титановых сплавов, который позволит получить прочное сварное соединение с наименьшим количеством пор после сварки, образующихся главным образом вблизи линии сплавления и на оси шва и обеспечивающих работоспособность узла в условиях циклического изменения температуры и повышенных нагрузках. В исследовании [42] представлены результаты исследования структуры и механических свойств сварных соединений из сплава ВТ6ч, выполненных ЭЛС и прошедших вакуумную термическую обработку. Разработана технология ремонта ЭЛС конструкций из данного сплава [43]. Установлено, что режим электронно-лучевого сплавления влияет на

параметры структуры сплава Inconel 718., определён фазовый состав сплава после разных режимов ЭЛС, показано, что твердость сплава Inconel 718 коррелирует с плотностью энергии режима ЭЛС [44].

Анализ научных исследований за рубежом показывает, что в мире активно развиваются и продолжают свое развитие в будущем литейные и деформируемые жаропрочные никелевые сплавы. Эти материалы с высокими служебными характеристиками требуются для изготовления изделий атомной, ракетной, авиационной, железнодорожной и морской техники нового поколения, а также в машиностроительной отрасли [45]. Авторы работы [46] проанализировали ЭЛС и ограниченную термообработку швов высокожаропрочных сплавов, исследовали поля температуры и напряжений, определили химический состав, структуру и механические свойства сварных соединений высокожаропрочных никелевых сплавов после электронно-лучевой сварки. В исследованиях [47], [48] рассмотрено влияние технологических вариантов аргонодуговой и ЭЛС фасонных деталей высокожаропрочного литого никелевого сплава на механические свойства и структуру сварных соединений сочетаний отливка с отливкой и отливка с деформируемым полуфабрикатом. Влияние технологических вариантов аргонодуговой и электронно-лучевой сварки высокожаропрочного никелевого сплава ВЖ159 в термически упрочненном состоянии без последующей термической обработки на механические свойства и структуру сварных соединений описаны в работе [49].

Благодаря высокой концентрации энергии в электронном луче, минимальному вводу тепла и высокой скорости охлаждения зона термического влияния при ЭЛС имеет существенно меньшую протяженность, а снижение свойств в ней относительно небольшое. Глубокое проплавление металла при малой погонной энергии, имеющее место при ЭЛС, обуславливает значительно большую скорость отвода тепла от зоны сварки, что обеспечивает увеличение скорости кристаллизации малой по объему сварочной ванны с получением мелкокристаллического строения металла шва, по своим свойствам мало отличающегося от основного металла [50]. Ввод наименьшего кол-ва тепла при

ЭЛС, тем более на импульсном режиме, по сопоставлению с дуговой сваркой выделяет вероятность во много раз убавить деформацию изделий. Огромное сосредоточение энергии в небольшом поперечном сечении луча и перенесении энергии лучом на большое расстояние от катода дают вероятность применить электронный луч при сварке в неширокую щель, когда способы дуговой сварки не имеют все шансы быть применены [51].

1.2 Методы моделирования тепловых процессов при электронно-лучевой сварке

Моделирование процессов ЭЛС - одна из наиболее важных частей прикладных исследований, поскольку проведение полномасштабных экспериментов является либо дорогостоящим, либо трудозатратным. Моделирование процесса ЭЛС зачастую затруднительно, особенно при вводе новых сплавов в промышленность потому, что требуется разработка нового технологического процесса. Применение методов математического моделирования позволяет существенно снизить временные, трудовые, экономические затраты на совершенствование и отработку существующих технологий. На сегодняшний день существует проблема с получением бездефектных сварных соединений при вводе новых изделий (Рисунок 1.1). Подобные проблемы возникают в связи с применением ЭЛС в аэрокосмической отрасли, так как проблемы качества там стоят особо остро.

На сегодняшний день для эффективного решения проблем, возникающих в процессе сварки, разрабатываются различные подходы. Например, Младенов Г., Колева Е., Беленький В. Я. и Трушников Д. Н. в своем исследовании [52] рассматривают многокритериальную задачу оптимизации процесса ЭЛС с использованием экспериментальных данных, которые описывают зависимость геометрии сварных швов на нержавеющей стали от параметров режима. Альтернативным подходом решением проблем, является разработанная Саломатовой Е. С., Трушниковым Д. Н. и Цаплиным А. И. математическая модель процессов испарения, конденсации, а также диффузии сплава АМг-6 при ЭЛС с динамическим позиционированием электронного пучка, позволяющая

прогнозировать химический состав сварных швов при электронно-лучевой сварке [53]. Помимо этого, зарубежными учеными Luo M., Hu R., Liu T., Wu B., и Pang S. разработана математическая модель сканирующей ЭЛС, которая впервые позволила моделировать динамику технологического процесса [54].

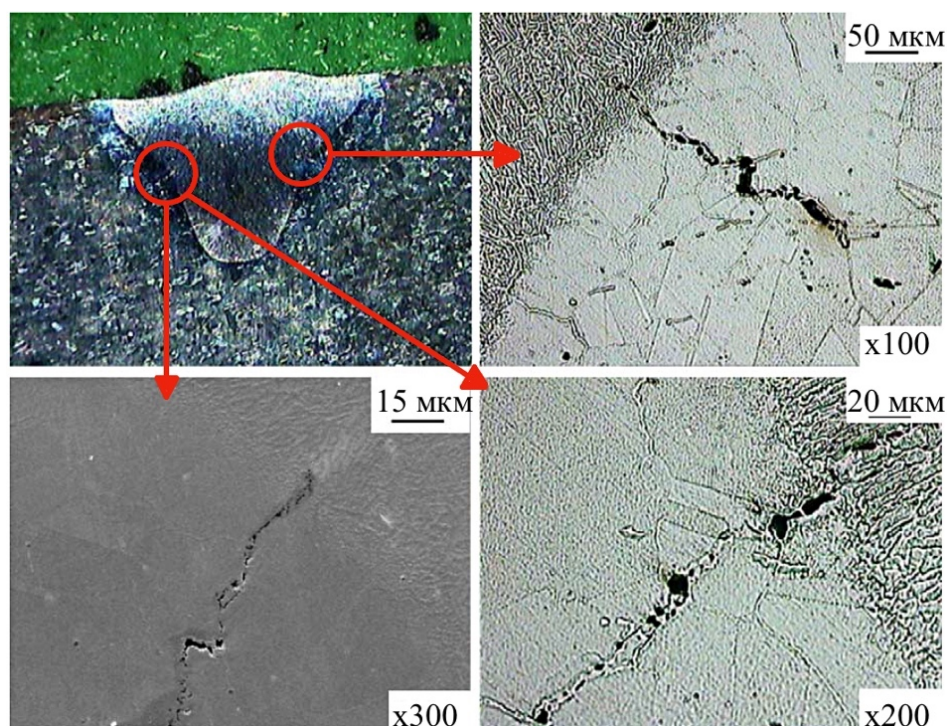


Рисунок 1.1 – Пример дефекта (микротрещена), полученного в процессе электронно-лучевой сварки тонкостенных деталей

В работе [55] авторами было проведено масштабное исследование о последних разработках в ЭЛС по теплопередаче, потоку жидкости и термомеханическому анализу при оценке размеров сварных швов, трехмерного распределения температуры, характера течения жидкости, вызванных сваркой искажений и остаточных напряжений, в заключение приведены рекомендации авторов по численному моделированию процесса электронно-лучевой сварки и выбору модели источника тепла. Чтобы лучше понять такие явления авторы работы [56] предложили модель CFD, которая разработана в свободном программном обеспечении CFD с открытым исходным кодом OpenFOAM, его цель - обеспечить основу для более глубокого понимания терможидкостно-динамических процессов. В работе [57] представлена численная модель,

описывающая тепловой источник при электронно-лучевой сварке, численные расчеты выполнены методом конечных элементов. В исследовании [58] разработана модель динамики сжимаемого парового шлейфа в замочной скважине во время процесса вакуумной электронно-лучевой сварки (VEBW) и исследована гидродинамика парового шлейфа внутри переходной замочной скважины в процессе VEBW для сплава Ti-6Al-4V. Одной из наиболее актуальных задач при ЭЛС металлов является определение закономерностей взаимодействия первичных электронов с потоком газа (пара) с учетом существующих и формируемых (заряженными частицами) электрических полей [59]. Авторами исследования разработаны 2D термомеханические конечно-элементные модели для прогнозирования напряжений и деформаций, связанных с изготовлением свесных конструкций методом ЭЛС для сплава Ti-6Al-4V, смоделированы и оценены различные геометрии несущих конструкций. Исследование температуры в зоне нагрева удобно производить путем численного моделирования в пакете программ «COMSOL Multiphysics» - программной среды, обеспечивающей все этапы моделирования [60]-[62].

В последние дни для эффективного решения этой проблемы были разработаны методы мягких вычислений [63]. Математическая постановка задачи движения в рамках лагранжева описания [64] включает уравнения баланса массы, импульса и энергии, а также физические уравнения для описания тепломассопереноса, на основании этого проведено численное моделирование.

В работе [65] рассматривается задача математического моделирования процесса ЭЛС на этапах ввода и вывода электронного пучка, также предложена концептуальная модель, разработанная с использованием математического аппарата теории тепловых процессов. Авторы работы [66] разработали математическую модель для исследования влияние расфокусировки электронного пучка на качество сварного шва. В исследовании [67] предложена новая динамическая модель источника тепла, которая может быть использована для понимания поведения связи между электронным пучком и стенкой канала для моделирования процесса ЭЛС. Численная модель, описывающая тепловой

источник при электронно-лучевой сварке представлена в работе [68]. Авторами исследования [69] использовалась модель, сочетающая эллипсоидальные и гауссовские источники тепла вращающегося тела, для численного моделирования температуры и остаточных напряжений, возникающих в процессе ЭЛС. В работе [70] разработана конечно-элементная модель для прогнозирования термомеханического отклика Ti-6Al-4V при электронно-лучевом осаждении. В исследовании [71] представлена новая трехмерная математическая модель ЭЛС и использована для теоретического понимания поведения связи между замочной скважиной и сварочной ванной во время ЭЛС сплава Ti-6-Al-4V.

Трехмерный термоупругопластический метод конечных элементов был разработан авторами исследования [72] для моделирования сварочных искажений, также исследовано влияние параметров сварки на форму сварного шва сплава Ti₂AlNb, соединенного электронно-лучевой сваркой. Авторами работы [73] в экспериментах, тонкостенные структуры строятся с помощью селективной электронно-лучевой плавильной машины ARCAM AB A2, а для моделирования используется термический инструмент конечно-элементного моделирования, разработанный авторами для моделирования распределения температуры в процессе селективной электронно-лучевой плавки.

В работе [74], [75] приведены результаты математического моделирования теплового процесса при нагреве сплава АМГ-6 источникам энергии, эквивалентным электронному пучку при электронно-лучевой сварке.

Авторы работы [76], [77] описали нелинейную математическую модель тепломассопереноса для ЭЛС и наплавки с подачей присадочного материала и изучили процесс электронно-лучевой сварки разнородных металлов и сплавов. Описана постановка задачи моделирования тепломассопереноса в жидкой ванне со свободной поверхностью и представлен текущий этап реализации модели движения жидкого металла [78].

Исследование [79] посвящено проблеме подбора эффективных значений параметров технологического процесса ЭЛС, поэтому в нем предлагается математическая модель, позволяющая оценить качество рассматриваемого

технологического процесса. Авторами работы [80] проведено моделирование диодной длиннофокусной пушки с энергией электронов до 120 кВ, также представлены результаты моделирования магнитной системы с магнитным зеркалом и магнитной оптикой для транспортировки пучка. Работа [81] заключается в построении модели сварного шва по результатам нескольких опытов. В частности, сварка титановых листов толщиной 60 мм, при следующих параметрах:

- скорость сварки;
- сила тока фокусирующей системы;
- сила тока луча.

На основе развития систем управления электронным лучом и программирования режимов сварки, возникает необходимость в разработке обобщенного системного подхода для решения тепловых задач при электроннолучевой сварке, так, авторами исследований [82]-[84] смоделированы тепловые процессы при электронно-лучевой сварке и получено выражение, которое является исходным для построения тепловых моделей. Динамическое позиционирование электронного пучка с формированием нескольких тепловых источников обеспечивает возможность ввода тепла в свариваемые заготовки в нескольких участках, расположенных друг от друга на некотором расстоянии, что позволяет получать качественные сварные соединения из разнородных материалов, повышать производительность ЭЛС и снижает пористость сварных швов [85].

Целью работы [86] является исследование возникновения турбулентности в жидкой фазе металла при ЭЛС посредством прямого численного моделирования процесса обтекания канала проплавления расплавом сварочной ванны для определения факторов, влияющих на рассматриваемое явление. Исследования [87], [88] посвящены изучению процесса ЭЛС с глубоким проплавлением с применением осцилляции пучка при различной фокусировке на примере стали 15Х5М. Целью работы [89] является изучение влияния осцилляции электронного луча на изменение химического состава сварного шва и прогнозирование

конечного химического состава сварных швов при ЭЛС сплавов, содержащих легкоиспаряемые легирующие элементы. ЭЛС с осцилляцией электронного пучка позволяет получить более однородные по макро- и микроструктуре сварные соединения [90].

Авторами работы [91] предложен метод математического и численного моделирования теплового процесса сварки для определения мощности сварочного источника и для сокращения времени и объема натурного эксперимента при отладке режима. Повышение предпочтения луча высокой энергии, такого как электронный луч, лазерный луч и т. д. привело к требованию его автоматизации за счет точного моделирования ввода–вывода, утверждают авторы исследования [92], которые провели моделирование электронно-лучевой сварки с помощью рекуррентных нейронных сетей Элмана и Джордана, имеющих один цикл обратной связи, для удовлетворения указанного требования. Также возможностью создания модели процесса ЭЛС при помощи искусственных нейронных сетей интересуются авторы работы [93]. В статье [94] описан фундаментальный принцип наряду с влиянием технологических переменных процесса ЭЛС и приведены рекомендации авторов по численному моделированию ЭЛС и выбору модели источника тепла. Авторами исследования [95] были построены многоцелевые эволюционные и генетические алгоритмы, основанные на мета-моделях для ЭЛС нержавеющей стали 304L.

Результаты исследования [96] показали, что форма сварочной ванны, полученная численной моделью, соответствует экспериментальному анализу поперечного сечения сварного шва, также численная модель смогла предсказать восприимчивость к образованию ликвационных трещин в зоне термического воздействия на основе изучения градиента температуры на стадии затвердевания. В статье [97] искажения сварки заглушки порта были предсказаны методом собственных деформаций с помощью численного моделирования, а последовательность сварки и конструкция зажима были оптимизированы. Авторами работы [98] были численно смоделированы с использованием метода конечных элементов температурные поля, величина и распределение полей

напряжений в соединениях в процессе сварки, точность процедуры моделирования была подтверждена хорошим согласием между расчетными результатами и экспериментальными данными. Целью исследования [99] является объединение 3D-характеристики с передовыми методами моделирования, чтобы развить более полное понимание процесса затвердевания и эволюции микроструктуры во время ЭЛС Inconel 718.

Проведено конечно-элементное моделирование [100] тепловых полей и напряженно-деформированного состояния узлов ускорительной техники из Cu и Nb, изготавливаемых ЭЛС. Анализ результатов моделирования позволил сравнить эффективность изменения положения точки начала траектории, направления перемещения сварочного источника тепла, а также синхронизации процессов сварки двух швов с целью минимизации сварочных короблений. Авторами исследования [101] приводится описание исследования и моделирования процесса ЭЛС по разработанной методике в математическом пакете, которая позволяет спрогнозировать распределение температуры в составных частях ЭМИО и подобрать наиболее оптимальный режим исходя из скорости движения пучка, его мощности, температуры и глубины проплавления кожуха и корпуса, исключая деформацию элементов конструкции.

Исследование [102] проводилось на модели, разработанной в двухмерной осесимметричной постановке, на примере вакуумной камеры с источником тепла для исследования электромагнитных и тепловых полей торцевого магитождкостного герметизатора МЖГ вращающегося вала установки ЭЛС АЭЛТКА-114.

Сложность и многофакторность ЭЛС делает традиционные методы моделирования, базирующиеся на конечно-разностных или вариационно-разностных решениях, практически бесполезными [103], в связи с этим для адекватного описания процессов обработки предлагается разработка и программное обеспечение математической модели на основе совместного решения связанных задач межфазного тепло-массообмена, гидро- и газодинамики и физики транспортировки и поглощения излучения. Разработана компьютерная

модель [104] температурного поля в инструменте и деталях в процессе их сварки трением с перемешиванием.

Авторами работы [105], [106] рассматривается имитационная модель системы управления фокусировкой луча с использованием программной среды Simulink, входящей в состав пакета Matlab. В работе [107] предложена численная модель для исследования процессов нагрева, плавления и кристаллизации при электронно-лучевой сварке разнородных металлов, оценки термических напряжений в сварном шве при разных режимах сварки.

В исследовании [108] разрабатывается программная система, основанная на методе позволяющем моделировать процессы распределения температуры при электронно-лучевой сварке, в модели учитываются фазовые переходы при нагреве, плавлении и испарении. Целью работы [109] было исследование с помощью методов математического моделирования дополнительных возможностей снижения остаточного давления атмосферных газов в зоне сварки за счет использования эжектирующего воздействия внешнего высокоскоростного газового потока. В работе [110] приведен численный анализ магнитожидкостных герметизаторов для установок ЭЛС.

Основу электронно-лучевых технологических установок составляют электронные пушки, которые включают электронно-оптические системы (ЭОС), обеспечивающие Репозиторий ВГУ 69 эмиссию электронов, формирование и ускорение электронного пучка [111]. Изменения и быстрое управление положением луча на поверхности, его мощностью и фокусировкой могут способствовать тепловым возмущениям в сварочной ванне, изменению плотности тепловой энергии и характера распределения [112]. В настоящее время изучены и нашли практическое применение пушки с плазменным эмиттером, поэтому авторы работы [113] представили результаты компьютерного моделирования электронно-оптической системы такой пушки. В рамках работы [114] рассмотрена трассировка частиц, в частности трассировка электронов низкой энергии и влияние на электронный пучок внешнего магнитного поля, разработана модель геометрии острейного катода. Авторами работы [115] проведено математическое

моделирование режимов работы сварочной электронной пушки. В исследовании [116] было проведено двумерное и трехмерное моделирование распределения магнитных полей в элементах блока магнитной системы, а также моделирование поведения электронного пучка в полученных полях. В работе [117] разработана математическая модель для описания процесса кристаллизации и первичной макроструктуры металла шва при ЭЛС.

Электронно-лучевая сварка имеет значительное преимущество в энергопотреблении, проварке толстых слоёв сплавов, сварке тугоплавких металлов, а также в улучшении качества шва [118]. Данный вид сварки является современным и модернизируется с каждым годом [119].

Выводы. В рамках данной главы рассмотрены методы ЭЛС, применяемые на предприятиях аэрокосмической отрасли для соединения ответственных деталей. Также рассматривается многослойная лучевая сварка для изготовления сфер на предприятиях ракетно-космической отрасли. Проведен обзор моделей, описывающие процессы испарения конденсации, тепловые источники, применяемые при ЭЛС, а также влияние расфокусировки электронного луча на качество сварного соединения. Показано, что существующие исследования не затрагивают моделирование зоны сварного соединения в установившемся режиме учитывая геометрические размеры изделия и отражение тепла в процессе сварки, а также предлагаемые программные системы не включают в себя адаптивное управление в процессе ЭЛС.

Несмотря на достаточное число имеющихся работ в этой области, современная литература не предлагает решения вопроса о поиске оптимальных режимов сварки для тонкостенных деталей при ЭЛС в установившемся режиме. Таким образом, требуется разработка и программная реализация методик и модели, описывающих динамику теплового процесса в зоне сварного соединения для решения задачи повышения качества сварного соединения в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей.

2 Разработка методик и модели для процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций в установившемся режиме

В рамках настоящей работы решается актуальная задача разработки математической модели для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей. Данная модель учитывает геометрические характеристики изделия, тип материала изделия и его теплофизические параметры. Также проводится разработка методики для оценки глубины провара и ширины сварного шва при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей. Был разработан метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме.

При разработке математической модели электронно-лучевой сварки для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей использовались:

- модельно-алгоритмический аппарата счета тепловых процессов для создания математического описания распределения энергии;
- теория вероятностей и математическая статистика для оценки адекватности предложенной математической модели как построенной имитационной модели, таки поведению реального объекта в процессе натурных экспериментов.

Разработанная модель электронно-лучевой сварки для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей, позволит с помощью траектории движения луча получать распределение температуры на поверхности свариваемой детали, обеспечивающее качество сварного соединения.

Под адаптивным управлением понимается управление скоростью сваркой или током луча при изменении мощности электронно-лучевой пушки, в случае напыления на катодный узел и снижения тока на катодном узле.

Оптимизация технологических параметров в процессе ЭЛС, позволит получать требуемые значения следующих технологических параметров процесса сварки:

- скорость сварки;
- ток луча;
- фокусное расстояние;
- энергия.

Моделирование с применением разработанного математического аппарата проводилось в программном обеспечении MATLAB [120]-[122], а результаты моделирования верифицированы посредством имитационных и натурных экспериментов с применением программного обеспечения COMSOL Multiphysics [123]-[125] и ANSYS student [126]-[128].

На Рисунке 2.1 изображена схема расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали (биметаллическое кольцо с электродвигателем) в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей в системе координат, связанных со сварным швом. На данном рисунке рассматривается только сварной шов, так как этого достаточно для демонстрации исследуемого процесса. Стык не рассматривается, однако предполагается, что он есть.

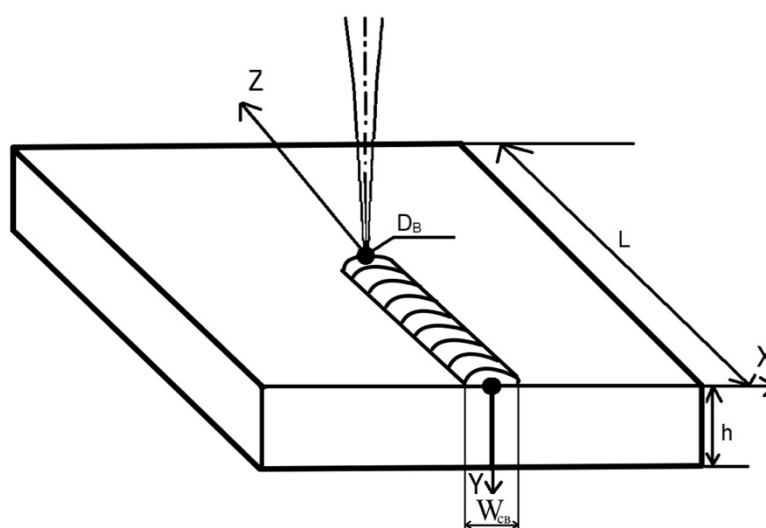


Рисунок 2.1 – Схема расчета в установившемся режиме:

h – толщина изделия; L – длина изделия; D_B – диаметр пучка; $W_{св}$ – ширина сварного шва

Математическая модель распределения температуры на поверхности свариваемой детали в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей построена с использованием аппарата теории тепловых процессов: точечный (2.1) и линейный (2.2) быстро движущиеся источники. Результаты моделирования верифицированы посредством имитационных и натурных экспериментов.

2.1 Выбор схемы нагреваемого тела

Формы тел, нагреваемых при сварке, весьма разнообразны. Распространение теплоты существенно зависит от формы и размеров тела. Точный учет конфигурации тела может привести к таким усложнениям расчета, что его практическое использование окажется затруднительным. Поэтому во всех тех случаях, когда пренебрежение второстепенными особенностями формы тела не приводит к большим погрешностям расчета, целесообразно упрощать формы рассматриваемых тел, сводя их к простейшим [129], [130].

Для дальнейшей работы выбирают одну из следующих схем [129], [130]:

- бесконечное тело представляет собой тело неограниченной протяженности по всем трем направлениям x , y , z (Рисунок 2.2а);
- полубесконечное тело представляет собой массивное тело с одной ограничивающей плоскостью $z=0$ (Рисунок 2.2б);
- бесконечная пластина представляет собой тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями $z=0$ и $z=\delta$ (Рисунок 2.2в). При использовании этой схемы всегда предполагается, что температура по толщине листа равномерна, а теплота может распространяться только в плоскости с координатными осями x и y ;
- полубесконечная пластина представляет собой тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями $z=0$, $z=\delta$ и плоскостью $y=0$ (Рисунок 2.2г);
- плоский слой представляет собой пластину, у которой температура точек тела по толщине неравномерна (Рисунок 2.2д);

– бесконечный и полубесконечный стержни представляют собой тела с прямолинейной или криволинейной осью, температура в пределах поперечного сечения стержня равномерна (Рисунок 2.2е).

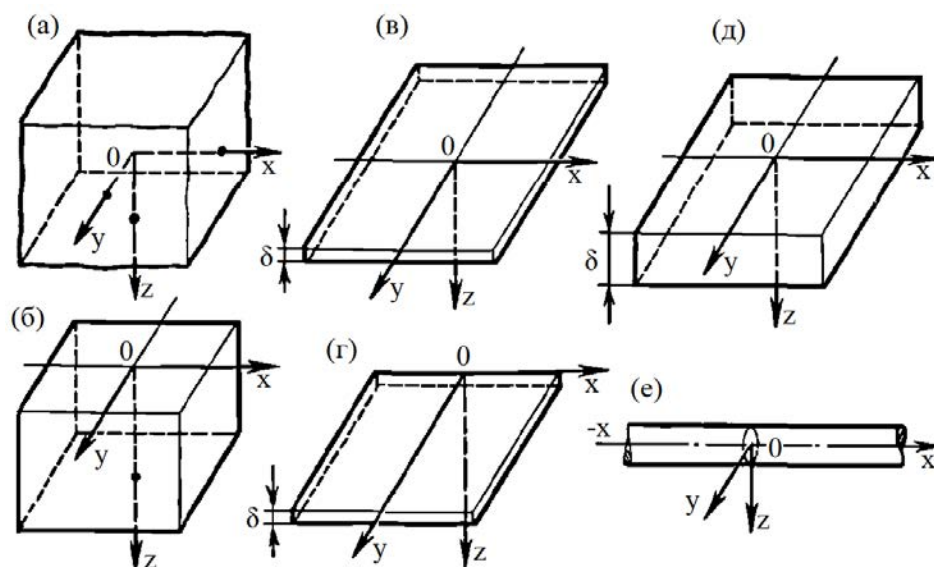


Рисунок 2.2 – Расчетные схемы тел:

а – бесконечное тело; б – полубесконечное тело; в – бесконечная пластина;
г – полубесконечная пластина; д – плоская пластина; е – бесконечный и
полубесконечный стержни

2.2 Описание теплофизических величин

Температура характеризует степень нагретости тела. Абсолютная температура выражается в кельвинах (K , $1 K = -272,15^{\circ}C$) [129], [130].

Температурное поле есть распределение температур в теле в конкретный момент времени. Оно может выражаться как в абсолютной температуре T , так и в приращении температуры ΔT по отношению к начальной температуре тела T_n . В общем случае температурное поле может быть функцией не только координат x , y , z отдельных точек, но и времени t [129], [130].

На Рисунке 2.3а графически представлены температурные поля в виде изотерм. Изотермической поверхностью называется геометрическое место точек тела, имеющих одинаковую температуру. От точки к точке температура тела может изменяться. Изменение температуры в направлении SS на длине

бесконечно малого отрезка dS называется градиентом температуры в рассматриваемой точке по направлению SS [129], [130].

На Рисунке 2.3б представлен градиент температуры в точке максимален по направлению нормали nn к изотерме [129], [130].

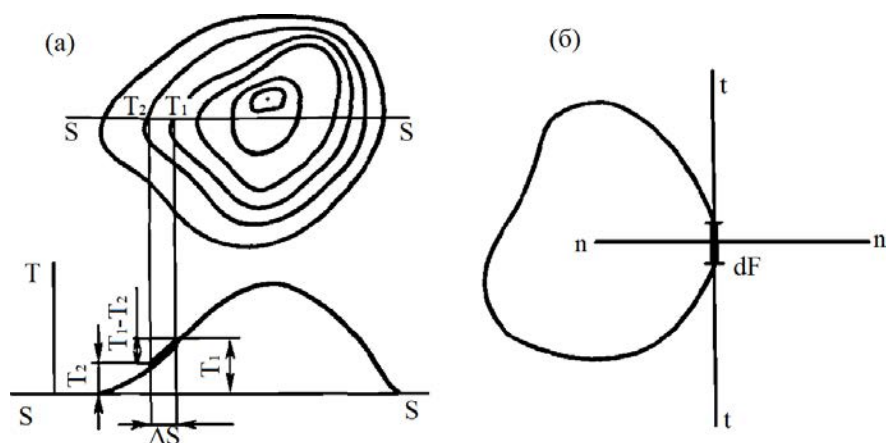


Рисунок 2.3 – Изображение температурного поля изотермами:

а – изменение температуры по направлению SS ; б – касательная tt и нормаль nn к изотерме

Удельное количество теплоты h выражает количество теплоты, сообщенное телу массой 1 г, при нагреве его от температуры T_1 до T_2 [129], [130].

Истинная удельная массовая теплоемкость c есть количество теплоты, необходимое для изменения на один кельвин температуры единицы массы тела. Теплопроводность λ характеризует способность тел проводить теплоту. Численно коэффициент λ выражает количество теплоты, протекающее через единицу изотермической поверхности в единицу времени [129], [130].

Температуропроводность — физическая величина, характеризующая скорость изменения (выравнивания) температуры вещества в неравновесных тепловых процессах. Численно равна отношению теплопроводности к теплоёмкости единицы объема вещества, в системе СИ измеряется в m^2/c [129], [130].

Коэффициент температуропроводности (а) [cm^2/c], представляет собой отношение коэффициента теплопроводности к объемной теплоемкости $a = \lambda/cp$.

Эта величина присутствует в дифференциальном уравнении теплопроводности [129], [130].

2.3 Разработка математической модели для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали

Модели мгновенных источников справедливы для металлов и сплавов при условии, что физические характеристики материала при нагреве не изменяются. Для вычисления параметров электронно-лучевой сварки используется критерий оптимальности. Использование данного критерия подразумевает использование теории теплового поля. Таким образом, применяются выражения, описывающие действия мгновенных быстродвижущихся линейного и точечного источников [129], [130].

Точечный источник теплоты постоянной мощности q движется с постоянной скоростью v прямолинейно из точки O_0 в направлении оси x (Рисунок 2.4). С момента движения источника прошло время t_n и он находится в точке O . Вместе с источником теплоты перемещается подвижная система координат, начало которой совпадает с местоположением источника теплоты, то есть с точкой O [129].

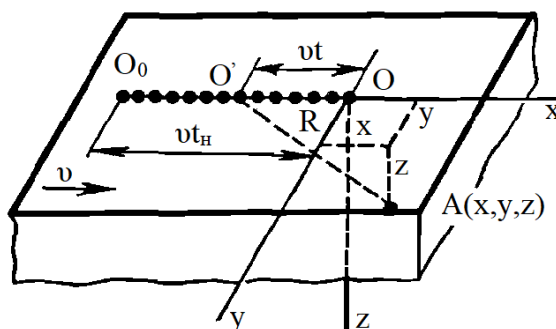


Рисунок 2.4 – Схема движения непрерывно действующего точечного источника на поверхности полубесконечного тела мощностью q , перемещающегося со скоростью v

Формула (2.1) для вычисления распределения энергии, при воздействии быстро движущегося точечного источника [129], [131]-[133]:

$$T_1(x, y, z, t, v, Q_1) = T_n + \frac{2Q_1}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t e^{-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{R^2}{4a\tau}} \frac{d\tau}{\tau^{3/2}} \quad (2.1)$$

где x, y, z – координаты в рассматриваемой точки;

T_n – начальная температура детали;

Q_1 – энергия электронного луча;

v – скорость процесса сварки;

$c\rho$ – теплоемкость стали;

a – коэффициент температуропроводности;

t – время, отсчитываемое от момента прохождения источника через сечения, в котором находится рассматриваемая точка;

$\tau = t - t'$ – длительность распространения теплоты в подвижной системе координат;

t' – некоторый момент времени после начала нагрева, в котором источник теплоты находится в точке O' с координатами $(vt', 0, 0)$, рисунок 2.4;

R – расстояние от направления движения источника до рассматриваемой точки ($R^2 = x^2 + y^2 + z^2$).

Линейный источник теплоты мощностью q с равномерным распределением её по толщине пластины движется с постоянной скоростью v (Рисунок 2.5). Граничные плоскости $z=0$ и $z=\delta$ отдают теплоту в окружающую среду, температуру которой T_c принимает равной начальной температуре тела T_n . Коэффициент теплоотдачи α [129], [130].

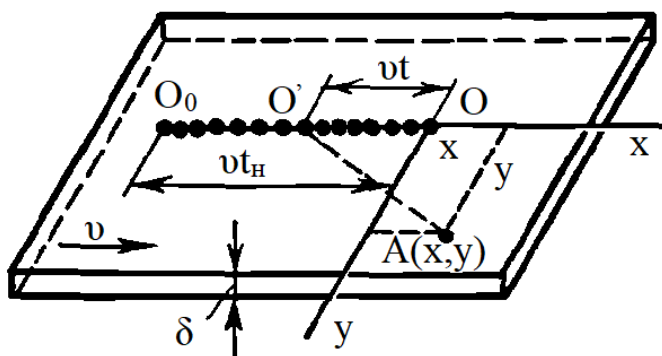


Рисунок 2.5 – Схема движения непрерывно действующего линейного источника в бесконечной пластине мощностью q , перемещающегося со скоростью v

Формула (2.2) для вычисления распределения энергии, при воздействии быстро движущегося линейного источника [129], [131]-[133]:

$$T_2(x, y, z, v, t, Q_2) = T_n + \frac{Q_2}{4\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t e^{-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{2\lambda\tau}{c\rho\delta} - \frac{r^2}{4a\tau}} \frac{d\tau}{\tau} \quad (2.2)$$

где δ – толщина;

Q_2 – энергия электронного луча;

r – расстояние от направления движения источника до рассматриваемой точки ($r^2 = x^2 + y^2$);

λ – коэффициент теплопроводности.

Энергия электронного луча в данном исследовании представлена в виде четырех идеализированных источников энергии (Рисунок 2.6).

Применение принципа наложения широко известно у ученых, занимающихся сварочными процессами [129], [134]. Представление мгновенного и непрерывно действующих движущихся источников теплоты, распределённых по поверхности или объему тела, в литературе представляется как совокупность точечных и линейных источников, действующих последовательно во времени в соответствующих областях пространства [134].

Действительный точечный источник Q_1 принимают перемещающимся по поверхности полубесконечного тела.

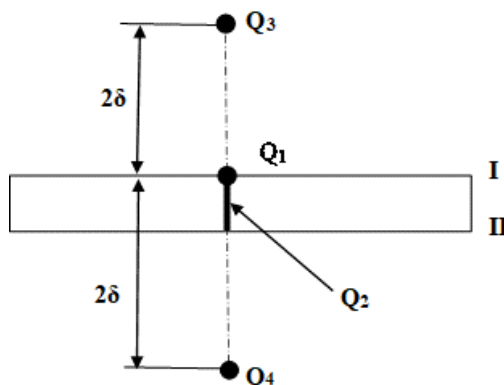


Рисунок 2.6 – Схема введения идеализированных источников для расчета температур в плоском слое

Отражение потока теплоты, отдаваемое источником Q_1 , от границы II учитывается введением источника Q_4 , симметричного источнику Q_1 относительно границы II, т.е. на расстоянии 2δ от источника Q_1 , действующего на границе I. Граница I для источника Q_4 учтена, введением фиктивного источника Q_3 , удаленного от границы I на расстояние 2δ . Для учета толщины детали (δ) при моделировании теплового процесса был введен линейный движущийся источник Q_2 .

Температура нагрева детали на поверхности, представляется в виде суммы температур от источников энергии (2.3):

$$T_{\text{комп}}(x, y, z, t, v) = T_1(x, y, z, t, v, Q_1) + T_2(x, y, z, t, v, Q_2) + T_3(x, y, z, t, v, Q_3) + T_4(x, y, z, t, v, Q_4) \quad (2.3)$$

где x, y, z – координаты в рассматриваемой точке;

T_1 – температура нагрева детали от движущегося по поверхности мгновенного точечного источника Q_1 ;

T_2 – температура нагрева детали от движущегося линейного источника Q_2 ;

T_3 – температура нагрева детали от движущегося над поверхностью фиктивного мгновенного точечного источника Q_3 ;

T_4 – температура нагрева детали от движущегося под поверхностью фиктивного мгновенного точечного источника Q_4 ;

t – время процесса сварки;

v – скорость процесса сварки, [см/с].

Применив метод наложения [129], получим итоговую систему уравнений температуры нагрева детали (2.4). При моделировании теплового процесса ЭЛС применяется критерий оптимальности (2.5). Изменение экспоненциального выражения (добавление величины δ), обусловлено необходимостью учета положения источника относительно поверхности детали (Рисунок 2.6).

$$T_{\text{комп}} = \sum \begin{cases} T_1 = \frac{Q_1}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2+y^2+(z-0,44\delta)^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}} \\ T_2 = \frac{Q_2}{4\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{2\lambda\tau}{c\rho\delta} - \frac{(x^2+y^2)}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau} \\ T_3 = \frac{Q_3}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2+y^2+(z-2\delta)^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}} \\ T_4 = \frac{Q_4}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2+y^2+(z+2\delta)^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}} \end{cases} \quad (2.4)$$

Так как $T_{\text{комп}}$ (2.3) не стационарный параметр, вычисление оптимальной скорости перемещения источника (скорость сварки) выполняется для времени t , при котором зона термического влияния (граница T^*) достигает нижней поверхности материала.

Под t понимается время интегрирование – время, при котором температура нагрева изделия (2.4) достигает порогового значения (граничная температура зоны термического влияния равна 600°C), задается в интервале $[0; +\infty)$.

При моделировании теплового процесса используется разработанный функционал (2.5), использующийся впервые для описания тепловых процессов. Для нормирования значений температур нагрева детали произведено деление на максимальное значение их температуры.

$$J(x, y, z, t, v) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (T_{\text{норм}_i}(x_i, y_i, z_i, t_i, v_i) - \overline{T_{\text{норм}}})^2} \quad (2.5)$$

где $(x, y, z, t, v) = \{(x_i, y_i, z_i, t_i, v_i)\}$ – множество координат рассматриваемых точек пространства, где $i = \overline{1, n}$;

$\overline{T_{\text{норм}}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{\text{норм}_i}(x_i, y_i, z_i, t_i, v_i)$ – нормированное среднее значение температуры детали в точках сварного шва;

$T_{\text{норм}_i}(x_i, y_i, z_i, t_i, v_i) = \frac{T_{\text{комп}_i}(x_i, y_i, z_i, t_i, v_i)}{T_{\text{max}}}$ – нормированное значение температуры детали в i -й точке;

$T_{\text{комп}_i}(x_i, y_i, z_i, t_i, v_i)$ – температура нагрева детали на поверхности;

T_{max} – максимальная температура нагрева детали на поверхности;

n – количество точек в объеме материала, для которых производятся вычисления.

Вычисление значения функционала выполняется для области, размеры которой сопоставимы с размерами канала проплавления.

Выбор требуемых значений технологических параметров при моделировании теплового процесса осуществлялся с помощью критерия оптимальности (2.6):

$$J_1(x, y, z, t, v) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (T_{\text{норм}_i}(x_i, y_i, z_i, t_i, v_i) - \overline{T_{\text{норм}}})^2} \rightarrow \min_{v(x,t)} \quad (2.6)$$

где $v(x,t)$ – скорость сварки от координаты вдоль сварного шва (x) и времени интегрирования (t).

Физический смысл критерия предполагает нагрев материала концентрированным источником энергии, обеспечивающим равномерное распределение температуры в зоне нагрева, максимально совпадающей с зоной формирования сварного шва.

Из необходимого условия экстремума первого порядка для поиска $J_1(x, y, z, t, v) \rightarrow \min_{v(x,t)}$ была получена система из трех уравнений (2.7):

$$\begin{cases} \frac{\partial J_1(x, y, z, t, v)}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial J_1(x, y, z, t, v)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial J_1(x, y, z, t, v)}{\partial v} = 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

Параметры y и z задаются границами, сформированными по характеристикам свариваемого материала (для исследуемого материала граничная температура зоны термического влияния равна 600°C , поэтому используются теплофизические параметры для этой температуры).

Для поиска точек минимума можно применить критерий проверки Сильвестра для проверки достаточных условий экстремума второго порядка. Для этого составим матрицу Гессе для функционала $J_1(x,y,z,t,v)$ (2.8).

$$G_J(x, y, z, t, v) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 J_1(x,y,z,t,v)}{\partial t^2} & \frac{\partial^2 J_1(x,y,z,t,v)}{\partial t \partial x} & \frac{\partial^2 J_1(x,y,z,t,v)}{\partial t \partial v} \\ \frac{\partial^2 J_1(x,y,z,t,v)}{\partial x \partial t} & \frac{\partial^2 J_1(x,y,z,t,v)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 J_1(x,y,z,t,v)}{\partial x \partial v} \\ \frac{\partial^2 J_1(x,y,z,t,v)}{\partial v \partial t} & \frac{\partial^2 J_1(x,y,z,t,v)}{\partial v \partial x} & \frac{\partial^2 J_1(x,y,z,t,v)}{\partial v^2} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Тогда существования минимума в найденной с помощью выражения (2.8) стационарной точке $(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)$, необходимо и достаточно выполнение следующей системы неравенств (2.9):

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial t^2} \right| > 0, \\ \left| \begin{array}{cc} \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial t^2} & \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial t \partial x} \\ \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial x \partial t} & \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial x^2} \end{array} \right| > 0, \\ \left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial t^2} & \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial t \partial x} & \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial t \partial v} \\ \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial x \partial t} & \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial x \partial v} \\ \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial v \partial t} & \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial v \partial x} & \frac{\partial^2 J_1(x^*, y^*, z^*, t^*, v^*)}{\partial v^2} \end{array} \right| > 0. \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Для поиска требуемых технологических параметров ЭЛС (энергия, время, скорость сварки) был разработан алгоритм, представленный в виде блок-схемы на Рисунке 2.7 [135]-[137]. Алгоритм основан на предлагаемых в данном исследовании моделях (2.1) – (2.7). После инициализации технологических параметров задаются следующие параметры: T – температура граничной зоны термического влияния (от минимальной до максимальной), t – время интегрирования, v – скорость сварки, Q – энергия источников нагрева, x – координаты по длине изделия, y – координаты по ширине изделия, z – координаты по высоте изделия. Далее значения сохраняются в базу данных для

дальнейшего использования в будущих вычислениях. В случае, если эксперимент новый, то для вычисления энергии источника нагрева задаются значения температуры, времени интегрирования и скорости сварки, после вычисляется температура нагрева (2.4) при действующих фиктивных и действительных источниках. Далее применяя критерий оптимальности (2.6), вычисляется требуемая энергия, обеспечивающая равномерную зону нагрева сварного шва, и строится полученный график зависимости критерия оптимальности от энергии (Рисунок 2.8). Для нахождения времени интегрирования задается полученная энергия и температура граничной зоны термического влияния, затем вычисляется температура нагрева варьируя остальные параметры в некотором диапазоне и строится график зависимости критерия оптимальности от времени интегрирования (Рисунок 2.8). Зная оптимальные значения энергии, времени интегрирования производится вычисления скорости сварки, аналогично предыдущим этапам. Также строится график зависимости критерия оптимальности от скорости сварки (Рисунок 2.9).

На заключительном этапе, при заданных значениях энергии, времени интегрирования и скорости сварки, а также при вариации геометрических размеров изделия, рассчитывается распределение температуры (2.4) свариваемой детали. Полученное распределение температуры формируется в соответствии с нагреваемой зоной в области сварного шва и соответствует зоне термического влияния.

Имеется возможность загружать параметры из БД и проводить вычисления для параметров, которые неизвестны или требуют оптимизации.

После завершения всех расчетов выводятся графики технологического процесса. Полученные результаты сохраняются в базу данных и используются в будущих моделированиях.

Выражение (2.4) позволяет получать распределение температуры свариваемой детали, тем самым получая зону термического влияния и позволяя проводить оценку глубины проплавления и ширины сварного шва.

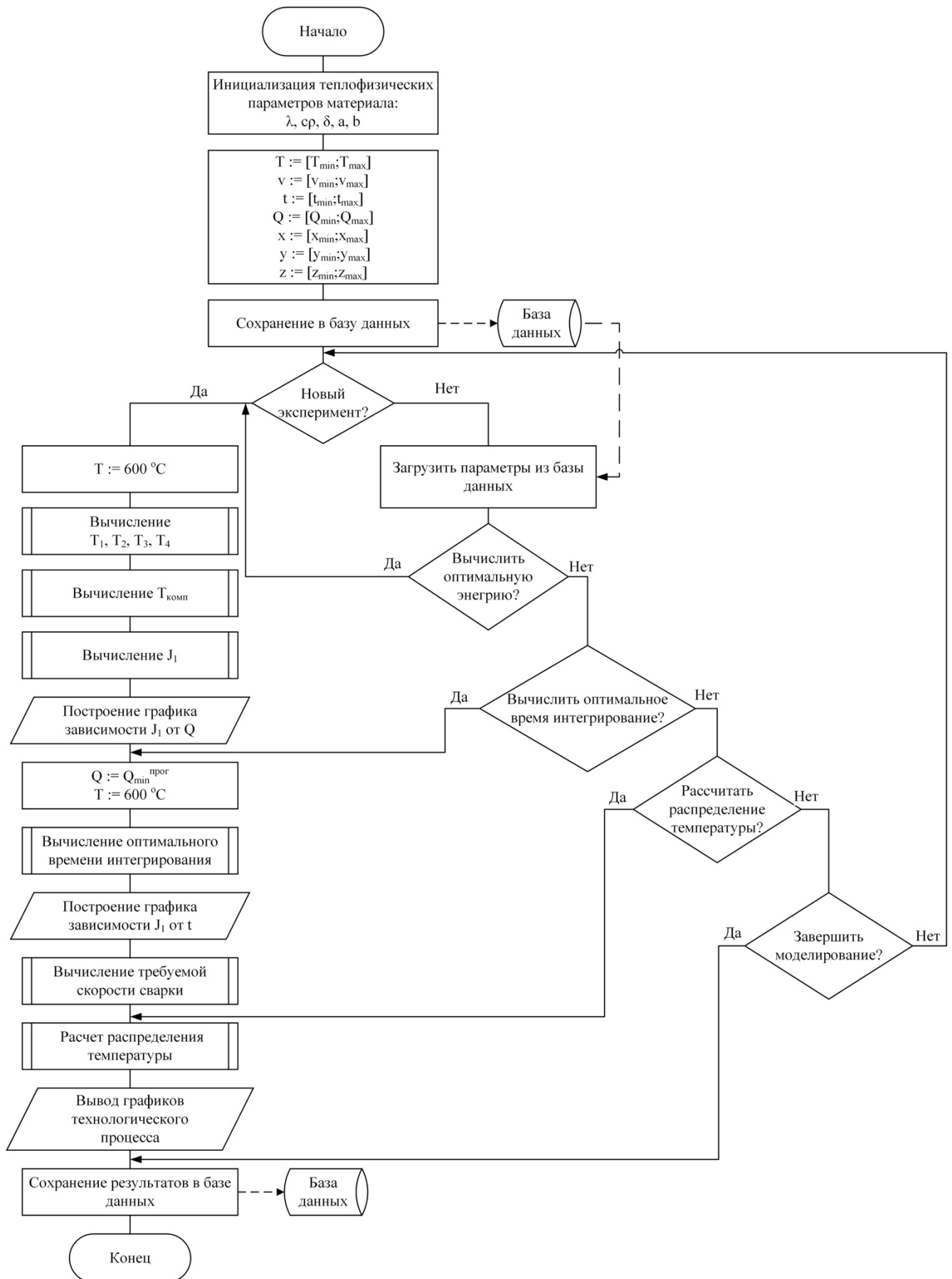


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритма поиска требуемых технологических параметров процесса сварки тонкостенных деталей

2.4 Методика для оценки глубины и ширины сварного шва при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей

Применяя разработанную методику, описываемую выражением (2.4), проводились расчеты зон термического влияния (ЗТВ) при ЭЛС тонкостенных деталей [138]-[142]. В процессе выполнения методики осуществляются расчеты температуры на поверхности детали, времени интегрирования и скорости сварки. Под температурой понимается выражение (2.4). Для расчета критерия оптимальности (2.6) разработана программа в среде MATLAB [143]-[146].

Методика оценки глубины проплавления и ширины сварного шва подразумевает получение зоны термического влияния на этапе поиска технологических параметров сварки. Полученная зона будет приближена к форме сварного шва. Оценка смоделированной зоны проводится сопоставлением полученных размеров глубины и ширины с требуемыми размерами для ответственных деталей, используемых в аэрокосмической промышленности.

Поиск технологических параметров, при которых будут получены требуемая глубина и ширина сварного шва осуществляется в несколько этапов (Рисунок 2.7).

На первом этапе, при нахождении требуемых технологических параметров осуществлялся поиск энергии и времени интегрирования, так как изначально не известно, сколько требуется вводиться энергии. В результате моделирования получен график зависимости критерия оптимальности от энергии и времени интегрирования (Рисунок 2.8).

На графике можно определить значение энергии, при котором критерий оптимальности имеет экстремальное значение (минимум), которое в дальнейшем принимается для расчетов.

На основе рассчитанных значений энергии и времени интегрирования на предыдущих этапах, производится вычисление скорости сварки с применением выражений (2.4) и (2.6).

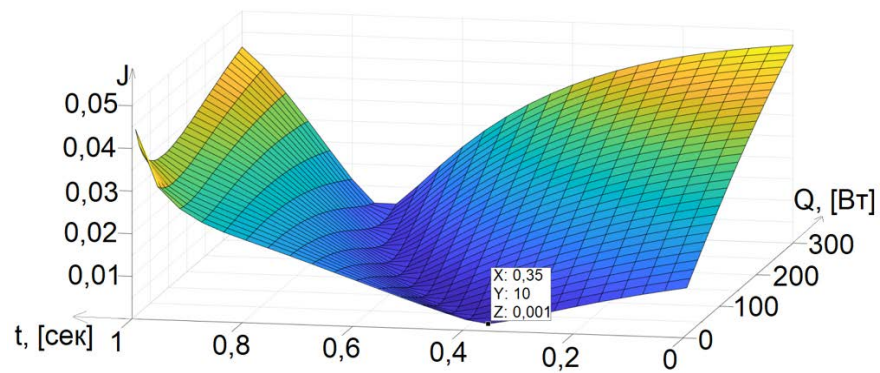


Рисунок 2.8 – График зависимости критерия оптимальности (J) от энергии (Q) и времени интегрирования (t)

В результате формируется график зависимости критерия оптимальности от скорости сварки (Рисунке 2.9). Решением будет являться минимум критерия на данном графике.

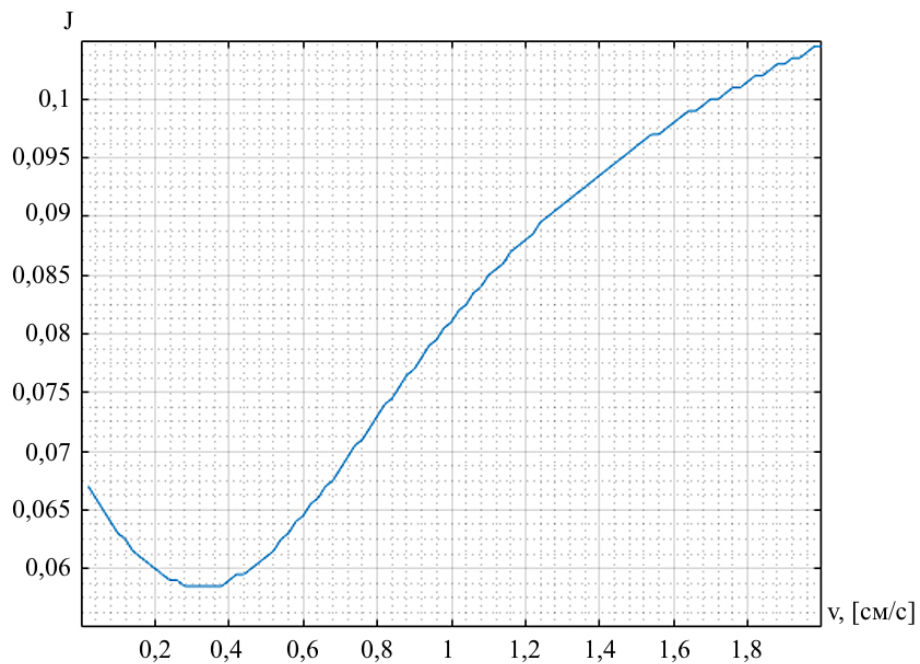


Рисунок 2.9 – График зависимости критерия оптимальности от скорости сварки

На следующем этапе рассчитывается распределение температуры относительно границ ЗТВ. Схематически границы ЗТВ показаны на Рисунке 2.10.

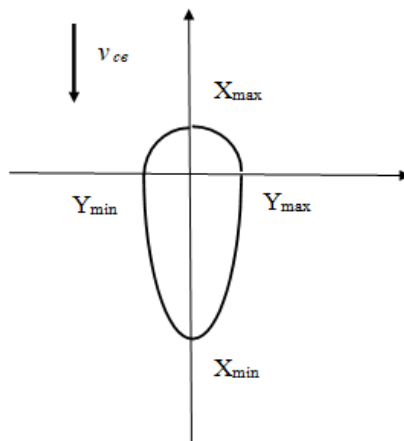


Рисунок 2.10 – Графическое пояснение по определению предельных значений координат относительно температурной границы свариваемой детали, где: $v_{св}$ – скорость сварки; Y_{max} – граница крайней правой зоны нагрева;

Y_{min} – граница крайней левой зоны нагрева;

X_{max} – граница верхней зоны нагрева (верхняя поверхность детали);

X_{min} – граница нижней зоны нагрева (нижняя поверхность детали)

Таким образом, расстояние от Y_{min} до Y_{max} будет эквивалентно ширине сварного шва. Расстояние от X_{max} до X_{min} будет эквивалентно глубине проплавления. Скорость сварки в данном случае направлена вдоль стыка детали.

В данном исследовании была разработана методика оценки глубины проплавления и ширины сварного шва [147]-[150], основанная на блок-схеме алгоритма поиска требуемых технологических параметров процесса сварки (Рисунке 2.7), представленная в виде блок-схемы алгоритма оценки глубины и ширины сварного полученных в процессе ЭЛС (Рисунок 2.11).

На первом этапе вводятся геометрические параметры изделия: h – высота изделия, w – ширины изделия, l – длина изделия и требуемые размеры сварного шва: $h_{шв}$ – высота сварного шва (глубина проплавления), $w_{шв}$ – ширина сварного шва. На следующем этапе, из БД загружаются технологические и теплофизические параметры детали.

Далее аналогично алгоритму показанном на Рисунке 2.7, задаются следующие параметры: T – температура граничной зоны термического влияния (от минимальной до максимальной), t – время интегрирования, v – скорость

сварки, Q – энергия источников нагрева, x – координаты по длине изделия, y – координаты по ширине изделия, z – координаты по высоте изделия. Далее значения сохраняются в базу данных для дальнейшего использования в будущих вычислениях.

Вычисление температур действующих и фиктивных источников производится согласно предложенной модели (2.4). На данном этапе формируется ЗТВ сопоставимая с зоной сварного соединения и позволяющая провести оценку высоту и ширину сварного шва. Таким образом строится график зависимости T – температуры нагрева детали (2.4) от ширины сварного шва – x и глубины проплавления – y .

На заключительном этапе производится оценка полученной ЗТВ. То есть, с помощью замеров полученной и представленной ЗТВ в виде графика, устанавливается соответствие требуемым значениям глубины и ширины сварного шва. В текущей работе исследование проводилось для сплава ВТ14 и в соответствии с руководством по эксплуатации изготавливаемой детали глубина шва должна быть 1,25 мм, при этом ширина шва не должна превышать 1,9 мм (в Главе 3.3 представлен и более подробно описан проводимый эксперимент). В случае, если имеются отклонения более 1%, то расчеты проводятся заново при других параметрах. Таким образом, исключается необходимость проведения натурных экспериментов для поиска или отработки технологического режима.

Вычисление критерия оптимальности (2.6) необходимо, так как полученная температура нагрева не должна превышать пороговые значения. Это проверяется вручную с помощью данного критерия.

Соответствие полученной глубины проплавления и ширины сварного шва говорит о применимости предложенных технологических параметров и позволяет получать стыковые соединения заданных геометрических размеров, обеспечивая отсутствие дефектов.

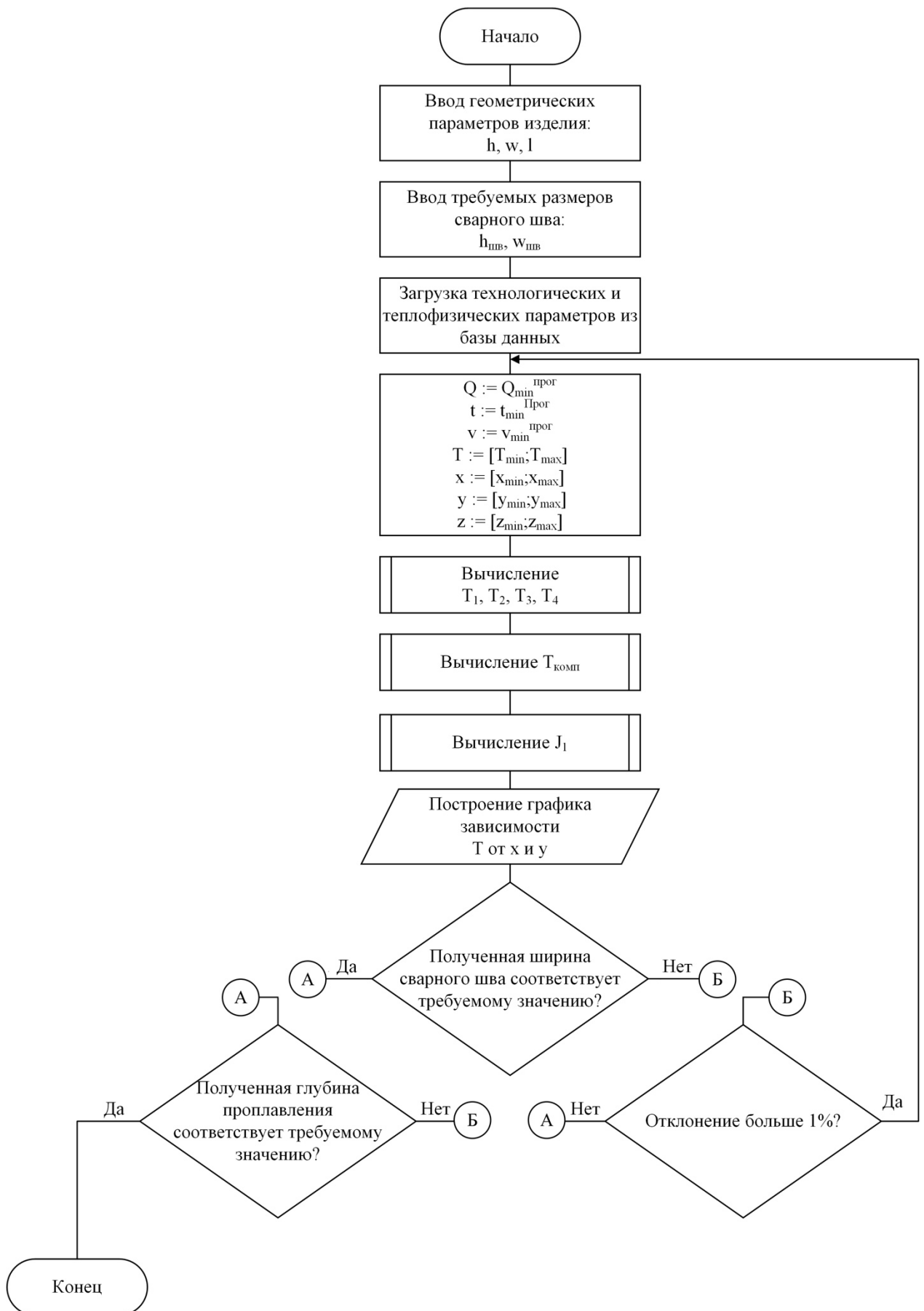


Рисунок 2.11 – Блок-схема методики оценки глубины и ширины сварного полученных в процессе ЭЛС

Применяя метод численного моделирования и разработанный подход (2.4), была получена ЗТВ сопоставимая с каналом проплавления (Рисунок 2.12). Расчеты проводились при значениях времени интегрирования, соответствующих моменту достижения границы ЗТВ нижней поверхности нагреваемого материала.

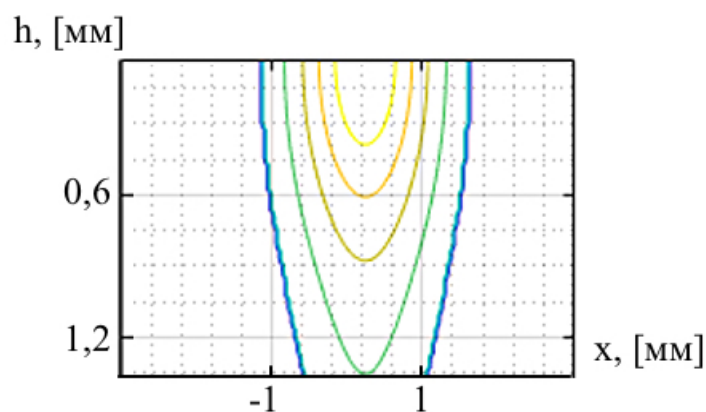


Рисунок 2.12 – Результаты моделирования зоны термического влияния:

h – толщина сварного шва; x – ширина изделия; синий цвет – границы ЗТВ

Как видно из рисунка выше, глубина проплавления h составляет чуть более 1,2 мм, а ширина сварного шва равна 1,9 мм, что сопоставимо в результатами полученными в Главе 3.

Таким образом, для оценки ЗТВ, необходимо провести моделирование с помощью разработанной программы в MATLAB, далее сопоставить размеры полученной глубины проплавления и ширины сварного шва с требованиями для ответственной детали.

В данном исследовании необходимо выполнять следующие условия: глубина сварного шва должна быть 1-2 мм, а отношение глубины проплавления к ширине шва больше либо равно единице.

При вычислении границы температурного поля на поверхности материала основываясь на выражении (2.6), была обнаружена следующая закономерность: при вариации скорости перемещения источника нагрева (2.4) имеет минимум, характерный для конкретной энергии и толщины нагреваемого материала (Рисунке 2.13).

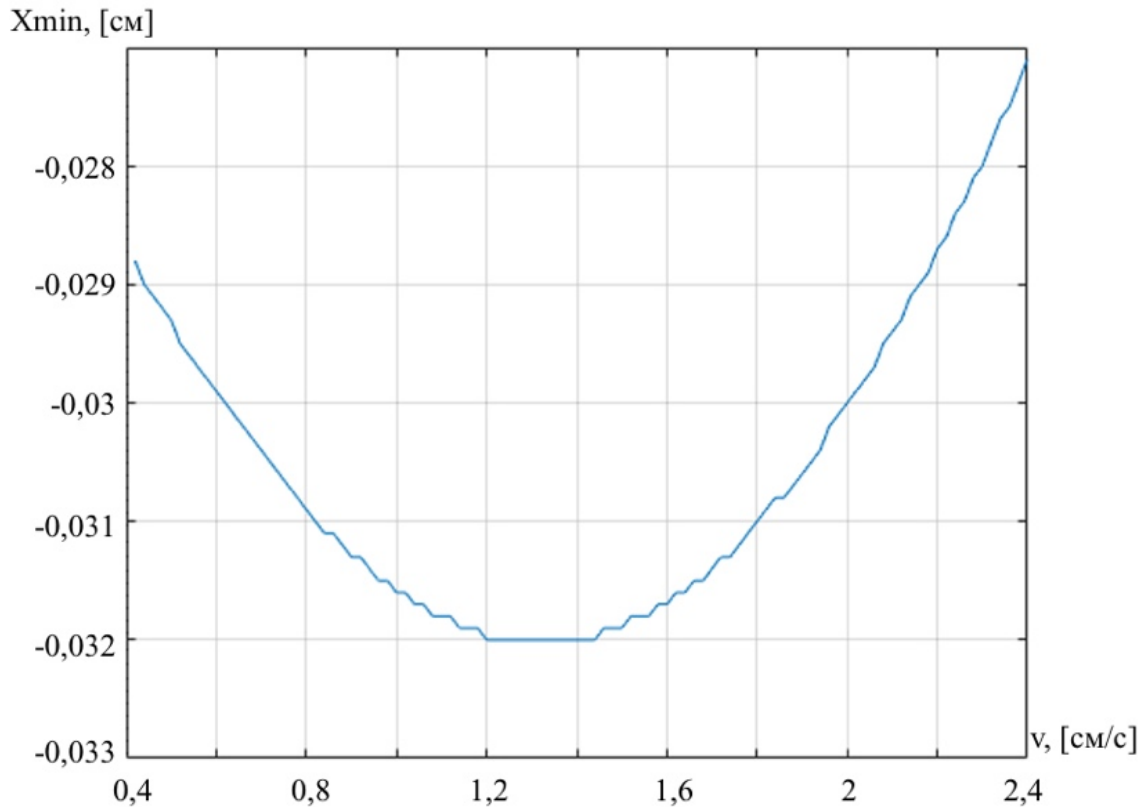


Рисунок 2.13 – График изменения граничного значения X_{min} от скорости перемещения источника нагрева

В формульном выражении это можно представить в следующем виде (2.10):

$$\frac{dT_{\text{комп}}}{dv} = 0 |_{T_{\text{комп}} > T^*} \quad (2.10)$$

Скорость перемещения источника нагрева (скорость сварки) определялась по координате положения экстремальной точки критерия оптимальности (Рисунок 2.14).

Экстремум скорости нагрева (Рисунок 2.9) совпадает с экстремумом скорости на Рисунке 2.13 для случая, когда время интегрирования соответствует времени, при котором формируется ЗТВ (Рисунок 2.12).

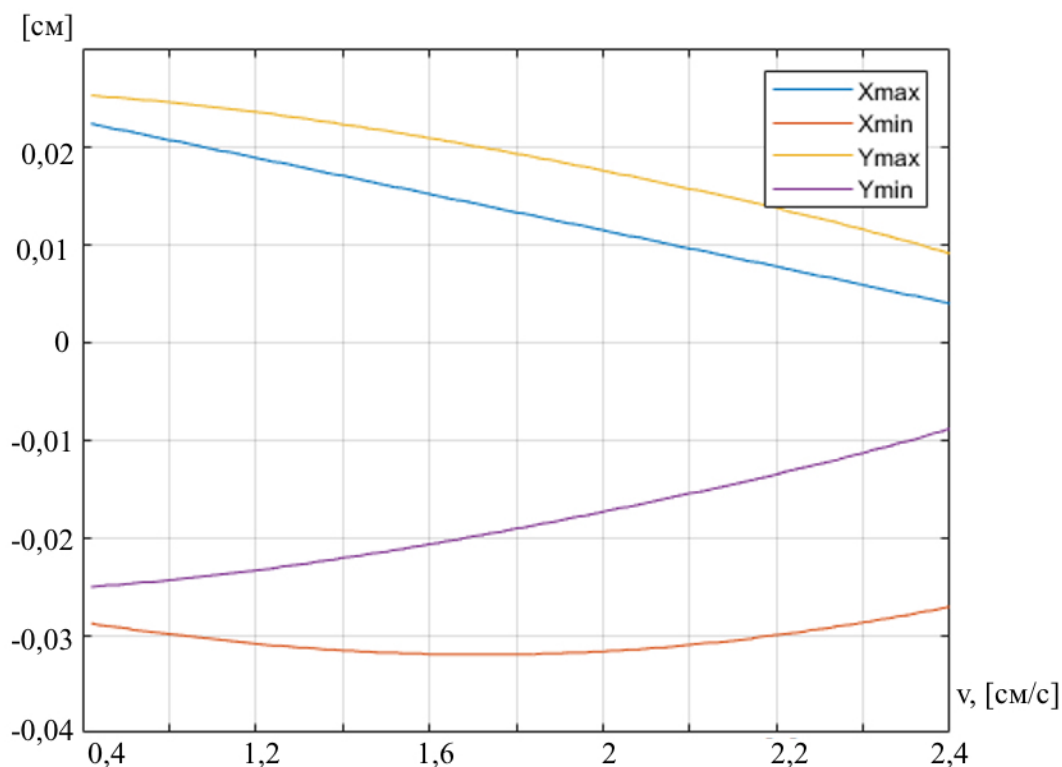


Рисунок 2.14 – График изменения граничных значений координат границы зоны нагрева от скорости перемещения источника нагрева

По полученным результатам исследований поведения критерия оптимальности (2.6) для различных значений энергии источника нагрева, был сформирован алгоритм вычисления параметров технологического процесса, рекомендуемых в дальнейшем для отработки технологии ЭЛС.

Таким образом, для нахождения требуемых технологических параметров процесса ЭЛС тонкостенных конструкций из алюминиевого сплава толщиной 1,2 мм и 0,65 мм, а также сплавов титана BT14 толщиной 1,2 мм, используется следующий алгоритм, состоящий из трёх этапов:

- поиск энергии;
- поиск времени интегрирования;
- поиск скорости сварки.

С физической точки зрения минимум критерия оптимальности пропорционален минимальному рассеянию температуры нагрева металла. В случае равномерного нагрева материала, т.е. минимальном рассеянии температуры в рассматриваемом объеме, вероятность равномерного расплавления

металла будет наивысшей. Это повлечет за собой формирование шва с наилучшими качественными показателями и минимальными остаточными напряжениями. Введение нормированных показателей повышает чувствительность критерия, что особенно важно для температур, не превышающих температур фазовых переходов свариваемых материалов.

Сложность проводимых вычислений заключалась в наличии неопределенности по выбору значения энергии при вводе новых материалов. В настоящее время, исследований для сплава АД31 не проводились, поэтому применяя разработанный критерий оптимальности, осуществлялся подбор энергии. В ходе моделирования технологического процесса осуществлялся поиск параметров с помощью выражений (2.6) и (2.11) (Таблица 2.1) [151].

В таблице содержатся результаты моделирования теплового процесса нагрева комплексным источником энергии (2.4) для трех параметров материала АД31. Вычисления проводились для минимальной толщины детали ($\delta=0,065$ см) и максимальной толщины детали ($\delta=0,12$ см). Кроме этого, расчеты проводились с заданной толщиной непроплава ($\delta=0,065+0,4$ см). Это необходимо для отработки технологических режимов сварки на заготовках с большей толщиной.

Результаты полученных значений времени интегрирования и скорости сварки при энергии источника нагрева (столбец 1) находятся в столбцах: 4, 5, 8, 9, 12, 13.

В таблице помещены численные значения заданного комплексного источника нагрева Q согласно уравнения (2.4). Расчеты проводились с применением критерия (2.6), однако, варьировались координаты y и z , а координата x выбрана по максимальной площади зоны термического влияния. Основываясь на результатах моделирования, полученных ранее [1], [66], и выборе параметров, описанном выше, геометрические размеры ЗТВ максимально приближены к размерам поперечного сечения сварного шва.

Для оптимизации энергии была выбрана погонная энергия. Этот параметр часто используется технологами для анализа эффективности энергозатрат при

сварке. Погонная энергия вычисляется по формуле (2.11):

$$Q_{\text{пог}} = \frac{Q}{v_{\text{св}}} \quad (2.11)$$

На Рисунке 2.15 изображен график зависимости погонной энергии от энергии источника нагрева при толщине детали 0,12 см для случая с гарантированным непроплавом.

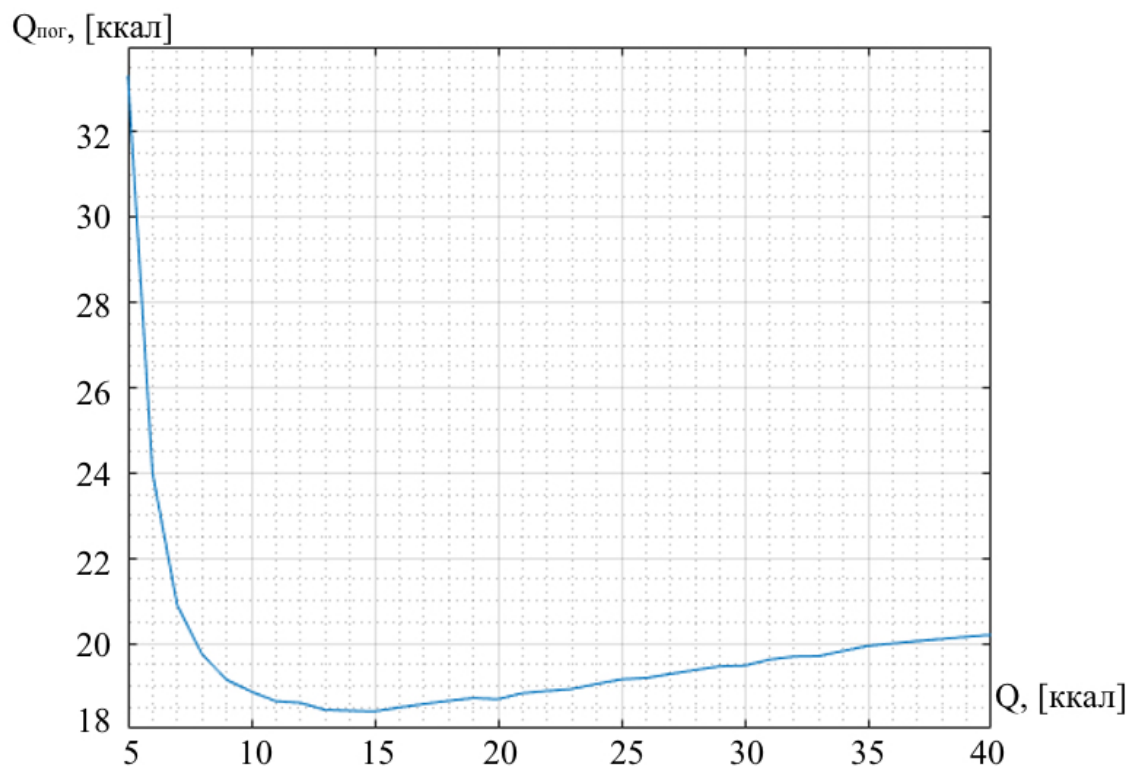


Рисунок 2.15 – График зависимости погонной энергии от энергии источника нагрева при толщине детали 0,12 см

Таблица 2.1 – Результаты вычисления модели (2.6)

35	30	25	20	15	10	5	1	Q	
0,080139	0,084796	0,089768	0,095369	0,104246	0,112253	0,127053	2	J ₁	delta=0,065+0,4
15,05376	14,70588	14,32665	13,84083	13,33333	12,82051	14,49275	3	Q _{пор}	
2,325	2,04	1,745	1,445	1,125	0,78	0,345	4	v	
0,092	0,1	0,112	0,13	0,159	0,217	0,377	5	t	
0,07845	0,082472	0,086336	0,093173	0,100404	0,110351	0,125332	6	J ₁	
14,02806	13,66743	13,29787	12,86174	12,34568	11,97605	13,88889	7	Q _{пор}	delta=0,065
2,495	2,195	1,88	1,555	1,215	0,835	0,36	8	v	
0,095	0,103	0,115	0,132	0,161	0,217	0,373	9	t	
0,074534	0,077531	0,081618	0,08643	0,09274	0,102906	0,118736	10	J ₁	
19,94302	19,48052	19,15709	18,69159	18,40491	18,86792	33,33333	11	Q _{пор}	
1,755	1,54	1,305	1,07	0,815	0,53	0,15	12	v	delta=0,12
0,161	0,176	0,196	0,227	0,278	0,375	0,649	13	t	

Полученный результат моделирования с целью оптимизации энергии источника нагрева, алгоритм которого предполагает получение графика, представленного Рисунке 2.15, не подтвердился при моделировании на других материалах, изображенных на Рисунке 2.16.

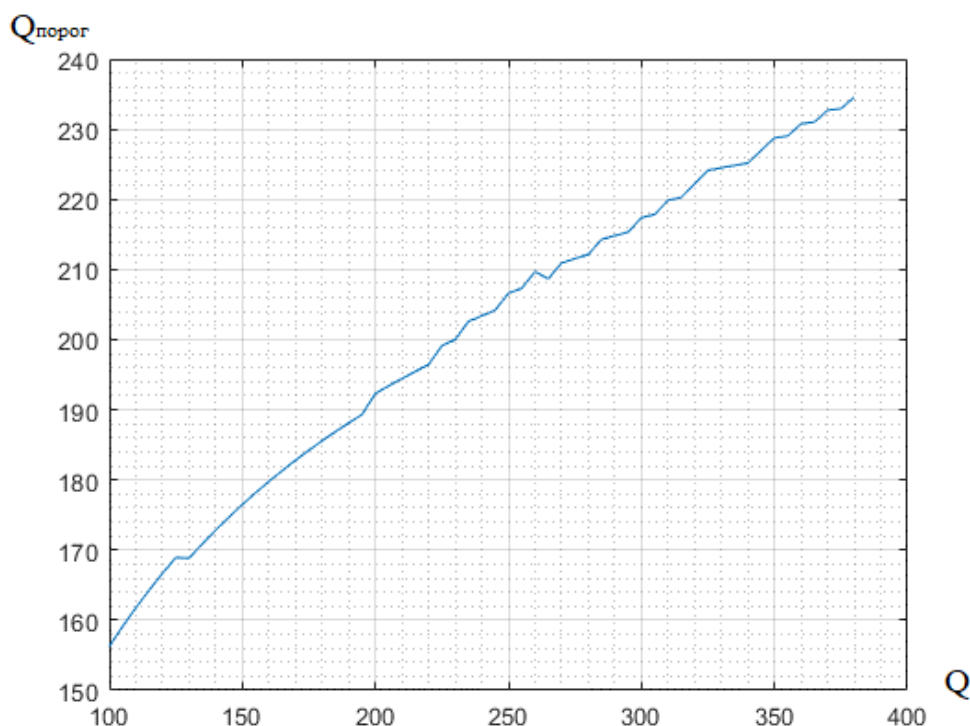


Рисунок 2.16 – График зависимости погонной энергии от энергии источника нагрева при толщине детали 0,12 см для материала ВТ14

Для решения данной проблемы, на основе предыдущих работ, был разработан следующий критерий оптимальности (2.12):

$$J_2 = (Q - Q_{\text{пог}})^2 \rightarrow \min \quad (2.12)$$

В результате применения данного критерия получен математический инструмент для определения не только оптимального фокусного расстояния и скорости сварки, но и энергии источника нагрева (Рисунки 2.17 и 2.18).

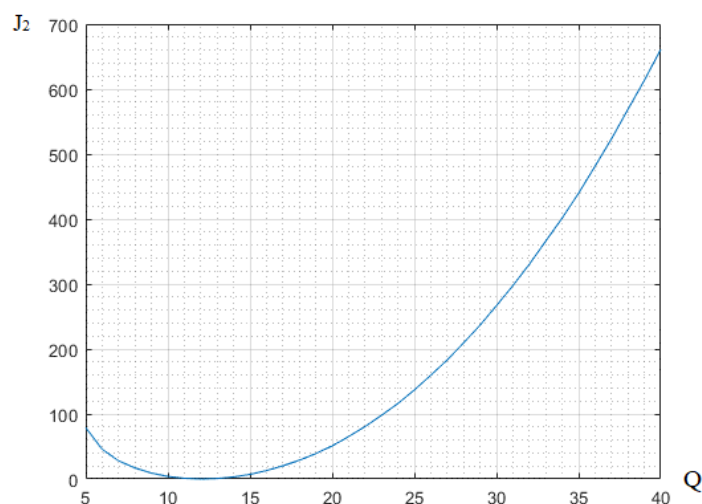


Рисунок 2.17 – График критерия J_2 от энергии источника нагрева при толщине детали 0,065 см

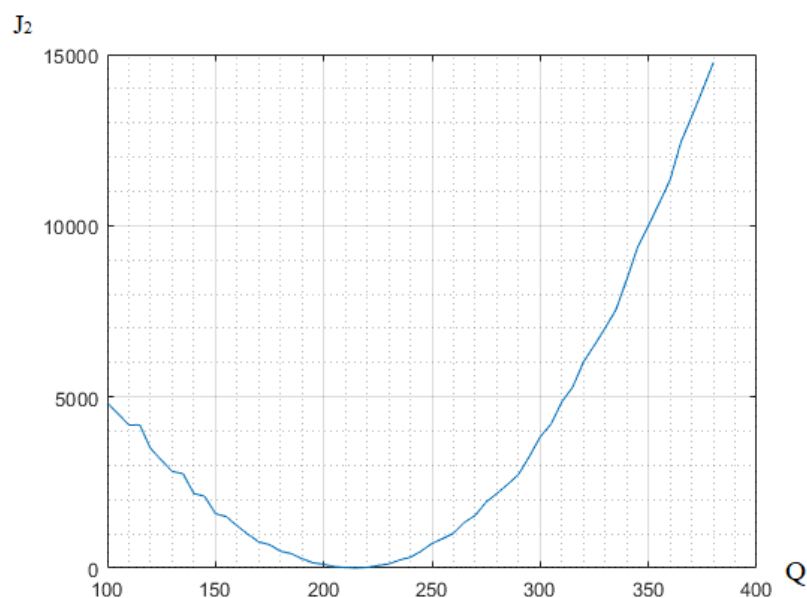


Рисунок 2.18 – График зависимости J_2 от энергии источника нагрева при толщине детали 0,12 см для материала ВТ14

Моделирование процесса сварки выполнено для идеального источника нагрева. Для интерпретации результатов требуется определить масштабный коэффициент конкретного оборудования. Для этого необходимо провести пробную сварку на образце с последующим замером глубины проплавления. Далее, необходимо сопоставить энергию с графика и введенную энергию при сварке, таким образом получим масштабный коэффициент. В результате адаптируем графики моделирования с реальным источником нагрева.

2.5 Верификация предложенной модели путем имитационного моделирования

Для проверки разработанных методик и модели, и для оценки полученных геометрических размеров сварных швов при ЭЛС тонкостенных деталей применялась имитационное моделирование, с помощью программного продукта COMSOL Multiphysics [152]-[156] и ANSYS Discovery AIM [157]-[161]. Используемая в данных программных продуктах модель учитывает теплофизические характеристики свариваемых материалов и технологические параметры сварки при ЭЛС, что позволяет провести оценку того, насколько предложенный подход в данном исследовании по итогам сравнения результатов с имитационным моделированием в COMSOL и ANSYS будет соответствовать заявленным условиям.

Верификация в среде COMSOL Multiphysics.

Для верификации полученных результатов было проведено имитационное моделирование в программе COMSOL Multiphysics [162]-[164], позволяющее по заданным трехмерным моделям тонкостенных конструкций, а также с учетом предложенных математических моделей проводить исследования по оценке распределения энергии.

Для проведения моделирования был подготовлен эскиз готовой детали (Рисунок 2.19). Высота изделия – 80 мм, диаметр диска – 76 мм, его толщина – 12 мм.

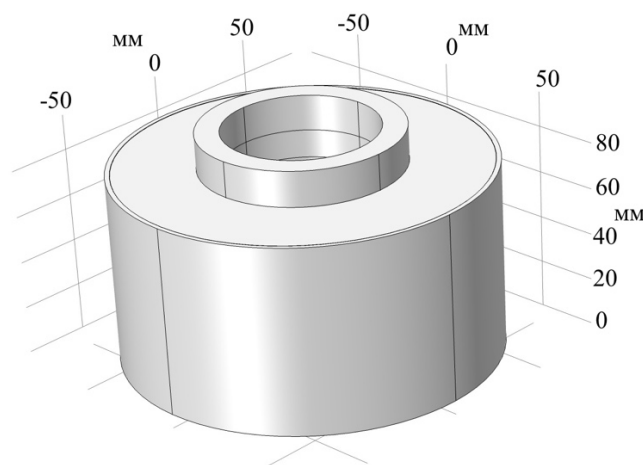


Рисунок 2.19 – Эскиз готового изделия, сделанный во встроенном модуле COMSOL

На Рисунке 2.20 представлена визуализация распределения энергии на поверхности изделия, при моделировании COMSOL Multiphysics для сплавов титана BT14. Белым цветом обозначено место, где достигается максимальный нагрев и формируется сварной шов.

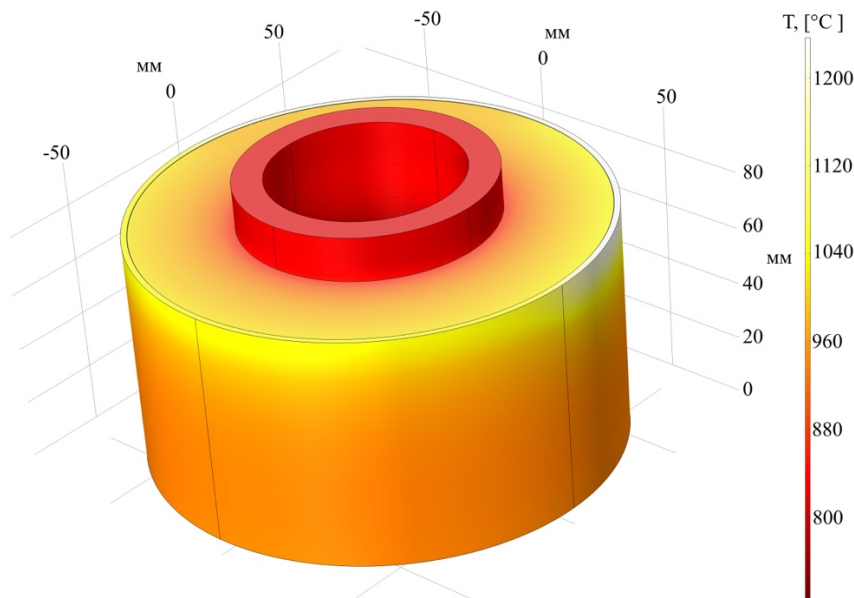


Рисунок 2.20 – Распределение температуры при нагреве в установившемся режиме титанового сплава B14 в среде COMSOL

В процессе модельных экспериментов исследовалось влияние типа материала, из которого изготовлены тонкостенные конструкции – сплава титана (BT14), алюминия (АМг6), меди (Л63), стали (12Х18Н10Т), и влияние технологических параметров процесса сварки.

Из Рисунка 2.20 видно, что максимальный нагрев изделия происходит в зоне сварного соединения, при этом остаточное тепло также концентрируется в зоне ввода-вывода электронного луча. При этом наименее концентрированное распределения энергии обнаруживается для титанового сплава BT14. Данные результаты хорошо соотносятся с предположениями, основанными на значениях теплофизических характеристик для таких материалов.

На Рисунках 2.21-2.23 представлена визуализация распределения энергии по конструкции в виде стакана с крышкой, имитирующей образец для сплавов алюминия (АМг6), нержавеющей стали (12Х18Н10Т) и меди (Л63), получаемой при реализации моделирования в COMSOL Multiphysics.

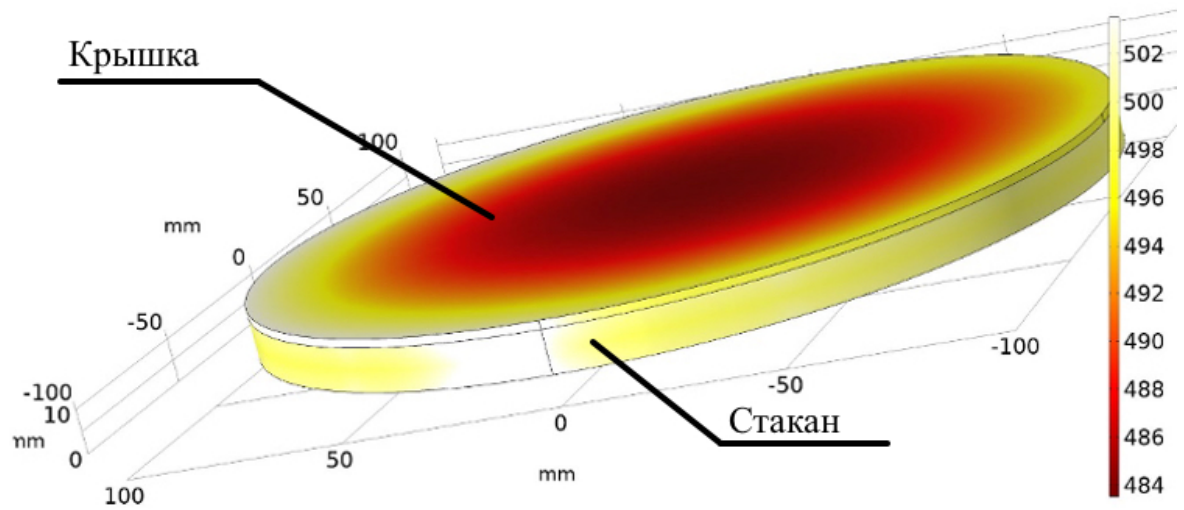


Рисунок 2.21 – Распределение температуры при нагреве алюминиевого сплава АМг6

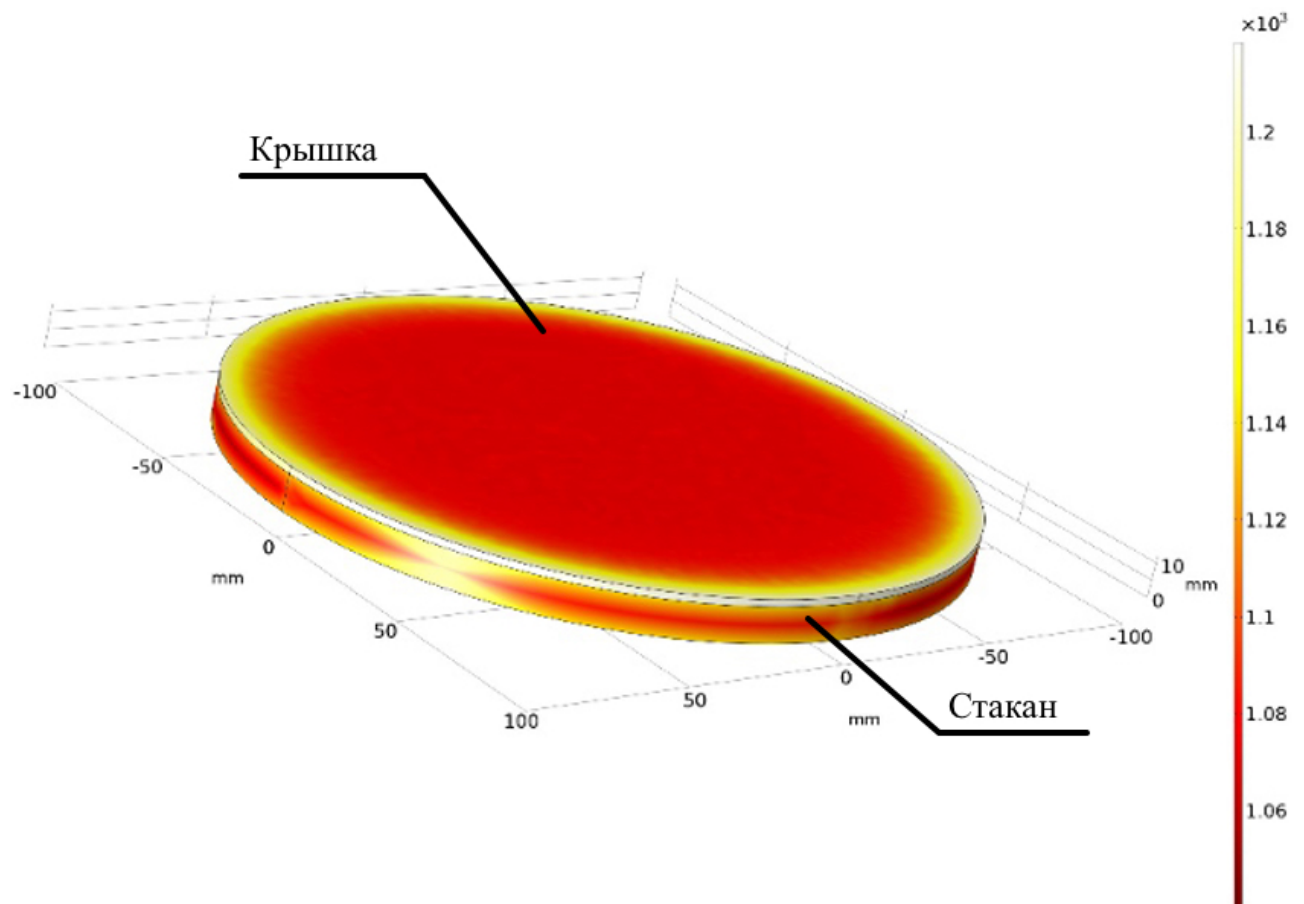


Рисунок 2.22 – Распределение температуры при нагреве нержавеющей стали 12X81N10T

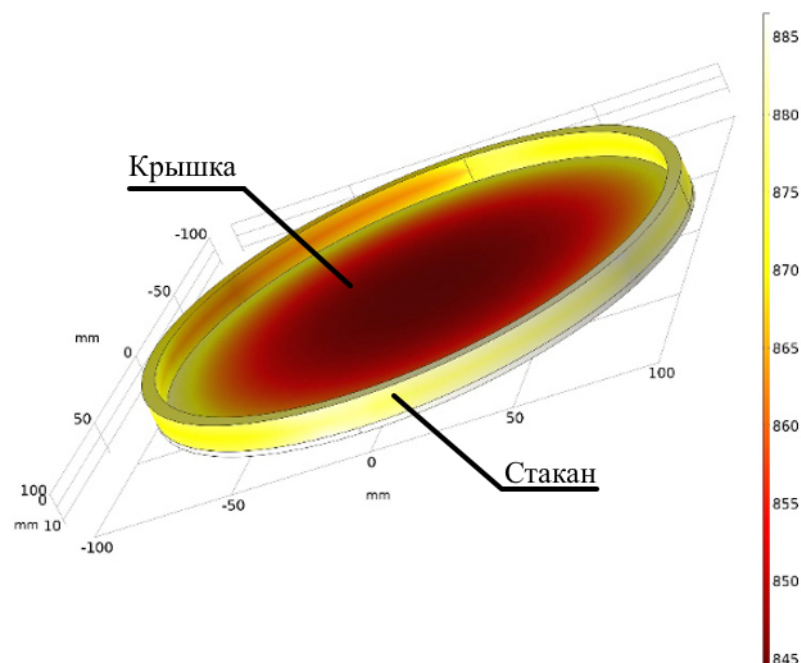


Рисунок 2.23 – Распределение температуры при нагреве сплава латуни Л63

В процессе модельных экспериментов исследовалось влияние как типа материала, из которого изготовлены тонкостенные конструкции (сплав титана, алюминия, меди, стали) так и технологических параметров процесса сварки (ток луча, скорость сварки, ток фокусировки).

Из рисунков видно, что максимальных нагрев изделия происходит в зоне сварного соединения (обозначенный белым цветом). При этом наименее концентрированное распределение энергии обнаруживается для титанового сплава BT14, а наибольшее концентрация в зоне сварного шва достигается для нержавеющей стали (12X18H10T). Данные результаты хорошо соотносятся с предположениями, основанными на значениях теплофизических характеристик для таких материалов.

Для изучения влияния изменения тока сварки в процессе ЭЛС было проведено моделирование в программе COMSOL Multiphysics и в результате проводилось сравнения полученных графиков распределения температуры.

Далее изменялось значение вводимой энергии в меньшую и большую сторону для изучения реакции предложенной модели.

На Рисунках 2.24-2.26 представлены визуализации результатов моделирования для изделия из сплава титана BT14 при последовательном увеличении тока луча.

На Рисунках 2.27-2.29 представлены визуализации результатов моделирования для изделия, выполненного из сплава алюминия АМг6, также при последовательном увеличении тока луча.

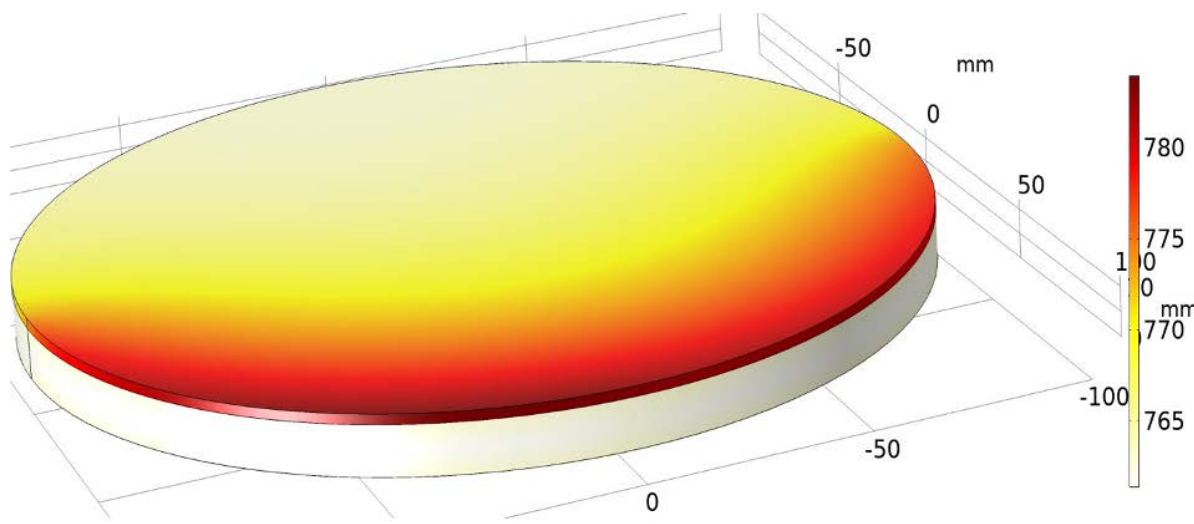


Рисунок 2.24 – Распределение температуры при нагреве титанового сплава BT14

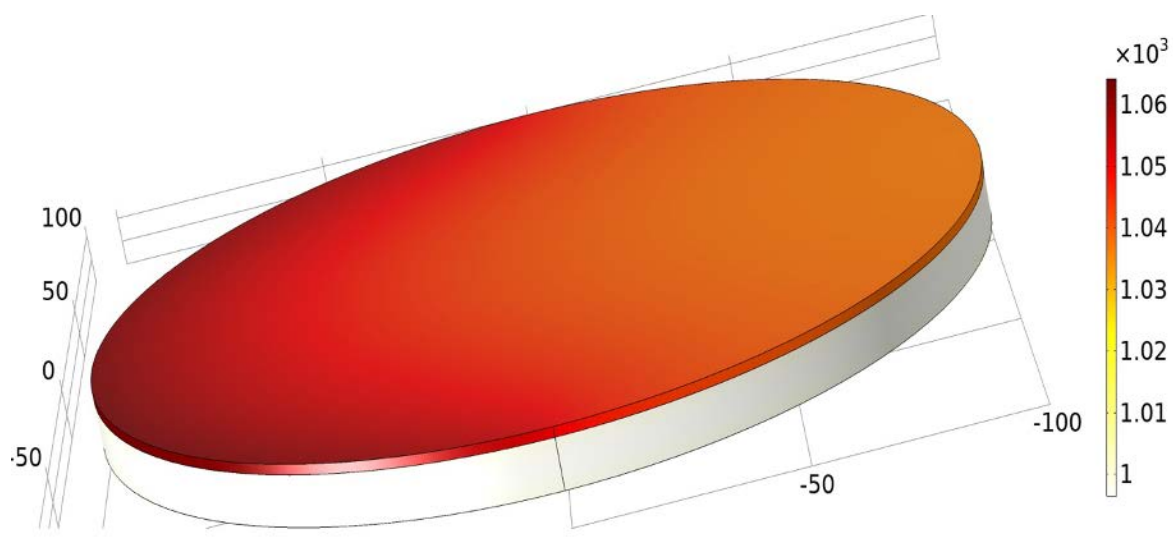


Рисунок 2.25 – Распределение температуры при нагреве титанового сплава BT14

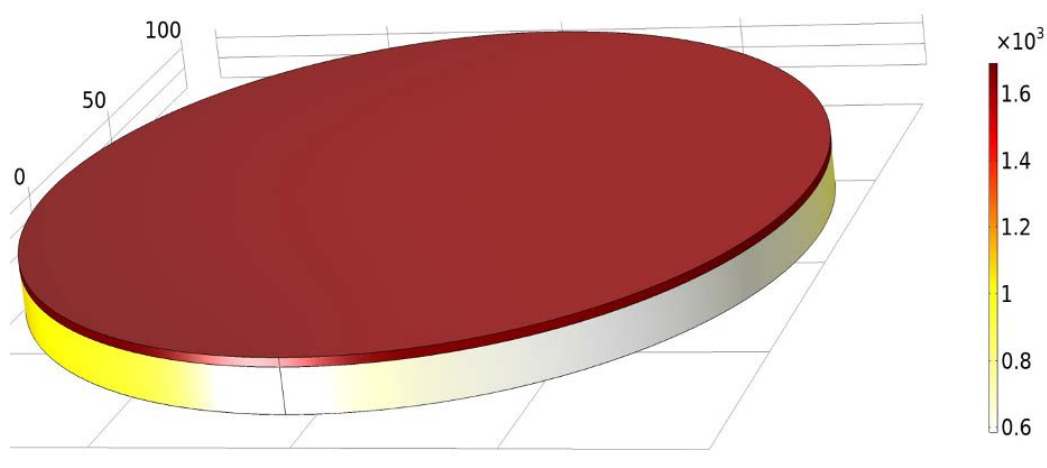


Рисунок 2.26 – Распределение температуры при нагреве титанового сплава BT14

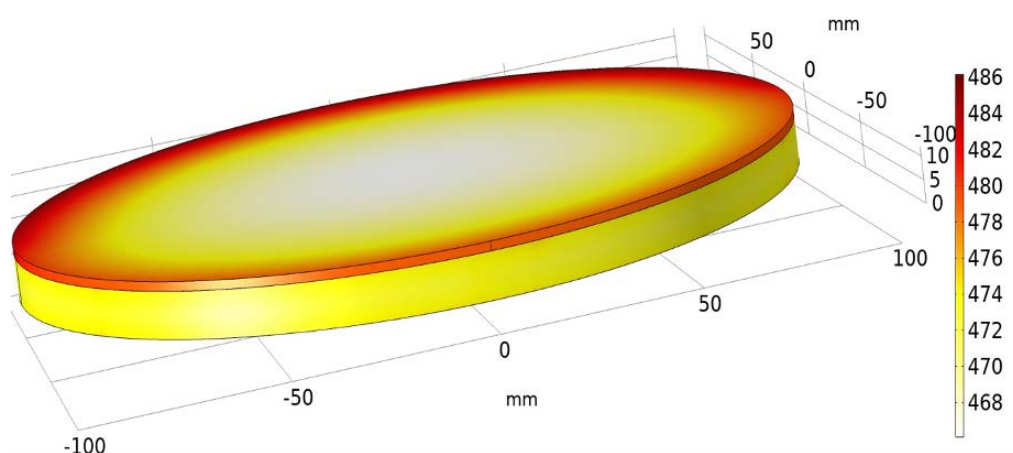


Рисунок 2.27 – Распределение температуры при нагреве алюминиевого сплава
AMг6

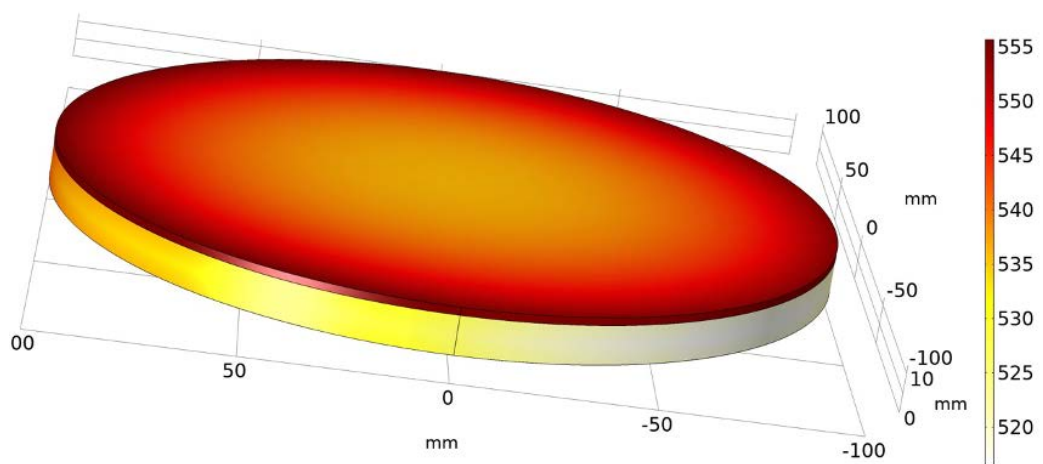


Рисунок 2.28 – Распределение температуры при нагреве алюминиевого сплава
AMг6

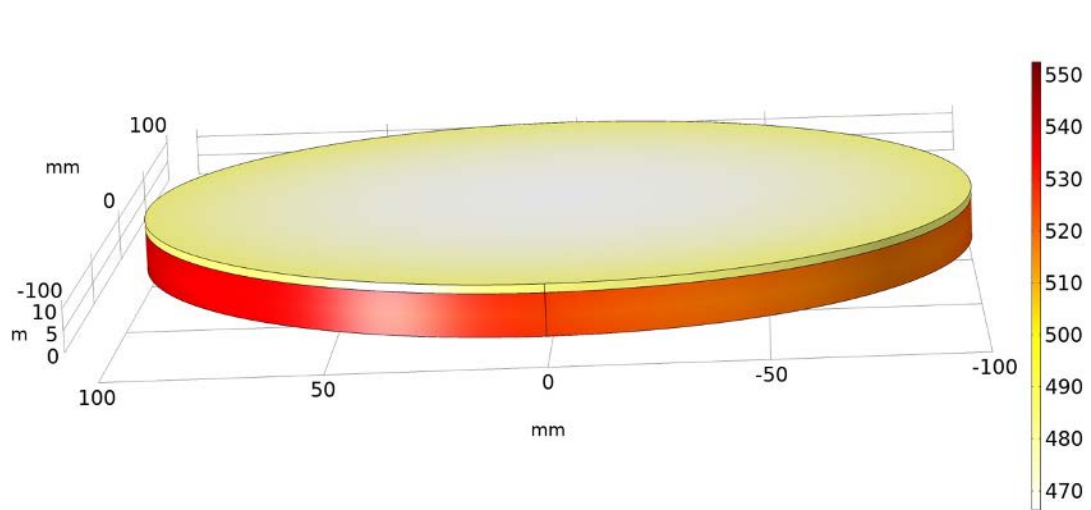


Рисунок 2.29 – Распределение температуры при нагреве алюминиевого сплава АМг6

При изменении тока луча происходит перераспределение энергии между свариваемыми элементами как в верхней части изделия, так и в некоторых случаях нижней его части. Например, нижняя часть изделия может нагреться значительно сильнее, чем верхняя, что при практической реализации такой технологии вызовет появление непроваров или перегрев изделия выше температуры правления, что недопустимо в процессе сварки (Рисунки 2.26 и 2.29).

Такой эффект приводит к увеличению ширины формируемой сварной ванны, к снижению качества сварного соединения в смысле прочности, а также к уменьшению глубины проплавления.

В результате визуализации средствами COMSOL Multiphysics распределения тепловых полей в зоне сварного соединения для трех значений тока электронного пучка по каждому материалу, можно судить об эффективности предварительно сформированного набора оптимальных значений параметров.

Верификация в среде ANSYS Discovery AIM.

Для проверки адекватности предложенной математической моделей распределения температуры, применялись имитационные модели нагрева твердого тела с введением выражения (2.15), данные модели построены средствами специализированной САПР, что позволит дополнить комплекс

существующих математических моделей. Моделирование проводилось в ПО ANSYS Discovery AIM.

Для проведения имитационного моделирования и верификации полученных результатов на предыдущем этапе математического моделирования, было введено выражение тока луча (2.14), в котором присутствует среднеквадратичное отклонение, которое было принято за диаметр луча.

Ток коллектора вторичных электронов [130] можно представить выражением (2.13):

$$I_k = I_{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, y) j_{\pi}(x, y) dx dy \quad (2.13)$$

где I_{π} – ток пучка электронов;

$\varphi(x, y)$ – эффективный коэффициент вторичной эмиссии;

$j_{\pi}(x, y)$ – нормированная плотность распределения тока пучка в координатах x, y , причём $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} j_{\pi}(x, y) dx dy = 1$.

Нормированная плотность $j_{\pi}(x, y)$ [130] обычно представляют нормальным законом распределения (2.14):

$$j_{\pi}(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma_x^2}\right) * \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{(y-\varepsilon_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (2.14)$$

где σ_x, σ_y – среднеквадратическое отклонение по соответствующим осям;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – положение оси пучка в координатах x и y .

Если стык свариваемого соединения ориентирован вдоль оси y тогда функция $\varphi(x, y)$ не зависит от y , т.е. $\varphi(x, y) = \varphi(x)$. Объединяя выражения (2.12), (2.14) и учитывая, что $\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right) = 1$ [130]. Получим следующее выражение, которое описывает ток пучка (2.15):

$$I = \frac{I_{\text{п}}}{\sigma \sqrt{\pi}} * \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) * \exp\left(-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2*\sigma^2}\right) dx \quad (2.15)$$

где $I_{\text{п}}$ – ток пучка электронов;

x – координата по оси X ;

$\varphi(x)$ – эффективный коэффициент вторичной эмиссии;

ε – математическое ожидание;

σ – среднеквадратическое отклонение.

На Рисунках 2.30 и 2.31 представлены примеры визуализации распределения температуры детали при изменении вводимой энергии, полученные при моделировании нагрева свариваемой детали в процессе ЭЛС в ANSYS [158]-[161], соответственно, для сплавов титана и алюминия.

Из рисунков видно, что при увеличении энергии, нагрев имеет более интенсивный характер, а температурное поле сконцентрировано в зоне приложения энергии – в зоне сварного шва. Однако, для тонкостенных конструкций, особенно для верхнего элемента соединяемой сборки, такая концентрация приводит к появлению дефектов в зоне сварного соединения. Данное заключение справедливо как для изделия из титанового сплава, так и для изделия из сплава алюминия.

Уменьшение энергии при нагреве детали в процессе сварки (при не изменой скорости нагрева и времени проведения сварки), согласно полученным результатам имитационного моделирования, приводит к более равномерному распределению температуры по всей поверхности детали, включая участки, находящиеся на значительном удалении от зоны сварки, а также к меньшему нагреву самого сварного шва, что приводит к искажению геометрических характеристик сварной ванны и негативно сказывается на механических характеристиках соединений.

При моделировании нагрева детали с заданным значением энергии эквивалентной мощности, с которой проводится сварка данного сплава, видно,

что основная энергия концентрируется в зоне сварного шва (линия красного цвета), также температура находится в пределах плавления ВТ14, что означает равномерный нагрев и получение качественного сварного шва.

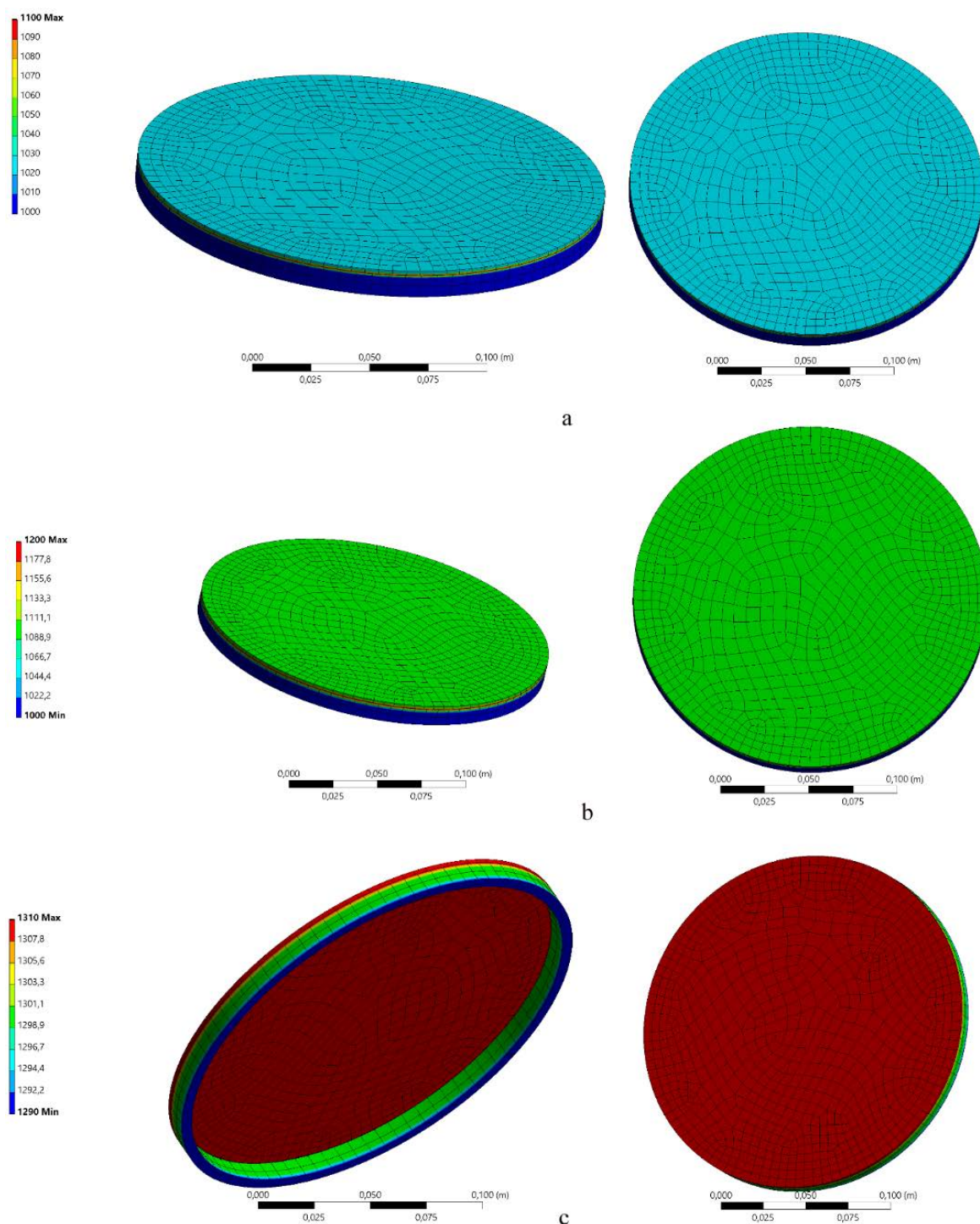


Рисунок 2.30 – Распределение температуры при нагреве титанового сплава ВТ14 разной энергией, где а) энергия меньше требуемой; б) требуемая энергия (значение эквивалентно значению мощности, при котором проводится сварка для данной материала и детали); с) энергия больше требуемой

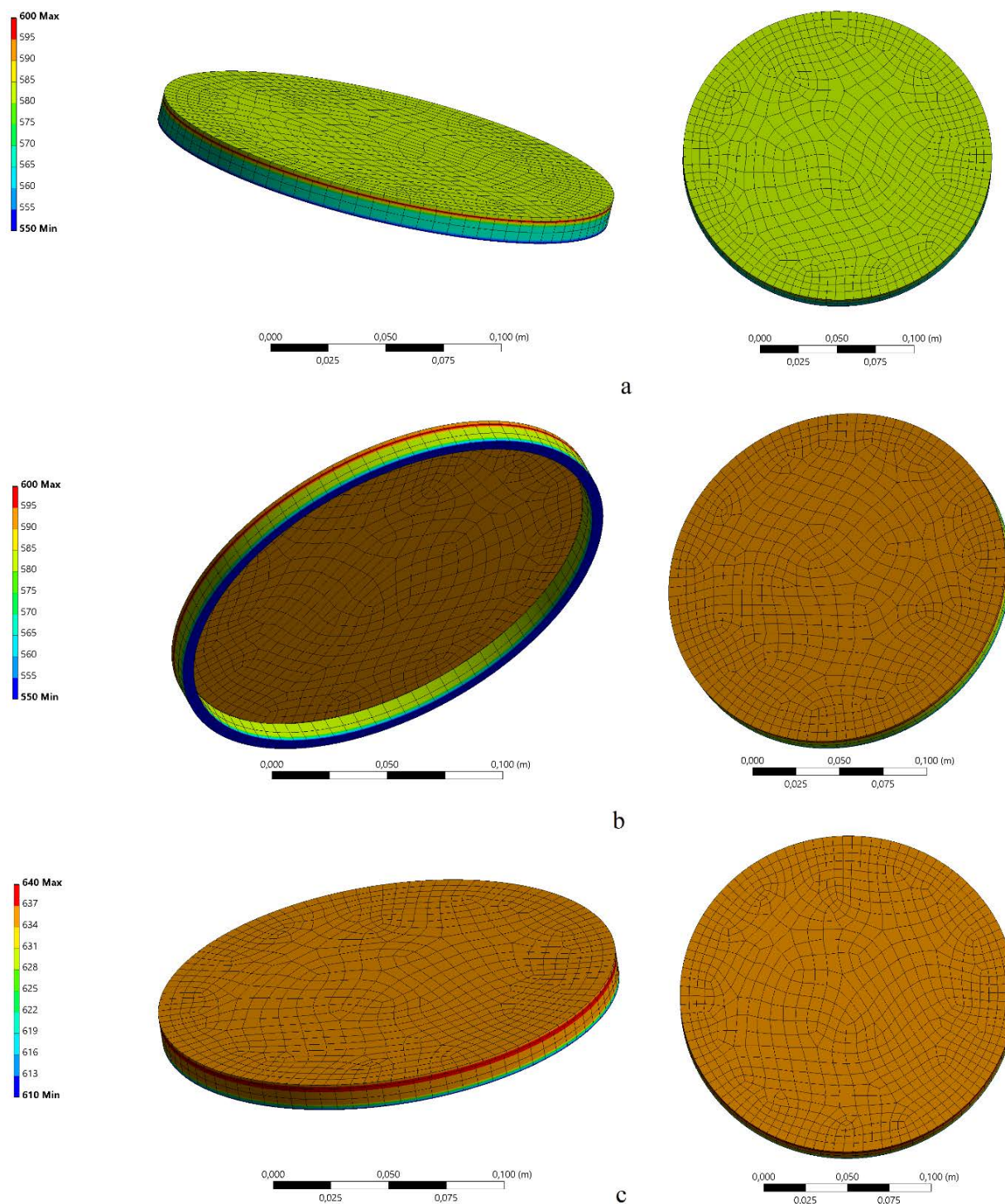


Рисунок 2.31 – Распределение температуры при нагреве алюминиевого сплава АМг6 и при задаваемой различной мощности, где а) энергия меньше требуемой; б) требуемая энергия; с) энергия больше требуемой

Увеличение энергии, Рисунки 2.25, 2.26, 2.28, 2.29, 2.30с и 2.31с относительно эффективного значения, Рисунки 2.20, 2.21, 2.30а и 2.31а, приводит чрезмерному нагреву зоны сварного шва и его излишнему заужению, а также к

возможному появлению корневых дефектов за счет увеличенной глубины прохождения электронного луча в зоне проплавления. Кроме того, происходит перегрев более тонкой составляющей части изделия – крышки.

В результате анализа полученных изображений в ходе имитационного моделирования, а также сопоставления их с результатами натурных экспериментов, можно сделать вывод о применимости разработанных методик и математической модели для практического использования в процессе отработки технологического процесса ЭЛС тонкостенных деталей в установившемся режиме.

Проведенное в рамках данного исследования имитационное моделирование для двух широко применяемых в аэрокосмической промышленности материалов: сплав титана BT14 и сплав алюминия АМг6, – показало работоспособность на разработанной математической модели для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали в процессе ЭЛС для тонкостенных деталей.

2.6 Разработка методики оптимизации технологических параметров сварки с применением адаптивного управления

Контекстная диаграмма по методологии IDEF0, показана процессная модель адаптивного управления ЭЛС (Рисунок 2.32).

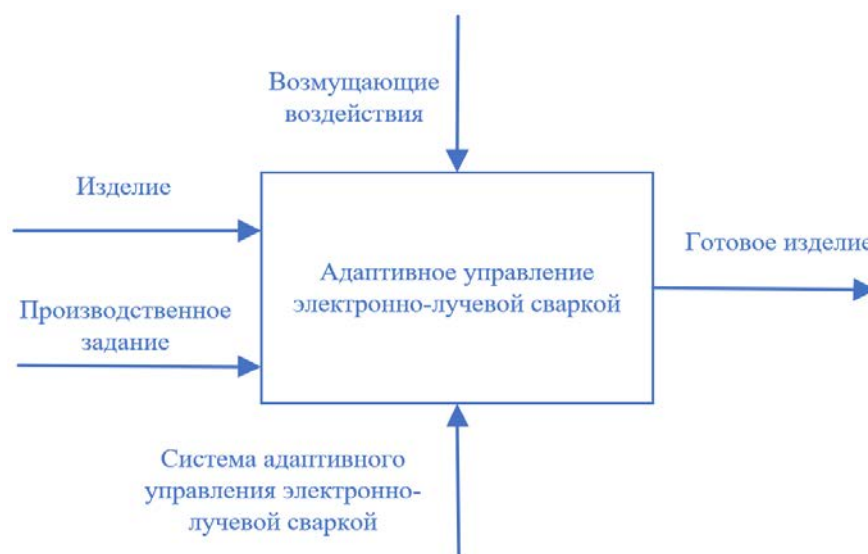


Рисунок 2.32 – Процессная модель адаптивного управления ЭЛС. Контекстная диаграмма по методологии IDEF0

Слева в блок адаптивного управления подаются входные параметры, для рассматриваемого процесса ЭЛС – изделие и производственное задание. Под изделием понимается его геометрические характеристики и тип шва, тогда как под производственным заданием понимается требуемые характеристики сварного шва и технологические параметры для текущего изделия и электронно-лучевого оборудования. Сверху входят внешние факторы – возмущающие воздействия, например, катодный узел. Снизу входят управляющие воздействия – система адаптивного управления ЭЛС. Выходным параметром является готовое изделие с требуемыми размерами сварного шва.

Диаграмма декомпозиции по методологии IDEF0 показывает процессную модель адаптивного управления ЭЛС (Рисунок 2.33).



Рисунок 2.33 – Процессная модель адаптивного управления ЭЛС. Диаграмма декомпозиции по методологии IDEF0

В данной диаграмме можно выделить два основных блока:

- оптимизация технологических параметров ЭЛС. Входными являются производственное задание, включающее в себя требуемые параметры сварного шва (глубина и ширина), технологические параметры процесса (ускоряющее напряжение, ток фокусировки, ток луча, скорость сварки, время) и изделие, то есть его геометрические размеры (длина, высота). Внешними факторами, которые

входят сверху является деградация катодного узла. Управляющими воздействиями, которые входят снизу является система адаптивного управления ЭЛС, которая состоит из двух систем, в частности системы поддержки принятия технологических решений (подсистема оптимизации технологических решений), описанной в предыдущей главе. Выходными параметрами являются уже оптимизированные значения скорости сварки и тока луча;

– управление ЭЛС. Входными параметрами являются скорость сварки и ток луча, непосредственно полученные из блока оптимизации, технологические параметры процесса (без скорости сварки и тока луча) и изделие. Сверху поступают возмущающие воздействия. Снизу входит вторая часть система адаптивного управления ЭЛС, а именно автоматизированная система управления процессом ЭЛС (подсистема управления ЭЛС). На выходе, применяя комплексный подход к оптимизации и управления ЭЛС, получается готовое изделие с требуемыми геометрическими характеристиками сварного шва.

Метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме, поясняется блок-схемой алгоритма управления ЭЛС (Рисунок 2.34).

Блок-схема алгоритма адаптивного управления ЭЛС в установившемся режиме, представлена на Рисунке 2.35.

Алгоритм основан на разработанной модели для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали в процессе ЭЛС. С целью достижения оптимального качества управления процессом ЭЛС в установившемся режиме при изменяющихся условиях работы (изменение мощности электронно-лучевой пушки), необходимо учитывать теплофизические, геометрические и технологические параметры детали.

На первом этапе производится ввод параметров изделия, его длина и высота. Далее вводятся теплофизические параметры материала, и выбирается сплав.

На следующем этапе осуществляется ввод характеристик производственного изделия (требуемая ширина и требуемая сварного шва).

Вводимые параметры изделия сохраняются базу данных и в дальнейшем используются для построения параметров адаптивного управления.

На этапе оптимизация скорости сварки и тока луча производится поиск оптимальных значений по формуле (2.6). Блок оптимизации включает в себя следующий алгоритм – на первом этапе вводятся теплофизические и геометрические параметры детали, на втором этапе осуществляется поиск энергии и времени интегрирования с применением критерия оптимальности (2.6), на заключительном этапе производится поиск требуемых технологических параметров (скорость сварки, ток луча, фокусное расстояние).

Далее осуществляется инициализация параметров процесса ЭЛС (с учетом оптимальных значений) то есть производится фиксация параметров в автоматизированной системе технологом.

На следующем этапе, а именно на этапе управления выполняются параллельные под процессы. После инициализации параметров ЭЛС осуществляется управление ЭЛС в установившемся режиме (формируется оптимальная траектория ввода и время ввода электронного луча, осуществляется поддержание скорости сварки, тока луча, тока фокусировки и тока накала) [153]-[164]. На этом же этапе осуществляется мониторинг процесса ЭЛС, который позволяет отслеживать технологические параметры и осуществляется их корректировка по средством адаптивного управления. Например, в случае напыления металла на катодный узел и снижения мощности электронно-лучевой пушки (при несвоевременной его чистке), система может увеличивать ток накала, либо уменьшать скорость сварки, для получения требуемого размера сварного шва.

После выводятся графики технологического процесса, например, зависимость температуры на поверхности изделия от длины и высоты изделия. В завершении, результаты технологического процесса сохраняются в базе данных.

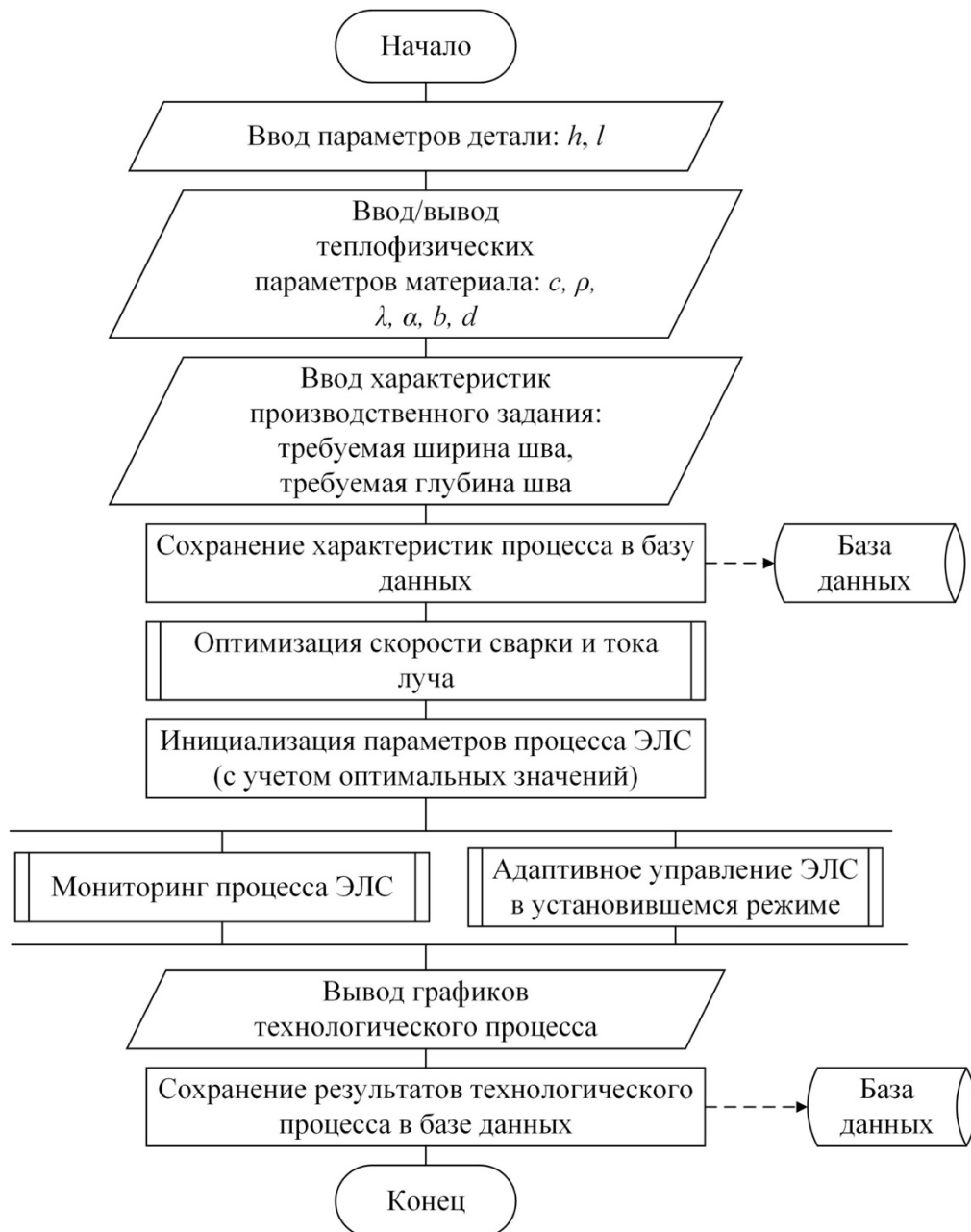


Рисунок 2.35 – Алгоритм управления процессом ЭЛС, где: h – высота изделия;

l – длина изделия; c – удельная теплоемкость материала;

λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность материала;

α – коэффициент теплового расширения; a – температуропроводность;

b – коэффициент теплопередачи; d – толщина изделия

После инициализации COM-порта и платы PCI-1710, необходимых для управления контроллером сервопривода задаются программные значения скорости сварки и тока луча посредством подачи уставки (Уставка $V_{св}$, Уставка $I_{л}$) на сервопривод и систему управления током луча соответственно. Далее система

производит мониторинг программного тока луча и требуемого тока (значение, обеспечивающее получения сварного шва с требуемыми размерами ширины и глубины). После запускаются два цикла. Первый цикл отслеживает время процесса сварки внутри которого работает второй цикл, посредством которого осуществляется управления скоростью сварки. При недостаточном энерговложении (уменьшении тока луча относительно требуемого значения), система уменьшает скорость сварки на величину дельта, определяемую как разница между заданным значением скорости и требуемым для сохранения необходимого значения энерговложения. Значения загружаются из базы данных, заранее подготовленных на этапе оптимизации.

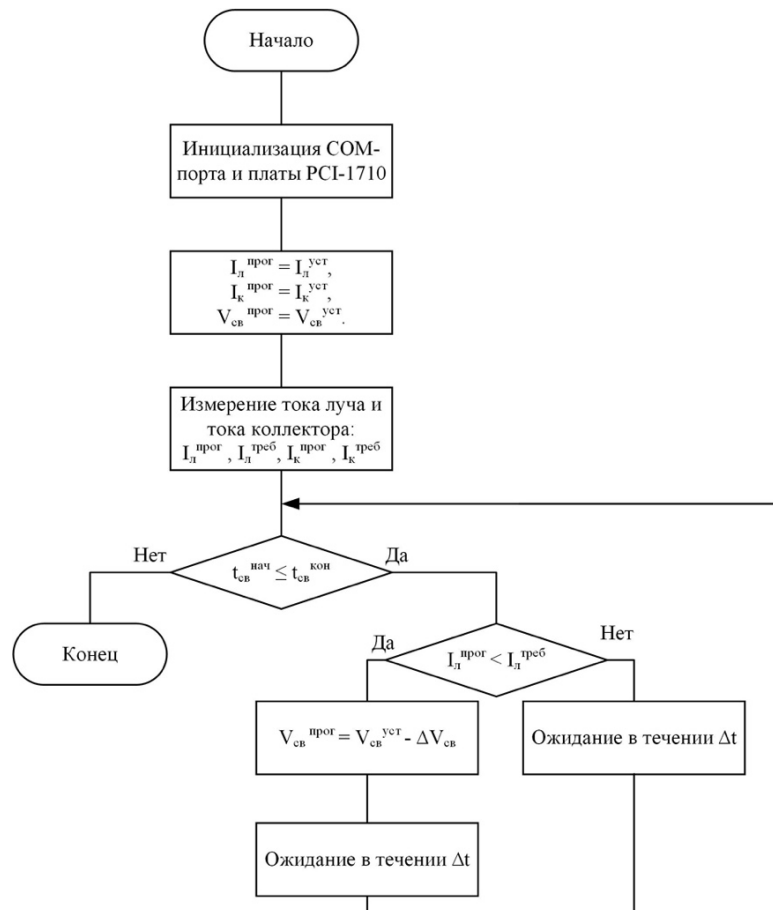


Рисунок 2.35 – Алгоритм адаптивного управления процессом ЭЛС в установившемся режиме

Применение разработанных методик позволит получать стыковые соединения заданных геометрических размеров, обеспечивающие получение

бездефектных соединений и снизить количество дефектов в зоне сварного соединения.

Выводы: В данной главе на основе теории сварочных процессов, а также применяя метод наложения была разработана математическая модель электронно-лучевой сварки для расчета распределения температуры в установившемся режиме в процессе ЭЛС для тонкостенных конструкций. На основе данной модели был предложен критерий оптимальности для нахождения требуемых технологических параметров процесса ЭЛС. В результате представлена блок-схема алгоритма поиска требуемых технологических параметров процесса сварки.

Была разработана методика для оценки глубины провара и ширины сварного шва при ЭЛС тонкостенных деталей в установившемся режиме позволяющая осуществлять оценку концентрации энергии в зоне сварного соединения учитывая геометрические размеры детали, технологические параметры сварки и теплофизические параметры.

С использованием системы моделирования MATLAB и пакета Simulink была реализована модель и методика для системы автоматизированного управления процессом ЭЛС. Также было показано применение разработанной модели для построения распределения температуры в виде ЗТВ и применение критерия оптимальности для поиска требуемых параметров процесса ЭЛС.

Результаты исследования показывают адекватность распределения энергии, разработанной математической модели, а также соотносятся с теплофизическими особенностями изучаемых материалов. Такая модель позволяет проводить исследования по оценке влияния технологических параметров процесса электронно-лучевой сварки на интенсивность нагрева зоны вблизи и также непосредственно в зоне сварного шва.

Для процесса ЭЛС был разработан метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме позволяющий стабилизировать подводимую энергию к зоне сварного соединения и снизить количество дефектов.

На практике применение предложенного в исследовании подхода позволит существенно снизить трудовые и материальные затраты на отработку технологического процесса ЭЛС тонкостенных деталей аэрокосмического назначения как при коррекции существующих процессов, так и при вводе в производство новых типоразмеров и материалов изделий.

3 Разработка макета автоматизированной системы управления ЭЛС

В процессе работы над диссертацией был разработан действующий макет АСУ ЭЛС (Рисунок 3.1).

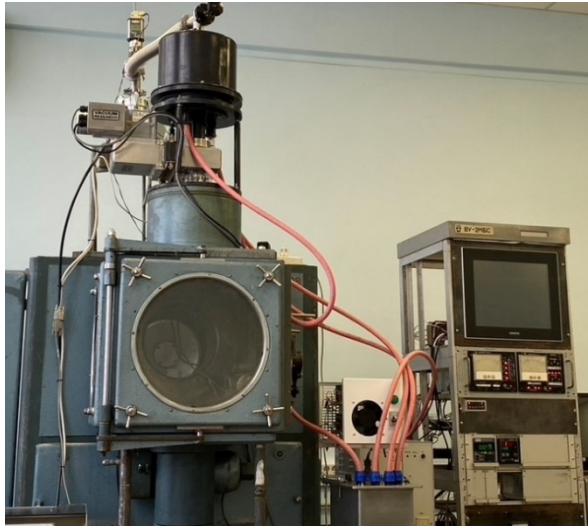


Рисунок 3.1 – Действующий макет АСУ ЭЛС

АСУ ЭЛС имеет в своем составе следующее оборудование:

- электронно-лучевую пушку;
- источник ускоряющего напряжения на 20 кВ;
- управляемый электрический привод высокоточного позиционирования для манипулятора;
- вакуумная камера с системой вакуумирования;
- турбомолекулярную откачную систему MT-Turbo 65D/0/8 KF40M MTM;
- система дифференциальной откачки воздуха;
- вакуумный затвор с электромагнитным приводом ISO63.

Основу стенда управления электронно-лучевой сваркой составляет промышленный компьютер АСР-4000МВ-00СЕW, с интерфейсной платой ввода/вывода информации PCI-1710 и 4 разъемами RS-232.

Была разработана структурная схема системы управления АСУ ЭЛС (Рисунок 3.2).

BR – энкодер; блок энкодера – расшифровывает сигналы; поступающие с энкодера;
GE – датчик положения для определения начала процесса сварки; $I_{\text{л}}$ – ток
электронного луча; $I_{\text{ф}}$ – ток фокусировки; $I_{\text{н}}$ – ток накала электронно-лучевой
пушки; $U_{\text{уск}}$ – ускоряющее напряжение; $V_{\text{св}}$ – скорость сварки

Основой АСУ ЭЛС является промышленный компьютер АСР-4000МВ-00СЕW, который содержит в своем составе промышленную плату сбора данных PCI-1710. От электронно-лучевой аппаратуры (ЭЛА) на масштабирующий усилитель поступают контролируемые параметры процесса электронно-лучевой сварки: ток электронного луча $I_{\text{л}}$, ток фокусировки $I_{\text{ф}}$, ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}}$, ток накала пушки $I_{\text{н}}$. Управление скоростью сварки осуществляется через контроллер сервопривода (уставка $V_{\text{св}}$). Управление фокусировкой осуществляется через блок фокусировки (уставка $I_{\text{ф}}$). Масштабирующий усилитель нормирует данные параметры и передает их на аналоговые входа платы PCI-1710 промышленного компьютера. Промышленный компьютер проводит обработку данных в соответствии с алгоритмами и выдает сигналы управления [165]-[169].

3.1 Проектирование программной системы АСУ ЭЛС

В качестве средств реализации программы были выбраны:

- система программирования Embarcadero RAD Studio;
- система управления базами данных MySQL.

Связующим звеном программных компонентов прототипа выступает база данных, позволяющая хранить и обрабатывать результаты математического и имитационного моделирования, набор готовых технологических решений, а также информацию о свариваемых деталях, параметрах техпроцесса и результатах сварки. Данная программная система предоставляет пользователю возможность: протоколировать технологический процесс сварки, выбирать готовые технологические решения, осуществлять моделирование процесса ЭЛС по заданным технологическим параметрам и находить технологические параметры для новых деталей. Применение предложенного программной системы позволяет минимизировать затраты предприятия на отработку технологического процесса ЭЛС, а также создать информационную базу по проведенным сваркам изделий и готовым технологическим решениям процесса ЭЛС.

Структурная схема программной системы состоит из 6 модулей [170]-[173] (Рисунок 3.3).

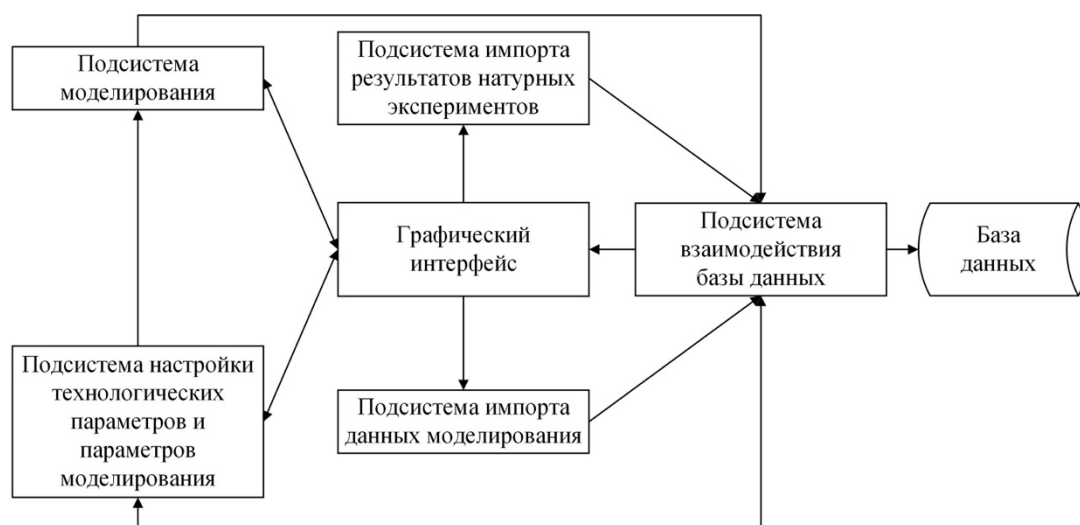


Рисунок 3.3 – Структурная схема программной системы АСУ ЭЛС

Программная система состоит из 6 модулей, осуществляющих следующие функции:

- модуль математического моделирования реализует математическую модель процесса ЭЛС;
- модуль импорта данных натурных экспериментов позволяет загружать данные проведенных экспериментов при отработке технологического процесса на установке ЭЛС;
- модуль конфигурации технологических и модельных параметров осуществляет ввод технологических и теплофизических параметров для моделирования;
- графический интерфейс является главным окном программы;
- модуль импорта данных моделирования позволяет загружать данные и графики полученные в процессе моделирования;
- модуль взаимодействия с базой данных осуществляет взаимодействие между графическим интерфейсом и базой данных;
- база данных, хранящая информацию по настройкам технологического процесса, значения теплофизических параметров свариваемых материалов, а также результаты моделирования.

Блок-схема работы программной системы, показана на Рисунке 3.4.

На первом этапе проверяется, существует текущий эксперимент в базе данных или нет.

Если данный эксперимент является новым, то вводятся параметры моделирования и технологические параметры эксперимента, после введенные значения сохраняются в базу данных. Если такой эксперимент существует, то программа проверяет, какие параметры эксперимента используются.

В случае, если используются новые параметры, то пользователем вводятся технологические параметры эксперимента и значения сохраняются в базе данных. В противном случае эксперимент загружается из базы данных.

Далее поэтапно проверяется информация о каждом из типов эксперимента (математическое моделирование, а натурный эксперимент, имитационное моделирование).

В случае отсутствия информации может происходить одно из двух событий:

- проводится математическое моделирование на основе критерия оптимальности (2.6);
- производится импорт результатов натурального эксперимента или результатов имитационного моделирования.

На последнем этапе полученные и загруженные данные сохраняются в базу данных и отображаются на главной форме программы.

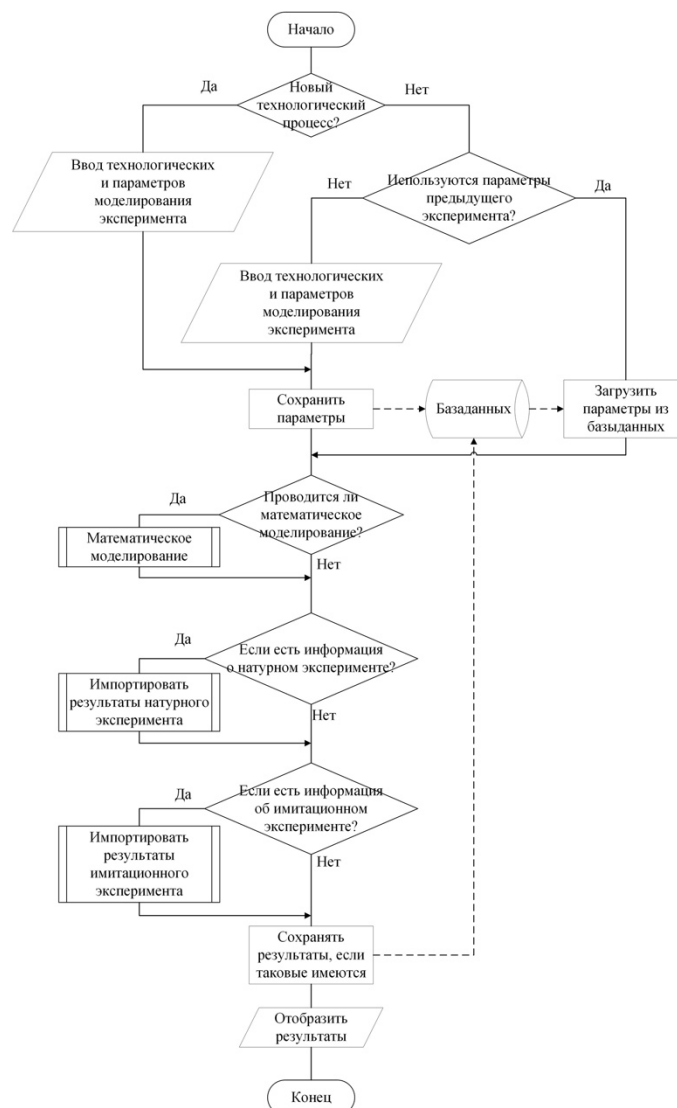


Рисунок 3.4 – Блок-схема работы программной системы АСУ ЭЛС

Алгоритм математического моделирования, представлен на Рисунке 3.5.

На начальном этапе алгоритма производится инициализация технологических параметров (U, I, v) затем вводятся параметры математической модели: $x_{\min}, x_{\max}, x_{\text{step}}, y_{\min}, y_{\max}, y_{\text{step}}, z_{\min}, z_{\max}, z_{\text{step}}, t_{\min}, t_{\max}, t_{\text{step}}$. Далее координатам и времени присваиваются минимальные значения ($x=x_{\min}; y=y_{\min}; z=z_{\min}; t=t_{\min}$). На следующем этапе проводится математическое моделирование в точке (x, y, z) при времени t . Данный этап включает в себя вычисление температурного поля по формуле (2.6) в зависимости от геометрических размеров изделия.

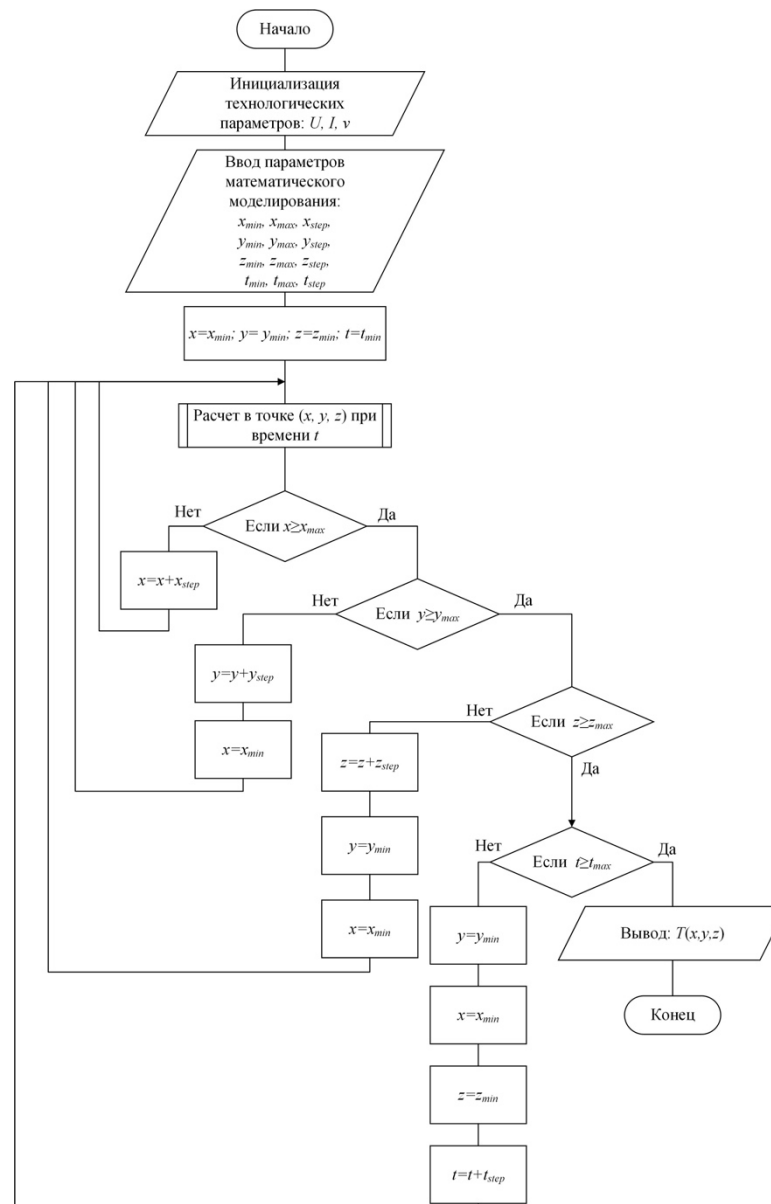


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритма математического моделирования ЭЛС

В процессе вычисления, для задания и движения по координатной сетке поэтапно проверяется значение каждой координаты (x , y , z) и времени (t). Таким образом, если x меньше максимально заданного значения, то к текущему значению прибавляется шаг (x_{step}) и переходит на этап математического моделирования. Если x оказывается больше либо равен максимуму (x_{max}), то сравнивается значение по y . В случае, если y меньше максимально заданного значения, то к текущему значению прибавляется шаг (y_{step}) и координате x присваивается минимум ($x=x_{\text{min}}$) и переходит на этап математического моделирования. Иначе сравнивается текущее значение по z с максимальным (z_{max}). Если z меньше максимально заданного значения, то к текущему значению прибавляется шаг (z_{step}) и координатам x и y присваивается минимум и переходит на этап математического моделирования.

На заключительном этапе ($z \geq z_{\text{max}}$) производится сравнение текущего значения времени с максимальным (t_{max}). Если условие выполняется, то выводятся значения температуры ($T_{\text{комп}}(x,y,z)$). Однако, если $t < t_{\text{max}}$, то каждой координате присваивается минимальное значение ($y=y_{\text{min}}$, $x=x_{\text{min}}$, $z=z_{\text{min}}$), а время увеличивается на заданный шаг t_{step} .

Алгоритм поиска требуемых технологических параметров сварки, представлен на Рисунке 3.6.

Поиск технологических параметров электронно-лучевой сварки начинается с инициализации данных. Определяется мощность источников, свойства материалов, скорость сварки и время сварки. Большинство данных берется из базы данных, где хранятся параметры материалов и технологического процесса ЭЛС. По формуле (2.6) производится расчет температурного поля изделия. Данный процесс итерационный, так как в процессе расчетов уточняется время сварки и скорость сварки.

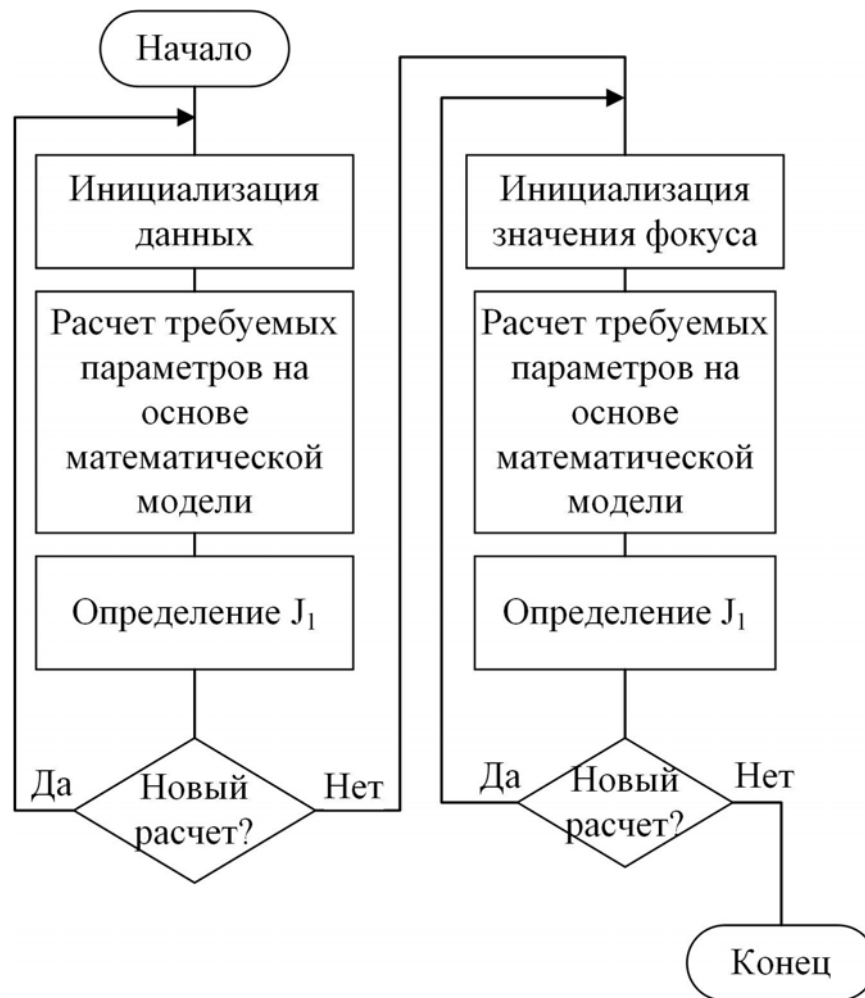


Рисунок 3.6 – Алгоритм определения требуемых технологических параметров сварки

Критерий оптимальности J_1 , рассчитываемый по формуле (2.6), служит для определения оптимальности полученных параметров. Минимальное значение J_1 служит маркером того, что выбранные параметры сварочного процесса являются оптимальными. Поэтому для выбранного изделия (материал, толщина изделия) вычисления могут проводиться множество раз, при различных параметрах процесса сварки (мощность, скорость сварки).

Вторая часть алгоритма служит для определения оптимального фокуса электронно-лучевой сварки. В данном случае производится повторный расчет требуемых параметров на основе математической модели для различного положения фокуса (от расположенного над поверхностью детали до корня шва).

Программная система АСУ ЭЛС представляет собой Windows-приложения, работа которых возможна в среде операционных систем Windows 7/8/10. Программа состоит из двух модулей – модуль ПО технолога и модуль ПО моделирования. Данные компоненты могут функционировать отдельно друг от друга и запускаться в зависимости от задач, стоящих перед технологами и учеными. Структурная схема программы АСУ ЭЛС, показана на Рисунке 3.8.

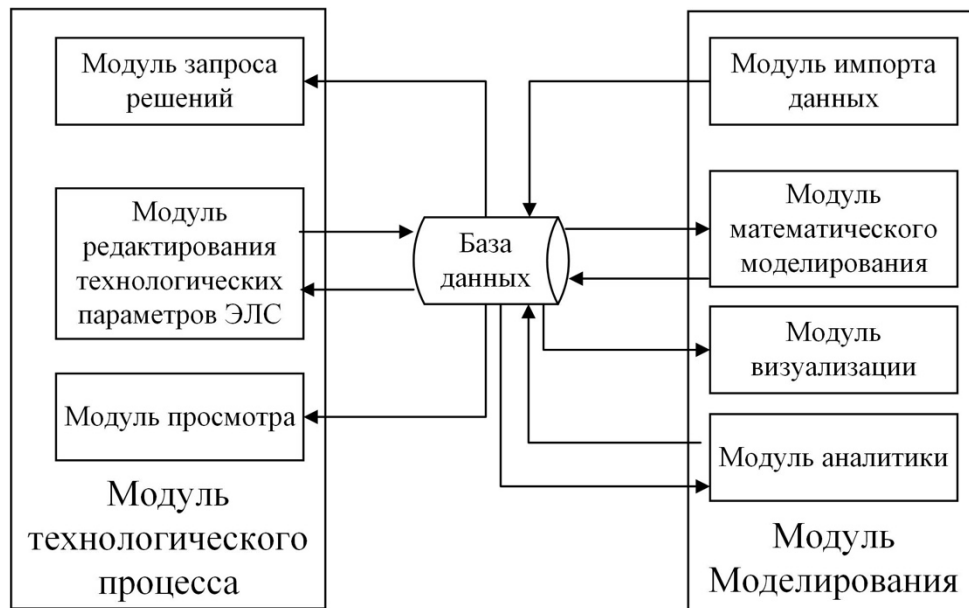


Рисунок 3.7 – Структурная схема программной системы АСУ ЭЛС

Модуль технологического процесса состоит из трех модулей:

- модуль редактирования технологических параметров ЭЛС осуществляет ввод и редактирование параметров процесса ЭЛС;
- модуль запроса решений осуществляет выборку из базы данных технологических решений для проведения процесса ЭЛС и достижения требуемых параметров шва;
- модуль просмотра данных осуществляет вывод графиков значений параметров проведенных сварочных процессов, содержащихся в базе данных.

Модуль моделирования состоит из четырех модулей, обеспечивающих следующие функции:

- модуль математического моделирования реализует процесс электронно-лучевой сварки;
- модуль импорта данных имитационного моделирования осуществляет ввод данных и графиков моделирования, осуществленных в сторонних программных продуктах имитационного моделирования;
- модуль визуализации осуществляет графическое построение результатов математического моделирования процесса ЭЛС;
- модуль аналитики обрабатывает данные математического моделирования и осуществляет выработку технологических решений для процесса электронно-лучевой сварки.

Блок-схема работы программной системы АСУ ЭЛС, показана на Рисунке 3.8.

Работой с модулем технологического процесса занимается технолог. Технолог вводит или редактирует данные свариваемого изделия, а затем переходит к вводу параметров технологического процесса: ток электронного луча, ускоряющее напряжение, ток фокуса, скорость сварки. Параметры можно вводить вручную или использовать уже готовые техпроцессы, используемые ранее. Прототип системы также позволяет просмотреть рекомендуемые решения и выбрать подходящее для сварки изделия параметры. Если их нет, производится моделирование технологического процесса, и на основании полученных результатов моделирования осуществляется выработка технологических решений для процесса ЭЛС.

Модуль моделирования процесса ЭЛС отвечает за этап математического моделирования и визуализации полученных результатов в виде графиков технологического процесса, например, зависимость температуры на поверхности изделия от длины и высоты изделия.

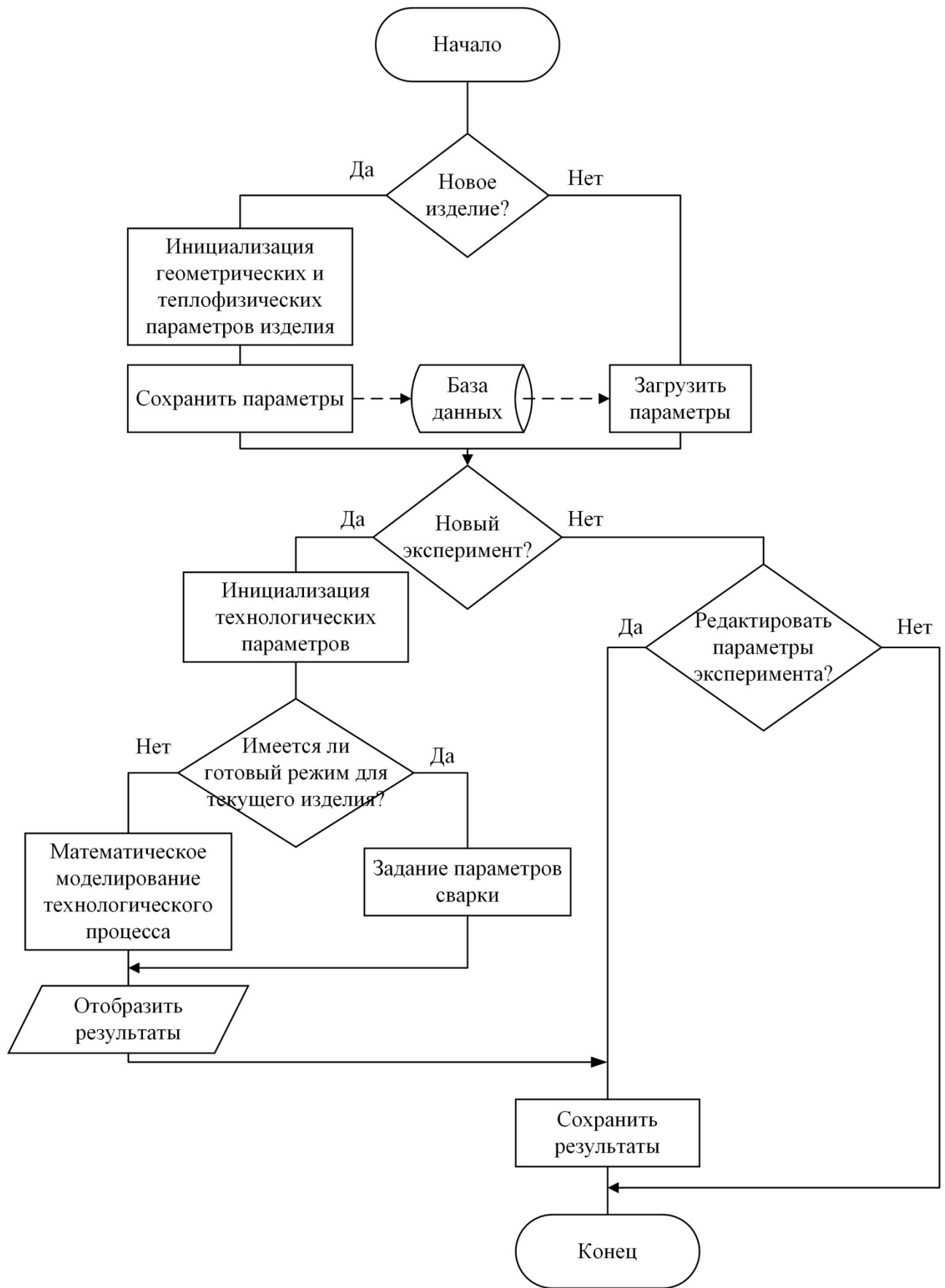


Рисунок 3.8 – Блок-схема работы программной системы АСУ ЭЛС

3.2 Описание работы программной системы АСУ ЭЛС

Главное окно программы АСУ ЭЛС (Рисунок 3.9). С помощью данного окна можно планировать процесс сварки, производить процесс сварки, выполнять моделирования процесса ЭЛС (осуществлять поиск технологических параметров) и обрабатывать полученные результаты полученные.

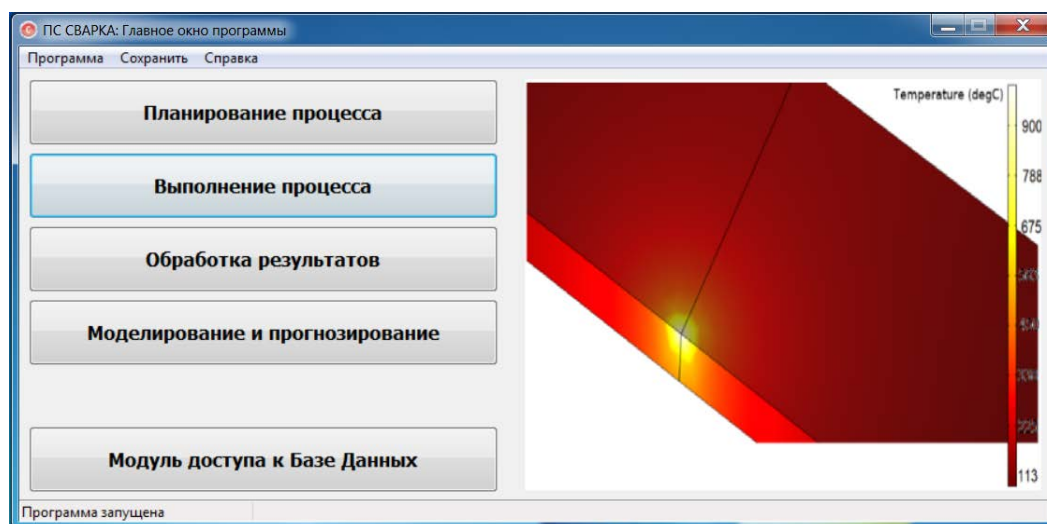


Рисунок 3.9 – Главное окно программной системы АСУ ЭЛС

Для корректировки настроек подключения к базе данных необходимо:

- запустить главное окно ПС СВАРКА. В окне необходимо нажать на кнопку «Модуль доступа к Базе данных». Отобразится окно «Модуль доступа к базе данных», вкладка «Подключение к БД», в котором имеется четыре поля ввода информации:

- 1) «Имя/Адрес сервера»;
- 2) «Имя пользователя»;
- 3) «Пароль»;
- 4) «Название базы данных»;

Также доступны три кнопки:

- «Подключиться» - производит подключение к базе данных ПС СВАРКА;
- «Отключиться» - отключает программное приложение от базы данных;

- «Получить список таблиц БД».
- далее необходимо ввести информацию в поля ввода «Имя/Адрес сервера», «Имя пользователя», «Пароль», «Название базы данных» и нажать кнопку «Подключиться». В правой части окна отобразится сообщение об успешном подключении к базе данных;
- при нажатии на кнопку «Получить список таблиц БД» в информационном поле справа отобразится список названий таблиц базы данных, к которой произведено подключение (Рисунок 3.10).

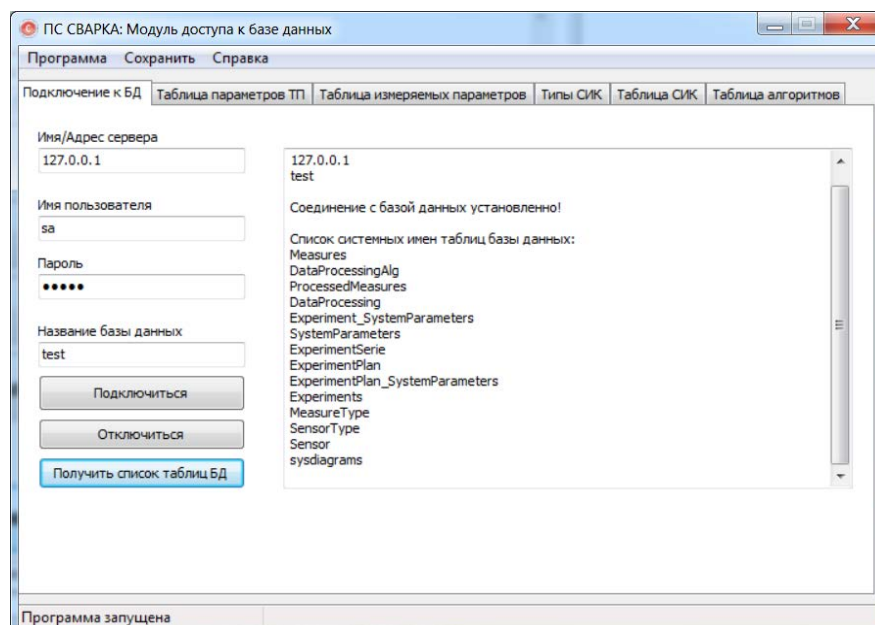


Рисунок 3.10 – Окно «Модуль доступа к базе данных» (вкладка «Подключение к БД»)

Модуль планирования технологического процесса предназначен для генерации планов выполнения технологических процессов на установке электронно-лучевой сварки. Реализует функции по расчету значений варьируемых параметров в соответствии с заданными пользователем ограничениями и шагом дискретизации.

Для формирования плана технологического процесса необходимо:

- запустить главное окно ПС СВАРКА. В окне необходимо нажать на кнопку «Планирование технологического процесса». Отобразится окно «ПС

СВАРКА: Модуль планирования технологического процесса», вкладка «Создание/выбор плана технологического процесса», показанный на рисунке 7 с незаполненными таблицами «Создание нового плана технологического процесса» и «Выбор плана технологического процесса из базы данных», а также кнопками:

- 1) «Инициализировать новый план технологического процесса»;
- 2) «Показать планы из базы данных»;
- 3) «Выбрать отмеченный план из базы данных и продолжить с ним»;

– в поле «Описание плана технологического процесса» таблицы «Создание нового плана технологического процесса» необходимо ввести описание плана технологического процесса. В поле «Тип технологического процесса (1-4)» таблицы «Создание нового плана технологического процесса» необходимо ввести номер (от 1 до 4) типа проводимой серии технологического процесса;

– далее требуется нажать кнопку «Инициализировать новый план технологического процесса» и перейти во вкладку «Выбор варьируемых параметров» (Рисунок 3.11);

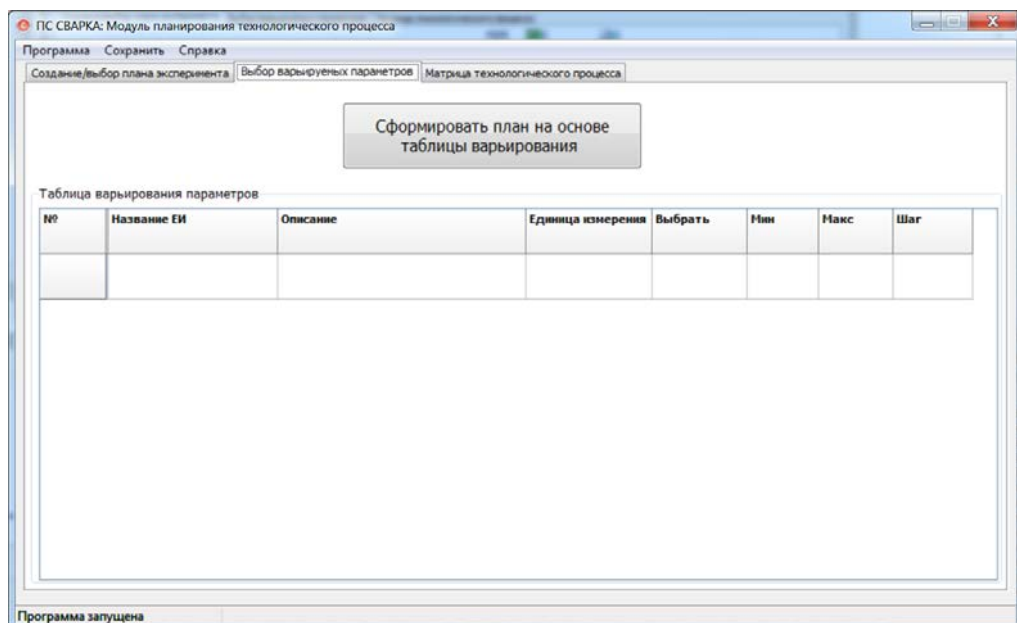


Рисунок 3.11 – Окно «ПС СВАРКА: Модуль планирования технологического процесса», вкладка «Выбор варьируемых параметров»

Отобразится вкладка «Выбор варьируемых параметров» с незаполненной

таблицей значений параметров технологического процесса и двумя кнопками:

- «Загрузить из базы данных»;
- «Сформировать план»;
- необходимо нажать на кнопку «Загрузить из базы данных».

В таблице значений параметров технологического процесса отобразятся загруженная из базы данных информация по параметрам системы: названия параметров, единицы измерения. Также в таблице появится отметка выбора параметра для планирования технологического процесса (Рисунок 3.12).

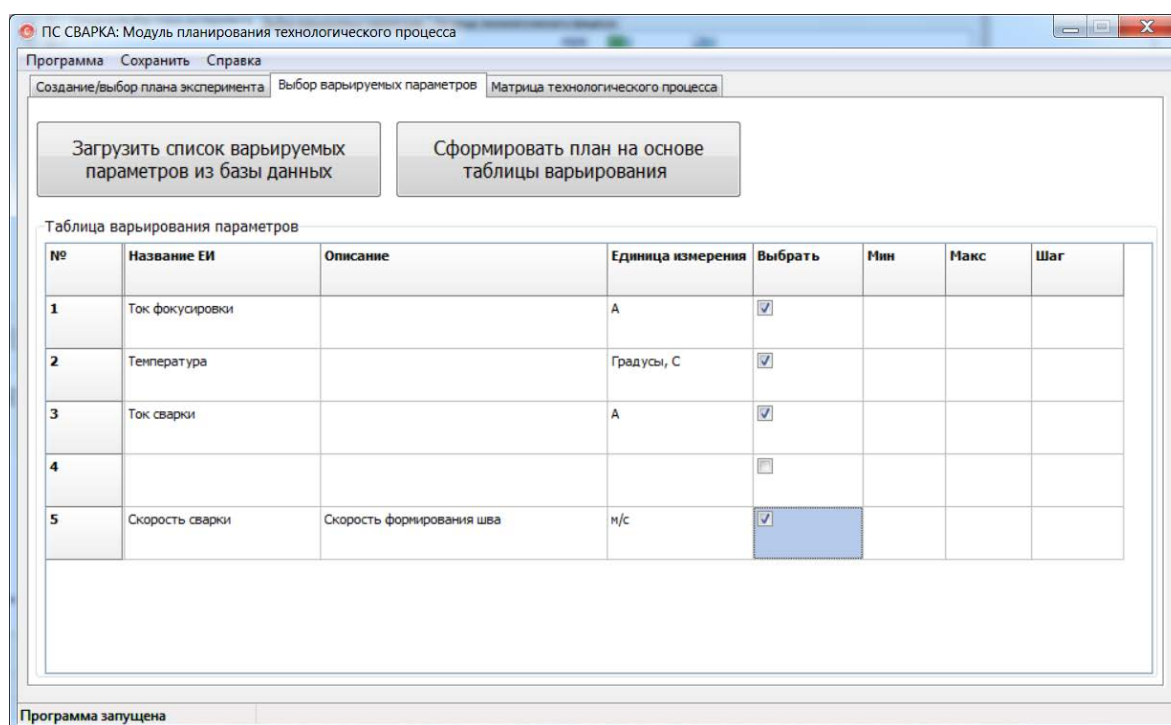


Рисунок 3.12 – Окно «ПС СВАРКА: Модуль планирования технологического процесса», вкладка «Выбор варьируемых параметров»

– далее необходимо выбрать требуемые для планирования параметры, отметив «галочки» в соответствующих строках таблицы значений параметров технологического процесса, а также указать минимальные, максимальные значения для выбранных параметров и шаг дискретизации;

- далее необходимо нажать кнопку «Сформировать план».

Отобразится вкладка «Матрица планирования технологического процесса»

с заполненной таблицей параметров. Также появятся кнопки «Показать матрицу технологического процесса для текущего плана» и «Запомнить выбор и перейти в модуль выполнения технологического процесса».

Для формирования плана технологического процесса необходимо:

– запустить главное окно ПС СВАРКА (Рисунок 3.13). В окне необходимо нажать на кнопку «Планирование технологического процесса». Отобразится окно «ПС СВАРКА: Модуль планирования технологического процесса», вкладка «Создание/выбор плана технологического процесса» с незаполненными таблицами «Создание нового плана технологического процесса» и «Выбор плана технологического процесса из базы данных», а также кнопками:

- 1) «Инициализировать новый план технологического процесса»;
- 2) «Показать планы из базы данных»;
- 3) «Выбрать отмеченный план из базы данных и продолжить с ним».

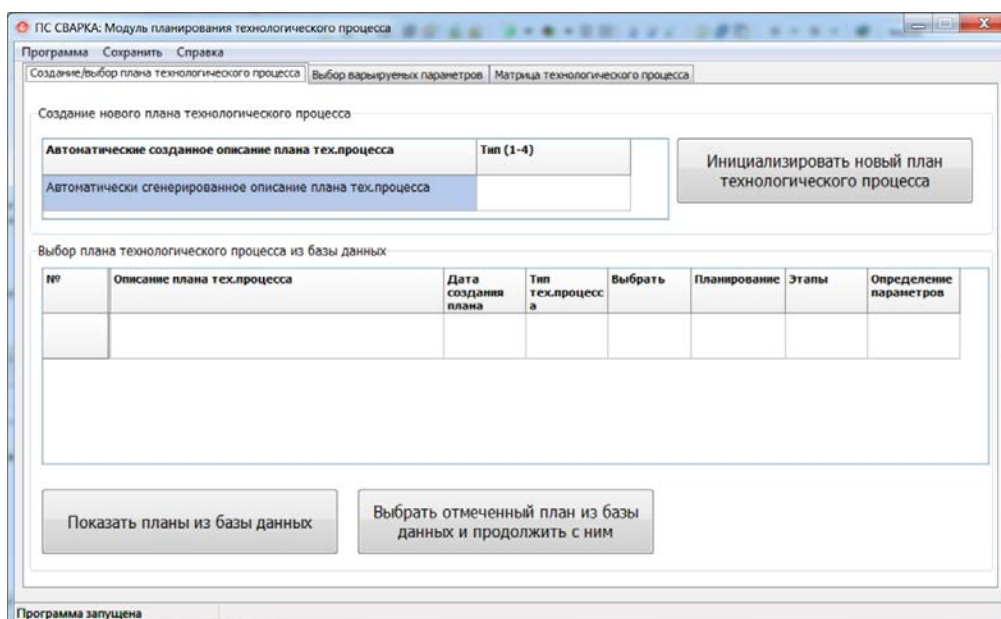


Рисунок 3.13 – Окно «ПС СВАРКА: Модуль планирования технологического процесса», вкладка «Создание/выбор плана технологического процесса»

– необходимо нажать кнопку «Показать планы из базы данных». В таблице «Выбор плана технологического процесса из базы данных» отобразятся все имеющиеся планы (Рисунок 3.14);

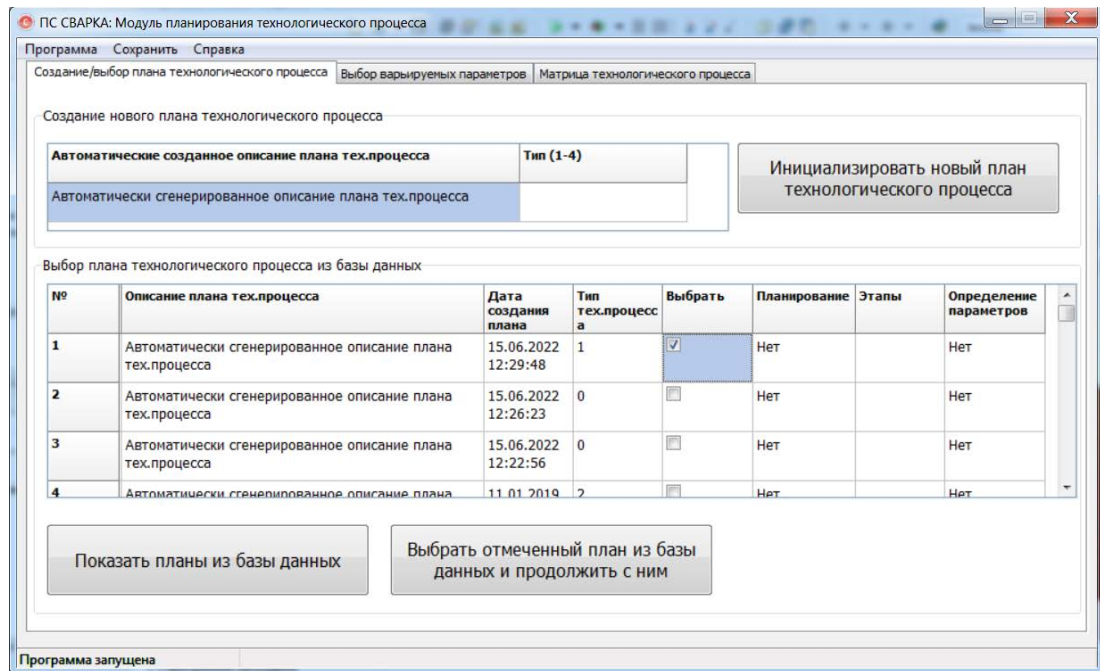


Рисунок 3.14 – Окно «ПС СВАРКА: Модуль планирования технологического процесса», вкладка «Создание/выбор плана технологического процесса»

– далее необходимо выбрать требуемый план технологического процесса, отметив «галочку» в соответствующей строке таблицы, и нажать на кнопку «Выбрать отмеченный план из базы данных и продолжить с ним». Отобразится вкладка «Матрица планирования технологического процесса» с заполненной таблицей технологического процесса.

Для проведения технологического процесса необходимо запустить из главного окна «Проведение технологического процесса»

Разработанная АСУ ЭЛС позволяет производить процесс сварки тонкостенных деталей, обеспечить повторяемость технологического процесса за счет мониторинга процесса сварки и выбора оптимальных параметров технологического процесса.

Программная система АСУ ЭЛС позволяет (Рисунок 3.15):

- осуществлять мониторинг технологических параметров сварки;
- строить графики зависимости параметра от времени;

- вести журнал технологического процесса, то есть сохранять в базу данных параметры в процессе сварки;
- задавать технологических параметры сварки.

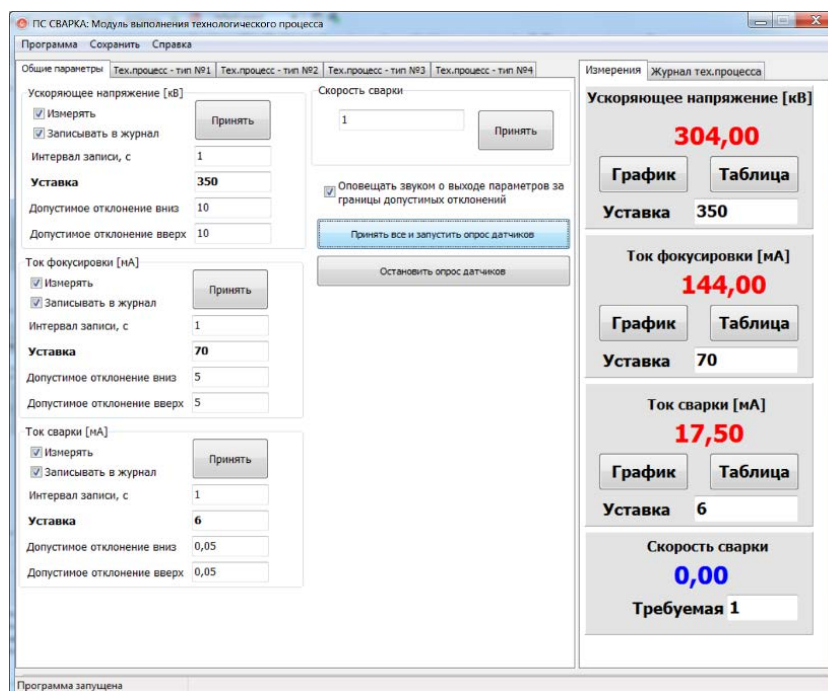


Рисунок 3.15 – Главное окно программной системы АСУ ЭЛС

Для заполнения протокола проведенного технологического процесса необходимо:

- нажать кнопку «Заполнить протокол по результатам выполненного тех. процесса». Отобразится окно «Протокол испытаний» (Рисунок 3.16), содержащее незаполненную таблицу значений параметров технологического процесса.

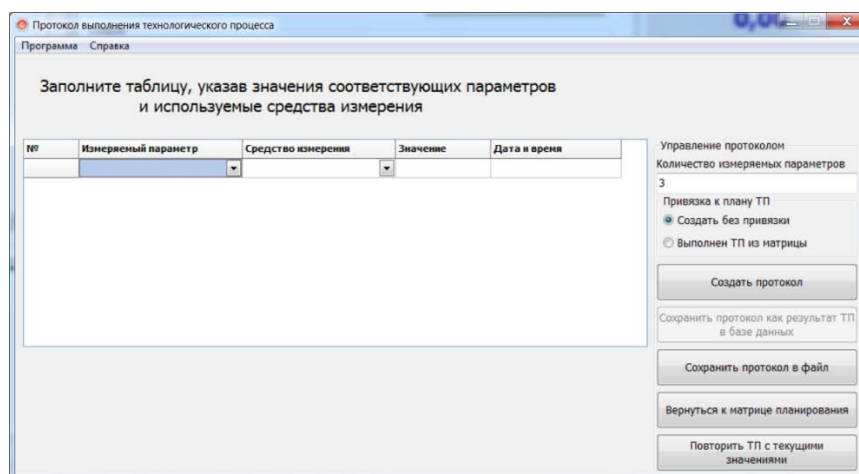


Рисунок 3.16 – Окно «Протокол испытаний»

В окне доступен ввод количества измеряемых параметров. Доступны кнопки:

- «Создать протокол»;
- «Сохранить протокол в базе данных»;
- «Сохранить протокол в файл»;
- «Вернуться к матрице планирования»;
- «Повторить ТП с текущими значениями».

необходимо указать количество измеряемых параметров в соответствующем поле ввода и нажать кнопку «Создать протокол». В таблице значений параметров технологического процесса добавится указанное количество строк для ввода значений (Рисунок 3.17);

Протокол выполнения технологического процесса

Программа Справка

Заполните таблицу, указав значения соответствующих параметров и используемые средства измерения

№	Измеряемый параметр	Средство измерения	Значение	Дата и время
1	Параметр №1			
2	Параметр №1	ИВМВЫ		
3	Параметр №1			

Управление протоколом

Количество измеряемых параметров
3

Привязка к плану ТП

☒ Создать без привязки

☐ Выполнен ТП из матрицы

Создать протокол

Сохранить протокол как результат ТП в базе данных

Сохранить протокол в файл

Вернуться к матрице планирования

Повторить ТП с текущими значениями

Рисунок 3.17 – Окно «Протокол испытаний»

– в столбцах «Измеряемый параметр» и «Средство измерения» таблицы значений параметров технологического процесса из выпадающего списка необходимо выбрать требуемые значения, а также ввести значения измеренных параметров в соответствующих строках. В столбце «Дата и время» таблицы значений параметров технологического процесса будет отображено текущее системное время – время выполнения измерения;

– далее необходимо и/или:

1) нажать кнопку «Сохранить протокол как результат опыта в базе данных». В базе данных будет сохранена параметрическая информация в соответствии с выполняемым на испытательном стенде планом технологического процесса;

2) нажать кнопку «Сохранить протокол в файл». Параметрическая информация в соответствии с выполняемым на испытательном стенде планом технологического процесса будет сохранена в файл.

Модуль моделирования и прогнозирования реализует параметрические и непараметрические алгоритмы аппроксимации.

Для моделирования необходимо:

– запустить главное окно ПС СВАРКА. В окне необходимо нажать на кнопку «Моделирование и прогнозирование». Отобразится окно «ПС СВАРКА: Модуль моделирования и прогнозирования», вкладка «Выбор технологического процесса для выгрузки данных и построения модели» (Рисунок 3.18).

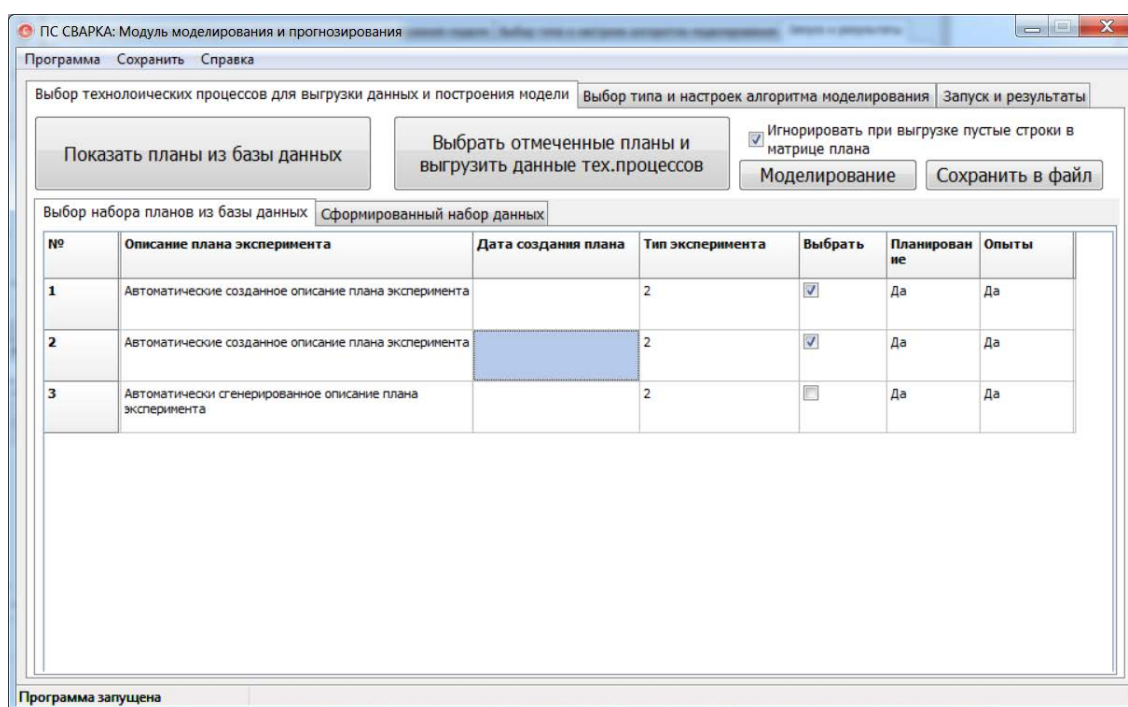


Рисунок 3.18 – Окно «ПС СВАРКА: Модуль моделирования и прогнозирования», вкладка «Выбор совокупности технологического процесса для выгрузки данных и построения модели»

В окне представлена таблица с информацией о загруженных из базы данных планах технологического процесса, а также две кнопки:

- «Показать планы из базы данных»;
- «Выбрать отмеченные планы выгрузить данные технологического процесса».

Также имеется возможность использовать функцию «Игнорировать при выгрузке пустые строки в матрице технологического процесса» установив соответствующий «флажок». Необходимо отметить «галочкой» в таблице строки, соответствующие тем планам технологического процесса, результаты которых требуется обработать. После этого необходимо нажать кнопку «Выбрать отмеченные планы выгрузить данные технологического процесса».

Будет показана вкладка «Выбор типа и настроек алгоритма моделирования» (Рисунок 3.19).

На панели общих настроек представлены три поля ввода:

- «Количество прогонов алгоритма»;
- «Количество точек поиска на каждом шаге»;
- «Значение ошибки для остановки алгоритма, %».

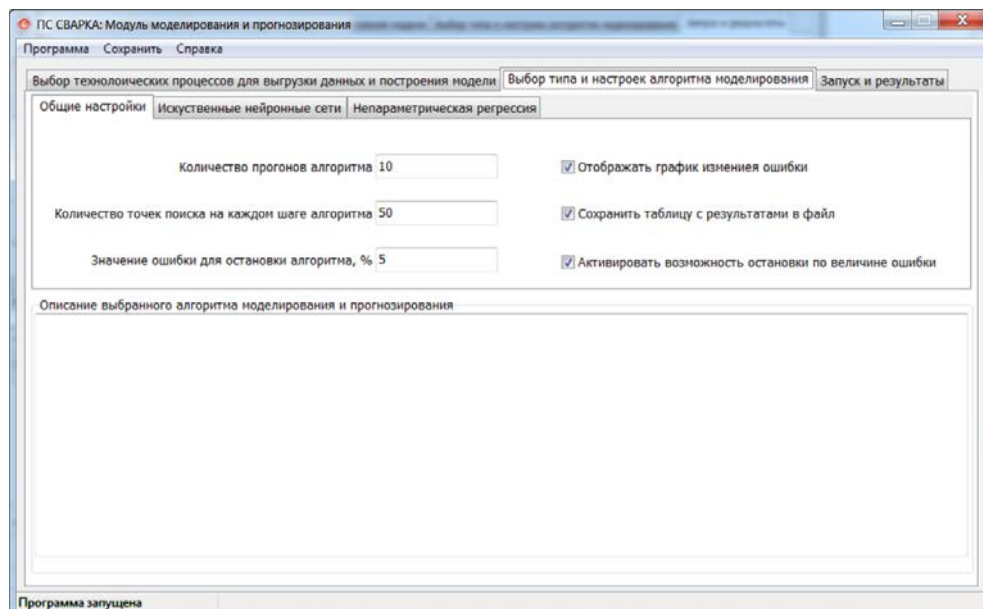


Рисунок 3.19 – Окно «ПС СВАРКА: Модуль моделирования и прогнозирования», вкладка «Выбор типа и настроек алгоритма моделирования»

Также имеется возможность воспользоваться дополнительными функциями в процессе моделирования, установив соответствующие «флажки»:

- «Отображать график изменения ошибки»;
- «Сохранить таблицу с результатами в файл»;
- «Активировать возможность остановки по величине ошибки»;
- Необходимо выбрать вкладку необходимого алгоритма моделирования

из возможных:

- 1) «Искусственные нейронные сети»;
- 2) «Непараметрическая регрессия»;
- 3) «Восстановление символьной зависимости».

В соответствующем окне указать настройки алгоритма и нажать кнопку «Подтвердить». Откроется вкладка «Запуск и результаты» (Рисунок 3.20).

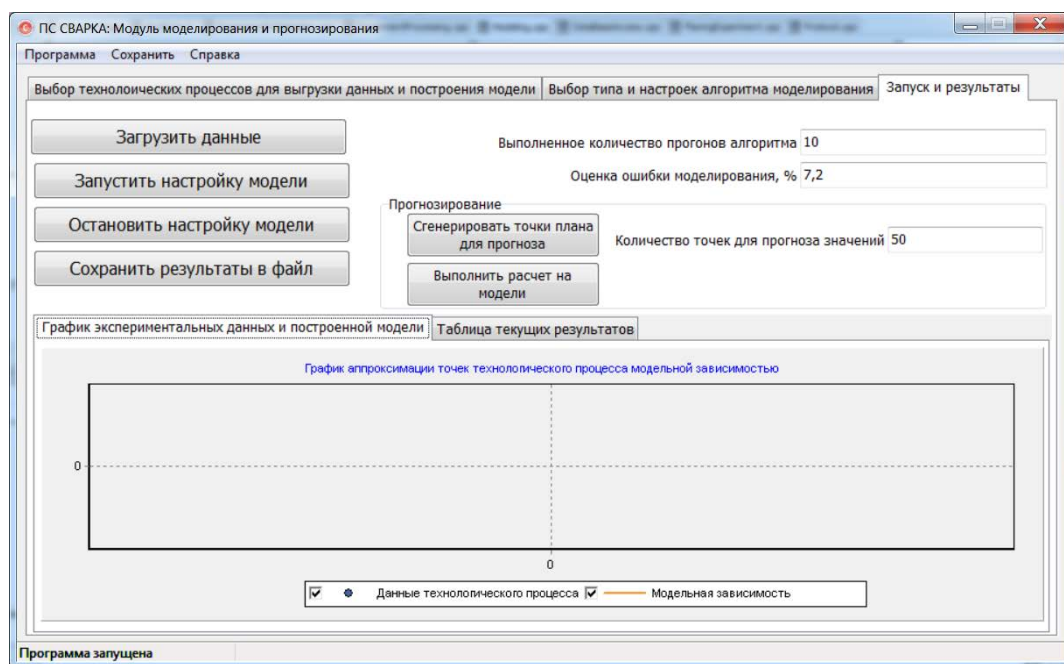


Рисунок 3.20 – Окно «ПС СВАРКА: Модуль моделирования и прогнозирования», вкладка «Запуск и результаты»

В окне имеется три кнопки, предназначенные для моделирования:

- «Запустить настройку модели»;
- «Остановить настройку модели»;
- «Сохранить результаты в файл».

В правой части окна представляется информация о выполненном количестве прогонов алгоритма, а также о средней ошибке моделирования (в процентах).

В нижней части окна производится вывод информации по моделированию в графическом и табличном виде (при выборе соответствующей вкладки).

– Необходимо нажать кнопку «Запустить настройку модели».

В соответствующих полях вывода будет представлена информация о выполненном количестве прогонов алгоритма и средней ошибке моделирования.

Будет выведен график аппроксимации. Далее необходимо нажать кнопку «Сохранить результаты в файл». Будет открыт диалог сохранения в файл.

Разработанная программная система АСУ ЭЛУ основана на предлагаемых в данной работе математической модели (2.4) и критерия оптимальности (2.6), методике для оценки глубины провара и ширины сечения сварного шва и метода адаптивного управления скоростью сварки и током луча. Учитывает как теплофизические параметры материала, так и геометрические размеры изделия и позволяет производить процесс сварки тонкостенных деталей, обеспечить повторяемость технологического процесса за счет мониторинга процесса сварки и выбора оптимальных параметров технологического процесса.

3.3 Верификация предложенного подхода посредством натурных экспериментов

Для апробации предлагаемых режимов сварки была проведена сварка образцов-имитаторов из титанового сплава ВТ14.

Образцом-имитатором является привод. Привод представляет собой биметаллическое кольцо и электродвигатель. В процессе изготовления привода, то есть при сварке биметаллического кольца с электродвигателем и выполнении последующих работ возникают остаточные напряжения и деформации, приводящие к изменению посадочных размеров корпусов под подшипники. В соответствии с руководством по эксплуатации электродвигателей глубина шва должна быть 1,25 мм, при этом ширина шва не должна превышать 1,9 мм.

В ходе натурального эксперимента проводилась проверка обеспечения требуемых по технологии геометрических размеров сварного шва (глубина

провара и ширины сварного шва). Для чистоты эксперимента и апробации предложенного подхода было выбрано два режима при которых проводилась сварка образца-имитатора без оптимизации (Таблица 3.1) и с оптимизацией (Таблица 3.2). После сварки были проведены замеры геометрических размеров сварного шва. Оценка величины отклонения геометрических размеров от требуемых значений проводилась с помощью СКО.

Для Режима 1 рекомендованы следующие параметры сварки:

- ток фокусировки равен 146 мА;
- ток сварки равен 44 мА;
- ускоряющее напряжение 20 кВ;
- фокусное расстояние 60 мм;
- скорость сварки равна 9,0 об/мин.

Для Режима 2 рекомендованы следующие параметры сварки:

- ток фокусировки равен 139 мА;
- ток сварки равен 48 мА;
- ускоряющее напряжение 20 кВ;
- фокусное расстояние 80 мм;
- скорость сварки равна 4,5 об/мин.

Перевод скорости сварки из м/с в об/мин производится на основании диаметра свариваемой детали.

Таблица 3.1 – Результаты контроля проведенных экспериментов без оптимизации

№	Режимы сварки				Размеры швов, мм	
	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Скорость сварки, об/мин	Фокусное расстояние, мм	Глубина	Ширина
1	44	146	9	60	1,13	1,84
2	44	146	9	60	1,13	1,80
3	44	146	9	60	1,13	1,68

4	44	146	9	60	1,15	1,79
5	44	146	9	60	1,15	2,0
6	44	146	9	60	1,15	1,72
7	44	146	9	60	1,18	1,96
8	44	146	9	60	1,18	1,76
9	44	146	9	60	1,18	1,80
10	44	146	9	60	1,23	1,86
11	44	146	9	60	1,23	1,90
12	44	146	9	60	1,23	1,96
13	44	146	9	60	1,27	1,86
14	44	146	9	60	1,27	2,08
15	44	146	9	60	1,27	2,16
16	48	139	4,5	80	1,25	1,86
17	48	139	4,5	80	1,25	2,0
18	48	139	4,5	80	1,25	2,1
19	48	139	4,5	80	1,28	1,8
20	48	139	4,5	80	1,29	2,07
21	48	139	4,5	80	1,29	1,79
22	48	139	4,5	80	1,31	1,78
23	48	139	4,5	80	1,31	2,08
24	48	139	4,5	80	1,31	2,02
25	48	139	4,5	80	1,31	2,15
26	48	139	4,5	80	1,33	2,02
27	48	139	4,5	80	1,33	2,05
28	48	139	4,5	80	1,33	2,07
29	48	139	4,5	80	1,34	2,1
30	48	139	4,5	80	1,34	2,1

Как видно из Таблицы 3.1, при фиксированных значениях технологических параметрах оборудование обеспечивает получение требуемых геометрических размеров сварных швов, однако зачастую данные размеры отклоняются на значительную величину, что ведет к некачественному сварному соединению. Такие отклонения являются следствием нестабильного вращения многопозиционного манипулятора на ЭЛУ, а также напылением на катодный узел, что вызывает уменьшение тока накала и как следствие упадок общей мощности ЭЛП.

Таблица 3.2 – Результаты контроля проведенных экспериментов с оптимизацией

№	Режимы сварки				Размеры швов, мм	
	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Скорость сварки, об/мин	Фокусное расстояние, мм	Глубина	Ширина
1	44	146	9	60	1,23	1,90
2	44	146	9	60	1,23	1,89
3	44	146	9	60	1,24	1,90
4	44	146	9	60	1,24	1,89
5	44	146	9	60	1,24	1,90
6	44	146	9	60	1,24	1,88
7	44	146	9	60	1,24	1,89
8	44	146	9	60	1,25	1,90
9	44	146	9	60	1,25	1,90
10	44	146	9	60	1,25	1,89
11	44	146	9	60	1,25	1,90
12	44	146	9	60	1,25	1,90
13	44	146	9	60	1,25	1,89
14	44	146	9	60	1,25	1,90
15	44	146	9	60	1,25	1,90

16	48	139	4,5	80	1,24	1,90
17	48	139	4,5	80	1,24	1,90
18	48	139	4,5	80	1,24	1,90
19	48	139	4,5	80	1,25	1,90
20	48	139	4,5	80	1,25	1,90
21	48	139	4,5	80	1,25	1,87
22	48	139	4,5	80	1,25	1,87
23	48	139	4,5	80	1,25	1,88
24	48	139	4,5	80	1,26	1,88
25	48	139	4,5	80	1,26	1,89
26	48	139	4,5	80	1,25	1,89
27	48	139	4,5	80	1,25	1,90
28	48	139	4,5	80	1,25	1,90
29	48	139	4,5	80	1,25	1,90
30	48	139	4,5	80	1,24	1,90

Результаты, представленные в таблице 3.2 лучшие размеры сварных швов чем при сварке без оптимизации. Требуемые размеры сварного шва достигаются в большем количестве экспериментов. Для оценки отклонения относительно значений глубины проплавления и ширины сварного шва полученных при двух режимах (Режим 1 и Режим 2) сварки тонкостенных деталей без применения оптимизации и с применением оптимизации, используем среднеквадратичную ошибку (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Отклонение значений размеров сварных швов при ЭЛС в установившемся режиме

-	Управление процессом ЭЛС отличным от оптимального	Управление процессом ЭЛС с применением
---	---	--

			предложенного подхода
Абсолютное отклонение по глубине проплавления, мм	Режим 1	0,06	0,000086
	Режим 2	0,0359	0,00004
Абсолютное отклонение по ширине сварного шва, мм	Режим 1	0,017	0,00006
	Режим 2	0,0248	0,000186

Для подтверждения полученных результатов, дополнительно проведены работы по сварке электродвигателя с биметаллическим кольцом с проведением металлографического контроля (замером глубины проплавления и ширины сварного шва).

Для глубины проплавления 1,25 мм и ширины сварного шва 1,9 мм были рекомендованы следующие параметры сварки:

- ток фокусировки равен 146 мА;
- ток сварки равен 44 мА;
- ускоряющее напряжение 20 кВ;
- фокусное расстояние 60 мм;
- скорость сварки равна 9,0 об/мин.

В таблицах 3.4-3.7 представлены результаты металлографического контроля, проведенного в 4-х поперечных сечениях сварного шва образца-имитатора (шлиф). В таблицах 3.4-3.6 показаны шлифы, сваренные с применением параметров процесса электронно-лучевой сварки, отличных от оптимальных. Видно, что шлифы данных образцов имеют дефекты различного характера: в ряде случаев происходили непровары; в других случаях

образовывался шов слишком большой глубины, что вызывало появление корневых дефектов. Также в ряде образцов проявлялись микротрещины и образовывались газовые поры, а также сформированный шов не обладал симметрией.

В таблице 3.7 представлены шлифы, полученные при найденных оптимальных значениях технологических параметров с применением предложенного в настоящем исследовании подхода.

Таблица 3.4 – Результаты металлографического контроля

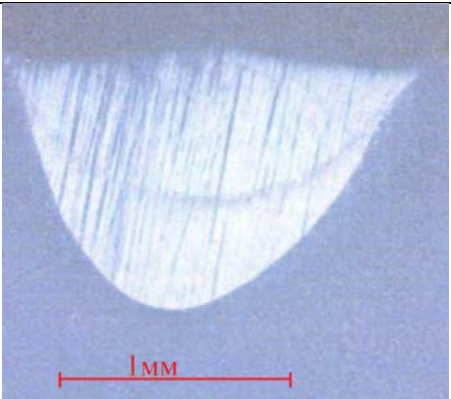
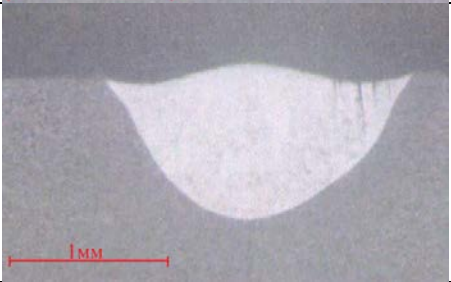
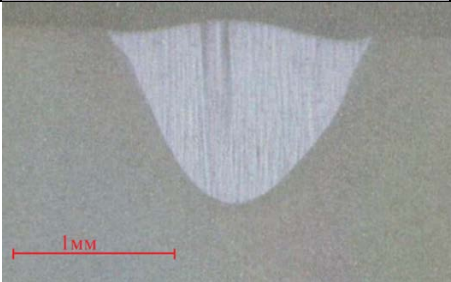
№ шлифа	Глубина провара, мм	Ширина шва, мм	Фото
1	1,16	1,96	
2	0,92	1,86	
3	0,96	2,00	
4	1,08	1,68	

Таблица 3.5 – Результаты металлографического контроля

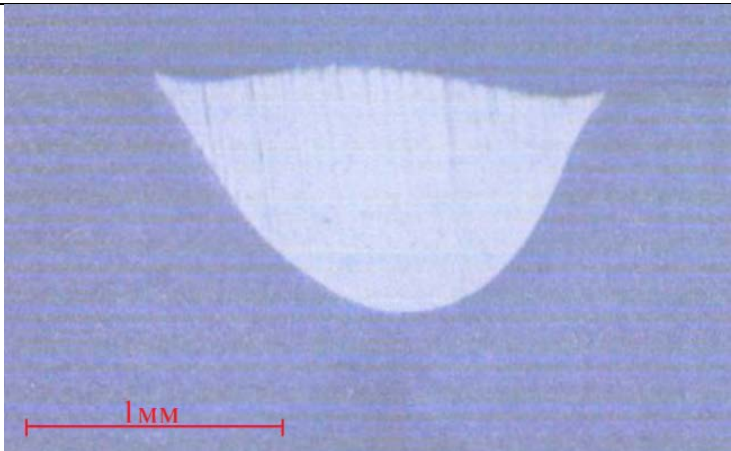
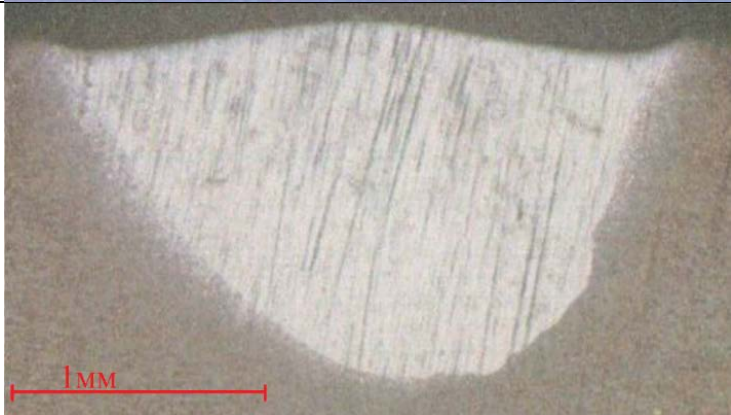
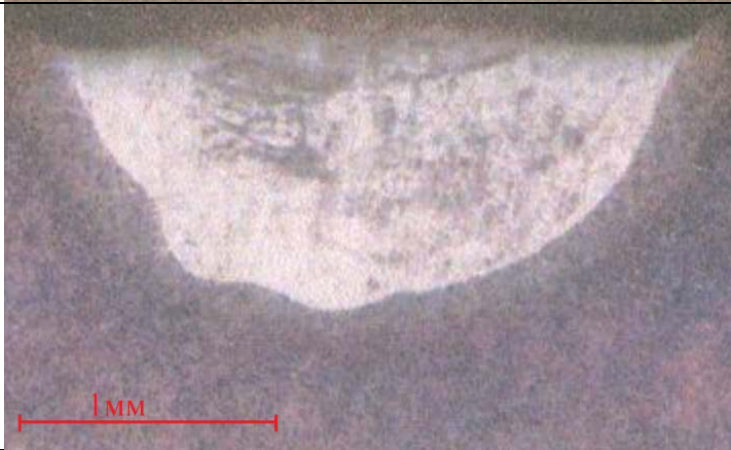
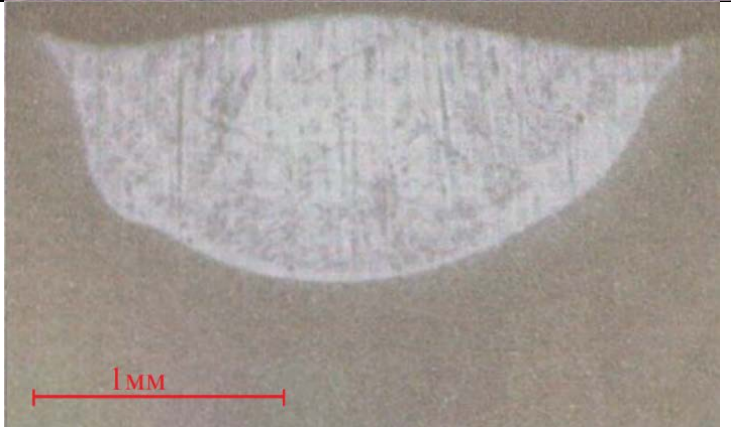
№ шлифа	Глубина провара, мм	Ширина шва, мм	Фото
1	1,98	1,84	
2	1,36	2,52	
3	0,88	2,00	
4	0,84	2,24	

Таблица 3.6 – Результаты металлографического контроля

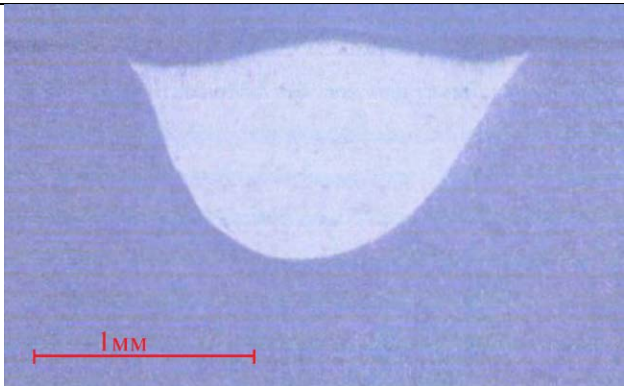
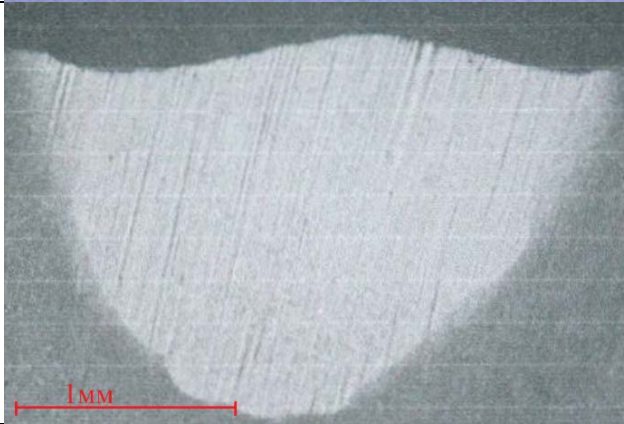
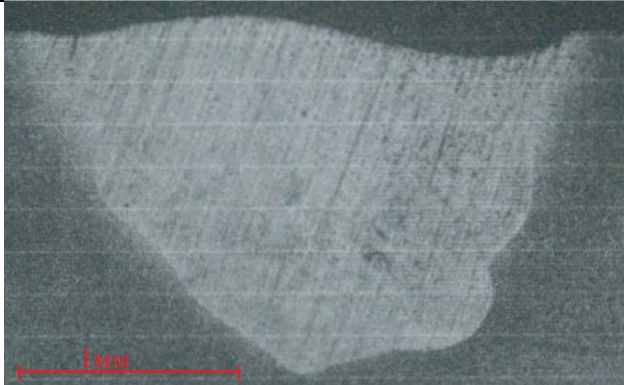
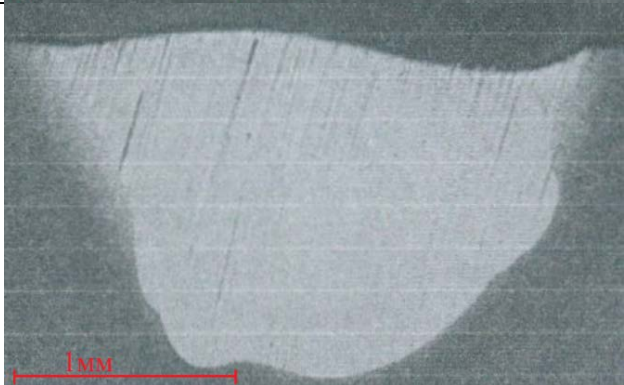
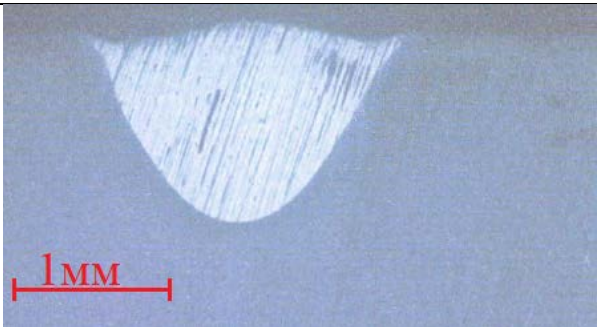
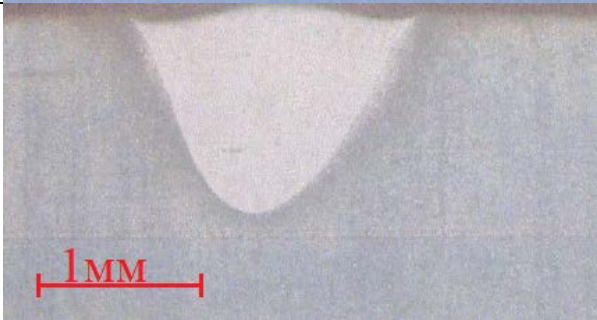
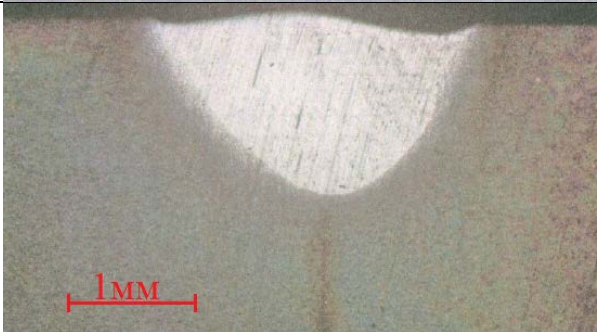
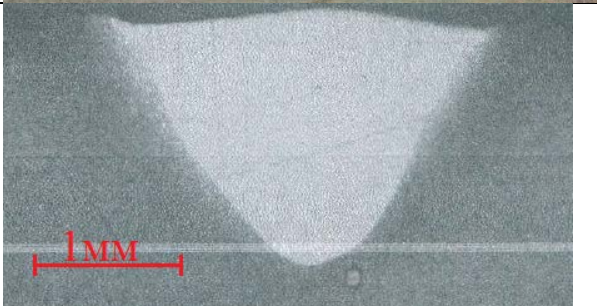
№ шлифа	Глубина провара, мм	Ширина шва, мм	Фото
1	1,04	1,89	
2	1,68	2,60	
3	1,60	2,54	
4	1,58	2,52	

Таблица 3.7 - Результаты металлографического контроля

№ шлифа	Глубина провара, мм	Ширина шва, мм	Фото
1	1,24	1,89	
2	1,25	1,89	
3	1,24	1,9	
4	1,25	1,9	

Выводы. Результат анализа полученных изображений в ходе натурных экспериментов, позволяет сделать вывод, что глубина провара и ширина сварного шва образца-имитатора соответствует техническим требованиям чертежа и находится в пределах для глубины 0,02 мм, а для ширины 0,01 мм.

Полученные результаты измерений и шлифов в Таблицах 3.3 и 3.7 свидетельствуют о повышении качества сварного соединения за счет повышения

эффективности управления процессов ЭЛС при использовании разработанных методик и модели.

Применение разработанных методик и модели позволяет устранить нестабильное вращение многопозиционного манипулятора на ЭЛУ, изменяя ток луча, а также компенсировать недостаток энергии в процессе ЭЛС при напылении на катодный узел и как следствие уменьшение тока накала, путем увеличения тока на катодном узле или изменения скорости сварки. Данные недостатки выражаются нестабильными геометрическими размерами сварных швов. Как видно из Таблиц 3.1 и 3.4 – 3.6 наблюдаются отклонения без применения разработанного подхода.

Геометрические размеры сварных швов у образцов-имитаторов, для которых применялась оптимизация имеют большую степень соответствия требуемых размерам, чем образцы, сваренные без оптимизации, о чем свидетельствуют полученные результаты в Таблицах 3.1 – 3.7.

Применение разработанной АСУ ЭЛС, а также разработанных методик и модели позволяет получать распределение температуры на поверхности свариваемой детали, снизить количество дефектов в зоне сварного соединения и получать стыковые соединения заданных геометрических размеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты:

1) Проведен анализ моделей и методов для автоматизированного управления электронно-лучевой сваркой. Описаны методы моделирования тепловых процессов при ЭЛС. Результат анализа показал, что требуется разработка и программная реализация методик и модели, описывающих динамику теплового процесса в зоне сварного соединения для решения задачи повышения качества сварного соединения в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей.

2) Разработанная модель электронно-лучевой сварки для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей позволяет с помощью траектории движения луча получать распределение температуры на поверхности свариваемой детали, обеспечивающее качество сварного соединения.

3) Разработанная методика для оценки глубины провара и ширины сечения сварного шва при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей позволяет получать стыковые соединения заданных геометрических размеров с отсутствием дефектов.

4) Разработанный метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме позволяет стабилизировать подводимую энергию к зоне сварного соединения и снизить количество дефектов в зоне сварного соединения.

5) Разработанная автоматизированная система управления электронно-лучевой сваркой позволяет производить процесс сварки тонкостенных деталей и обеспечивать повторяемость технологического процесса за счет мониторинга процесса сварки и выбора оптимальных параметров технологического процесса.

Таким образом, все задачи диссертационного исследования решены и цель достигнута.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Seregin, Yu.N. Modeling the thermal process using the temperature functional by electron beam welding / Yu.N. Seregin, S.O. Kurashkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Т. 734. — №. 1. — С. 012003.
- 2 Guoqing, Ch. Numerical simulation of keyhole morphology and molten pool flow behavior in aluminum alloy electron-beam welding / Ch. Guoqing, L. Junpeng, S. Xi, G. Hua // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2019. — Т. 138. — С. 879-888.
- 3 Ziyou, Y. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow during vacuum electron beam welding of 2219 aluminium girth joints / Y. Ziyou, F. Yuchao, H. Jingshan // Vacuum. — 2020. — Т. 175. — С. 109-126.
- 4 Sanjib, J. Fuzzy Inference System-Based Neuro-Fuzzy Modeling of Electron-Beam Welding / J. Sanjib, K.P. Dilip // Advances in Computational Methods in Manufacturing. — 2019. — Т. 123. — С. 839-850.
- 5 Trushnikov, D.N. Mathematical modeling of the electron-beam wire deposition additive manufacturing by the smoothed particle hydrodynamics method / D.N. Trushnikov, E.G. Koleva, R.P. Daviyatshi, R.M. Gerasimov, Yu.V. Bayandin // Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes. — 2019. — Т. 5. — С. 1-14.
- 6 Родякина, Р.В. Моделирование процесса ионизации металлов при ЭЛС / Р.В. Родякина, А.В. Щербаков, Д.А. Гапонов // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2020. — № 1. — С. 129-136.
- 7 Мотасов, М.И. Автоматизация управления фокусировкой луча при электронно-лучевой сварке / М.И. Мотасов, Д.А. Довыдов, В.С. Алексеев // Вопросы электротехнологии. — 2017. — № 1. — С. 127-130.
- 8 Дрозд, А.А. Численное исследование температурных полей и деформации в процессе точечной электронно-лучевой сварки / А.А. Дрозд // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. — 2018. — № 1. — С. 290-294.

9 Тарасова В.Н. Оптимизация проектирования электронно-лучевой аппаратуры за счет компьютерного моделирования // Наука и современное образование. Материаловедение, машиностроение. – 2021. – N. 1. С.11-13.

10 Мелюков В.В., Тарабукин Д.А. Определение параметров сварочного источника в зависимости от геометрических размеров сварочного шва // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Материаловедение. – 2017. – N.1. С.117-130.

11 Суходоев, С.С. Математическая модель наплавки титана / С.С. Суходоев, А.А. Суходоева // Научно-исследовательская деятельность курсантов в образовательной среде военного вуза. — 2019. — № 1. — С. 140-144.

12 Jolisch, T. Heat source model for electron beam welding of nickel-based superalloys / T. Jolisch, N. Doynov, R. Ossenbrink // Materials Testing. — 2021. — Т. 63. — С. 17-28.

13 Бормотов, Е.В. Технологические возможности и преимущества электронно-лучевой сварки // Е.В. Бормотов, В.А. Ивлев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2020. — № 1. — С. 441-443.

14 Яхин, А. Сравнительный анализ электронно-лучевой сварки изделий из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных традиционными и аддитивными методами / А. Яхин // Перспективы развития фундаментальных наук. — 2020. — № 1. — С. 251-253.

15 Муравьев, В.И. Исследование влияния электронно-лучевой сварки титановых сплавов на распределение водорода в сварном шве / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, В.В. Григорьев, О.Г. Шакирова, С.А. Исаков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2019. — № 4. — С. 157-168.

16 Яхин, А. Исследование сварного соединения в изделиях из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных аддитивными методами / А. Яхин, А.В. Панин // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. — 2020. — № 1. — С. 533-534.

17 Jyotirmmaya, K. Beam oscillation, porosity formation and fatigue properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy / K. Jyotirmmaya, C. Debalay, K.R. Sanat, G.R. Gour // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2018. — № 266. — С. 165-172.

18 Guoqing, C. Microstructure evolution of electron beam welded joints of Ti-43Al-9V-0.3Y and Ti-6Al-4V alloys / C. Guoqing, Z. Ge, Y. Qianxing, Z. Binggang, F. Jicai // *Materials Letters*. — 2018. — № 233. — С. 336-339.

19 Николаева, А.В. Исследование образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого сплавления / А.В. Николаева // *Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. — 2020. — 21 апреля.

20 Тереньтьев, Е.В. Оптимизация режимов термической обработки разнородных сварных соединений из стали ЭП517 и сплава 36НХТЮ / Е.В. Тереньтьев, А.Ю. Марченко, А.Л. Гончаров, А.П. Слива, К.Т. Бородавкина // *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии*. — 2020. — № 1. — С. 243-250.

21 Тереньтьев, Е.В. Повышение конструкционной прочности разнородных сварных соединений сплава 36НХТЮ и стали ЭП517 за счет оптимизации герметических параметров шва / Е.В. Тереньтьев, А.Ю. Марченко, А.П. Слива, А.Л. Гончаров // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. — 2018. — № 1. — С. 63-72.

22 Паршуков, Л.И. Технология сварки разнородных сталей и сплавов / Л.И. Паршуков, Ю.В. Панин // *Передовое развитие современной науки как драйвер роста экономики и социальной сферы*. — 2020. — № 1. — С. 8-15.

23 Матюнин, В.М. Контроль механических свойств разнородных сварных соединений сталей разных структурных классов / В.М. Матюнин, А.Л. Гончаров, А.Ю. Марченко, Д. Жгут, Н. Абусейф, А. Бободжанов // *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии*. — 2020. — № 1. — С. 530-537.

24 Гончаров, А.Л. Исследование влияния структурной неоднородности на механические свойства разнородных сварных соединений сталей 20 и 12Х18Н10Т / А.Л. Гончаров, А.Ю. Марченко, Е.В. Тереньтьев, И.Е. Жмурко, А.П. Слива // Сварка в России — 2019: Современное состояние и перспективы. — 2020. — № 1. — С. 307-324.

25 Маталасов, А.Н. Сварка ферромагнитных материалов (сталей) / А.Н. Маталасов, В.Я. Беленький, Е.С. Саломатова // Химия, экология, урбанистика. — 2020. — № 1. — С. 290-293.

26 Харитонов, И.А. Исследование магнитных свойств сталей различных структурных классов в слабых магнитных полях, характерных для условий генерации термоэлектрических токов при электронно-лучевой сварке / И.А. Харитонов, Р.В. Родякина, А.Л. Гончаров // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. — 2019. — № 2. — С.35-40.

27 Быков, Ю.Г. Опыт применения ЭЛС при изготовлении сварных барабанов из сплава ВТ41 в конструкции КВД перспективного двигателя / Ю.Г. Быков, Е.О.Фомичев, О.С. Кашапов, К.А. Карамян // Электрометаллургия. — 2017. — № 10. — С. 14-19.

28 **Пат. 2681067 Российская Федерация, МПК В23К 15/10, В23К 33/00.** Способ электронно-лучевой сварки деталей [Текст] / Портных А.И., Татаринцев А.А., Паничев Е.В., Шуваева Л.П. ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева" (АО "ГКНПЦ им. М.В. Хруничева") — № 2018101803 ; заявл. 17.01.2018 ; опубл. 01.03.2019. — 6 с.

29 **Пат. 2701262 Российская Федерация, МПК В23К 15/10, В23К 9/23.** Способ электронно-лучевой сварки стыковых соединений [Текст] / Ващенко Т.А. ; заявители и патентообладатели Паршуков Л.И., Ващенко Т.А., Ефремов Т.А. — № 2019109264 ; заявл. 29.03.2019 ; опубл. 25.09.2019. — 14 с.

30 **Пат. 2688033 Российская Федерация, МПК В23К 15/00, В23К 15/02.** Способ многослойной электронно-лучевой сварки [Текст] / Драгунов В.К., Гончаров А.Л., Слива А.П. ; заявитель федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ"). — № 2018143873 ; заявл. 11.12.2018 : опубл. 17.05.2019. — 10 с.

31 Пат. 2733964 Российская Федерация, МПК В23К 15/06, В23К 37/06. Способ электронно-лучевой сварки закрытых сферических и цилиндрических сосудов и защитное приспособление для его реализации [Текст] / Ковалев С.В., Юхневич С.С., Паничев Е.В. ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Конструкторское бюро химвавтоматики" (АО КБХА). — № 2020109489 ; заявл. 03.03.2020 ; опубл. 08.10.2020. — 11 с.

32 Павлушин, Н.В. Зонная электронно-лучевая сварка / Н.В. Павлушин // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2019. — № 5. — С. 288-302.

33 Пат. 2708724 Российская Федерация, МПК В23К 15/02, В23К 33/00, В23К 31/02. Способ электронно-лучевой сварки кольцевого соединения тонкостенной обечайки с цилиндрической крышкой, выполненных из высокопрочных алюминиевых сплавов [Текст] / Архипов Д.А., Ворожцов А.Б., Даммер В.Х. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет" (НИ ТГУ). — № 2019114949 ; заявл. 15.05.2019 ; опубл. 11.12.2019. — 11 с.

34 Пат. 2750229 Российская Федерация, МПК В23К 15/00, В23К 9/23, В23К 33/00. Способ электронно-лучевой сварки высокопрочных титановых сплавов для изготовления крупногабаритных конструкций [Текст] / Орыщенко А.С., Леонов В.П., Михайлов В.И. ; заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. — № 2020133943 ; заявл. 06.10.2020 ; опубл. 24.06.2021. — 7 с.

35 Пат. 2751203 Российская Федерация, МПК В23К 15/04, В23К 33/00, В23К 31/02. Способ электронно-лучевой сварки кольцевых или круговых соединений из медных сплавов [Текст] / Собко С.А., Гареев И.С., Писарев М.С. ;

заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом". — № 2020116398 ; заявл. 30.04.2020 ; опубл. 12.07.2021. — 16 с.

36 Пат. 2664746 Российская Федерация, МПК В23К 15/04, В23К 9/23, В23К 33/00. Способ электронно-лучевой сварки тонкостенных труб из молибденовых сплавов [Текст] / Абитов А.Р., Выбыванец В.И., Колесников Е.Г. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение "ЛУЧ" (ФГУП "НИИ НПО "ЛУЧ"). — № 2017136057 ; заявл. 11.10.2017 ; опубл. 22.08.2018. — 6 с.

37 Пантелеев, М.Д. Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава В-1579 / М.Д. Пантелеев, М.М. Бакрадзе, А.А. Скупов, А.В. Щербаков, В.Е. Белозор // Авиационные материалы и технологии. Технологии материалов. — 2018. — № 3. — С. 11-17.

38 Егоров, Р.В. Электронно-лучевая сварка деталей из алюминиевых деформируемых сплавов / Р.В. Егоров, В.В. Овчинников // Заготовительные производства в машиностроении. — 2019. — № 11. — С. 487-494.

39 Лобода, П.И. Особенности электронно-лучевой сварки сплава Ti-TiB со сталью 12X18H10T / П.И. Лобода, К.О. Зворыкин, Л.В. Зворыкин, Э.Л. Вржижевский, Т.Г. Таранова, В.А. Костин // Mechanics and Advanced Technologies. — 2020. — № 1. — С. 141-147.

40 Тереньтьев, Е.В. Влияние скорости ЭЛС на механические свойства металла шва титанового сплава 5В / Е.В. Тереньтьев, Д.А. Жгут, К.Т. Бородавкина // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. — 2020. — № 2. — С. 40-46.

41 Степашин, Р.А. Электронно-лучевая сварка титана и титановых сплавов / Р.А. Степашин, Я.Е. Иванов, А.В. Храмлиук // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2020. — № 1. — С. 487-489.

42 Арисланов, А.А. Исследование структуры и механических свойств сварных соединений из сплава ВТ6ч / А.А. Арисланов, С.В. Путырский, А.Л.

Яковлев, М.С. Грибков // Авиационные материалы и технологии. Технологии материалов. — 2019. — № 4. — С. 74-79.

43 Свиридов, А.В. Особенности ремонта сварных конструкций больших толщин из титанового сплава ВТ6ч / А.В. Свиридов, М.С. Грибков // Труды ВИАМ. — 2021. — № 11. — С. 34-43.

44 Пырин, Д.В. Влияние режима электронно-лучевого сплавления на структуру сплава Inconel 718 / Д.В. Пырин, Д.С. Попкова, А.Ю. Жилияков // Актуальные проблемы развития технических наук. — 2021. — № 1. — С. 105-110.

45 Каблов, Е.Н. Особенности электронно-лучевой сварки жаропрочных сплавов ЭИ689-ВД и ЭП718-ИД со сталью 45 / Е.Н. Каблов, В.В. Антипов, А.В. Свиридов, М.С. Грибков // Труды ВИАМ. — 2020. — № 9. — С. 3-14.

46 Бормотов, Е.В. Электронно-лучевая сварка и ограниченная термообработка сварных швов из высокожаропрочных сплавов / Е.В. Бормотов, В.В. Ивлев, А.В. Будаев // Инновации. Наука. Образование. — 2021. — № 27. — С. 1089-1098.

47 Ковальчук, В.Г. Технологические варианты аргонодуговой и электронно-лучевой сварки фасонных деталей из жаропрочного никелевого сплава / В.Г. Ковальчук, Е.В. Голев, Е.А. Ходакова, Н.С. Одинцов // Сварочное производство. — 2019. — № 9. — С. 31-37.

48 Ковальчук, В.Г. Технологические варианты аргонодуговой и электронно-лучевой сварки фасонных деталей из жаропрочного никелевого сплава / В.Г. Ковальчук, Е.В. Голев, Е.А. Ходакова, Н.С. Одинцов // Технология машиностроения. — 2020. — № 8. — С. 22-29.

49 Мазалов, И.С. Выбор технологических вариантов аргонодуговой и электронно-лучевой сварки жаропрочного никелевого сплава в термически упрочненном состоянии / И.С. Мазалов, В.Г. Ковальчук, Е.В. Голев, Е.А. Ходакова, Н.С. Одинцов // Сварочное производство. — 2018. — № 12. — С. 3-8.

50 Голубев, В.В. Технологические возможности и преимущества ЭЛС / В.В. Голубев, М.С. Машков, А.О. Путилова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Механика и машиностроение. — 2019. — № 1. — С. 512-514.

51 Бормотов, Е.В. Технологические возможности и преимущества электронно-лучевой сварки / Е.В. Бормотов, В.А. Ивлев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2020. — № 1. — С. 441-443.

52 Младенов, Г. Моделирование и оптимизация электронно-лучевой сварки сталей / Г. Младенов, Е. Колева, В. Я. Беленький, Д. Н. Трушников, //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. — 2014. — Т. 16. — №. 4. — С. 7-21.

53 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. — 2015. — № 6. — С. 124-134.

54 Luo, M. Optimization possibility of beam scanning for electron beam welding: Physics understanding and parameters selection criteria / M. Luo, R. Hu, T. Liu, B. Wu, S. Pang, //International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2018. — Т. 127, №. 1. — С.1313-1326.

55 Sohini, C. Perspective Review on Experimental Investigation and Numerical Modeling of Electron Beam Welding Process / C. Sohini, N. Yadaiah, S. Mujaheed, O. Rupshree, Das. Benjamin, M.A. Muralidhar // 7th International Conference of Materials Processing and Characterization. — 2017. — 17 March.

56 Bormann, S. Electron beam welding of CrMnNi-steels: CFD-modeling with temperature sensitive thermophysical properties / S. Bormann, C. Kratzsch, L. Halbauer, H. Bierman // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2019. — № 1. С. 442-455.

57 Jingsheng, W. Modeling fluid dynamics of vapor plume in transient keyhole during vacuum electron beam welding / W. Jingsheng, H. Renzhi, X. Chen // Vacuum. — 2018. — № 1. — С. 277-290.

58 Petrov, P. Numerical modelling of heat source during electron beam welding / P. Petrov, M. Tongov // Vacuum. — 2020. — № 1. — С. 108-120.

59 Ситников, И.В. Разработка численной модели электронно-лучевой сварки зубчатого колеса с использованием одного и трех тепловых источников / И.В. Ситников, В.Я. Беленький, Г.Л. Пермяков. // Химия, экология, урбанистика. — 2019. — № 2. — С. 550-556.

60 Орешенко, Т.Г. Моделирование распределения температуры при электронно-лучевом нагреве / Т.Г. Орешенко, О.А. Бочарова, А.С. Свиридова, В.С. Тынченко, А.Н. Бочаров. // Научно-технический вестник Поволжья. — 2019. — № 5. — С. 70-73.

61 Бочарова, О.А. Применение программной среды COMSOL MULTIPHISICS для моделирования тепловых полей в процессах ЭЛС и индукционной пайки / О.А. Бочарова, Т.Г. Орешенко, А.Н. Бочаров, Ю.Н. Серегин, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин // Вестник Московского энергетического института. — 2019. — № 1. — С. 39-47.

62 Курашкин, С.О. Имитационное моделирование процесса электронно-лучевой сварки в установившемся режиме для отработки технологического процесса / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко // Вестник МГТУ "Станкин". — 2022. — № 3. — С. 42-46.

63 Sanjib, J. Fuzzy Inference System-Based Neuro-Fuzzy Modeling of Electron-Beam Welding / J. Sanjib, K.P. Dilip // Advances in Computational Methods in Manufacturing. — 2019. — Т. 123. — С. 839-850.

64 Kurashkin, S. Modeling the Temperature Distribution in an Electron Beam Welded Bimetallic Ring with COMSOL Multiphysics / S. Kurashkin, E. Shutkina, Y. Tynchenko, V. Bukhtoyarov, I. Makarchuk, A. Bocharov // Software Engineering Application in Systems Design. CoMeSySo 2022. — 2023. — 1 Января.

65 Kurashkin, S.O. Mathematical models of beam input and output in the process of electron beam welding of thin-walled structures / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, Yu.N. Seregin, V.E. Petrenko, A.V. Milov, A.V. Murygin // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — T. 1515. — C. 1-5.

66 Kurashkin, S.O. Mathematical functional for thermal distribution calculating during the electron-beam welding process / S.O. Kurashkin, Yu.N. Seregin, V.S. Tynchenko, V.E. Petrenko, A.V. Murygin // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — № 5. — C. 052049.

67 Yang, Z. Numerical Investigation on Molten Pool Dynamics and Defect Formation in Electron Beam Welding of Aluminum Alloy / Z. Yang, Yu. Fang, J. He // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2020. — T. 29. — C. 6570-6580.

68 Petrov, P. Numerical modelling of heat source during electron beam welding / P. Petrov, M. Tongov // *Vacuum*. — 2020. — T. 171. — C. 108991.

69 Shen, X. Simulation and analysis of electron beam welding residual stress in thin-walled high-temperature alloy aero engine structures / X. Shen, K. Gao, Sh. Dong // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2020. — T. 107. — C. 3953-3966.

70 Denlinger, E.R. Residual stress and distortion modeling of electron beam direct manufacturing Ti-6Al-4V / E.R. Denlinger, J.C. Heigel, P. Michaleris // *Vacuum*. — 2015. — T. 229. — C. 1803-1813.

71 Huang, B. A three-dimensional model of coupling dynamics of keyhole and weld pool during electron beam welding / B. Huang, X. Chen, Sh. Pang, R. Hu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2017. — T. 115. — C. 159-173.

72 Li, Y. Effects of welding condition on weld shape and distortion in electron beam welded Ti₂AlNb alloy joints / Y. Li, Y. Zhao, Q. Li, A. Wu, R. Zhu, G. Wang // *Materials & Design*. — 2017. — T. 114. — C. 226-233.

73 Riedbauer, D. Macroscopic simulation and experimental measurement of melt pool characteristics in selective electron beam melting of Ti-6Al-4V / D. Riedbauer, T. Scharowsky, R. Singer, P. Steinmann, C. Korner, J. Mergheim // *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2016. — Т. 88. — С. 1309-1317.

74 Курашкин, С.О. Моделирование режима электронно-лучевой сварки тонкостенной конструкции из сплава АД31 / С. О. Курашкин, Ю. Н. Серегин, В. С. Тынченко, А. В. Мурыгин, С. В. Котельникова // Сибирский аэрокосмический журнал. — 2022. — № 2. — С. 296-304.

75 Серегин, Ю.Н. Моделирование энергии электронного пучка при электронно-лучевой сварке с применением функционала теплового поля / Ю.Н. Серегин, С.О. Курашкин // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2020. — № 1. — С. 62-73.

76 Щербаков, А.В. Моделирование процессов тепломассопереноса и отражения электронов при электронно-лучевой сварке и аддитивном формообразовании / А.В. Щербаков, Д.А. Гапонова, А.В. Гуденко, А.П. Слива, Р.В. Родякина, А.Л. Гончаров, С.А. Овчинников, В.К. Драгунов // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2021. — № 1. — С. 40-57.

77 Пермьяков, Г.Л. Моделирование процессов тепломассопереноса при электронно-лучевой сварке разнородных материалов / Г.Л. Пермьяков, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2015. — № 1. — С. 517-523.

78 Гапонова, Д.А. Разработка элементов математической модели процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования / Д.А. Гапонова, А.С. Кожеченко, А.В. Щербаков, Р.В. Родякина, А.П. Слива, М.А. Портнов, А.Л. Гончаров // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2021. — № 1. — С. 238-249.

79 Курашкин, С.О. Моделирование формы сварного шва по тепловым процессам при электронно-лучевой сварке / С.О. Курашкин, Ю.Н. Серегин, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2021. — № 1. — С. 58-65.

80 Алякринский, О.Н. Разработка источников электронов на энергию 120 кВ для электронно-лучевой сварки / О.Н. Алякринский, Т.А. Девятайкина, В.А.

Павлюченко, Ю.И. Семенов, А.А. Старостенко, А.С. Цыганов // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2021. — № 1. — С. 341-348. (79)

81 Махмутянов, А.Н. Моделирование процесса электронно-лучевой сварки титана / А.Н. Махмутянов, Д.Н. Колесников, И.М. Мухамадеев // Наука, технологии, инновации. — 2020. — № 1. — С. 228-231.

82 Ольшанская, Т.В. Тепловые модели при электронно-лучевой сварке различным динамическим позиционированием луча, полученные при решении методом функций Грина / Т.В. Ольшанская, Е.М. Федосеева, Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2017. — № 1. — С. 60-81.

83 Ольшанская, Т.В. Построение моделей решения тепловых задач электронно-лучевой сварки с колебаниями луча / Т.В. Ольшанская, Е.М. Федосеева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. — 2018. — № 3. — С. 45-54.

84 Ольшанская, Т.В. Построение тепловых моделей при электронно-лучевой сварке методом функций Грина / Т.В. Ольшанская, Е.М. Федосеева, Е.Г. Колева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. — 2017. — № 3. — С. 49-74.

85 Судник, В. А. Численная модель процесса электронно-лучевой сварки с экспериментальной проверкой / В. А. Судник, В. А., Ерофеев, К. Г. Рихтер. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2008. — №. 2. — С. 233-243. (81)

86 Пермяков, Г.Л. Исследование гидродинамических процессов при электронно-лучевой сварке посредством математического моделирования / Г.Л. Пермяков, Д.Н. Трушников // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2017. — № 1. — С. 131-141.

87 Пермяков, Г.Л. 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 // Сибирский аэрокосмический журнал. — 2015. — № 4. — С. 828-832.

88 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 // Сварка и диагностика. — 2015. — № 1. — С. 139-145.

89 Ситников, И.В. Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного луча / И.В. Ситников, Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький // Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика. — 2015. — № 3. — С. 262-266.

90 Ефимова, Е.Н. Особенности моделирования динамических режимов ЭЛС / Е.Н. Ефимова // Образовательный, научный и инновационный процессы в нанотехнологиях. — 2017. — № 1. — С. 70-75.

91 Мелюков, В.В. Определение параметров сварочного источника в зависимости от геометрических размеров сварочного шва / В.В. Мелюков, Д.А. Тарабукин // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2017. — № 1. — С. 117-130.

92 Das, D. Meta-Heuristic Algorithms-Tuned Elman vs. Jordan Recurrent Neural Networks for Modeling of Electron Beam Welding Process / D. Das, A. Das, S. Jaypuria // Neural Processing Letters. — 2021. — Т. 53. — С. 1647-1663.

93 Шанин, И.Е. Концепция нейросетевого моделирования процесса электронно-лучевой сварки / И.Е. Шанин, В.С. Тынченко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2021. — № 1. — С. 364-366.

94 Chowdhury, S. A Perspective Review on Experimental Investigation and Numerical Modeling of Electron Beam Welding Process / S. Chowdhury, N. Yadaiah, K.S. Mujaheed // Materials Today: Proceedings. — 2018. — Т. 5. — С. 4811-4817.

95 Mohanty, K. Simulation and meta-modeling of electron beam welding using genetic algorithms / K. Mohanty, G. Roy, N. Chakraborti // Metallurgia Italiana. — 2016. — Т. 108. — С. 45-48.

96 Salehi-Shabestari, A. Numerical modeling of electron beam welding (EBW) of Zhs6u superalloy and its experimental validation / A. Salehi-Shabestari, A. Khakzadshahandashti, M. Rahimipour // *Materials at High Temperatures*. — 2022. — T. 39. — C. 12-20.

97 Xia, X. Numerical modeling of the electron beam welding for port stub of CFETR vacuum vessel / X. Xia, Z. Liu // *Fusion Engineering and Design*. — 2021. — T. 171. — C. 112562.

98 Zhang, B. Effects of filler wire on residual stress in electron beam welded QCr0.8 copper alloy to 304 stainless steel joints / B. Zhang, J. Zhao // *Thermal Engineering*. — 2015. — T. 80. — C. 261-268.

99 Polonsky, A. 3D Characterization of the Columnar-to-Equiaxed Transition in Additively Manufactured Inconel 718 / A. Polonsky, N. Raghavan, M. Echlin // *Minerals, Metals and Materials Series*. — 2020. — C. 990-1002.

100 Поболь, А.И. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния деталей из Cu и Nb после электронно-лучевой сварки. Часть 1: Свойства материалов / А.И. Поболь // *Современные методики и технологии создания и обработки материалов*. — 2020. — № 1. — С. 213-225.

101 Осипенко, А.И. Исследование процесса электронно-лучевой сварки с использованием математического моделирования / А.И. Осипенко, И.С. Костарев // *Фундаментальные и прикладные космические исследования*. — 2021. — № 1. — С. 79-80.

102 Шокрин, С. Моделирование температурных и электромагнитных полей в магнитожидкостном герметизаторе для оборудования электронно-лучевой сварки азлнк-114 / С. Шокрин // *Электроэнергетика*. — 2020. — № 1. — С. 85.

103 Ткачева, Т.В. Компьютерная система моделирования процесса электронно-лучевой сварки / Т.В. Ткачева, В.Я. Браверман // *Лесной и химический комплексы — проблемы и решения*. — 2016. — № 1. — С. 330-332.

104 Майстренко, А.Л. Моделирование тепловых процессов для улучшения структуры металлов и сплавов методом трения с перемешиванием / А.Л.

Майстренко, В.М. Нестеренков, В.А. Дутка, В.А. Лукаш, С.Д. Заболотный, В.Н. Ткач // Автоматическая сварка. — 2015. — № 1. — С. 5-14.

105 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612310 Российская Федерация. Программа для формирования траектории развертки электронного пучка в виде синусоиды при электронно-лучевой сварке : № 2020611327 : заявл. 10.02.2020 : опубл. 19.02.2020 / Курашкин С.О., Серегин Ю.Н., Тынченко В.С., Петренко В.Е., Мурыгин А.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». — 1 с.

106 Мотасов, М.И. Автоматизация управления фокусировкой луча при электронно-лучевой сварке / М.И. Мотасов, Д.А. Давыдов, В.С. Алексеев // Вопросы электротехнологии. — 2017. — № 1. — С. 127-130. (106)

107 Кректулева, Р.А. Численное моделирование процессов электронно-лучевой сварки разнородных металлов / Р.А. Кректулева, О.И. Черепанов, Р.О. Черепанов // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций. — 2016. — № 1. — С. 417-418.

108 Kurashkin, S. Software System for Modeling Temperature Distribution During the Electron Beam Welding / S. Kurashkin, D. Rogova, S. Kurashkin, V. Tynchenko, E. Shutkina, S. Saidov, A. Bocharov // 4th IEEE International Conference on Design and Test of Integrated Micro and Nano-Systems. — 2022. — 4 Июль. (108)

109 Райзген, У. Численное исследование конструкции эжекторного устройства для электронно-лучевой сварки / У. Райзген, А. Шибан, О. Мокров, А. Лесной // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. — 2018. — № 1. — С. 1-6.

110 Савинова, М.И. Численное исследование герметичных вращающихся вводов электротехнологических установок электронно-лучевой сварки / М.И. Савинова // Энергия-2018. — 2018. — № 1. — С. 108-109.

111 Шиенок, Ю.В. Задача моделирования плазменных эмиссионных электронно-оптических систем / Ю.В. Шиенок // Репозиторий ВГУ. — 2019. — № 1. — С. 68-70.

112 Ольшанская, Т.В. Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке / Т.В. Ольшанская, Е.С. Саломатова // Вестник Пермского национального исследовательского университета. — 2016. — № 1. — С. 169-187.

113 Гришков, А.А. Моделирование формирования и транспортировки электронного пучка в газонаполненной электронно-оптической системе с плазменным эмиттером / А.А. Гришков, С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе, С.В. Шидловский, В.А. Шкляев // Прикладная физика. — 2015. — № 1. — С. 48-53.

114 Костромыткина, В.В. Моделирование траектории низкоэнергетического электронного пучка под воздействием внешних полей / В.В. Костромыткина // Студент года 2021. — 2021. — № 1. — С. 249-259.

115 Чулков, И.С. Математическое моделирование режимов работы сварочной электронной пушки / И.С. Чулков, А.Л. Гончаров // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — 2015. — № 1. — С. 105-121.

116 Пимонов, Д.А. Система быстрой развертки установки электронно-лучевой сварки / Д.А. Пимонов // МНСК-2015. — 2015. — 11 апреля.

117 Ольшанская, Т.В. Математическая модель для описания процесса кристаллизации и первичной макроструктуры металла шва при ЭЛС / Т.В. Ольшанская, Е.М. Федосеева // Сварка в России – 2019. — 2019. — № 1. — С. 215-217.

118 Шелудько, М.Л. Преимущества и недостатки электронно-лучевой сварки в ракетостроении / М.Л. Шелудько, О.А. Платонов // Решетневские чтения. — 2021. — № 1. — С. 64-65.

119 Платонов, О.А. Применение электронно-лучевой сварки в ракетостроении / О.А. Платонов, А.В. Широков, Д.А. Феоктистов // Решетневские чтения. — 2021. — № 1. — С. 45-46.

120 Kurashkin, S.O. Mathematical modelling of waveguide paths by electron-beam welding / S.O. Kurashkin, A.V. Murygin, Yu.N. Seregin, V.S. Tynchenko, A.V. Lavrishev // 3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, ISM 2021. — 2021. — 17 ноября.

121 Курашкин, С.О. Моделирование электронно-лучевой сварки волноводных трактов космических аппаратов / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, Д.В. Рогова // Вестник МГТУ Станкин. — 2020. — № 4. — С. 84-89.

122 Курашкин, С.О. Особенности моделирования распределения энергии электронного пучка для процесса электронно-лучевой сварки / С.О. Курашкин, Ю.Н. Серегин, А.В. Мурыгин, В.Е. Петренко // Сибирский журнал науки и технологий. — 2020. — № 2. — С. 266-273.

123 Kurashkin, S.O. Simulation model of the electron beam welding process for the formation of the effective technological parameters during the welding of aerospace structures / S.O. Kurashkin, V. Bukhtoyarov, A.V. Murygin, A.N. Bocharov, Yu.N. Seregin, D.V. Rogova // 2022 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH). — 2022. — 16 Марта.

124 Курашкин, С.О. Имитационное моделирование распределение энергии в установившемся режиме для процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций с применением COMSOL MULTIPHYSICS / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. — 2022. — 4 Марта.

125 Kurashkin, S.O. Energy distribution modelling in the weld zone for various electron beam current values in COMSOL Multiphysics / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, A.V. Murygin, Ya.A. Tynchenko // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — № 4. — С. 042058.

126 Kurashkin, S.O. The use of ANSYS for modelling the energy distribution in steady mode with electron beam welding / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, A.V. Murygin, D.V. Rogova // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — № 4. — С. 042061.

127 Kurashkin, S.O. Simulation of the electron beam welding process of a bimetallic ring by means of ANSYS / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, D.V. Rogova // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — №. 4. — С. 042092.

128 Курашкин, С.О. Экспертный анализ рынка систем моделирования для верификации математических моделей ввода-вывода электронного луча в процессе сварки / С.О. Курашкин, А.В. Милов, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин, В.Е. Петренко // Научно-технический вестник Поволжья. — 2020. — № 11. — С. 48-50.

129 Коновалов, А.В. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 752 с.

130 Лаптенко, В.Д. Управление электронно-лучевой сваркой / В.Д. Лаптенко, А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин ; под редакцией В. Д. Лаптенка. — Красноярск : САА, 2000. — 234 с.

131 Kurashkin, S.O. Modelling the heating of thin-walled aerospace designs from various materials with electron beam welding / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, A.V. Murygin, D.V. Rogova, A.N. Bocharov // AIP Conference Proceedings. — 2021. — 29 Апреля.

132 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662729 Российская Федерация. Программная система моделирования распределения энергии при электронно-лучевой сварке тонкостенных конструкций : № 2021661556 : заявл. 21.07.2021 : опубл. 03.08.2021 / Курашкин С.О., Тынченко В.С., Рогова Д.В., Мурыгин А.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». — 1 с.

133 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664000 Российская Федерация. Программа определения скорости сварки для оптимального нагрева металла в области проплавления : № 2018661400 : заявл. 19.10.2018 : опубл. 08.11.2018 / Серегин Ю.Н., Курашкин С.О., Мурыгин А.В., Тынченко В.С. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева). — 1 с.

134 Блейхер Г.А. Исследование процессов тепломассопереноса при электронно-лучевой сварке / Г.А. Блейхер, В.П. Кривобоков, Н.В. Байдинова // Проблемы оптимизации сложных систем. — 2018. — № 2. С. 176-181.

135 Kurashkin, S.O. Software and algorithmic support of the electron-beam welding system / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, V.E. Petrenko, A.V. Murygin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Т. 919. — №. 5. — С. 052024.

136 Курашкин, С.О. Аналитические характеристики плотности распределения электронного пучка по пятну нагрева для оптимизации процесса электронно-лучевой сварки / С.О. Курашкин // Сварка в России - 2019: современное состояние и перспективы. — 2019. — 3 сентября.

137 Курашкин, С.О. Оптимизация распределения энергии по пятну нагрева при электронно-лучевой сварке / С.О. Курашкин, Ю.Н. Серегин // Решетневские чтения. — 2019. — 11 ноября.

138 Kurashkin, S.O. Optimizing the mode parameters at electron-beam welding / S.O. Kurashkin, Yu.N. Seregin // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2019. — 8 апреля.

139 Kurashkin, S.O. Analytical research on the electron beam optimization by spot heating at electron-beam welding / S.O. Kurashkin. // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. — 2019. — № 18. — С. 371-375.

140 Курашкин, С.О. Выбор ускоряющего напряжения по оптимальному нагреву зоны проплавления / С.О. Курашкин, Ю.Н. Серегин // Решетневские чтения. — 2018. — 12 ноября.

141 Курашкин, С.О. Влияние физических коэффициентов на моделирование параметров электронно-лучевой сварки / С.О. Курашкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2018. — 9 апреля.

142 Курашкин, С. О. Моделирование режима ЭЛС для прогнозирования параметров сварного шва / С.О. Курашкин, Ю.Н. Серегин // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии : сборник материалов и докладов Второй международной конференции. — 2017. — 14 ноября.

143 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616858 Российская Федерация. Программа для моделирования плотности распределения электронного пучка с использованием различных разверток при электронно-лучевой сварке : № 2021615834 : заявл. 19.04.2021 опубл. 28.04.2021 / Курашкин С.О., Тынченко В.С., Серегин Ю.Н., Мурыгин А.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». — 1 с.

144 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617039 Российская Федерация. Автоматизированное рабочее место технолога электронно-лучевой сварки : № 2021615942 : заявл. 19.04.2021 : опубл. 05.05.2021 / Головенко И.А., Тынченко В.С., Курашкин С.О., Мурыгин А.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». — 1 с.

145 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617194 Российская Федерация. Программа моделирования распределения энергии при вводе и выводе электронного луча в процессе сварки тонкостенных конструкций : № 2021615951 : заявл. 19.04.2021 : опубл. 11.05.2021 / Курашкин С.О., Тынченко В.С. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». — 1 с.

146 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663138 Российская Федерация. Программная система управления режимами ввода-вывода луча в процессе электронно-лучевой сварки : № 2021661575 : заявл. 21.07.2021 : опубл. 12.08.2021 / Тынченко В.С., Курашкин С.О., Тынченко Я.А.,

Бухтояров В.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». — 1 с.

147 Kurashkin, S.O. Hardware Control of the Electron Beam Energy Density by the Heating Spot / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, Yu.N. Seregin, A.V. Murygin, A.N. Bocharov // Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology. — 2022. — 24 September.

148 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022665411 Российская Федерация. Автоматизированная система управления процессом электронно-лучевой сварки: № 2022663600 : заявл. 19.07.2022 опубл. 15.08.2022 / Бухтояров В.В., Тынченко В.С., Курашкин С.О., Мурыгин А.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». — 1 с.

149 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661322 Российская Федерация. Модуль моделирования температурного поля в установившемся режиме процесса электронно-лучевой сварки: № 2022660429 : заявл. 06.06.2022 опубл. 20.06.2022 / Курашкин С.О., Сысоев Р.В., Тынченко В.С., Рогова Д.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». — 1 с.

150 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660819 Российская Федерация. Модуль моделирования системы принятия технологических решений для процесса электронно-лучевой сварки : № 2022618391 : заявл. 05.05.2022 опубл. 09.06.2022 / Курашкин С.О., Тынченко В.С., Бочаров А.Н., Серегин Ю.Н., Мурыгин А.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». — 1 с.

151 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610233 Российская Федерация. Разработка комплексной системы автоматизации электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций из различных сплавов: № 2022685652 : заявл. 22.12.2022 опубл. 09.01.2023 / Курашкин С.О., Сысоев Р.В., Тынченко В.С., Шуткина Е.В., Мурыгин А.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». — 1 с.

152 Saddaiah, A. Prediction and optimization of weld bead geometry for electron beam welding of AISI 304 stainless steel / A. Saddaiah, B.K. Singh, P. Mastanaiah // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2017. — № 1. — С. 27-43.

153 Silhavy, R. Modeling of Product Heating at the Stage of Beam Input in the Process of Electron Beam Welding Using the COMSOL Multiphysics System /R. Silhavy, P. Silhavy, Z. Prokopova // Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. — 2020. — Т. 1294. — С. 905-912.

154 Kurashkin, S.O. Modeling the Temperature Field Distribution at the Stages of Input-Output of the Electron Beam / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, Yu.N. Seregin, A.V. Murygin, A.N. Bocharov // Software Engineering and Algorithms. CSOC 2021. — 2021. — 20 Июля.

155 Kurashkin, S.O. Energy Distribution Modeling During the Electron Beam Welding Using Dynamically Changing Thermophysical Parameters of the Product / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, Yu.N. Seregin, A.V. Murygin, V. Kukartsev // Software Engineering and Algorithms. CSOC 2021. — 2021. — 20 Июля.

156 Kurashkin, S.O. Automation of Electron Beam Input During the Welding of Thin-Walled Structures / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, S. Dokshanin, A. Leonteva // Software Engineering and Algorithms. CSOC 2021. — 2021. — 20 Июля.

157 Курашкин, С.О. Математическое моделирование распределения энергии при вводе в материал изделия луча в процессе электронно-лучевой

сварки /С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин // Вестник Московского энергетического института. — 2021. — № 3. — С. 88-95.

158 Kurashkin, S.O. The model of energy distribution during electron beam input in welding process / S.O. Kurashkin, Yu.N. Seregin, V.S. Tynchenko, V.V. Kukartsev, A.V. Murygin, V.V. Tynchenko // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Т. 1679. — № 4. — С. 042036.

159 Kurashkin, S.O. Algorithm for calculating the distribution of temperature fields at the stage of input and output of an electron beam in the welding process / S.O. Kurashkin, Yu.N. Seregin, V.S. Tynchenko, V.V. Kukartsev, V.E. Petrenko, V.V. Tynchenko, V.V. Bukhtoyarov // Journal of Physics: Conference Series. — № 4. — С. 042048.

160 Курашкин, С.О. Автоматизация ввода электронного луча при сварке тонкостенных конструкций / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, Д.В. Рогова // Автоматизация в промышленности. — 2020. — № 10. — С. 14-18.

161 Курашкин, С.О. Оптимизация режима ввода электронного луча в процессе сварки тонкостенных конструкций / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, Д.В. Рогова // Системы управления и информационные технологии. — 2020. — № 4. — С. 64-67.

162 Курашкин, С.О. Моделирование теплового поля в процессе электронно-лучевой сварки с использованием динамически изменяемых параметров сплавов изделий / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин, В.Е. Петренко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. — 2020. — № 36. — С. 131-145.

163 Kurashkin, S.O. Analytical characteristics of the electron beam distribution density over the heated spot for optimizing the electron-beam welding process / S.O. Kurashkin, V.D. Laptenok, A.V. Murygin, Yu.N. Seregin // IOP conference series: materials science and engineering. — 2019. — № 1. — С. 012021.

164 Kurashkin, S.O. Software for optimization of beam output during electron beam welding of thin-walled structures / S.O. Kurashkin, A.V. Murygin, A.N.

Bocharov, Yu.N. Seregin, V.S. Tynchenko // 3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, ISM 2021. — 2022. — 1 Января.

165 Kurashkin, S.O. Calculation analysis of welding speed in the thermal field / S.O. Kurashkin / Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. — 2017. — № 16. — С. 291-294.

166 Курашкин, С.О. Разработка системы программного управления скоростью сварки / С.О. Курашкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2017. — 9 Апреля.

167 Курашкин, С.О. Автоматизированная система прогнозирования технологических параметров для электронно-лучевой сварки / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, И.А. Головенко // Автоматизация в промышленности. — 2021. — № 1. — С. 53-59.

168 Курашкин, С.О. Модель анализа и прогнозирования технологических параметров для процесса электронно-лучевой сварки / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, В.Е. Петренко, И.А. Головенюк // Программные продукты и системы. — 2021. — № 2. — С. 96-103.

169 Kurashkin, S.O. Software to Predict the Process Parameters of Electron Beam Welding / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, V.V. Bukhtoyarov, K.A. Bashmur, V.V. Tynchenko, V.V. Kukartsev, R.B. Sergienko // IEEE Access. — 2021. — Т. 9. — С. 92483-92499. Ё

170 Курашкин, С.О. Программная система математического моделирования процесса электронно-лучевой сварки / С.О. Курашкин, А.В. Мурыгин, В.С. Тынченко, А.Н. Бочаров, В.Е. Петренко // Сибирский аэрокосмический журнал. — 2021. — № 2. — С. 261-274.

171 Курашкин, С.О. Разработка программного обеспечения для математического моделирования распределения температуры в процессе электронно-лучевой сварки / С. О. Курашкин, Д. В. Рогова, В. С. Тынченко, Е. В. Шуткина // Программные продукты и системы. — 2022. — № 3. — С. 509-517.

172 Курашкин, С.О. Прототип системы поддержки принятия технологических решений для процесса ЭЛС / С.О. Курашкин, А.В. Мурыгин,

В.С. Тынченко, А.Н. Бочаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. — 2022. — № 42. — С. 132-150.

173 Kurashkin, S.O. Software for Modeling the Electron-Beam Welding in Steady State / S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko // International Russian Automation Conference. — 2021. — 18 Января.

Приложение А

Акт о внедрении научных и практических результатов

Акционерное общество
«Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва»



АКТ

« 23 » 05 2023

О внедрении научных и практических результатов

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева» в рамках договора №14-17 от 01 июля 2017 г. на нашем предприятии проводил работы по теме «Повышение точности задания и воспроизводимости технологических параметров электронно-лучевой сварки».

В результате научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы модернизирована автоматизированная система управления электронно-лучевой сваркой, позволяющая получать требуемое распределение температуры на поверхности свариваемой детали, снизить количество дефектов в зоне сварного соединения и получать стыковые соединения заданных геометрических размеров.

В работе использовались научные результаты, полученные аспирантом СибГУ имени М.Ф. Решетнева Курашкиным Сергеем Олеговичем при работе над кандидатской диссертацией по теме «МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ».

Указанные научно-технические результаты переданы и внедрены в Акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва».



УТВЕРЖДАЮ
Главный технолог АО «РЕШЕТНЁВ»

М.М. Михнёв

СОГЛАСОВАНО
Начальник сектора технологий сварки
и пайки – главный сварщик АО «РЕШЕТНЁВ»

С.К. Злобин

Рисунок А.1 – Акт о внедрении научных и практических результатов

Приложение Б

Патент и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ



Рисунок Б.1 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



Рисунок Б.2 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



Рисунок Б.3 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



Рисунок Б.4 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



Рисунок Б.5 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



Рисунок Б.6 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021617194

**Программа моделирования распределения энергии при
вводе и выводе электронного луча в процессе сварки
тонкостенных конструкций**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет науки и
технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им.
М.Ф. Решетнева) (RU)*

Авторы: *Курашкин Сергей Олегович (RU), Тынченко Вадим
Сергеевич (RU)*

Заявка № 2021615951

Дата поступления 19 апреля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 мая 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Рисунок Б.7 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021617039

**Автоматизированное рабочее место технолога
электронно-лучевой сварки**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева) (RU)*

Авторы: *Головенок Игорь Александрович (RU), Тынченко Вадим Сергеевич (RU), Курашкин Сергей Олегович (RU), Мурыгин Александр Владимирович (RU)*

Заявка № **2021615942**

Дата поступления **19 апреля 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **05 мая 2021 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Излиев

Рисунок Б.8 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



Рисунок Б.9 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



Рисунок Б.10 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



Рисунок Б.11 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ