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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мурыгин Александр Владимирович

Официальные оппоненты: **Царев Роман Юрьевич**,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»,
доцент кафедры прикладной математики

Москвичев Владимир Викторович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий

Ведущая организация: Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), известный центр своими работами в области сварочных технологий и автоматизации производственных процессов

Защита состоится «06» октября 2023 года в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий» 31, зал заседаний диссертационного совета, ауд. Л-205

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» и на сайте https://www.sibsau.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 660037, Россия, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева), Диссертационный совет E-mail: dissovet@sibsau.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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., Лаптенок В.Д., Hara K., Виноградов В.А., Sasaki S., Кривенков В.А., Куцан Ю.Г., Anderl P. и др.). В своих исследованиях Родякин Р. В. разрабатывает методику моделирования процесса прохождения пучка электронов через слой испаренного металла. Авторы Мотасов М. И., Довыдов Д. А., Алексеев В. С. рассматривают имитационную модель системы управления фокусировкой луча с использованием программной среды Simulink, входящей в состав пакета MATLAB. Дрозд А. А. в своем исследовании 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. 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.

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. Оптимизация технологических параметров процесса сварки при вводе новых материалов, требует проведения натурных 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.

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 электронно-лучевой сварки 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 линейно-

го), 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 быстродвижущихся 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 INFOTEH-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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, рассмотрены вопросы научной новизны и практической значимости проведенных исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу моделей и методов для автоматизированного управления ЭЛС, а также приводится описание методов моделирования тепловых процессов при ЭЛС.

Моделирование процессов ЭЛС – одна из наиболее важных частей прикладных исследований, поскольку проведение полномасштабных экспериментов является дорогостоящим и требует большого количества времени. 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, пример дефекта показан на рисунке 1. Подобные проблемы возникают в связи с применением ЭЛС в аэрокосмической отрасли, так как проблемы качества там стоят особо остро.

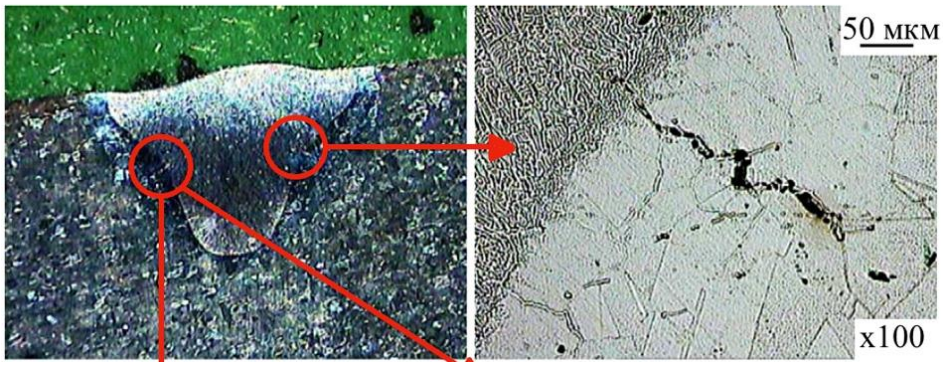


Рисунок 1 – Пример дефекта (микротрещена), полученного в процессе электронно-лучевой сварки тонкостенных деталей

На сегодняшний день для эффективного решения проблем, возникающих в процессе сварки, разрабатываются различные походы. Например, Младенов Г., Колева Е., Беленький В. Я. и Трушников Д. Н. в своем исследовании 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. 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. Применение научным коллективом Ghazanfarpour B., Radzi M. и Mariun N. искусственных нейронных сетей для ЭЛС позволило разработать эффективную математическую модель технологического процесса ЭЛС с высокой удельной мощностью. Авторами Kurashkin S. O., Seregin Y. N., Tynchenko V. S. и Murygin A. V. предложена математическая модель температурного поля в процессе ЭЛС, отражающая распределение энергии и позволяющая проводить оптимизацию технологических режимов ЭЛС. Другим важным достижением, является, создание исследователями Певневой А. Г. и Калинкиной М. Е. трехмерной модели в сочетании с моделью объема жидкости для изучения динамического поведения и стабильности канала сварочных ванн при вакуумной электронно-лучевой сварке. Для моделирования процесса развития термических напряжений и деформаций при точечной ЭЛС, используется численный метод, а в предложенной Дроздовым А. А. модели учитываются фазовые переходы при нагреве, плавлении, испарении и кристаллизации.

Для описания процессов ЭЛС применяют численное моделирование. Исследователями Мелюковым В. В. и Тарабукиным Д. А. предложен метод математического и численного моделирования теплового процесса сварки для определения мощности сварочного источника, сокращения времени и объема натурного эксперимента при отладке режима ЭЛС. С помощью ПО ANSYS CFX Райсген У., Шибан А. и Мокров О. А. выполнили параметрические исследования размеров конструкции инжектирующего устройства, которое устанавливается на патрубок выходного отверстия электронно-лучевой пушки для сварки в атмосфере.

Главным выводом первой главы является то, что, 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. Решению данного вопросы посвящена эта диссертационная работа.

Вторая глава посвящена разработке математической модели для расчета распределения температуры на поверхности свариваемых деталей в процессе электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций. Разработана методика для оценки глубины провара и ширины сварного шва при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей. Разработан метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме. 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.

На рисунке 2 изображена схема для построения модели для расчета распределения температуры на поверхности свариваемой детали в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных деталей в системе координат, связанных со сварным швом.

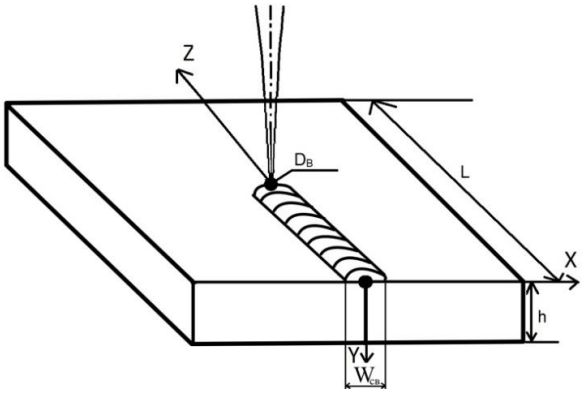


Рисунок 2 – Схема для построения модели расчета распределения температуры:
h – толщина изделия; L – длина изделия; $D_В$ – диаметр пучка; $W_{св}$ – ширина сварного шва

Энергия электронного луча в данном исследовании представлена в виде четырех идеализированных источников энергии, как показано на рисунке 3.

Действительный точечный источник Q_1 принимают перемещающимся по поверхности полубесконечного тела.

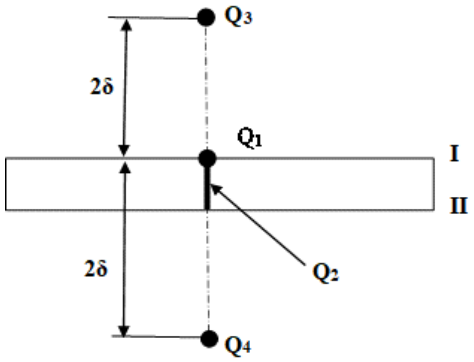


Рисунок 3 – Схема введения идеализированных источников для расчета температур в плоском слое

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 (1):

$$T_{комп}(x, y, z, t, \nu) = T_1(x, y, z, t, \nu, Q_1) + T_2(x, y, z, t, \nu, Q_2) + \\ + T_3(x, y, z, t, \nu, Q_3) + T_4(x, y, z, t, \nu, Q_4) \quad (1)$$

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; ν – скорость процесса сварки, [см/с].

Применив метод наложения, получим итоговую систему уравнений температуры нагрева детали (2). При моделировании теплового процесса ЭЛС применяется критерий оптимальности (3). Изменение экспоненциального выражения (добавление величины δ), обусловлено необходимостью учета положения источника относительно поверхности детали (Рисунок 3).

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

Так как $T_{комп}$ (1) 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 (t) – время, при котором температура нагрева изделия (2) достигает порогового значения (граничная температура зоны термического влияния равна 600 °C), задается в интервале [0; +∞).

Выбор требуемых значений технологических параметров при моделировании теплового процесса осуществлялся с помощью критерия оптимальности (3).

$$J_1(x,y,z,t,\nu) = \sqrt{\frac{1}{n-1}\cdot\sum_{i=1}^{n}\left(T_{норм_i}(x_i,y_i,z_i,t_i,\nu_i) - \overline{T_{норм}}\right)^2} \rightarrow \min_{\nu(x,t)} \quad (3)$$

где $(x,y,z,t,\nu) = \{(x_i,y_i,z_i,t_i,\nu_i)\}$ – множество координат рассматриваемых точек пространства, где $i = \overline{1,n}$; $\overline{T_{норм}} = \frac{1}{n}\cdot\sum_{i=1}^{n} T_{норм_i}(x_i,y_i,z_i,t_i,\nu_i)$ – нормированное среднее значение температуры детали в точках сварного шва; $T_{норм_i}(x_i,y_i,z_i,t_i,\nu_i) = \frac{T_{комп_i}(x_i,y_i,z_i,t_i,\nu_i)}{T_{max}}$ – нормированное значение температуры детали в i-й точке; $T_{комп_i}(x_i,y_i,z_i,t_i,\nu_i)$ – температура нагрева детали на поверхности; T_{max} – максимальная температура нагрева детали на поверхности; n – количество точек в объеме материала для которых производятся вычисления; ν(x,t) – скорость сварки от координаты вдоль сварного шва (x) и времени интегрирования (t).

Для поиска требуемых технологических параметров ЭЛС (энергия, время, скорость сварки) был разработан алгоритм, представленный в виде блок-схемы на рисунке 4. Алгоритм позволяет по вводным значениям теплофизических и геометрических параметров материалов определить оптимальные технологические параметры процесса сварки.

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

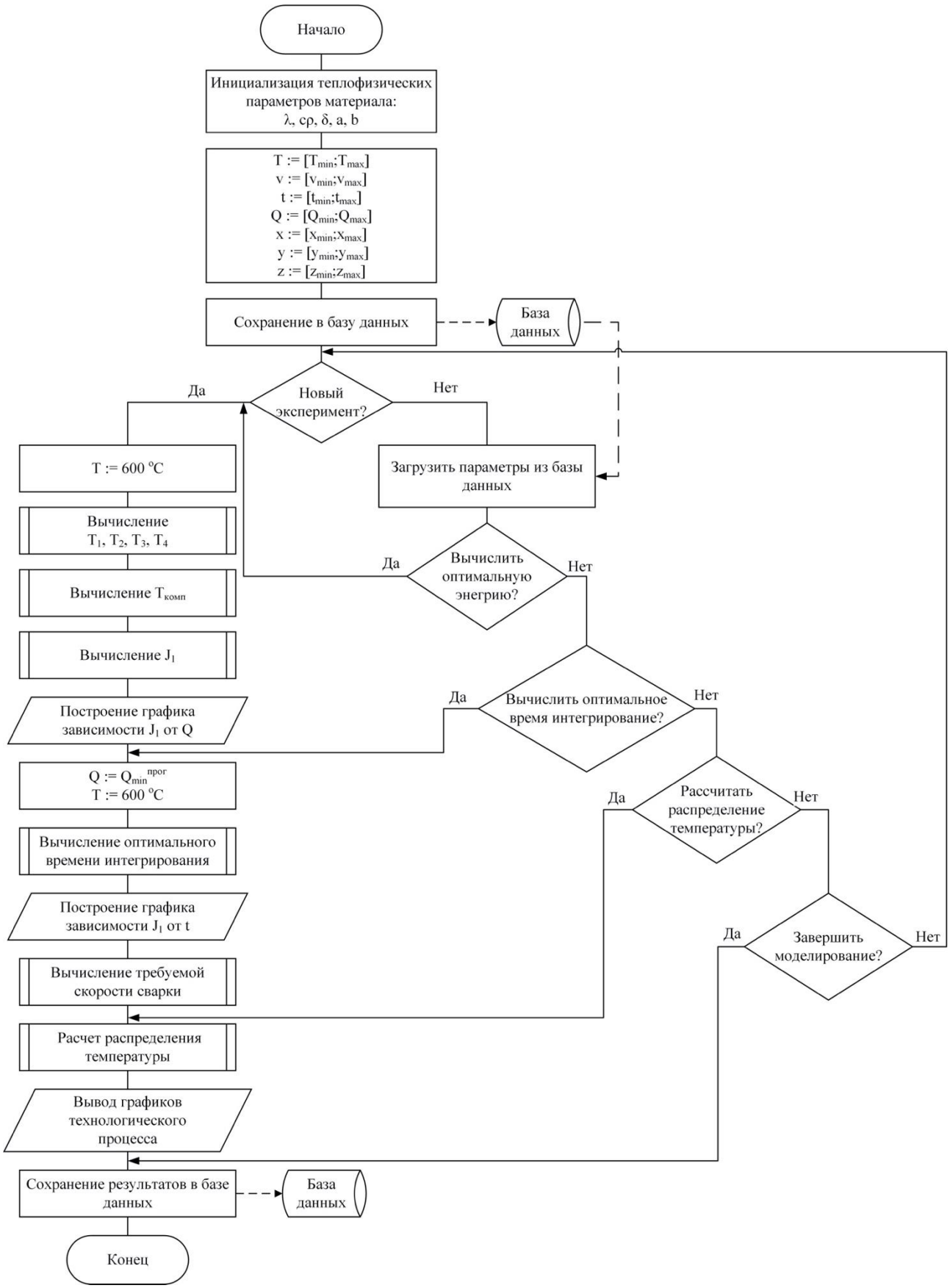


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма поиска требуемых технологических параметров процесса сварки тонкостенных деталей

Выражение (2) позволяет получать распределение температуры свариваемой детали, тем самых получая зону термического влияния и позволяя проводить оценку глубины проплавления и ширины сварного шва.

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

Применяя разработанную методику, описываемую выражением (2), проводились расчеты зон термического влияния (ЗТВ) при ЭЛС тонкостенных деталей. В процессе выполнения методики осуществляются расчеты температуры на поверхности детали, времени интегрирования и скорости сварки. Под температурой понимается выражение (2). Для расчета критерия оптимальности (2) разработана программа в среде MATLAB.

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 4).

Расчеты проводились при значениях времени интегрирования, соответствующих моменту достижения границы зоны термического влияния нижней поверхности нагреваемого материала, пример расчетов показан на рисунке 5. Из рисунка следует, что форма поперечного сечения полученной зоны термического влияния максимально приближена к форме поперечного сечения сварного шва.

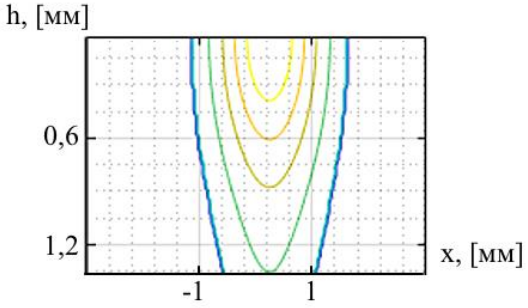


Рисунок 5 – Результаты моделирования зоны термического влияния:
h – толщина сварного шва; x – ширина изделия; синий цвет – границы зоны термического влияния

На рисунке 6 представлена блок-схема методики оценки глубины и ширины сварного шва при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей, позволяющая получать зону термического влияния приближенную к форме сварного шва и проводить ее оценку соответствия геометрическим размерам.

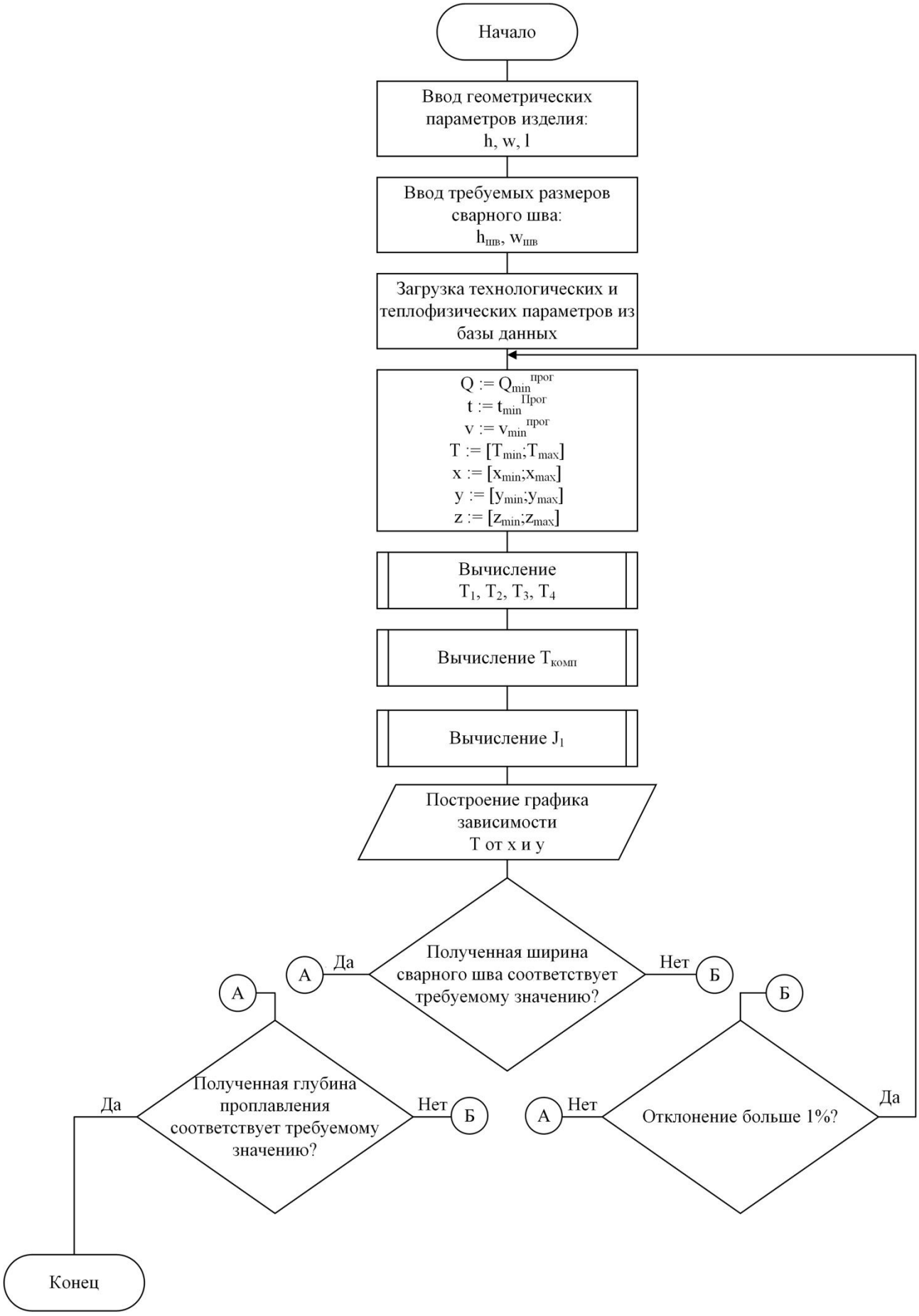


Рисунок 6 – Блок-схема методики оценки глубины и ширины сварного полученных в процессе ЭЛС

Метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме, поясняется блок-схемой алгоритма управления ЭЛС на рисунке 7.

Рисунок 7 – 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

Алгоритм основан на разработанной модели для расчета распределения температуры свариваемой детали в процессе ЭЛС, выражение (2). С целью достижения оптимального качества управления процессом ЭЛС в установившемся режиме при изменяющихся условиях работы (изменение мощности электронно-лучевой пушки), необходимо стабилизировать подводимую энергию к

зоне сварного соединения и учитывать теплофизические, геометрически и технологические параметры детали.

Блок оптимизации включает в себя следующие этапы – на первом этапе вводятся теплофизические и геометрические параметры детали, на втором этапе осуществляется поиск энергии с применением критерия оптимальности (3), на заключительном этапе производится поиск требуемых технологических параметров (скорость сварки, энергия, время).

Блок-схема алгоритма адаптивного управления ЭЛС в установившемся режиме, представлена на рисунке 8.

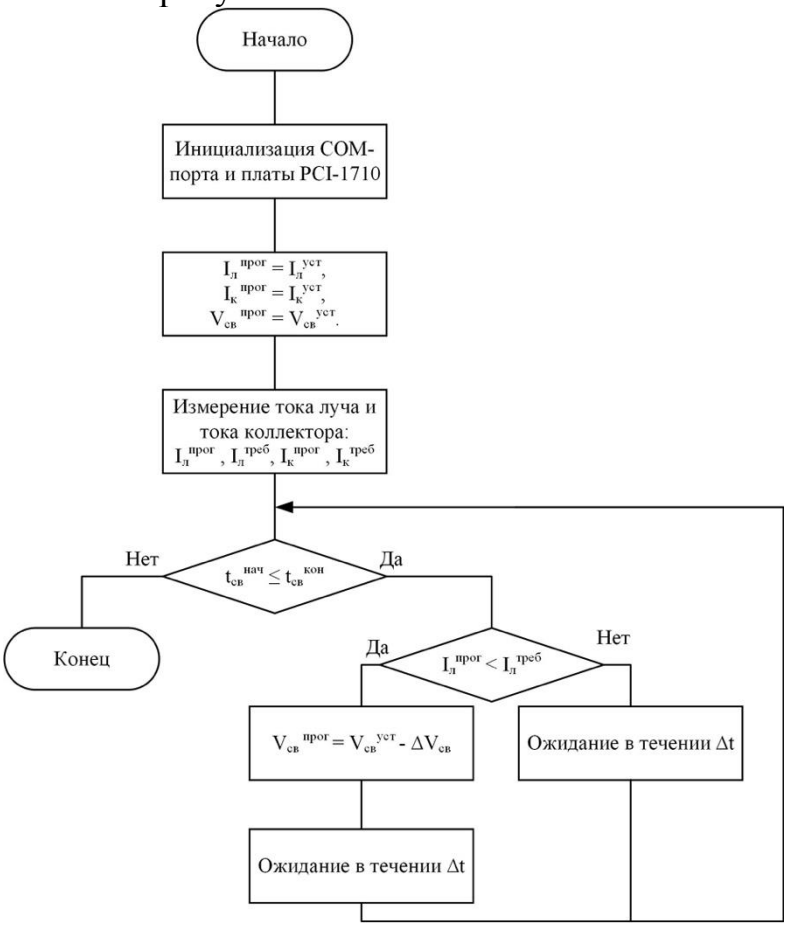


Рисунок 8 – Алгоритм адаптивного управления процессом ЭЛС в установившемся режиме

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 необходи-

мого значения энерговложения. Значения загружается из базы данных, заранее подготовленных на этапе оптимизации.

Применение разработанной методики и метода позволит получать стыковые соединения заданных геометрических размеров с отсутствием дефектов и стабилизировать подводимую энергию к зоне сварного соединения снизив количество дефектов.

В **главе три** разрабатывается макет автоматизированной системы управления ЭЛС, а также приводятся результаты натурных экспериментов для верификации разработанного макета автоматизированной системы управления (АСУ) ЭЛС и полученных режимах в результате моделирования.

Действующий макет АСУ ЭЛС, показан на рисунке 9.

АСУ ЭЛС имеет в своем составе следующее оборудование:

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

АСУ ЭЛС реализована на базе промышленного компьютера ACP-4000MB-00CEW.

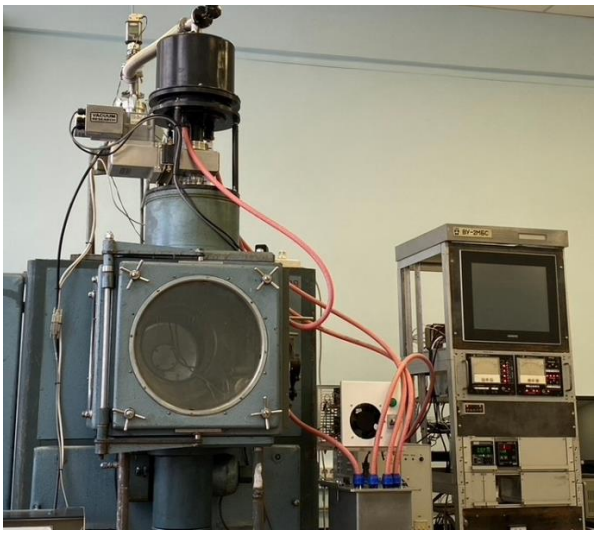


Рисунок 9 – Действующий макет АСУ ЭЛС

Структурная схема системы управления АСУ ЭЛС показана на рисунке 10.

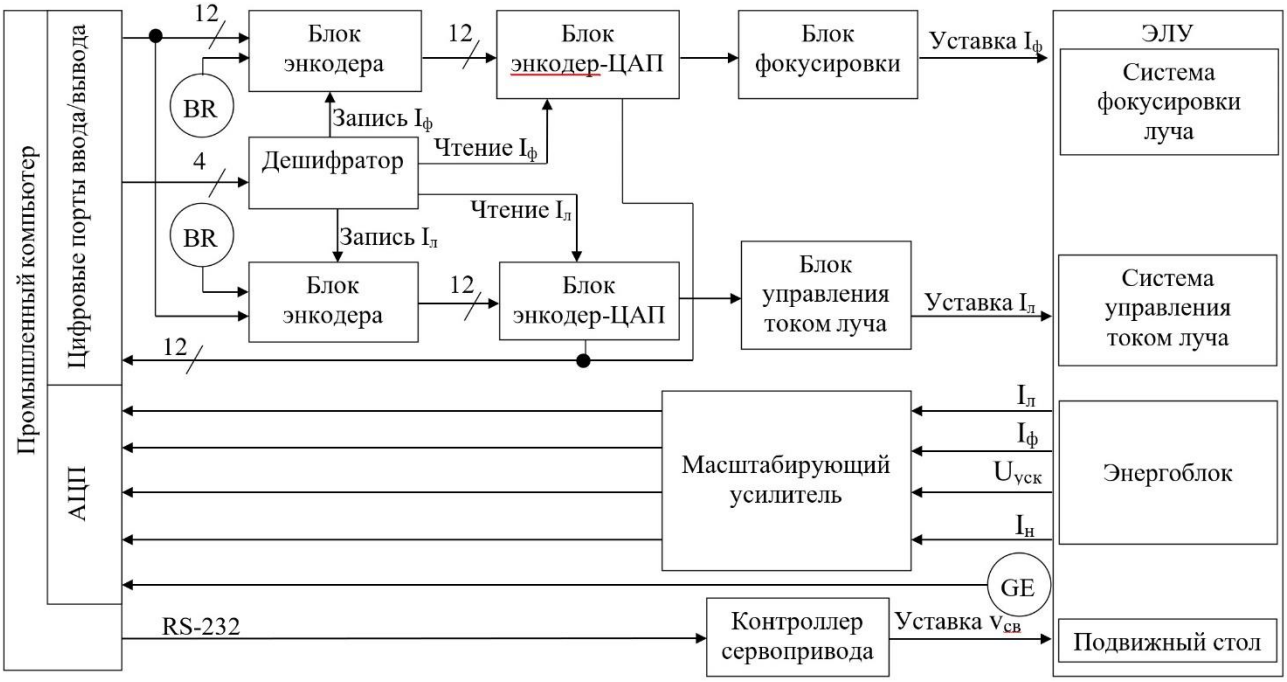


Рисунок 10 – Структурная схема системы управления АСУ ЭЛС, где: BR – энкодер; блок энкодера – расшифровывает сигналы, поступающие с энкодера; GE – датчик положения для определения начала процесса сварки; $I_л$ – ток электронного луча; $I_ф$ – ток фокусировки; $I_н$ – ток накала электронно-лучевой пушки; $U_{уск}$ – ускоряющее напряжение; $V_{св}$ – скорость сварки

Основой АСУ ЭЛС является промышленный компьютер АСР-4000МВ-00CEW, 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 $I_л$, ток фокусировки $I_ф$, ускоряющее напряжение $U_{уск}$, ток накала пушки $I_н$. Управление скоростью сварки осуществляется через контроллер сервопривода (уставка $V_{св}$). Управление фокусировкой осуществляется через блок фокусировки (уставка $I_ф$). 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.

Главное окно программы АСУ ЭЛС представлено на рисунке 11. С помощью данного окна можно задавать параметры сварки, производить мониторинг данных параметров и строить графики изменения параметров во времени.

Разработанная АСУ основана на предлагаемых в данной работе математической модели (2) и критерии оптимальности (3), 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.

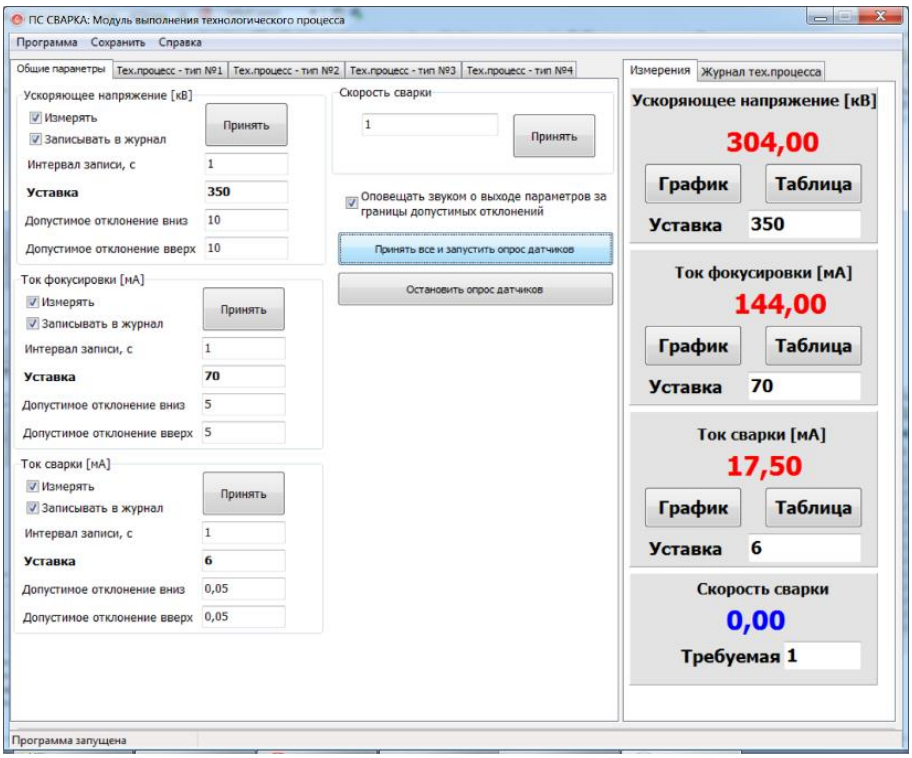


Рисунок 11 – Главное окно программной системы АСУ ЭЛС

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

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

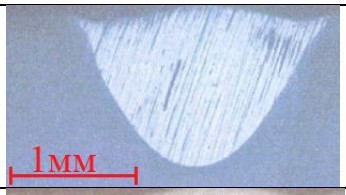
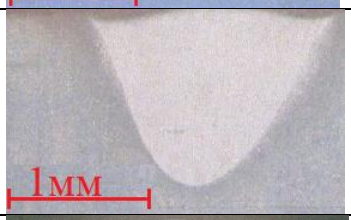
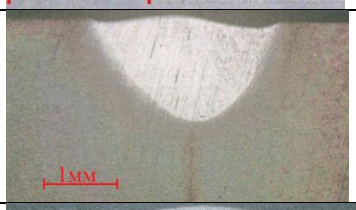
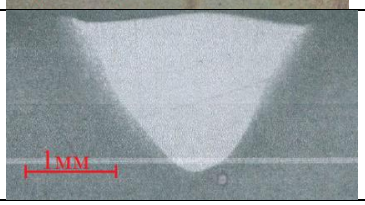
- ток фокусировки равен 146 мА;
- ток сварки равен 44 мА;
- ускоряющее напряжение 20 кВ;
- фокусное расстояние 60 мм;
- скорость сварки равна 9,0 об/мин.

Результаты качества сварных швов контролировались с помощью металлографического контроля. В таблице 1 представлены результаты металлографического контроля, проведенного в 4-х поперечных сечениях сварного шва образца-имитатора (шлиф) с оптимизацией. Шлифы показывают сварные швы, полученные при найденных оптимальных значениях технологических параметров с применением предложенного в настоящем исследовании подхода.

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.

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

Таблица 1 – Результаты металлографического контроля для титанового сплава ВТ14 с оптимизацией

№ 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	

В **приложении** представлены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, а также акт о внедрении научных и практических результатов.

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 устано-

вившемся 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1 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. – Текст : непосредственный // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2022. – Т. 23, № 2. – С. 296–304.

2 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. – Текст : непосредственный // Программные продукты и системы. –2022. – Т. 35, № 3. – С. 509–517.

3 Курашкин, С. О. Прототип системы поддержки принятия технологических решений для процесса ЭЛС / А. В. Мурыгин, В. С. Тынченко, С. О. Курашкин, А.Н. Бочаров. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 42. – С. 132–150.

4 Курашкин, С. О. Имитационное моделирование процесса электронно-лучевой сварки в установившемся режиме для отработки технологического процесса / В. С. Тынченко, С. О. Курашкин. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ "Станкин". – 2022. – № 3(62). – С. 42-46.

5 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. – Текст : непосредственный // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2021. – Т. 22, № 2. – С. 261–274.

6 Курашкин, С. О. Моделирование электронно-лучевой сварки волноводных трактов космических аппаратов / С. О. Курашкин, В. С. Тынченко, Д. В. Рогова. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ Станкин. – 2020. – № 4. – С. 84–89.

7 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. – Текст : непосредственный // Сибирский журнал науки и технологий. – 2020. – Т. 21, № 2. – С. 266–273.

Публикации в изданиях, входящих в Web of Science и Scopus:

8 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. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham, 2023. – T. 596. – direct text.

9 Software System for Modeling Temperature Distribution During the Electron Beam Welding / 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, DTS 2022. – P. 1-6. – direct text.

10 Software for Modeling the Electron-Beam Welding in Steady State / V. Tynchenko, S. Kurashkin //Advances in Automation III. RusAutoCon 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering, – Springer, Singapore, 2022. – T. 857, P. 237–246. – direct text.

11 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. V. Bukhtoyarov, A. V. Murygin, A. N. Bocharov, Yu. N. Seregin, D. V. Rogova // 2022 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH). – IEEE, 2022. – P. 1-5. – direct text.

12 Mathematical modelling of waveguide paths by electron-beam welding / S. O. Kurashkin, A. V. Murygin, Yu. N. Seregin, V. S. Tynchenko, A. V. Lavrischev // 3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, ISM 2021. – Procedia Computer Science, Elsevier. – 2022. – T. 200. – P. 83-90. – direct text.

13 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. – Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, Singapore, 2022. – P. 71-78. – direct text.

14 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. – AIP Publishing LLC, 2021. – T. 2402, № 1. – P. 020048. – direct text.

15 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. – IOP Publishing, 2021. – T. 1889, №. 4. – P. 042058. – direct text.

16 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. – IOP Publishing, 2021. – T. 1889, № 4. – P. 042061. – direct text.

17 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. – IOP Publishing, 2021. – T. 2094. – №. 4. – P. 042092. – direct text.

18 Modeling the thermal process using the temperature functional by electron beam welding / S. O. Kurashkin, Yu. N. Seregin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – T. 734, № 1. – P. 012003. – direct text.

19 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. – IOP Publishing, 2020. – Т. 919, № 5. – P. 052024. – direct text.

20 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. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1515, № 5. – P. 052049. – direct text.

21 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. – IOP Publishing, 2019. – Т. 681, № 1. – С. 012021. – direct text.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

22 Свидетельство № 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. – 1 с. – Текст : непосредственный.

23 Свидетельство № 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. – 1 с. – Текст : непосредственный.

24 Свидетельство № 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. – 1 с. – Текст : непосредственный.

25 Свидетельство № 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. – 1 с. – Текст : непосредственный.

26 Свидетельство № 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. – 1 с. – Текст : непосредственный.

27 Свидетельство № 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. – 1 с. – Текст : непосредственный.

28 Свидетельство № 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. – 1 с. – Текст : непосредственный.

29 Свидетельство № 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. – 1 с. – Текст : непосредственный.