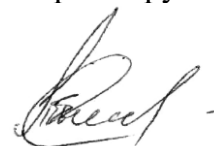


На правах рукописи



ТЫНЧЕНКО ВАДИМ СЕРГЕЕВИЧ

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССАМИ СОЗДАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора 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 консультант: Мурыгин Александр Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Лившиц Александр Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет
путей сообщения», г. Иркутск, заведующий кафедрой
«Автоматизация производственных процессов»

Трушников Дмитрий Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет», г. Пермь, профессор
кафедры «Сварочное производство, метрология и
технология материалов»

Кравец Олег Яковлевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет», г. Воронеж, профессор кафедры
«Автоматизированные и вычислительные системы»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится «27» октября 2023 года в 15:00 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, проспект имени 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 официальном 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. Растущие потребности в использовании космической техники в различных сферах деятельности требуют создания все более совершенных космических аппаратов (КА). С развитием элементной базы оборудования КА растут требования к технологичности, точности и качеству как производства в целом, так и к формированию неразъемных соединений элементов оборудования в частности.

Сейчас на многих этапах производства используются точные наукоемкие методы индукционной пайки, электронно-лучевой и диффузионной сварки. В частности, метод индукционного нагрева для формирования паяных соединений хорошо себя зарекомендовал при производстве трактов антенно-фидерных устройств. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) прочно вошла в технологический цикл производства различных видов оборудования за счет незначительных тепловых деформаций соединяемых деталей. Качество соединения однородных материалов при диффузионной сварке может быть настолько высоким, что на микрошлифе нельзя обнаружить зоны раздела.

Применение подобных высокотехнологичных методов формирования неразъемных соединений усложняется наличием ряда факторов, в частности, таких как низкая степень повторяемости неавтоматизированного (ручного) процесса пайки/сварки, а также сложность выбора эффективных технологических режимов для этих процессов.

Вышеозначенные проблемы могут быть решены в результате внедрения современных автоматизированных систем, разработанных на основе новых эффективных моделей и методов управления, в том числе с применением цифровых двойников рассматриваемых технологических процессов, что подтверждает актуальность темы диссертационного исследования.

Степень разработанности темы. Проблемами управления технологическими процессами создания неразъемных соединений занимаются как отечественные, так и зарубежные ученые и практики. Основоположниками отечественного применения методов индукционного нагрева являются Вологдин В. П. и Лозинский М. Г., а развитие данного направления продолжили Голубь Б. И., Комиссарчик В. М., Потанин А. С., Барменкова Б. Г., Хацаюк М. Ю. Кроме того, вопросы моделирования процессов, происходящих при индукционном нагреве, также привлекают широкий круг исследователей, таких как Карпов С. В., Немков В. С., Плешивцева Ю. Э., Шарапова О. Ю., Graichen K., Chandrasekar S., Ruffini Goldstein R. С. Процесс электронно-лучевой сварки в части технологии, моделирования, управления, автоматизации и создания оборудования широко освещается современными исследователями. Работы Рыкалина Н. Н., Углова А. А., Язовского В. М., Трушников Д. Н., Беленького В. Я. посвящены не только технологическим основам реализации электронно-лучевой сварки, но и подходам к моделированию тепловых процессов в различных прикладных областях. Паршуков Л. И., Гильмутдинов Ф. З., Беленький В. Я., Кротов Л. Н., Ольшанская Т. В., Гореев А. К., Бурдовицин В. А., Климов А. С. в своих работах освещают вопросы расширения областей применения сварки электронным лучом на новые сплавы и материалы. Латышенко Г. И., Соколовская Д. Д., Щербаков А. В., Гончаров А. Л., Чадова И. И. занимаются разработкой как автоматизированного оборудования ЭЛС тонкостенных конструкций, так и методов определения параметров технологических режимов. Методы и алгоритмы управления процессами создания неразъемных соединений исследуются в работах Лаптенка В. Д., Мурыгина А. В., Беленького В. Я., Касицына А. Н., Храмлиука А. В., Иванова Я. Е., Бравермана В. Я., Степашина Р. А., Симонова Д. К., Сидорова В. П., Мельзитдинова А. В., Назаренко О. К., Куцана Ю. Г.

Цель диссертационной работы состоит в повышении эффективности технологических процессов создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций на предприятиях ракетно-космической отрасли за счет улучшения качества управления такими процессами для обеспечения технологических требований к сварным и паяным соединениям.

Под улучшением качества управления в исследовании подразумевается:

1. В задачах управления индукционной пайкой – снижение средней ошибки ответственности технологии, уменьшение разницы температур спаиваемых элементов, сокращение величины перерегулирования.

2. В задачах управления ЭЛС – уменьшение общего времени сварки, сокращение расстояния повторного прохода лучом сварного шва.

3. В задачах управления диффузионной сваркой – обеспечение выполнения на всех этапах процесса управления технологических требований по скорости первоначального нагрева изделия до температуры стабилизации и скорости контролируемого остывания изделия, а также снижение величины перерегулирования.

Сформулированная цель предопределила следующую совокупность решаемых **задач**:

1. Анализ методов и средств управления технологическими процессами создания неразъемных соединений на предприятиях ракетно-космической отрасли и формирование методологии управления в рамках технологического направления Индустрии 4.0.

2. Разработка математических моделей технологических процессов индукционной пайки и электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций на основе теории тепловых процессов.

3. Разработка многокритериальных постановок задач оптимального управления технологическими процессами создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций на основе предложенных математических моделей.

4. Разработка алгоритмов управления технологическими процессами создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций для одноконтурной и двухконтурной реализаций систем автоматизации индукционной пайки, систем автоматизации электронно-лучевой и диффузионной сварки.

5. Практическая реализация компьютерного управления технологическими процессами создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций на основе индукционной пайки, электронно-лучевой и диффузионной сварки.

Методы исследования. При выполнении работы использовался аппарат системного анализа и машинного обучения, теории тепловых процессов в части теории сварочных процессов, теории оптимизации, теории алгоритмизации, теории автоматического управления, теории вероятностей и математической статистики, методология создания прикладных программных систем, включая прикладные интеллектуальные системы. Для решения поставленных задач оптимизации применен гибридный многокритериальный эволюционный алгоритм.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана новая методология построения систем управления технологическими процессами создания неразъемных соединений, основанная на использовании цифровых двойников процессов индукционной пайки и электронно-лучевой сварки, позволяющая повысить качество управления.

2. Разработаны новые модели технологических процессов создания неразъемных соединений, построенные на основе теории тепловых процессов, отличающиеся

от известных учетом геометрических и теплофизических характеристик соединяемых конструкций, позволяющие осуществлять оценку распределения энергии в объеме производимых изделий для повышения качества управления.

3. Разработаны новые многокритериальные постановки задач оптимального управления технологическими процессами создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций, отличающиеся от известных учетом распределения энергии в объеме элементов нагреваемых конструкций, позволяющие повысить качество управления.

4. Разработан новый способ пайки волноводных трактов, основанный на двухконтурном управлении, отличающийся от известных тем, что контроль и программное управление температурой нагрева элементов паяемого соединения осуществляется за счет управления мощностью индукционного генератора и изменения расстояния от индуктора до волновода, что позволяет повысить качество паяных соединений.

5. Разработан новый способ ввода и вывода электронного луча в процессе электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций, отличающийся от известных учетом геометрических и теплофизических характеристик свариваемых деталей, позволяющий минимизировать тепловложения в околошовную зону и тем самым повысить качество сварного соединения.

6. Разработан универсальный комплекс алгоритмических решений, включающий в себя методы одно- и двухконтурного регулирования, управления на основе предварительно сформированных оптимальных траекторий для процесса индукционной пайки, позволяющий гарантированно проводить технологический процесс при различных вариантах компоновки производственного оборудования и вычислительных ресурсов предприятия ракетно-космической отрасли.

Теоретическая значимость. Предложенные математические модели технологических процессов создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций, а также разработанные многокритериальные модели оптимизации управления позволяют проводить исследования в области создания эффективных технологических комплексов и проектировать автоматизированные системы для индукционной пайки и электронно-лучевой сварки ответственных деталей.

Разработанные алгоритмы могут быть востребованы в процессе теоретических разработок при переходе к передовым цифровым технологиям в рамках направления Индустрии 4.0, применяемым при создании ответственных деталей.

Результаты исследования могут быть использованы для развития подходов к управлению технологическими процессами создания неразъемных соединений ответственных деталей тонкостенных конструкций на предприятиях ракетно-космической отрасли.

Практическая значимость. Разработанные программные системы, реализующие управление технологическими процессами создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций, внедрены на предприятии АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (АО «ИСС») и участвуют в создании соединений ответственных изделий при производстве спутников.

Работа выполнена в рамках следующих грантов, государственных субсидий и хозяйственных договоров: грант Минобрнауки России № 075-15-2022-1121 «Гибридные методы моделирования и оптимизации в сложных системах» (2022–2024); грант РФФИ и Правительства Красноярского края № 20-48-242917 «Модели и методы управления процессом электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций» (2021–2022); грант РФФИ и Правительства Красноярского края № 19-48-240007

«Математическое и алгоритмическое обеспечение процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения» (2020–2021); грант Президента РФ № МК-6356.2018.8 «Интеллектуализация технологических процессов формирования неразъемных соединений на предприятиях ракетно-космической отрасли» (2018–2019); грант РФФИ совместно с Правительством Красноярского края и предприятиями, осуществляющими деятельность и имеющими государственную регистрацию на территории Красноярского края, № 18-48-242006 «Математическое и физическое моделирование процессов, происходящих при индукционной пайке трубопроводов в защитных средах» (2018–2019); грант РФФИ и Правительства Красноярского края № 17-48-240098 «Моделирование тепловых процессов при электронно-лучевой сварке сканирующим электронным пучком» (2017–2018); грант РФФИ и Правительства Красноярского края № 16-48-242029 «Математическое и физическое моделирование процессов, происходящих при индукционной пайке элементов волноводных трактов» (2017–2018); грант Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 2017032101938 «Разработка автоматизированного комплекса электронно-лучевой аппаратуры для сварки тонкостенных узлов и деталей космических аппаратов» (2017); хозяйственный договор с АО «ИСС» № Б/Н от 27.04.2016 на тему «Модернизация комплекса автоматизированного оборудования и технологии для пайки волноводных трактов с использованием индукционного нагрева» (2016); хозяйственный договор с АО «ИСС» № 1-15 от 15.03.2015 на тему «Разработка, изготовление и внедрение автоматизированной системы индукционного нагрева для установки диффузионной сварки» (2015–2016).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методология построения систем управления технологическими процессами создания неразъемных соединений, основанная на использовании цифровых двойников процессов индукционной пайки и электронно-лучевой сварки, позволяет повысить качество управления в части соответствия программе процесса.

2. Разработанные модели процессов создания неразъемных соединений позволяют повысить качество управления процессом индукционной пайки в части повышения соответствия технологии и снижения перерегулирования, и процессом электронно-лучевой сварки в части сокращения общего времени сварки и расстояния повторного прохода лучом сварного шва.

3. Разработанные многокритериальные постановки задач оптимального управления технологическими процессами создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций позволяют улучшить качество управления в части повышения соответствия технологии, снижения перерегулирования и повышения количества успешно проведенных процессов.

4. Разработанный способ пайки волноводных трактов, основанный на двухконтурном управлении, позволяет повысить качество паяных соединений в части заполнения припоем технологических зазоров за счет снижения разницы температур паяемых элементов.

5. Разработанный способ ввода и вывода электронного луча в процессе электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций позволяет повысить качество сварного соединения в зоне ввода луча в части обеспечения требуемой геометрии сварного шва.

6. Разработанный универсальный комплекс алгоритмических решений позволяет гарантированно проводить технологические процессы индукционной пайки, электронно-лучевой и диффузионной сварки при различных вариантах компоновки

производственного оборудования и вычислительных ресурсов предприятия ракетно-космической отрасли.

7. Разработанное модельно-алгоритмическое обеспечение, реализованное в виде программных систем, позволяет автоматизировать технологические процессы индукционной пайки, электронно-лучевой и диффузионной сварки с высокой степенью повторяемости таких процессов.

Апробация работы. Процесс разработки и результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных конференциях различного уровня, в том числе XIX, XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV Международных научно-практических конференциях «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 гг.); 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (г. Владивосток, 2018 г.); International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (г. Челябинск, 2016, 2019 гг.); International Russian Automation Conference (г. Сочи, 2018, 2019, 2020 гг.); International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (г. Владивосток, 2018 г.); IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (г. Рим, Италия, 2021 г.); 4th, 5th International Conference on Computational Methods in Systems and Software (г. Злин, Чешская Республика, 2020, 2021 гг.); 9th, 10th Computer Science On-line Conference (г. Злин, Чешская Республика, 2020, 2021 гг.); 6th International Congress on Information and Communication Technology (г. Лондон, Англия, 2021 г.); 10th International Conference on High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production (г. Барнаул, 2020 г.); I, II, III, IV International Workshop on Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering (г. Красноярск, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.); I, II International Scientific Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (г. Красноярск, 2019, 2020 гг.); III, IV International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (2020, 2021 гг.); I, II, III International Conference on Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering (2019, 2020, 2021 гг.); International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing (г. Линц, Австрия, 2021 г.); IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (г. Дели, Индия, 2022 г.); 21st International Symposium INFOTEN-JAHORINA (г. Яхорина, Сербия, Босния и Герцеговина, 2022 г.).

Публикации. По теме данной работы опубликовано 85 печатных работ, среди которых 25 статей в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК, 7 статей в журналах, входящих в Q1/Q2 Web of Science и/или Scopus, 52 другие публикации в изданиях, входящих в Web of Science и/или Scopus и 1 монография. Получены: 1 патент на изобретение, 20 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Наиболее значимые публикации приведены в разделе «Публикации по теме работы» автореферата. Полный список публикаций по теме работы представлен в разделе «Список литературы» диссертации.

Структура работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 388 наименований и приложений. Текст работы изложен на 394 страницах, включая 246 рисунков и 38 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования; поставлена цель и сформулированы задачи исследования; формулируется научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения; описывается апробация результатов исследования на научных конференциях, хозяйственные договоры и научные проекты, в рамках

которых были получены представляемые результаты, а также внедрение результатов на предприятиях ракетно-космической отрасли (РКО); характеризуется опубликованность результатов исследования.

Первая глава работы посвящена анализу методов и средств управления процессами создания неразъемных соединений на предприятиях РКО. В данной главе рассматривается электронно-лучевая сварка (ЭЛС) тонкостенных конструкций, автоматизированная индукционная пайка при производстве волноводных трактов космических аппаратов, а также диффузионная сварка ответственных изделий. Кроме того, затрагиваются вопросы разработки цифровых двойников процессов создания неразъемных соединений, а также формируется методология управления такими технологическими процессами.

Выбор процессов для создания неразъемных соединений в РКО обуславливается особенностями материалов, из которых изготавливаются изделия, а также повышенными требованиями к их эксплуатационным и массо-габаритным характеристикам.

На рисунке 1 представлено место, которое занимают исследуемые в работе процессы индукционной пайки, ЭЛС и диффузионной сварки в производстве продукции РКО.



Рисунок 1 – Схема применения исследуемых процессов при создании неразъемных соединений элементов конструкций изделий РКО

ЭЛС широко применяется для создания соединений в конструкциях из титановых сплавов. При этом настоящее исследование фокусируется на тонкостенных конструкциях вследствие особой сложности их изготовления – при вводе в производство новых изделий возникает проблема выбора эффективных значений технологических параметров процесса сварки, таких как ток луча, ток фокусировки, скорость сварки, ускоряющее напряжение. Кроме того, сложным элементом сварочного цикла являются этапы ввода и вывода электронного луча. Пример тонкостенной конструкции из титанового сплава представлен на рисунке 2.

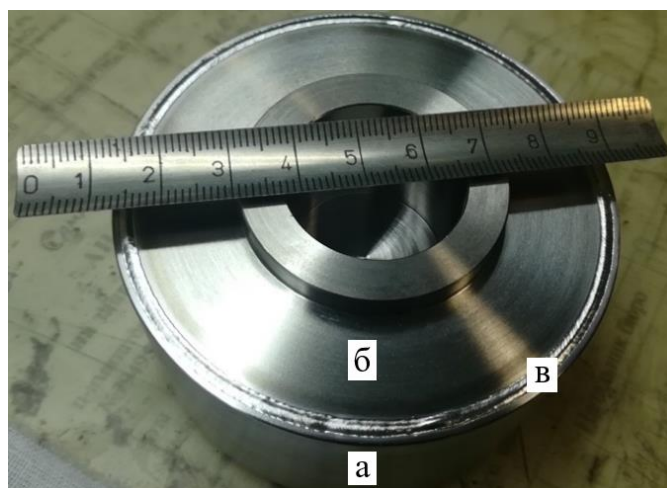


Рисунок 2 – Тонкостенное пустотелое изделие из титанового сплава (образец), толщина стенок от 1 до 2 мм: а – корпус изделия; б – крышка изделия; в – сварной шов

На рисунке 3 представлен общий вид разработанной в рамках диссертации автоматизированной системы ЭЛС.



Рисунок 3 – Автоматизированное оборудование ЭЛС: а – автоматизированное оборудование установки ЭЛС; б – корпус электронно-лучевого оборудования; в – вакуумная камера; г – электронно-лучевая пушка; д – поворотный сварочный стол; е – имитатор изделия

Другие конструкции – волноводные тракты антенно-фидерных устройств (рисунок 4), изготавливающиеся из алюминиевых сплавов, – соединяются высокотемпературным припоем, что ограничивает круг применяемых методов. Одним из наиболее распространенных является метод индукционной пайки.

В настоящее время существует множество систем автоматизации индукционной пайки, однако наибольшую эффективность показывают системы с дистанционным контролем температуры соединяемых элементов изделий посредством двух пирометрических датчиков (рисунок 5).

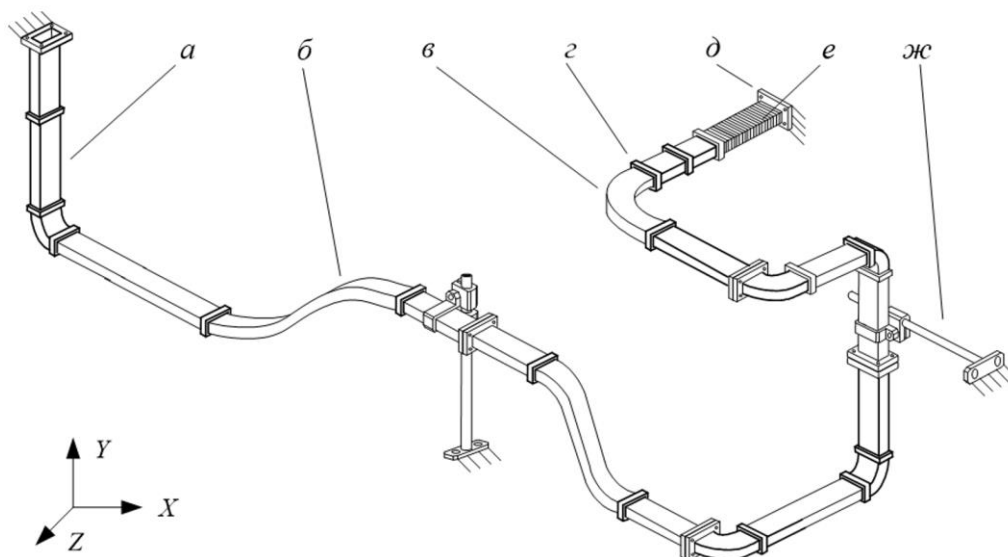


Рисунок 4 – Пример участка волноводно-распределительной системы, где а – прямой элемент; б – криволинейный элемент с переменным радиусом кривизны; в – криволинейный элемент с постоянным радиусом кривизны; г – соединительная муфта; д – фланец; е – гибкая секция; ж – промежуточная опора

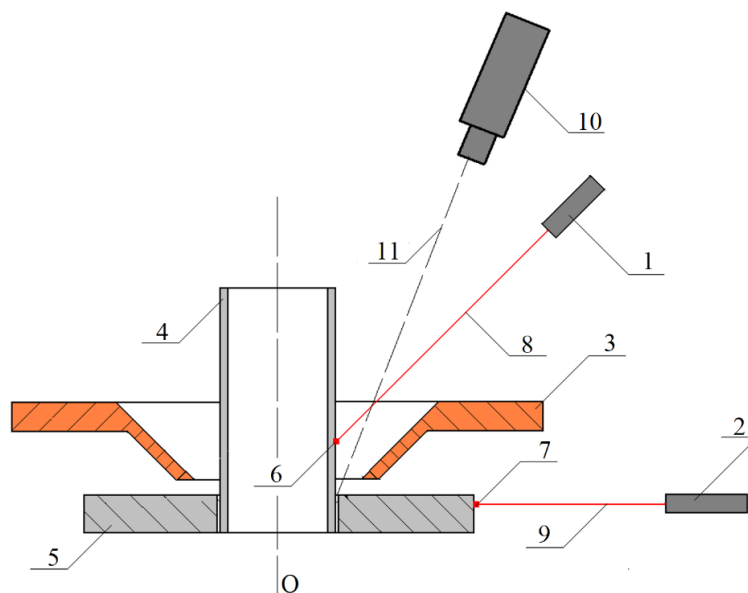


Рисунок 5 – Схема расположения пирометрических датчиков и видеокамеры, где 1 – пирометр для контроля нагрева волноводной трубы; 2 – пирометр для контроля нагрева фланца (муфты); 3 – индуктор; 4 – волноводная труба; 5 – фланец (муфта); 6 – точка контроля нагрева волноводной трубы; 7 – точка контроля нагрева фланца (муфты); 8 – луч пирометра 1; 9 – луч пирометра 2; 10 – видеокамера; 11 – ось видеозахвата

Пример такой системы, разработанной в настоящем исследовании, представлен на рисунке 6.

Для создания неразъемных соединений ответственных конструкций из различных материалов широкое применение получил процесс диффузионной сварки, достоинством которого является высокое качество сварного шва вплоть до полной однородности и неразличимости соединения. Основной сложностью при автоматизации диффузионной сварки является управление нагревом изделия вследствие высокой инерционности распределения тепла в объеме свариваемой конструкции.

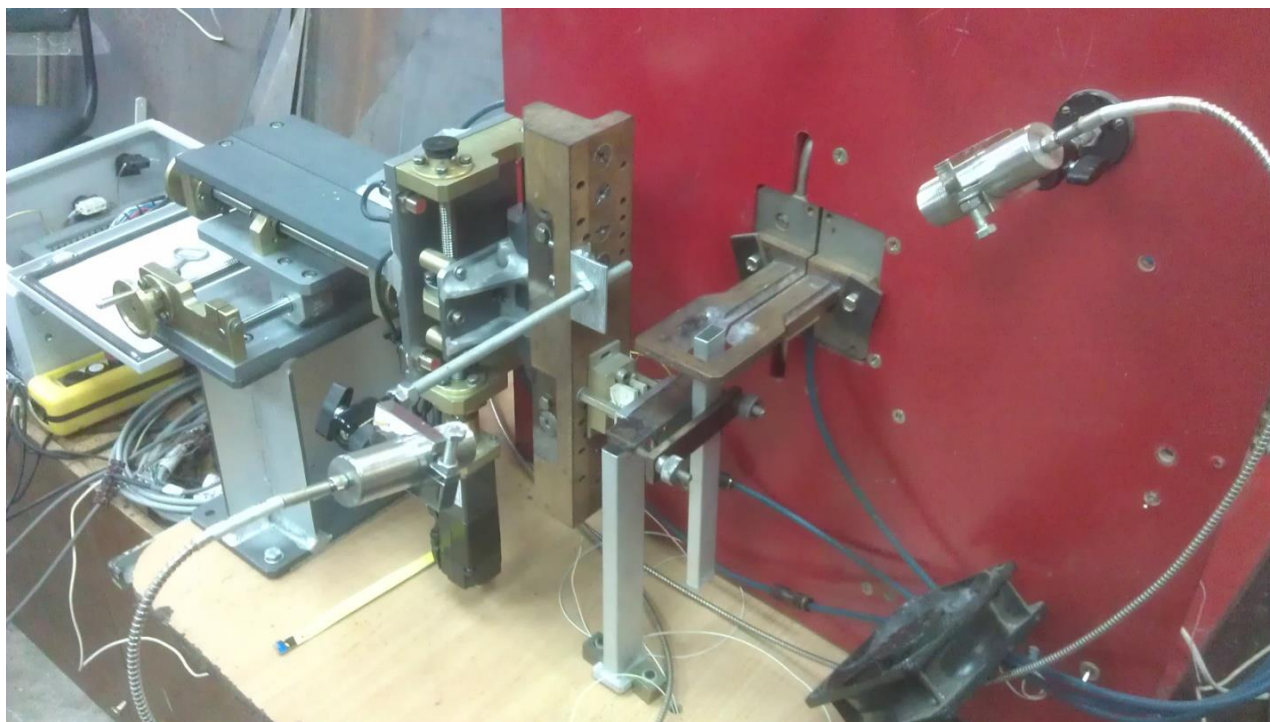


Рисунок 6 – Макет комплекса автоматизированного оборудования для пайки волноводных трактов

Пример конструкции, для изготовления которой применяется метод диффузионной сварки, представлен на рисунке 7. На рисунке 8 представлен общий вид автоматизированной установки диффузионной сварки, разработанной в рамках исследования.



Рисунок 7 – Диффузионная сварка ответственного изделия



Рисунок 8 – Установка диффузионной сварки

В рамках диссертационного исследования предлагается методология управления технологическими процессами создания неразъемных соединений на предприятиях РКО, представленная на рисунке 9, в которой управление, реализуемое в автоматизированной системе, может быть сформировано на основе цифрового двойника технологического процесса, построенного на базе его математической модели.

$$T(x, t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-1}^1 \frac{q}{F c \rho \sqrt{4 \pi a t}} \exp \left(-\frac{(x+jl-2iL)^2}{4at} - bt \right), \quad (1)$$

где x – расстояние от левого торца; L – длина стержня; l – расстояние от торца до источника нагрева; j – количество отражений, учитываемых при расчете.

Формула (1) позволяет сформулировать новые математические модели, описывающие нагрев элементов и сборки волноводных трактов, отличающиеся от известных учетом геометрии изделий и позволяющие проводить отработку параметров технологического процесса индукционной пайки.

Для трубы волноводного тракта (рисунок 10) следует исходить из следующих допущений: труба представляет собой достаточно длинное тело из однородного материала; сечение волноводной трубы по всей длине является постоянным; труба имеет схожий со стержнем механизм теплопередачи и теплопроводности.

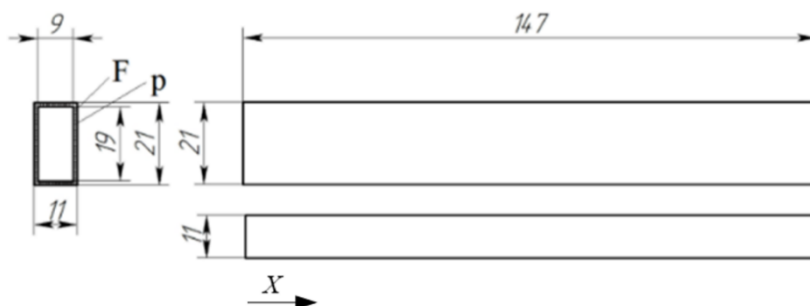


Рисунок 10 – Проекция волноводной трубы с типоразмерами

С учетом ввода ограничений и геометрии представленной проекции трубы (рисунок 11) расчетная формула (1) для процесса нагрева волноводной трубы с учетом геометрических размеров изделия принимает следующий вид:

$$T(x, t) = \sum_{j=-1}^1 \frac{q}{F c \rho \sqrt{4 \pi a t}} \exp \left(-\frac{(x+jl)^2}{4at} - bt \right).$$

Для фланца/муфты (рисунок 11) имеем:

$$T(x, t) = \sum_{i=0}^{n_{ref}} \frac{2Q}{F c \rho \sqrt{4 \pi a t}} \exp \left(-\frac{(x+2iL)^2}{4at} - bt \right),$$

где n_{ref} – количество отражений.

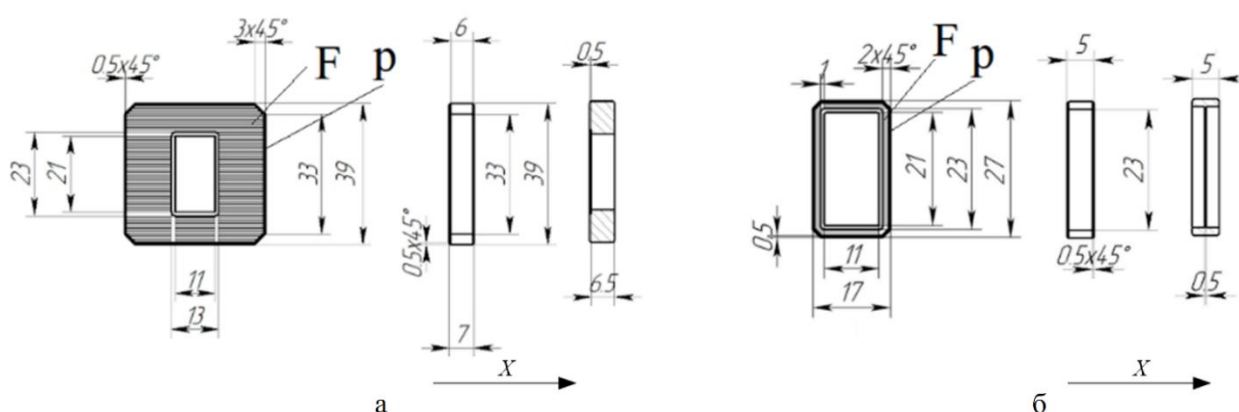


Рисунок 11 – Проекция: а – фланца сборки волноводного тракта; б – муфты сборки волноводного тракта с типоразмерами

В результате проведенных натурных экспериментов выявлено, что ошибка моделей не превышает 5%.

Для создания автоматизированной системы управления требуется разработать модель нагрева сборки волноводного тракта. На рисунке 12 представлена типовая сборка волноводного тракта труба-фланец.

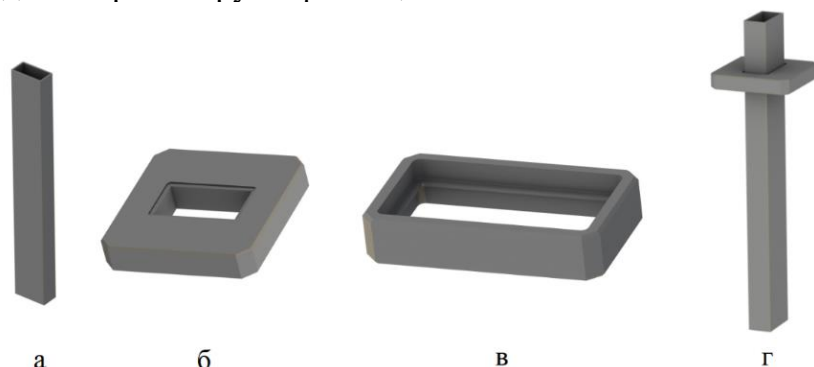


Рисунок 12 – Сборка волноводного тракта труба-фланец и ее элементы: а – труба; б – фланец; в – муфта; г – волноводная сборка

Принципиальное различие режимов нагрева сборок труба-фланец, труба-муфта, а также труба-муфта-труба состоит в законе распределения энергии нагрева между соответствующими элементами сборки. Исходя из особенностей технологии индукционного нагрева и формы индукторов, мы можем допустить при моделировании, что вся энергия, переданная индуктором, выделяется в зоне пайки и будет направлена в паяемую сборку. Таким образом, возможно сформулировать закон распределения количества теплоты между элементами волноводной сборки (рисунок 12г) в следующем виде:

$$q(t) = q_{mp}(t) + q_{fl}(t) = q(t)M(x) + q(t)(1 - M(x)),$$

где $q(t)$ – непрерывно действующий источник теплоты; $q_{mp}(t)$ – воздействие источника на трубу; $q_{fl}(t)$ – воздействие источника на фланец; $M(x)$ – коэффициент распределения теплоты между элементами сборки, $M(x) \in [0, 1]$, а x – расстояние от фланца/муфты до окна индуктора, $x \in [n, m]$, где $n > 0$ и $m \geq n$ соответственно нижняя и верхняя границы перемещения элементов сборки относительно окна индуктора.

Моделирование распределения энергии в пятне нагрева в процессе ЭЛС

В ходе исследования создана математическая модель распределения энергии при различных режимах ввода электронного луча в процессе сварки. На рисунке 13 изображены схемы расчета ввода (а) и вывода (б) электронного пучка в системе координат, связанных со сварным швом, где все точки пересечения осей X и Y являются траекторией ввода луча вдоль оси Z .

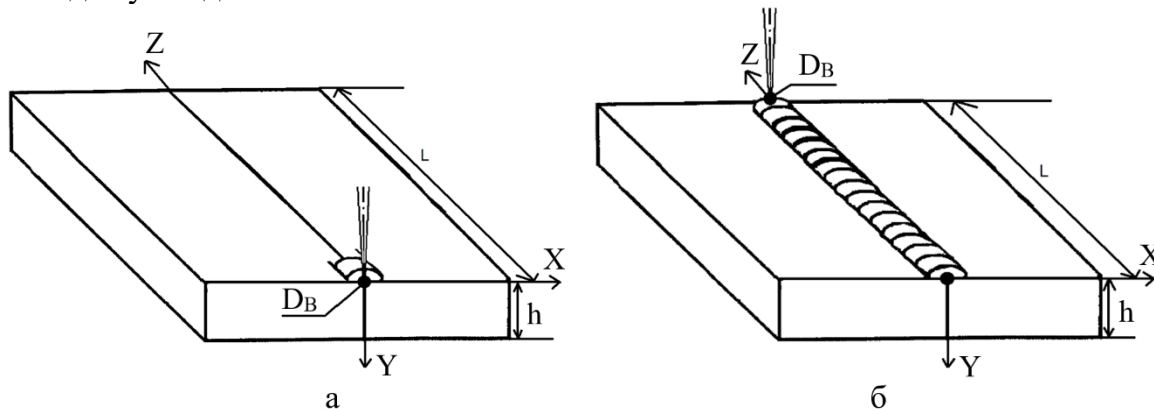


Рисунок 13 – Схема расчета ввода (а) и вывода (б) электронного луча, где h – толщина изделия; L – длина изделия; D_B – диаметр пучка; X, Y, Z – координатные оси

В начальный период действия источника теплоты температуры точек тела монотонно возрастают от начальных значений до температур предельного (стационарного) состояния, которое устанавливается в течение конечного промежутка времени и носит название периода теплонасыщения.

Расчет температур в период монотонного возрастания от начальных значений до температур предельного (стационарного) состояния требуется выполнять с учетом поправочного коэффициента теплонасыщения:

$$\psi(x, y, z, t, q, v) = \frac{T(t) - T_n}{T_{np}(x, y, z, t, q, v) - T_n},$$

где $T(t)$ – температура на стадии теплонасыщения; t – время от момента начала сварки; T_n – начальная температура; $T_{np}(x, y, z, t, q, v)$ – температура предельного состояния; x, y, z – координаты по осям X, Y и Z соответственно; q – мощность источника нагрева; v – скорость сварки.

Под температурой предельного состояния T_{np} понимается сумма температур двух источников: точечного источника на поверхности полубесконечного тела (T_1) и быстро движущегося линейного источника в бесконечной пластине (T_2):

$$T_{np}(x, y, z, t, q, v) = T_{np}(V, t, q, v) = T_1(V, t, q, v) + T_2(V, t, q, v),$$

где $V = (x, y, z)$ – точка в объеме материала изделия.

Формула для состояния температурного поля при воздействии быстро движущегося точечного источника:

$$T_1(V, t, q, v) = T_n + \frac{2q}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{R^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}},$$

где $c\rho$ – теплоемкость материала; a – коэффициент температуропроводности; t – время, отсчитываемое от момента прохождения источника через сечение, в котором находится рассматриваемая точка; R – расстояние от линии движения источника до рассматриваемой точки; τ – переменная интегрирования по времени.

Формула для состояния температурного поля при воздействии быстро движущегося линейного источника:

$$T_2(V, t, q, v) = T_n + \frac{q}{4\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{2\lambda\tau}{c\rho\delta} - \frac{r^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}},$$

где r – расстояние от линии движения источника до рассматриваемой точки; δ – толщина свариваемого изделия; λ – коэффициент теплопроводности.

Таким образом, температура сварки на этапе ввода луча может быть рассчитана по формуле:

$$T(V, t, q, v) = T_n + (T_{np}(x, y, z, t, q, v) - T_n)[\Psi(t) - \Psi(t - t_k)],$$

где $\Psi(t)$ – коэффициент теплонасыщения, соответствующий длительности нагрева; $\Psi(t - t_k)$ – коэффициент теплонасыщения, соответствующий длительности работы стока теплоты $t - t_k$; t и t_k – соответственно, время начала и окончания ввода электронного луча.

На рисунке 13б изображена схема расчета электронного пучка в процессе сварки на этапе вывода луча в системе координат, связанных со сварным швом.

В данной работе с учетом вводимых ограничений были выбраны следующие схемы нагреваемого тела: полубесконечная пластина и бесконечный стержень. При этом подвижный источник теплоты был представлен совокупностью мгновенных источников, действующих последовательно во времени.

Полученное выражение для вычисления температурного поля на этапе вывода электронного луча имеет следующий вид:

$$T(x, y, z, t, q, v) = T_n + \frac{f(t)q}{4\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \exp\left(-\left(\frac{v^2}{4a} + b\right)\tau - \frac{r^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau},$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – длина радиус-вектора точки A в подвижной системе координат; b – коэффициент теплоотдачи пластины; $f(t)$ – функция управления мощностью.

Третья глава работы посвящена оптимизации процессов создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций. В данной главе предлагаются постановки задач оптимизации управления режимами индукционной пайки и оптимизации этапов ввода и вывода луча при ЭЛС.

Оптимизация режимов управления индукционной пайкой

С целью формирования эффективной траектории управления процессом индукционной пайки в настоящем исследовании предлагается оптимизационная постановка такой задачи, применение которой позволяет производить поиск наилучшего набора управляющих параметров технологического процесса. Технологическая постановка задачи состояла в минимизации разницы температуры нагрева в каждый момент времени одного из элементов сборки волноводного тракта и температуры, задаваемой технологом для обеспечения качественного паяного соединения (программа нагрева).

Однако в процессе экспериментальных исследований было обнаружено, что дополнительно требуется:

1) обеспечивать в каждый момент времени минимальную разницу температур паемых элементов волноводного тракта за счет равномерного распределения между ними вводимой индуктором энергии;

2) для устранения перегревания обеспечить в каждый момент времени минимальную разницу скоростей нагрева паемых элементов волноводного тракта.

Далее рассматривается задача пайки волноводной сборки труба-фланец, однако следует понимать, что рассуждения справедливы и для сборки труба-муфта с заменой в выражениях фланца на муфту. В соответствии с вышесказанным можно сформулировать задачу поиска оптимального управления в непрерывном виде:

$$\begin{cases} \int_{t_0}^{t_n} \|T^{fl}(t) - T^{prg}(t)\| dt \rightarrow \min_{h(t), W(t)}, \\ \int_{t_0}^{t_n} \|T^{fl}(t) - T^{tb}(t)\| dt \rightarrow \min_{h(t), W(t)}, \\ \int_{t_0}^{t_n} \|V^{fl}(t) - V^{tb}(t)\| dt \rightarrow \min_{h(t), W(t)}, \end{cases}$$

где t_0 – время начала технологического процесса; t_n – время завершения процесса; $T^{fl}(t)$ – температура фланца; $T^{tb}(t)$ – температура трубы; $T^{prg}(t)$ – программа нагрева, задаваемая технологом в соответствии с особенностями процесса пайки; $V^{fl}(t)$ – скорость нарастания температуры фланца; $V^{tb}(t)$ – скорость нарастания температуры трубы; $h(t)$ – расстояние изделия от окна индуктора; $W(t)$ – уставка мощности индуктора; t – время; $\|\cdot\|$ – евклидова норма.

Для дальнейшей реализации предлагаемой модели формирования управления процессом индукционной пайки в рамках компьютерной системы управления требуется перевести постановку задачи оптимизации в дискретную форму.

Из трех представленных в общей постановке задачи оптимизации критериев наиболее важными и оказывающими влияние на качество паяного соединения являются два:

- 1) критерий минимизации несоответствия программе нагрева;
- 2) критерий минимизации разброса температур нагрева паяемых элементов.

Третий критерий минимизации разницы скоростей нагрева паяемых элементов является вспомогательным (предназначен для реализации более гладкого управления) и может быть переведен в ограничения. Таким образом, будет получена двухкритериальная постановка задачи оптимизации управления процессом индукционной пайки в дискретном виде:

$$\begin{cases} \sqrt{\sum_{i=0}^n (T_i^{fl} - T_i^{prg})^2} \rightarrow \min_{h, W}, \\ \sqrt{\sum_{i=0}^n (T_i^{fl} - T_i^{tb})^2} \rightarrow \min_{h, W}, \\ \sqrt{\sum_{i=0}^n (V_i^{fl} - V_i^{tb})^2} \leq V_{sp}. \end{cases}$$

Оптимизация формы ввода и вывода электронного луча при сварке тонкостенных конструкций

При вводе луча за слишком короткое время нагреваемая зона может выходить за сварной шов. Таким образом, происходит перенасыщение энергией, что вызывает дефекты в корне сварного шва на этапе ввода луча и возникновение брака.

Если ввод электронного луча осуществляется слишком долго, то ширина сварного шва на длинном промежутке не достигает необходимого значения, что вызывает непровары. Для получения стабильного качества сварного шва и уменьшения количества дефектов необходимо оптимизировать время ввода луча.

Для того чтобы обеспечить наилучшее качество сварного шва в зоне его ввода, необходимо выполнение трех условий:

- 1) время ввода должно быть минимально с целью более быстрого выхода системы управления ЭЛС на установившийся режим функционирования;
- 2) количество энергии, концентрируемой в точках изделия, попадающих в предполагаемую зону сварного шва (S_{in}), должно быть максимально (рисунок 14, зеленая зона);
- 3) количество энергии, концентрируемой в точках изделия, выходящих за предполагаемую зону сварного шва (S_{out}), должно быть минимально (рисунок 14, красная зона).

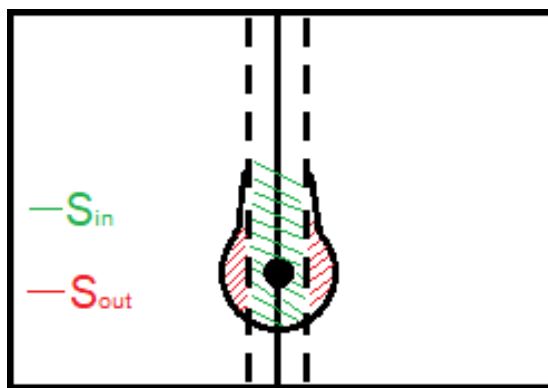


Рисунок 14 – Распределение энергии в зоне шва, где S_{in} – зона эффективного нагрева участка сварного шва; S_{out} – зона неэффективного нагрева выходящего за участок сварного шва

Следовательно, в задаче оптимизации режима ввода электронного луча имеется три критерия:

- 1) $t_{уст} \rightarrow \min$, где $t_{уст}$ – время достижения установившегося процесса;
- 2) $\sum_{p_i \in S_{in}} Q_{p_i} \rightarrow \max$, где p_i – точка в зоне нагрева, Q_{p_i} – количество вводимой энергии в точке p_i ;
- 3) $\sum_{p_i \in S_{out}} Q_{p_i} \rightarrow \min$.

Два из этих критериев, связанных с количеством вводимой энергии, являются согласованными. Таким образом, можно сформулировать математическую постановку задачи двухкритериальной оптимизации, оставив лишь один из критериев по количеству вводимой энергии:

$$\begin{cases} \sum_{p_i \in S_{out}} Q_{p_i} \rightarrow \min, \\ t_{уст} \rightarrow \min, \\ t_{уст} \geq 0. \end{cases}$$

Введем функцию мощности следующего вида:

$$Q_{p_i} = 0,24 I(t) U \eta,$$

где U – ускоряющее напряжение; $I(t)$ – ток пучка; η – коэффициент полезного действия.

$$I(t) = f(t) I_{уст},$$

где $f(t)$ – функция формы ввода луча; $I_{уст}$ – ток в установившемся режиме, вычисляется по формуле:

$$I_{уст} = \frac{I_n}{\sigma \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) \exp\left(-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right) dx,$$

где I_n – ток пучка электронов; x – координата по оси X ; $\varphi(x)$ – эффективный коэффициент вторичной эмиссии; ε, σ – соответственно, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение пучка электронов.

Вследствие требований гладкости и непрерывности функции формы ввода электронного луча $f(t)$, а также наличия граничных условий $f(0) = 0$ и $f(t_{уст}) = 1$ были рассмотрены три основных варианта формы ввода электронного луча: линейная, параболическая с постепенным нарастанием интенсивности ввода энергии и параболическая со снижением интенсивности ввода энергии. Для каждого из вариантов функции формы ввода можно составить модель оптимизации режима ввода луча:

- для линейной функции формы ввода (2);
- для квадратичной функции с нарастающей интенсивностью (3);
- для квадратичной функции со снижающейся интенсивностью (4).

$$\begin{cases} \sum_{p_i \in S_{out}} 0,24 \frac{t}{t_{уст}} I_{уст} U \eta \rightarrow \min, \\ t_{уст} \rightarrow \min, \\ t_{уст} \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sum_{p_i \in S_{out}} 0,24 \left(\frac{1}{t_{уст}^2} t^2\right) I_{уст} U \eta \rightarrow \min, \\ t_{уст} \rightarrow \min, \\ t_{уст} \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sum_{p_i \in S_{out}} 0,24 \left(-\frac{1}{t_{уст}^2} t^2 + \frac{2}{t_{уст}} t \right) I_{уст} U \eta \rightarrow \min_{t_{уст}}, \\ t_{уст} \rightarrow \min, \\ t_{уст} \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для автоматизации режима вывода электронного луча была разработана оптимизационная модель, зависящая от режима его ввода, геометрических размеров изделия и технологических параметров, используемых в процессе сварки.

Рассмотрим динамику нагрева в некоторой произвольной точке $x_i = x(t_i)$ тонкостенной конструкции в процессе ЭЛС, изображенную на рисунке 15.

В рамках данной работы предполагается, что точка x_i принадлежит отрезку сварного шва, на котором производится ввод-вывод луча. Вследствие того, что технологический процесс ЭЛС проходит при постоянной скорости, то для вычисления значения координаты x_i можно применить формулу равномерного движения, то есть: $x_i = vt_i$, где v – скорость сварки.

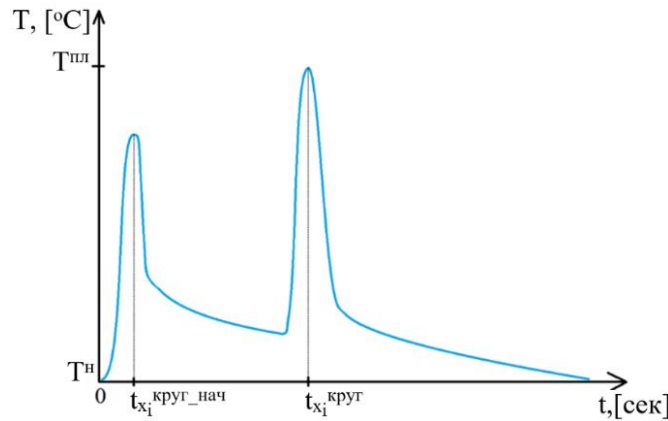


Рисунок 15 – Схема нагрева тонкостенной конструкции в процессе ЭЛС на участке ввода луча, где $t_{xi}^{круг_нач}$ – момент времени, когда электронный луч впервые пройдет через точку x_i ; $t_{xi}^{круг}$ – момент времени, когда электронный луч пройдет полный круг и вернется в точку x_i

На первоначальном этапе при приближении электронного пучка к рассматриваемой точке x_i происходит постепенное увеличение температуры в ней с максимумом, меньшим температуры плавления ($T^{пл}$), в момент $t_{xi}^{круг_нач}$ непосредственного прохождения луча. В дальнейшем происходит постепенное снижение температуры до момента $t_{xi}^{круг}$, когда электронный луч вновь приблизится к точке x_i по завершению оборота на этапе вывода луча. При этом для формирования в зоне вывода луча качественного сварного соединения необходимо при повторном прохождении электронного луча передать такую энергию в точку x_i , чтобы температура в ней достигла температуры плавления материала изделия $T^{пл}$.

Рассмотрим поперечное сечение сварного шва, изображенное на рисунке 16. Целью управления процессом ЭЛС является формирование сварного шва заданной глубины (не более толщины изделия) и заданной ширины по поверхности в координатах от $-\Delta y$ до Δy (Δy – полуширина предполагаемого сварного шва). При одной и той же ширине сварного шва можно получать различную глубину проплавления за счет варьирования фокуса электронного луча, что находится за рамками данного научного исследования. На рисунке 16 показана зона сварного шва $Y^{шов} = \{y \mid -\Delta y \leq y \leq \Delta y\}$ и зона $Y = \{y \mid y_1 \leq y \leq y_n\}$, находящаяся в фокусе интереса данного исследования. Температура в точках множества $Y - Y^{шов}$ рассматривается с целью ограничения нагрева зон, которые не входят в область предполагаемого сварного шва.

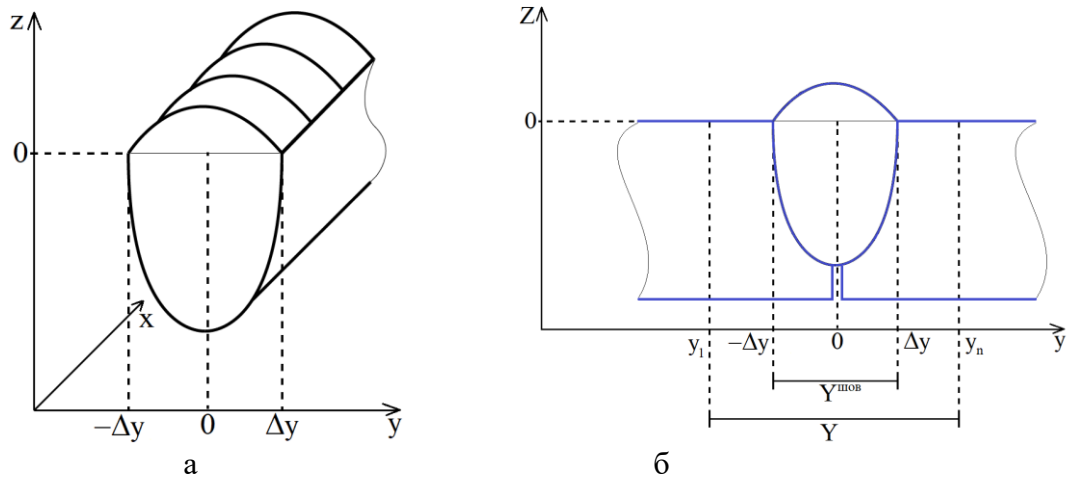


Рисунок 16 – Принципиальный график (а) и поперечное сечение (б) сварного шва изделия, где x – ось длины сварного шва; y – ось ширины сварного шва; z – ось глубины сварного шва

Целью управления является формирование такого объема вводимой энергии, который позволит обеспечить в каждой точке области $Y^{\text{шов}}$ температуру, не меньшую температуры плавления $T^{\text{пл}}$, а во всех точках, входящих в Y и не входящих в $Y^{\text{шов}}$, температуру, меньшую температуры плавления, то есть:

$$\begin{cases} T(x_i, y_j, z = 0, t_i, q, v) \geq T^{\text{пл}}, y_j \in Y^{\text{шов}}, \\ T(x_i, y_j, z = 0, t_i, q, v) < T^{\text{пл}}, y_j \notin Y^{\text{шов}}. \end{cases}$$

где T_{y_j} – температура на поверхности свариваемого изделия в точке y_j ; $Y = \{y_j | j \in [1, \dots, n]\}$ – множество рассматриваемых в при моделировании точек изделия, подвергаемых тепловой обработке; $Y^{\text{шов}} = \{y_j | -\Delta y \leq y_j \leq \Delta y, j \in [1, \dots, n]\}$ – множество рассматриваемых в процессе моделирования точек предполагаемого сварного шва; $y_1 = -\Delta y$ – первая (левая) точка шва, рассматриваемая в процессе моделирования; $y_j = y_1 + j \frac{2\Delta y}{n}$ ($j \in [2, \dots, n]$) – точки шва, рассматриваемые в процессе моделирования (за исключением первой); n – количество точек, в которых рассматривается нагрев изделия; $[-\Delta y, \Delta y]$ – размеры требуемого сварного шва по ширине.

Температура в интересующей точке изделия может быть вычислена как сумма остаточной температуры от первого прохода электронного луча и дополнительной (добавочной) температуры в процессе вывода луча:

$$T^{\text{текущ}}(x(t_i), y_j, z, t_i, q, v) = T_{\text{БВ}}^{\text{ост}}(x(t_i), y_j, 0, t_i, q, v) + T_{\text{БВ}}(x(t_i), y_j, 0, t_i, q, v),$$

где $T^{\text{текущ}}(x(t_i), y_j, z, t_i, q, v)$ – температура изделия в i -й момент времени; $x(t_i)$ – координата по длине сварного шва рассматриваемой точки вывода электронного луча; y_j – координата по ширине сварного шва рассматриваемой точки вывода электронного луча; t_i – рассматриваемый момент времени; $T_{\text{БВ}}^{\text{ост}}(x(t_i), y_j, 0, t_i, q, v)$ – температура остывания, сформированная на этапе ввода электронного луча, с управляемым изменением объема вносимой мощности ($f^{\text{БВ}}(t)$) на этапе ввода; $T_{\text{БВ}}(x(t_i), y_j, 0, t_i, q, v)$ – температура изделия, сформированная в результате воздействия электронного луча на этапе его вывода, вычисляемая по формуле:

$$\begin{aligned} T_{\text{БВ}}(x, y, z, t, q, v) = & \\ = & \begin{cases} 0, t < t^{\text{круг}}, \\ T_{\text{н}} + \frac{f^{\text{БВ}}(t)q}{c\rho\sqrt{4\pi a}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^{t-t^{\text{круг}}} \exp\left[-\left(\frac{v^2}{4a} + b\right)\tau - \frac{R^2}{4a\tau}\right] \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}, t \geq t^{\text{круг}}, \end{cases} \end{aligned}$$

где $f^{\text{ВЫВ}}(t)$ – функция формы вывода электронного луча, оказывающая влияние на количество вносимой мощности на этапе вывода.

При формировании управления выводом электронного луча преследуются следующие основные цели:

- 1) придание изделию температуры, максимально соответствующей температуре плавления материала по всему сечению сварного шва ($y_i \in Y^{\text{ШОВ}}, i \in [1, \dots, n]$);
- 2) обеспечение минимального выхода температуры в зону вне сварного шва ($y_i \notin Y^{\text{ШОВ}}, i \in [1, \dots, n]$) для ограничения ширины сварной ванны по поверхности в рамках заданных технологических требований.

Поэтому запишем двухкритериальную постановку задачи оптимизации:

$$\begin{cases} C_{\text{ШОВ}}^T = \sum_{t_i \in [t^{\text{КРУГ}}, t^{\text{КРУГ}} + t^{\text{УСТ}}]} \sum_{y_j \in Y^{\text{ШОВ}}} |T^{\text{ПЛ}} - T^{\text{ТЕКУЩ}}(x(t_i), y_j, 0, t_i, q, v)| \rightarrow \min_{f^{\text{ВЫВ}}(t_i)}, \\ C_{\text{ВНЕШ}}^T = \max_{t_i \in [t^{\text{КРУГ}}, t^{\text{КРУГ}} + t^{\text{УСТ}}], y_j \notin Y^{\text{ШОВ}}} (T^{\text{ТЕКУЩ}}(x(t_i), y_j, 0, t_i, q, v) - T^{\text{ПЛ}}) \rightarrow \min_{f^{\text{ВЫВ}}(t_i)}, \end{cases}$$

где $t^{\text{УСТ}}$ – время достижения установившегося процесса в конце этапа ввода луча.

Сформулируем $f^{\text{ВЫВ}}(t)$ в дискретном виде:

$$f^{\text{ВЫВ}}(t_i) = \begin{cases} f_1^{\text{ВЫВ}}, t_i = t^{\text{КРУГ}}, \\ f_2^{\text{ВЫВ}}, t_i = t^{\text{КРУГ}} + t^{\text{ШАГ}}, \\ \vdots \\ f_m^{\text{ВЫВ}}, t_i = t^{\text{КРУГ}} + t^{\text{УСТ}}, \end{cases}$$

где $\{f_i^{\text{ВЫВ}}\} (i=1, \dots, m)$ – множество значений функции формы вывода в моменты времени ($t_i - t^{\text{КРУГ}}$); $t^{\text{ШАГ}}$ – шаг управления в системе автоматизации; m – количество моментов управления на этапе вывода электронного луча ($m = t^{\text{УСТ}}/t^{\text{ШАГ}}$).

На основе предложенной выше функции $f^{\text{ВЫВ}}(t_i)$ можно сформировать дискретную функцию управления мощностью $f^Q(t)$ на всем протяжении процесса ЭЛС:

$$f^Q(t_i) = \begin{cases} f^{\text{ВЫВ}}(t_i), t_i \leq t^{\text{УСТ}}, \\ 1, t^{\text{УСТ}} < t_i < t^{\text{КРУГ}}, \\ f_1^{\text{ВЫВ}}, t_i = t^{\text{КРУГ}}, \\ f_2^{\text{ВЫВ}}, t_i = t^{\text{КРУГ}} + t^{\text{ШАГ}}, \\ \vdots \\ f_m^{\text{ВЫВ}}, t_i = t^{\text{КРУГ}} + t^{\text{УСТ}}. \end{cases}$$

Для решения поставленных задач оптимизации в настоящем исследовании применен гибридный многокритериальный эволюционный алгоритм на основе NSGA-2 для глобальной оптимизации и L-BFGS-B для локального поиска.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке семейства алгоритмов одно-, двухконтурного и оптимального управления индукционной пайкой, а также алгоритма управления с оптимизацией этапов ввода и вывода электронного луча для процесса ЭЛС.

Одноконтурный алгоритм управления индукционной пайкой

Для управления процессом индукционной пайки по единственному контуру мощности индуктора (рисунок 17) был разработан алгоритм на основе пропорционального регулятора.

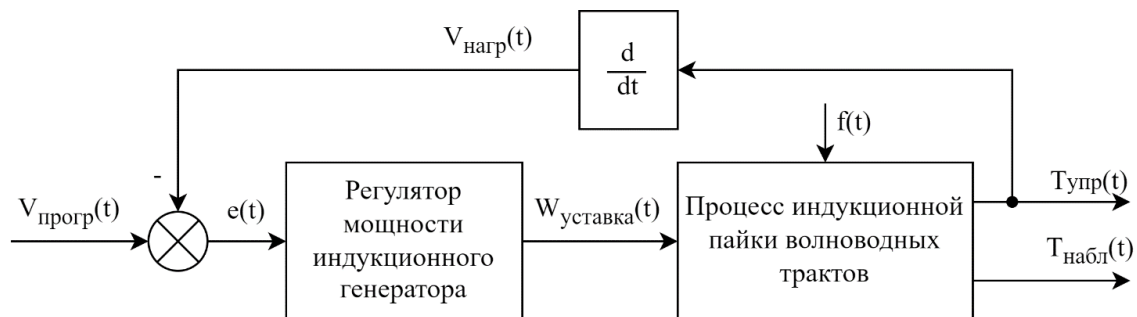


Рисунок 17 – Структурная схема одноконтурной системы управления индукционной пайкой, где $T_{упр}(t)$ – температура фланца/муфты волновода (для управления нагревом); $T_{набл}(t)$ – температура волноводной трубы (наблюдаемая); $V_{нагр}(t)$ – скорость нагрева изделия; $V_{прогр}(t)$ – программа нагрева изделия; $e(t)$ – расхождение скорости нагрева фланца/муфты волновода с программой нагрева; $W_{уставка}(t)$ – уставка мощности, подаваемая на индукционный генератор для управления нагревом; $f(t)$ – вектор возмущающих воздействий

В таком алгоритме управление нагревом изделия осуществляется с целью поддержания требуемой скорости нагрева, а при достижении температуры стабилизации – с целью поддержания этой температуры в течение некоторого времени (времени стабилизации) (рисунок 18).

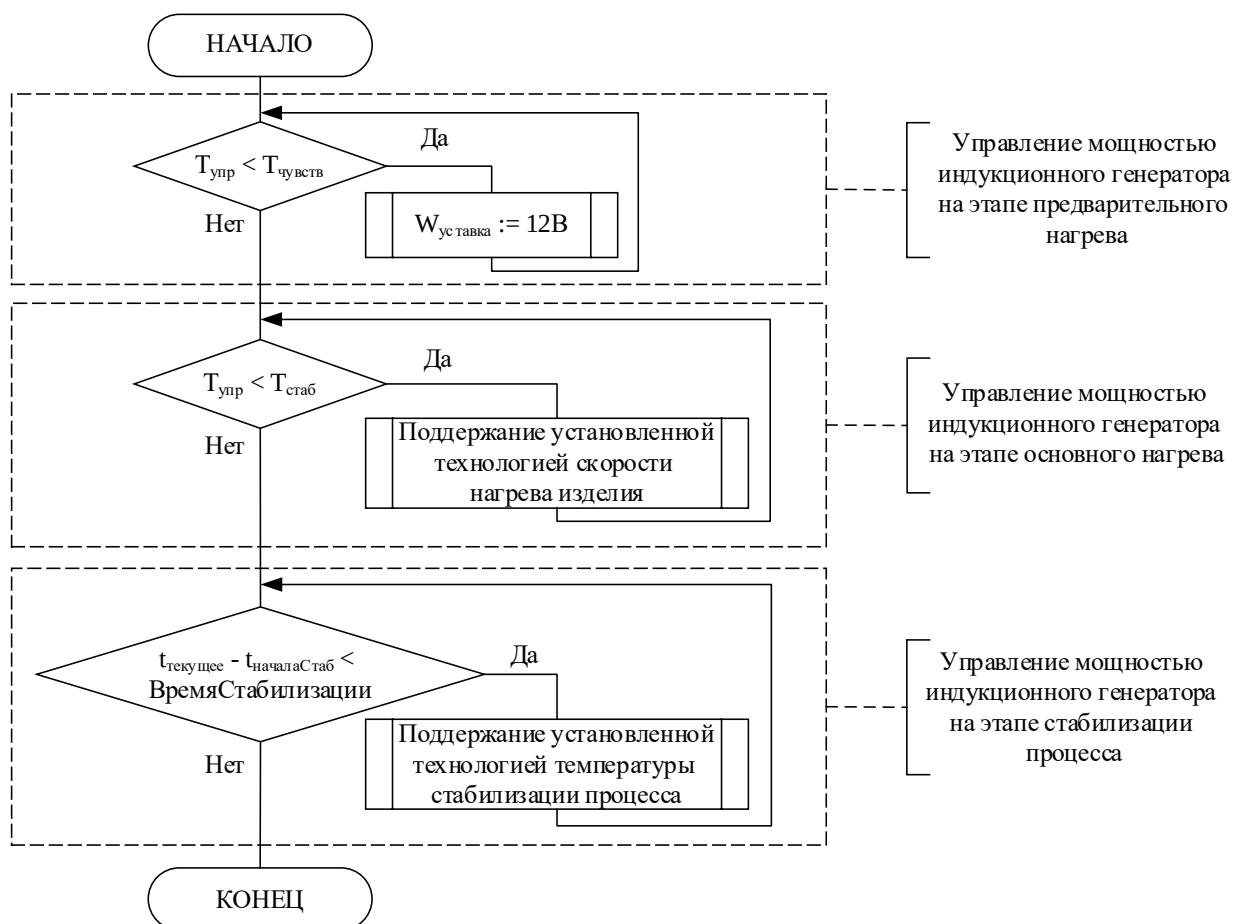


Рисунок 18 – Обобщенный алгоритм одноконтурного управления процессом пайки, где $T_{упр}$ – температура фланца/муфты волновода (для управления нагревом); $T_{чувств}$ – температура чувствительности пирометров; $T_{стаб}$ – значение температуры стабилизации, на которой происходит расплавление припоя; $t_{текущее}$ – текущее время; $t_{началаСтаб}$ – отметка времени, когда система начала процесс стабилизации; $ВремяСтабилизации$ – время, в течение которого необходимо выдерживать изделие при $T_{стаб}$

Такая схема управления, реализованная на базе пропорционального регулятора, позволяет производить эффективное управление 20 раз в секунду.

Двухконтурный алгоритм управления индукционной пайкой

Основная проблема представленного выше метода управления процессом индукционной пайки заключается в сложности настройки технологического процесса, обусловленного влиянием человеческого фактора на этапе наладки процесса технологом. Неправильная настройка начальных параметров технологического процесса не позволяет предсказать результат работы системы. Введение второго контура управления даст возможность повысить качество управления процессом индукционной пайки тонкостенных алюминиевых волноводных трактов космических летательных аппаратов.

Результаты экспериментальных исследований процесса индукционной пайки волноводных трактов показали, что программное регулирование мощности нагрева позволяет управлять только одним параметром – температурой фланца/муфты волновода. Температура трубы же может существенно отличаться от температуры фланца/муфты, различие может составлять до 100–150 градусов Цельсия. При правильном выборе положения относительно плоскости индуктора можно уменьшить разницу температур в области температуры плавления припоя. Однако невозможно полностью исключить диапазон изменения температур из-за разброса толщины труб волноводных трактов. Разница толщины труб может составлять более 20% от номинального значения. Данную проблему можно решить путем автоматизированной регулировки расстояния от фланца/муфты до индуктора во время технологического процесса пайки (рисунок 19).

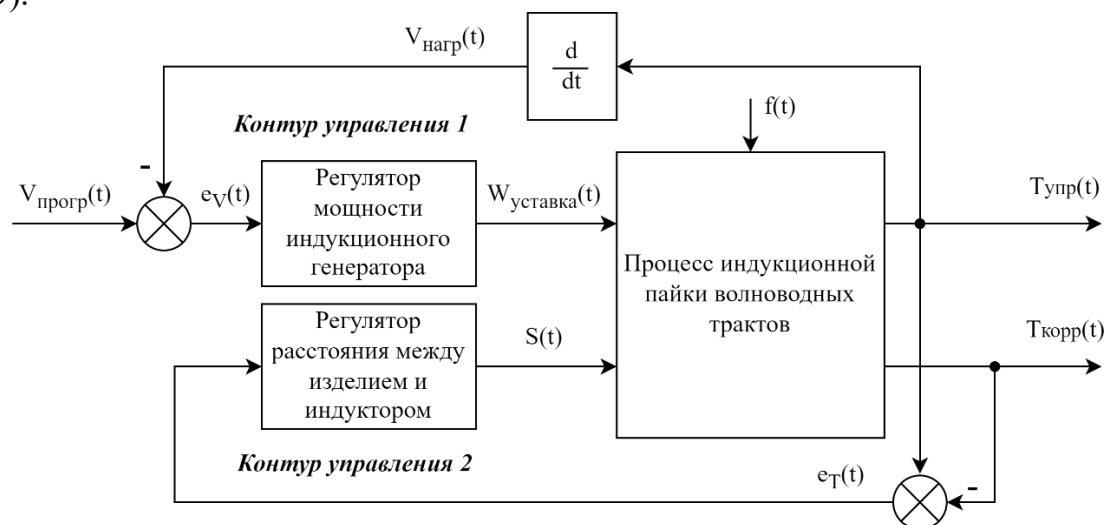


Рисунок 19 – Структурная схема двухконтурной системы управления индукционной пайкой, где $T_{упр}(t)$ – температура нагрева фланца/муфты волновода (для управления нагревом); $T_{корт}(t)$ – температура нагрева волноводной трубы (для коррекции положения заготовки относительно индуктора); $V_{нагр}(t)$ – скорость нагрева изделия; $V_{прогр}(t)$ – программа нагрева изделия; $e_V(t)$ – расхождение скорости нагрева фланца/муфты волновода с программой нагрева; $e_T(t)$ – расхождение температуры нагрева фланца/муфты и волноводной трубы; $W_{установка}(t)$ – установка мощности, подаваемая на индукционный генератор для управления интенсивностью нагрева; $S(t)$ – значение расстояния от фланца/муфты до индуктора, подаваемое на манипулятор; $f(t)$ – вектор возмущающих воздействий

Контур управления 1 обеспечивает управление мощностью, подаваемой на индуктор. Контур управления 2 обеспечивает управление приводом электромеханического манипулятора и позволяет изменять положение элементов сборки волноводного тракта относительно индуктора.

На рисунке 20 представлена блок-схема управления процессом пайки.

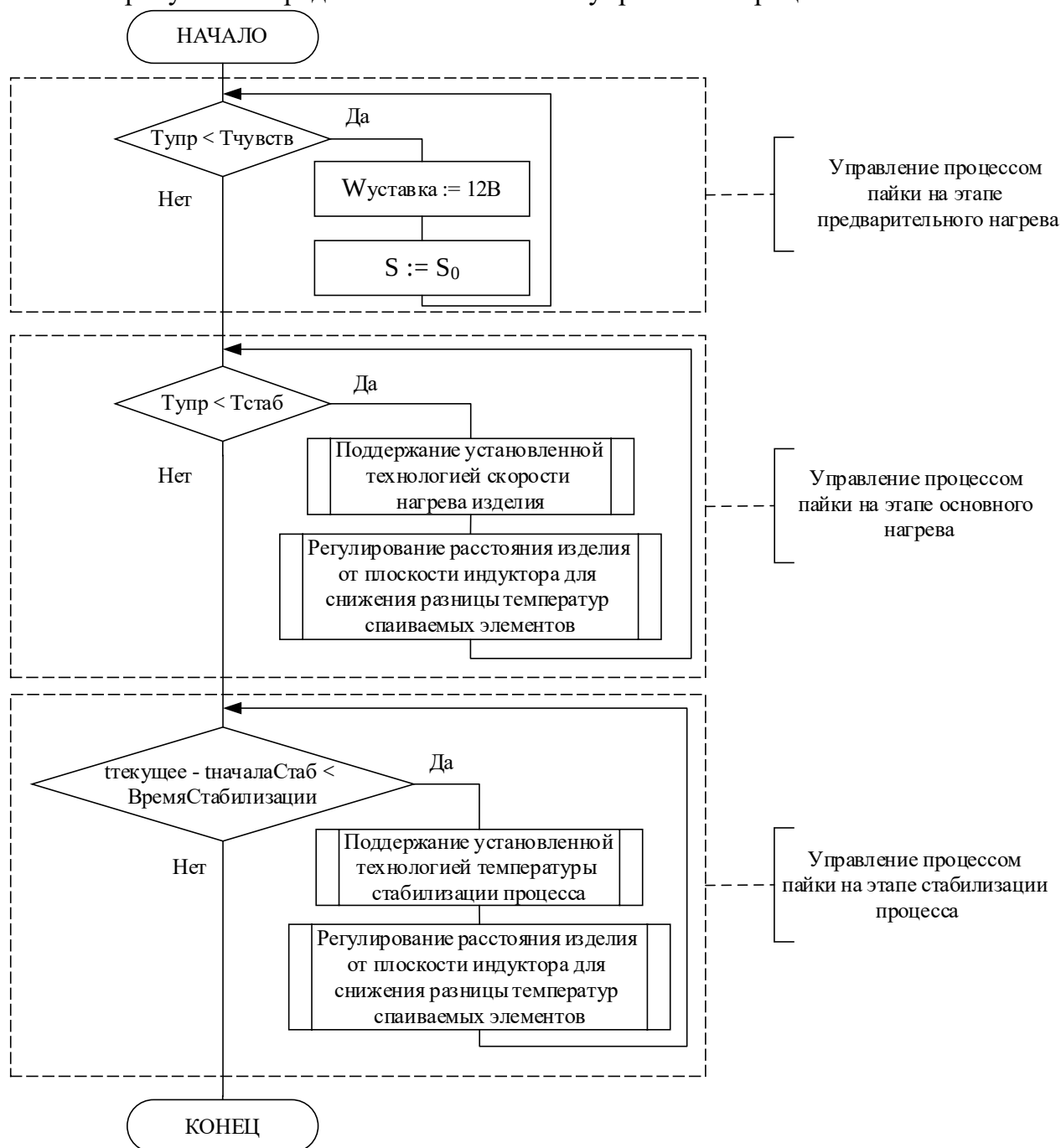


Рисунок 20 – Обобщенный алгоритм двухконтурного управления процессом пайки, где S_0 – начальное значение расстояния от фланца/муфты до индуктора.

Алгоритм управления на основе оптимальных траекторий

Предложенная в третьей главе модель оптимизации режимов управления индукционной пайкой была имплементирована в алгоритме управления, позволяющем в отсутствие априорной информации о поведении волноводной сборки в процессе индукционной пайки проводить эффективное управление процессом.

На рисунке 21 представлена блок-схема управления процессом автоматической пайки на основе оптимальной траектории управления, в рамках которого по сформированной в модуле моделирования и оптимизации технологического процесса оптимальной траектории управления производится нагрев и стабилизация температуры паяемых элементов волноводного тракта.

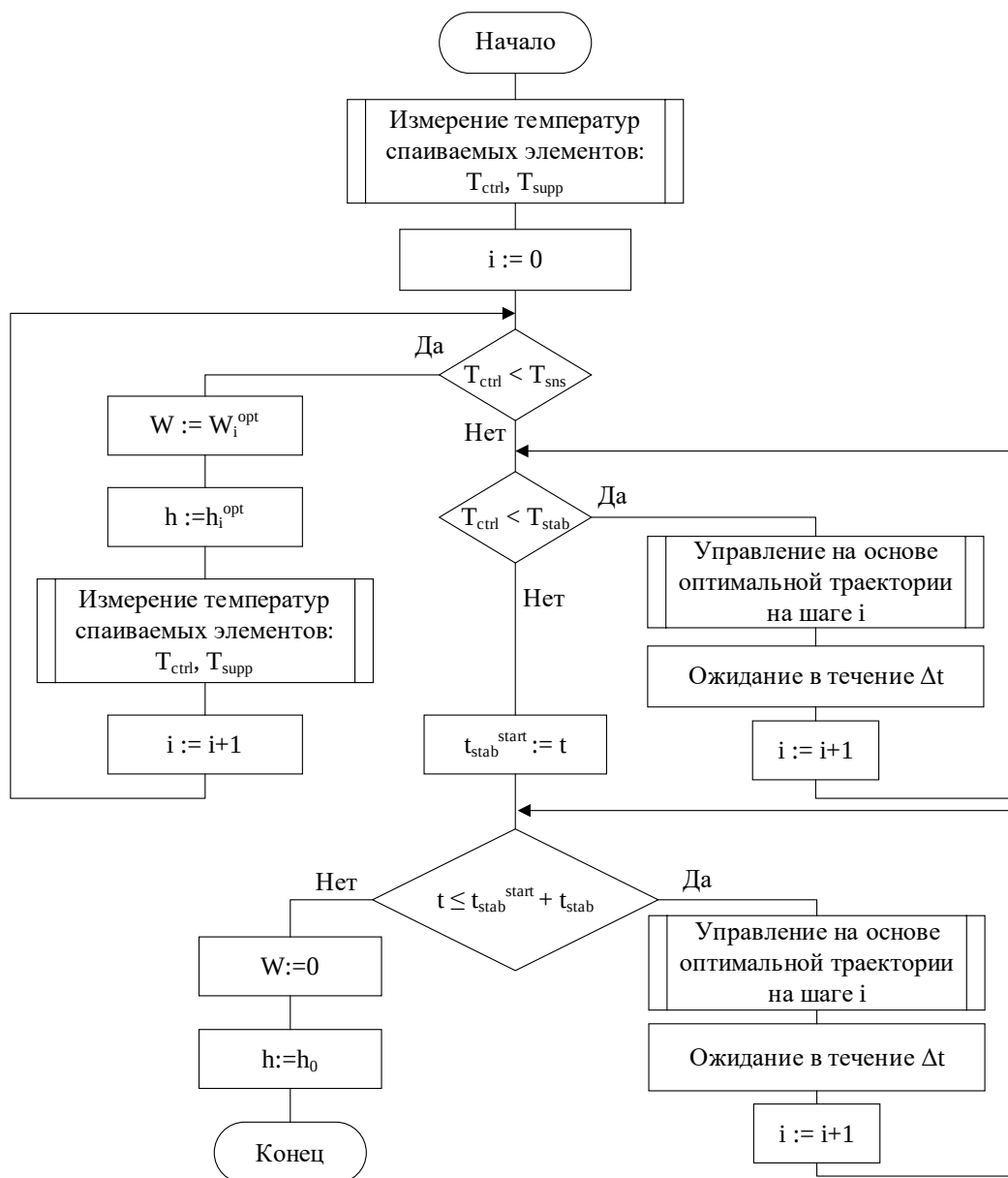


Рисунок 21 – Алгоритм управления процессом автоматической пайки на основе оптимальной траектории, где T_{ctrl} – температура нагрева фланца/муфты волновода (для управления нагревом); T_{supp} – температура нагрева волноводной трубы (для коррекции положения заготовки относительно индуктора); T_{sns} – температура чувствительности пирометров; T_{stab} – значение температуры стабилизации, на которой происходит расплавление припоя; W – уставка мощности, подаваемая на индукционный генератор для управления интенсивностью нагрева; W_i^{opt} – значение уставки мощности в соответствии с программой оптимального управления на шаге i ; h – значение целевого расстояния от фланца/муфты до индуктора, подаваемое на электромеханический манипулятор; h_i^{opt} – значение целевого расстояния от фланца/муфты до индуктора в соответствии с программой оптимального управления; h_0 – начальное расстояние от фланца/муфты до индуктора; t – время от начала процесса пайки; Δt – интервал дискретности управления; t_{stab} – время, в течение которого необходимо выдерживать изделие при T_{stab} ; t_{stab}^{start} – время начала стабилизации

На рисунке 22 представлена блок-схема оптимального управления на шаге i , обеспечивающая два контура регулирования: управление мощностью индукционного генератора и расстоянием от изделия до окна индуктора на основе сформированной ранее оптимальной траектории; коррекция оптимальной траектории управления в случаях снижения эффективности ее использования вследствие внешних факторов.



Рисунок 22 – Управление на основе оптимальной траектории на шаге i

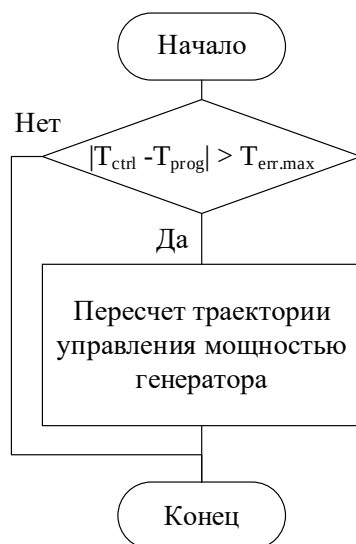


Рисунок 23 – Коррекция мощности генератора в процессе оптимального управления на шаге i , где $T_{err.max}$ – заданное максимально возможное отклонение нагрева от программы; T_{prog} – целевая температура изделия на шаге i программы нагрева



Рисунок 24 – Коррекция расстояния от фланца/муфты до индуктора в процессе оптимального управления на шаге i , где $T_{sp.max}$ – заданное максимально возможное отклонение температуры фланца/муфты от волноводной трубы

На рисунке 23 представлена блок-схема коррекции мощности генератора W в процессе оптимального управления, которая позволяет обеспечить повышение качества предварительно сформированной оптимальной траектории управления за счет наличия обратной связи по температуре процесса.

На рисунке 24 представлена блок-схема коррекции расстояния h в процессе оптимального управления, которая позволяет обеспечить повышение качества предварительно сформированной оптимальной траектории управления за счет наличия обратной связи по температуре процесса.

Алгоритм управления ЭЛС с оптимизацией этапов ввода и вывода луча

Алгоритм управления ЭЛС с оптимизацией этапов ввода и вывода луча включает в себя три подалгоритма:

- алгоритм оптимизации формы и времени ввода электронного луча, позволяющий на основе полученных данных об изделии и результатов математического моделирования технологического процесса сварки получить эффективную функцию формы ввода луча и время ввода луча;
- алгоритм оптимизации процесса вывода электронного луча, выполняющий на основе информации об изделии и форме ввода луча расчет оптимального значения времени вывода луча. Затем полученные параметры процессов ввода и вывода луча передаются в модуль работы с базой данных и модуль пользовательского интерфейса;
- алгоритм мониторинга и управления процессом ЭЛС.

На основе разработанной двухкритериальной задачи оптимизации был разработан алгоритм оптимизации режима ввода (рисунок 25).

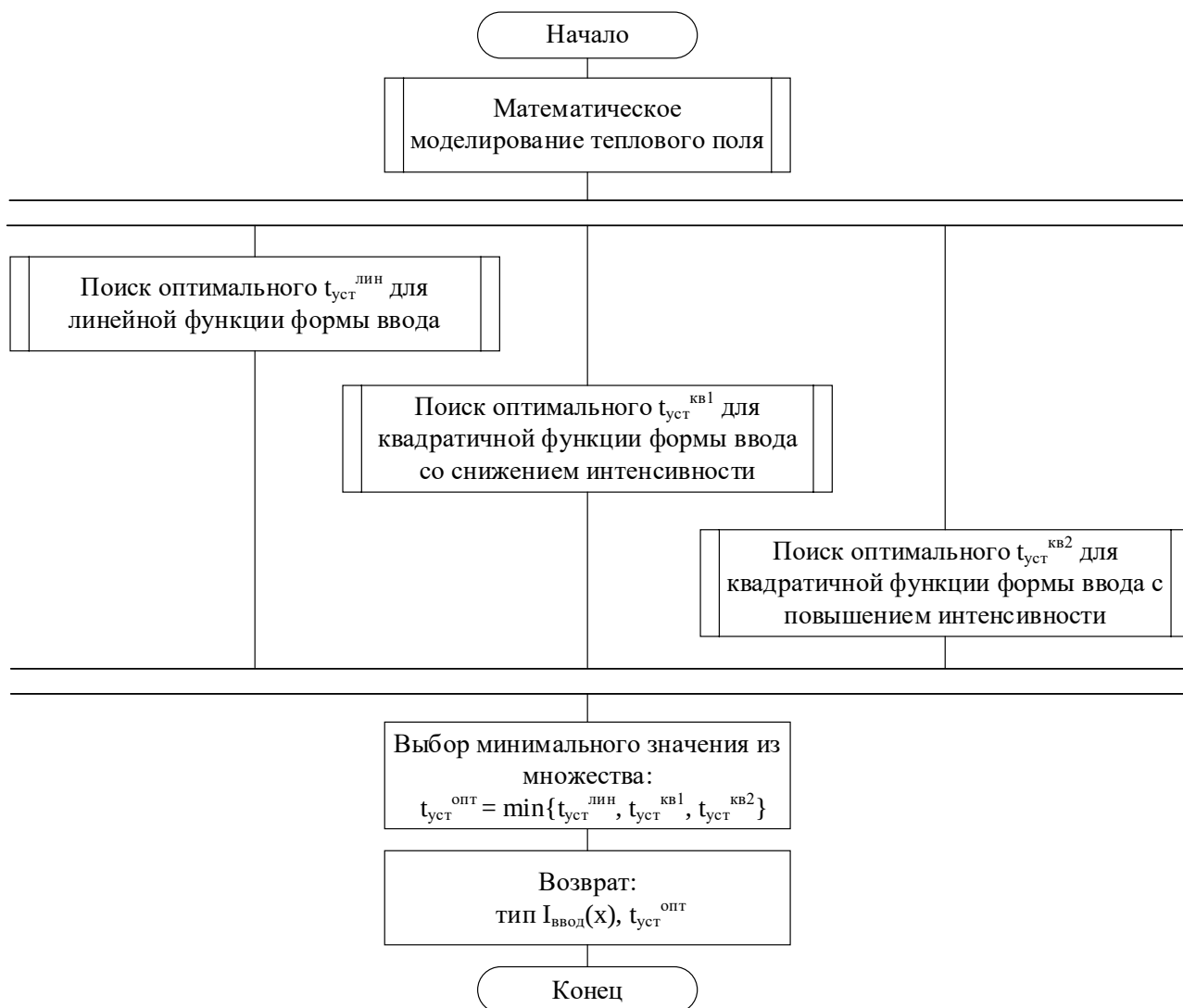


Рисунок 25 – Оптимизация формы и времени ввода луча, где $t_{уст}^{лин}$ – установившееся время линейной функции формы ввода; $t_{уст}^{кв1}$ – установившееся время квадратичной функции формы ввода со снижением интенсивности; $t_{уст}^{кв2}$ – установившееся время квадратичной функции формы ввода с повышением интенсивности; $t_{уст}^{опт}$ – оптимальное установившееся время

На схеме выше представлены четыре подпроцесса. В подпроцессе математического моделирования расчета теплового поля на основе разработанных математических моделей производится вычисление распределения энергии, вводимой в изделие. Далее выполняется поиск значений $t_{уст}$, а именно $t_{уст}^{лин}$, $t_{уст}^{кв1}$, $t_{уст}^{кв2}$. После осуществляется выбор минимального значения, которое принимается как $t_{уст}^{опт}$ исходя из полученных результатов, и далее возвращаются значения оптимального установившегося времени $t_{уст}^{опт}$ и тока луча при вводе $I_{ввод}(x)$.

На рисунке 26 представлена блок-схема оптимизации процесса вывода луча. В подпроцессе моделирования температуры остывания $T_{вв}^{ост}$ производится вычисление температуры по представленной в главе 2 модели. Далее оптимизируется траектория управления выводом электронного луча с применением гибридного эволюционного алгоритма решения задач оптимизации, использующего алгоритм NSGA-2 в качестве глобального оптимизатора и L-BFGS-B в качестве алгоритма локального поиска.



Рисунок 26 – Эволюционный алгоритм построения траектории оптимального управления выводом луча

В результате в качестве решения выбирается индивид из аппроксимации множества Парето с минимальным $C_T^{\text{шов}}$. После выводятся оптимальные значения функции формы вывода луча ($f_{\text{опт}}^{\text{выв}}(t_i)$) для всех моментов времени вывода луча t_i .

На рисунке 27 представлена блок-схема мониторинга и управления процессом ЭЛС.

На рисунке 28 представлена блок-схема управления вводом электронного луча с оптимизацией. На рисунке 29 представлена блок-схема управления выводом электронного луча с оптимизацией, состоящая из восьми этапов.

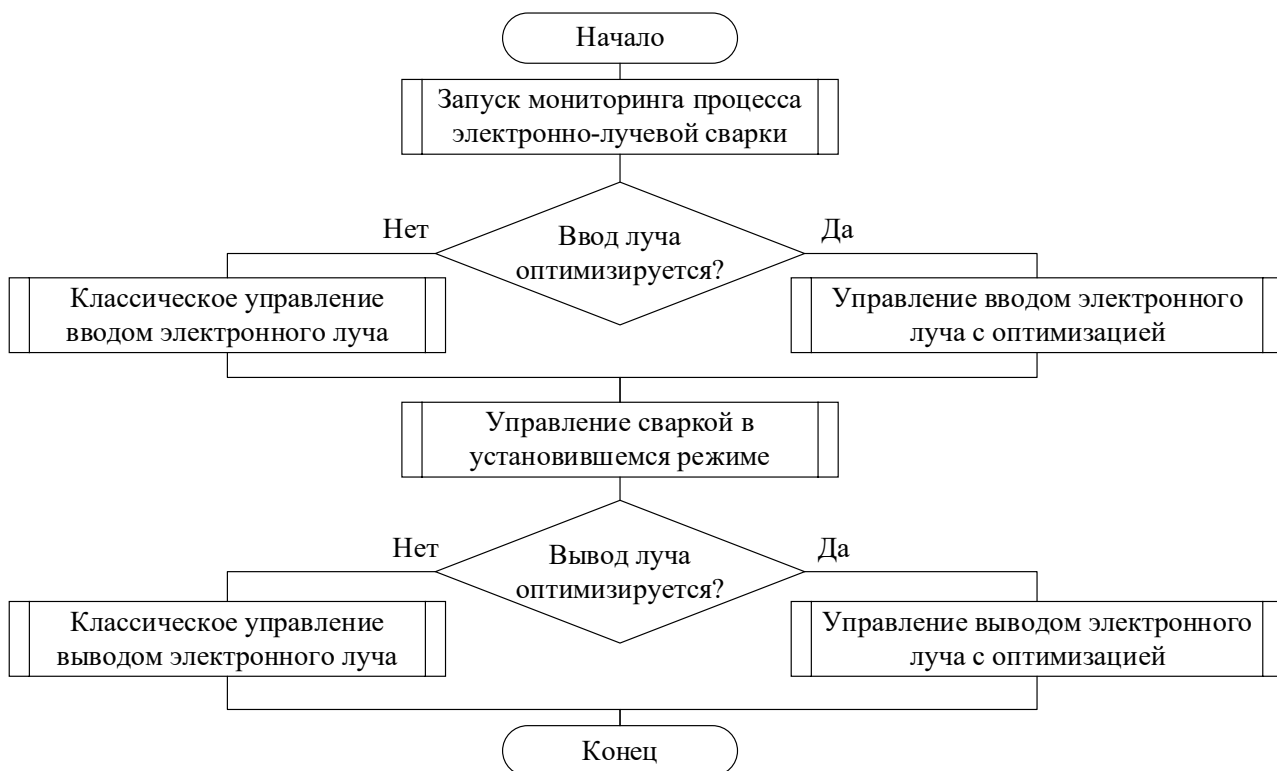


Рисунок 27 – Мониторинг и управление процессом ЭЛС

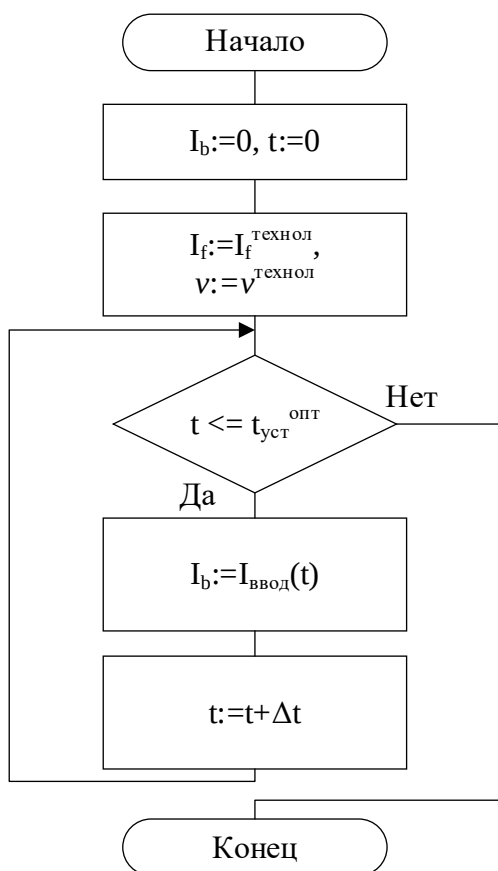


Рисунок 28 – Управление вводом электронного луча с оптимизацией

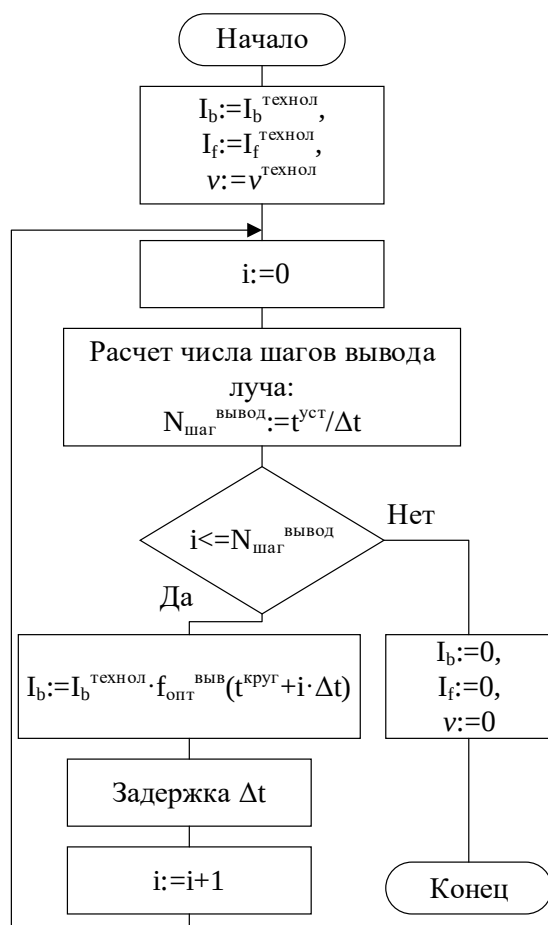


Рисунок 29 – Алгоритм оптимального управления выводом электронного луча

Алгоритм управления диффузионной сваркой

Для обеспечения установленного нормативами процесса нагрева, выдержки и остывания изделия был разработан алгоритм управления для установки диффузионной сварки, в последующем реализованный для программируемого логического контроллера (ПЛК) ОВЕН (рисунки 30 и 31).

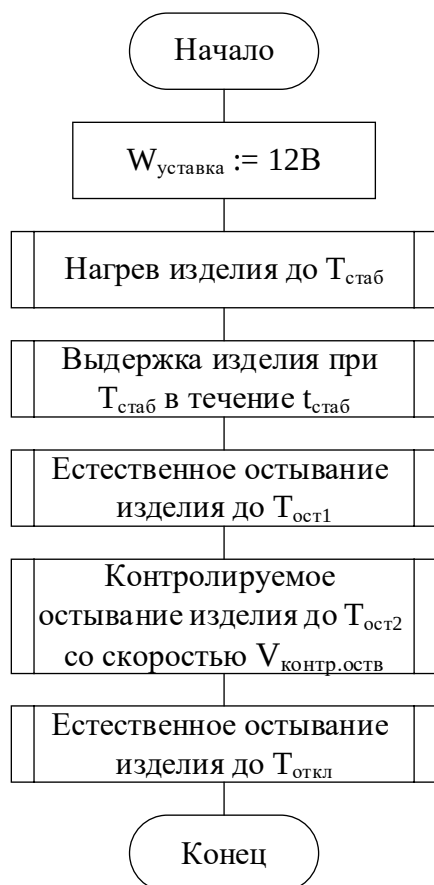


Рисунок 30 – Обобщенный алгоритм управления диффузионной сваркой

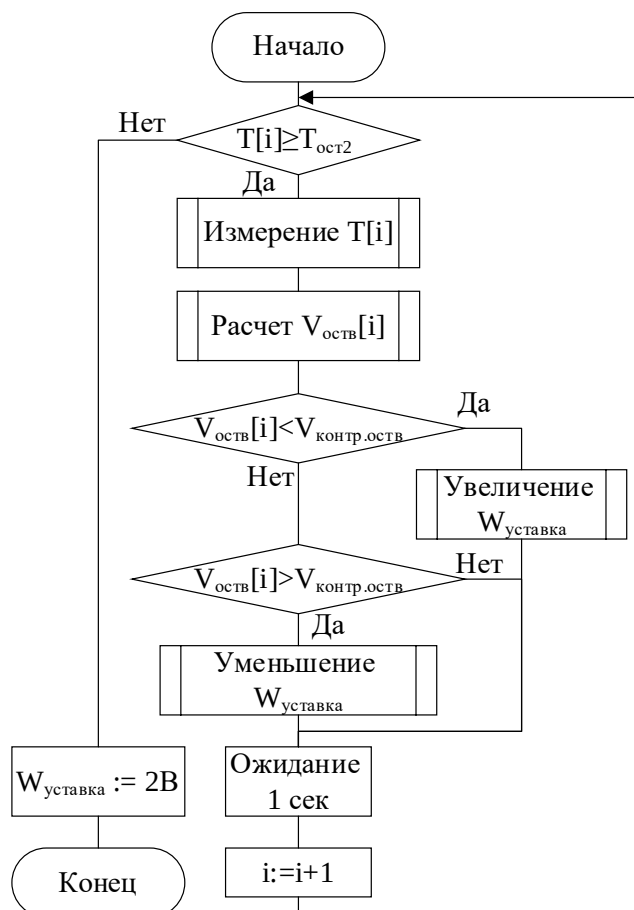


Рисунок 31 – Алгоритм контролируемого остывания изделия

На блок-схеме приняты следующие обозначения: $W_{установка}$ – установка мощности на индукторе; i – номер шага управления; $T[i]$ – температура изделия на шаге i ; $T_{стаб}$ – температура стабилизации, зависит от материала изделия (1100 °С для сплава титана VT-6); $V_{контр.оств}$ – скорость остывания, задается и отслеживается для управления процессом; $V_{оств}[i]$ – скорость остывания изделия на шаге i .

Схема использования разработанных алгоритмов управления технологическими процессами создания неразъемных соединений

Созданные в рамках диссертационного исследования алгоритмы управления процессами индукционной пайки, ЭЛС и диффузионной сварки могут быть применены при соединении изделий из титановых и алюминиевых сплавов (рисунок 32).

Такие алгоритмы управления индукционной пайкой, как одноконтурное и двухконтурное управление на основе классического регулятора, а также алгоритм управления диффузионной сваркой допускают реализацию в виде встраиваемых систем. Остальные алгоритмы управления возможны для реализации только на компьютерных системах.

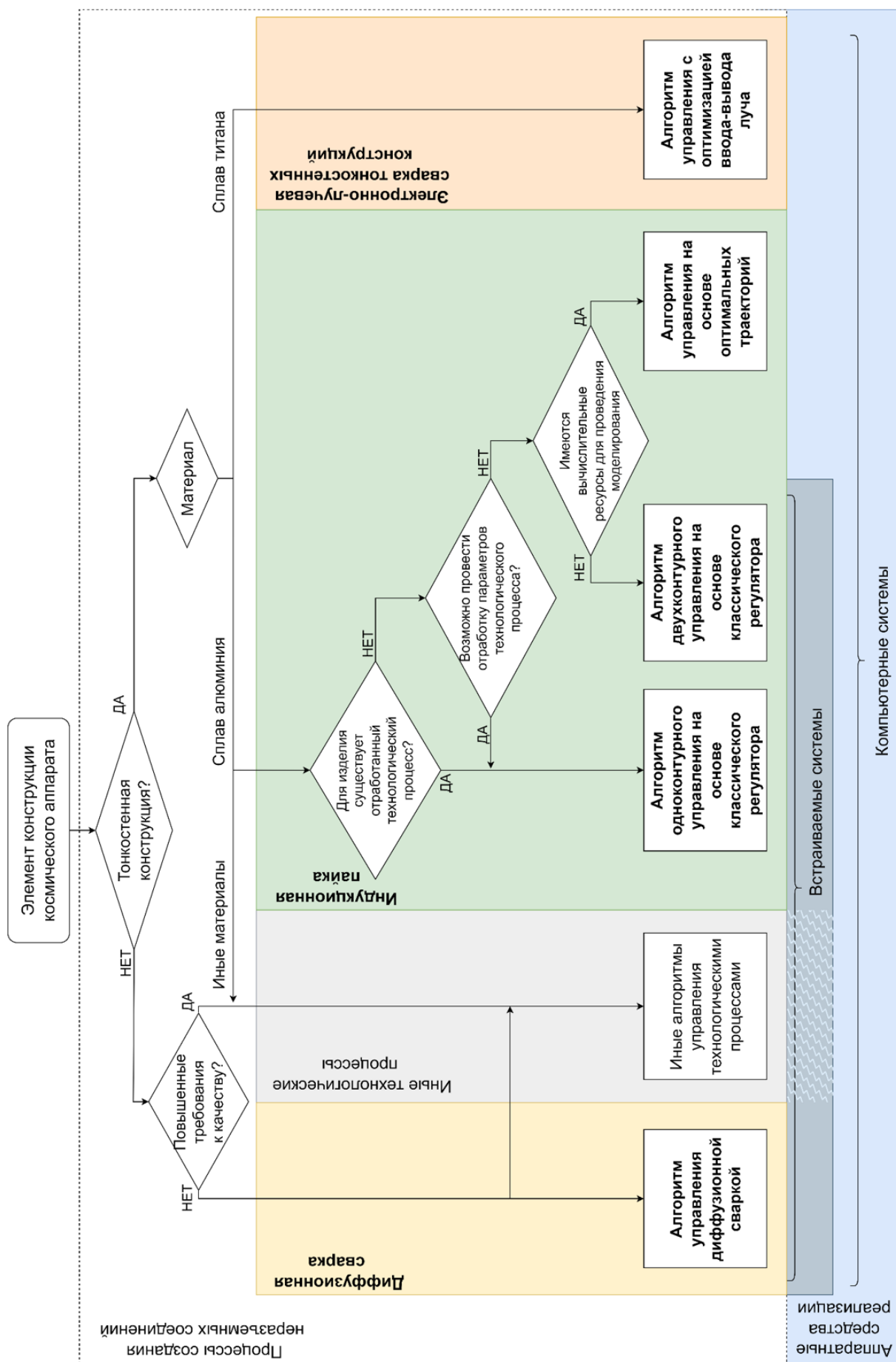


Рисунок 32 – Схема использования разработанных в диссертации алгоритмов управления

Пятая глава работы посвящена практической реализации компьютерного управления процессами создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций. Описывается комплекс программных решений, позволяющих повысить эффективность управления процессами ЭЛС, индукционной пайки и диффузионной сварки.

Предлагаются системы для одноконтурного, двухконтурного управления индукционной пайкой, а также система формирования оптимальных управляющих траекторий. Для автоматизации процесса ЭЛС разработано комплексное программное решение, включающее подсистему мониторинга параметров технологического процесса, подсистему управления вводом-выводом электронного луча и подсистему поддержки принятия решений для технолога установки ЭЛС.

Система одноконтурного управления индукционной пайкой

Программный продукт (рисунок 33), предлагаемый для автоматизации процесса индукционной пайки в рамках одного контура управления, представляет собой Windows-приложение, разработанное на языке C++ с применением объектно-ориентированного подхода.

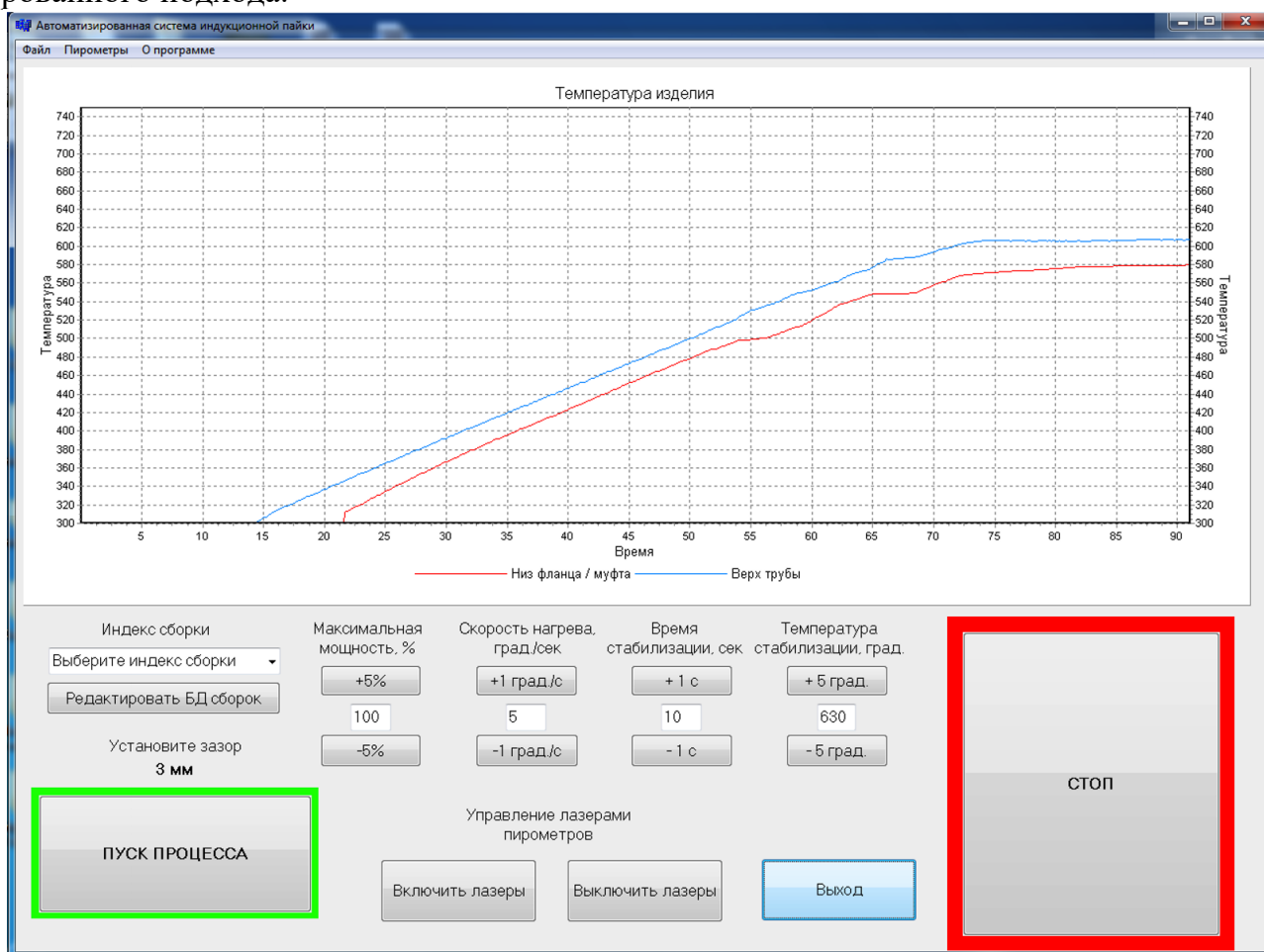


Рисунок 33 – Система управления индукционной пайкой с одним контуром управления, где 1 – элементы управления параметрами пайки; 2 – кнопки управления лазерами пирометров

По результатам средних значений показателей качества управления процессом (таблица 1) можно заключить, что при одноконтурной реализации системы автоматизированной пайки обязательным этапом является предварительная отработка технологических режимов. При использовании отработанных режимов показатели качества находятся в пределах нормы за исключением разницы температур паяемых элементов, что видно из графика нагрева на рисунке 33.

Таблица 1 – Средние значения показателей качества управления процессом

Показатели	Значения		
	Предварительная отработка процесса производилась	Предварительная отработка процесса не производилась	Пределы значений
Средняя абсолютная ошибка соответствия технологии, °C	4,2	7,2	5
Разница температур элементов, °C	74,6	122,7	10
Перерегулирование, °C	8,19	21,1	10
Процент успешно проведенных процессов, %	98	14	97

Система двухконтурного управления индукционной пайкой

Программный продукт (рисунок 34), реализующий управление индукционной пайкой по двум контурам, разработан на языке C++ с применением объектно-ориентированного подхода, что позволило сделать современное масштабируемое приложение.

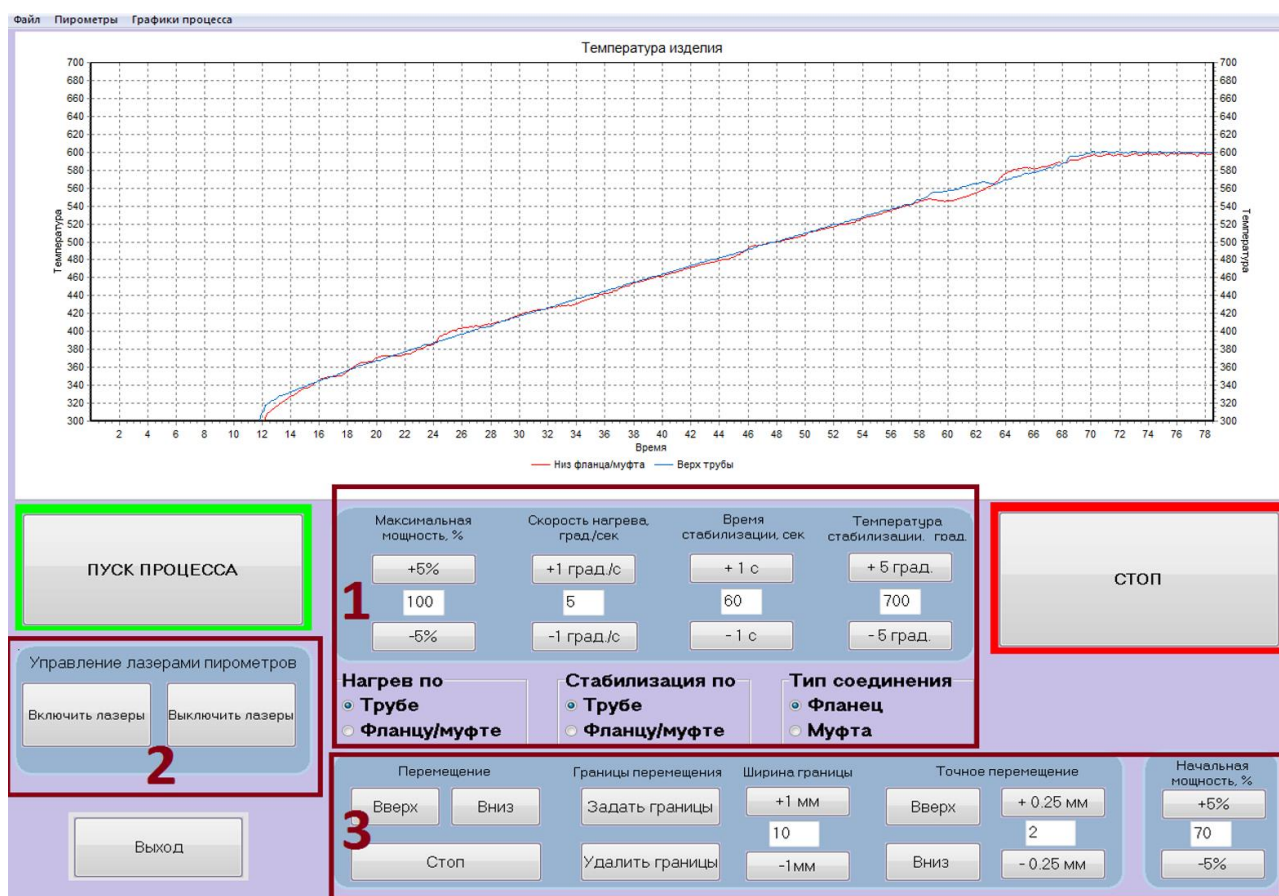


Рисунок 34 – Система управления индукционной пайкой с двумя контурами управления, где
1 – элементы управления параметрами пайки; 2 – кнопки управления лазерами пирометров;
3 – кнопки управления приводом и мощностью генератора

По результатам средних значений показателей качества управления процессом (таблица 2) можно заключить, что при двухконтурной реализации системы автоматизированной пайки предварительная отработка технологических режимов желательна, но в случае ее отсутствия процент брака сохраняется на невысоком уровне в сравнении с неавтоматизированным процессом.

Таблица 2 – Средние значения показателей качества управления процессом

Показатели	Значения		Пределы значений
	Предварительная обработка процесса производилась	Предварительная обработка процесса не производилась	
Средняя абсолютная ошибка соответствия технологии, °С	3,4	4,8	5
Разница температур элементов, °С	7,6	14,9	10
Перерегулирование, °С	7,9	8,9	10
Процент успешно проведенных процессов, %	99	92	97

При использовании отработанных режимов все показатели качества находятся в пределах нормы. При допущении оператором ошибок в случае первоначального позиционирования изделия в рамке индуктора система позволяет существенно снизить разницу температур паяемых элементов (рисунок 34).

Система управления индукционной пайкой на основе оптимальных управляющих траекторий

Автоматизированная система реализует формирование оптимальных управляющих траекторий и оптимальное управление процессом индукционной пайки на основе моделей и алгоритмов, предложенных, соответственно, в главах 3 и 4 диссертации.

По величинам средних значений показателей качества управления процессом пайки (таблица 3), полученным в результате экспериментальных исследований, можно заключить, что при автоматизации индукционной пайки на основе предварительно сформированных оптимальных траекторий управления, результаты проведенных технологических процессов являются наилучшими.

Таблица 3 – Средние значения показателей качества управления процессом

Показатели	Значения	Пределы значений
Средняя абсолютная ошибка соответствия технологии, °С	0,82	5
Разница температур элементов, °С	1,88	10
Перерегулирование, °С	0,19	10
Процент успешно проведенных процессов, %	99	97

Система управления ЭЛС с оптимизацией ввода-вывода луча

Для автоматизации процесса ЭЛС предлагается комплексное программное решение, включающее подсистему мониторинга параметров технологического процесса, подсистему управления вводом-выводом электронного луча и подсистему поддержки принятия решений для технолога установки ЭЛС. Программная система (рисунок 35) предназначена для управления процессом ЭЛС тонкостенных конструкций на основе математических моделей и алгоритмов управления режимами ввода и вывода электронного луча.

Для реализации аналитического ядра системы управления использовался модельно-алгоритмический аппарат расчета тепловых процессов, а для решения задачи оптимизации применялся гибридный многокритериальный эволюционный алгоритм. Программная система управления учитывает теплофизические характеристики свариваемых материалов, а также технологические параметры процесса ЭЛС.

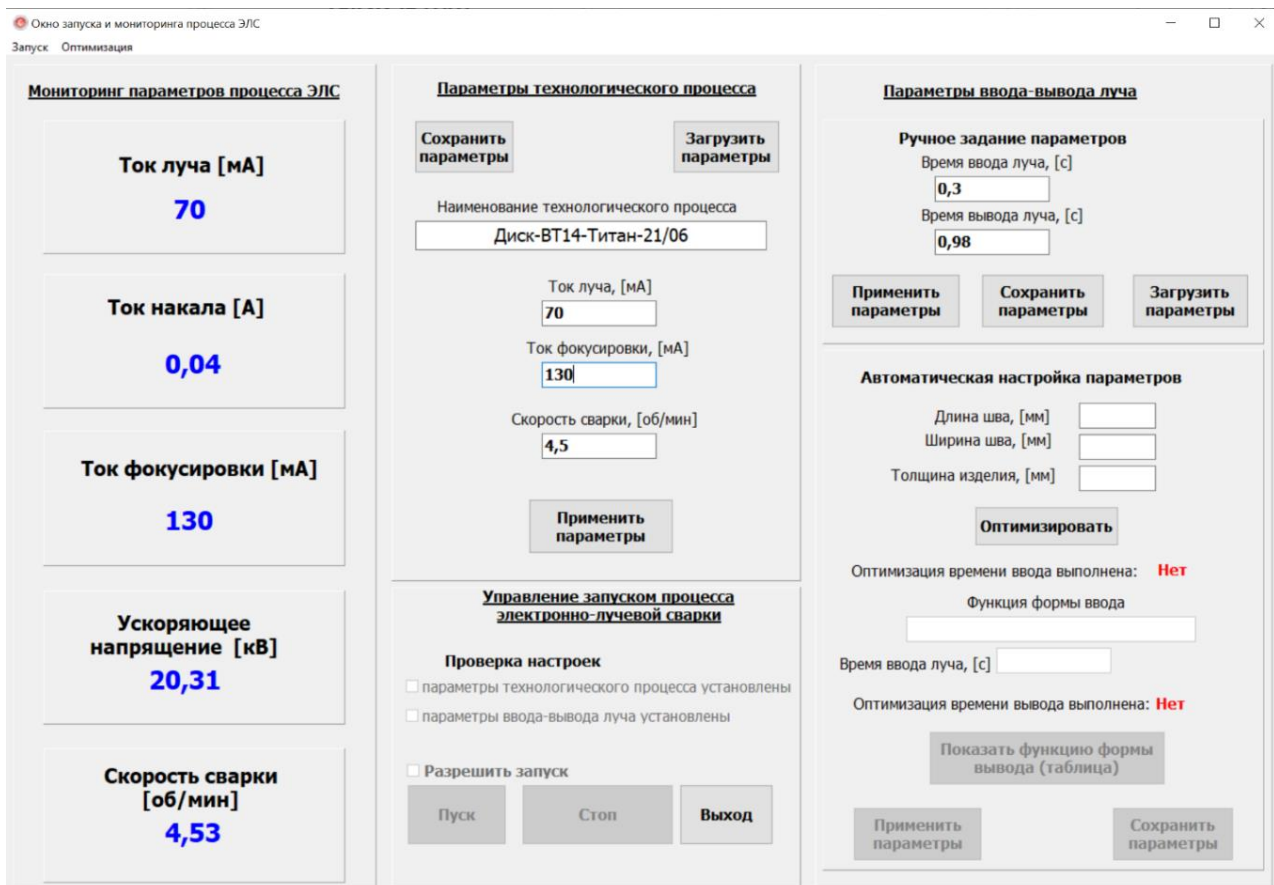
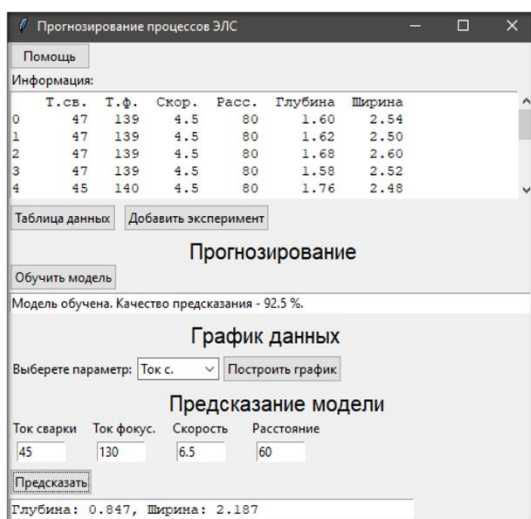


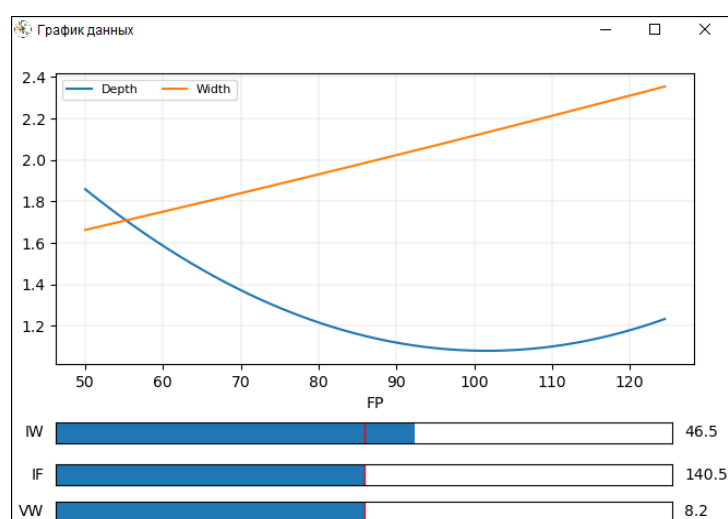
Рисунок 35 – Главное окно программной системы управления

Для поиска эффективных значений параметров процесса ЭЛС была создана система поддержки принятия технологических решений (рисунок 36а), в качестве базового аналитического ядра которой применяется гребневая регрессия (Ridge) – выбрана в результате экспериментальных исследований.

В главном окне программы (рисунок 36а) отображается краткая информация об экспериментах. В разделе «График данных» имеется возможность визуализации данных, спрогнозированных моделью, в виде интерактивного графика (рисунок 36б).



а



б

Рисунок 36 – Окна системы поддержки принятия решений для технолога: а – главное окно программы; б – график изменения технологических параметров

На графике по оси абсцисс откладываются значения параметра, выбранного на форме. По оси ординат значения глубины/ширины сварного шва в миллиметрах. В режиме реального времени можно изменять остальные параметры технологического процесса и наблюдать изменения значений размеров сварного шва (глубина и ширина). Система позволяет технологу при наличии сформированной модели производить поиск значений технологических параметров для обеспечения требуемых геометрических размеров сварного шва, например, при заданной по технологии глубине шва выбрать такой режим ЭЛС, при котором будет достигаться минимальная ширина шва, либо наоборот.

Для проверки эффективности применения предложенного подхода к решению задачи прогнозирования свойств сварного шва в режиме нормальной эксплуатации было проведено исследование на множестве полученных ранее наборов технологических параметров в количестве 10 штук, не участвовавших в формировании моделей.

Результаты сравнения экспериментальных значений геометрических размеров швов в зоне ввода-вывода электронного луча представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Размеры швов в зоне ввода-вывода луча и установившегося режима

Режимы сварки				Размеры швов, мм				Погрешности			
				В середине зоны установившегося режима		В середине зоны ввода-вывода		Абсолютная, мм		Относительная, %	
IW, мА	IF, мА	VW, об./мин.	FP, мм	Глубина	Ширина	Глубина	Ширина	Глубина	Ширина	Глубина	Ширина
56	146	10	60	1,36	1,76	1,24	1,8	0,12	0,04	8,82	2,27
59	140	8	80	1,16	1,96	1,2	2,0	0,04	0,04	3,45	2,04
57	141	12	80	1,08	1,68	1,16	1,74	0,08	0,06	7,41	3,57
54	150	9	50	1,08	1,82	1,08	1,8	0	0,02	0	1,10
54	146	9	60	1,2	1,76	1,2	1,88	0	0,12	0	6,82
57	139	4,5	80	1,58	2,5	1,68	2,6	0,1	0,1	6,33	4
55	140	4,5	80	1,76	2,48	1,64	2,56	0,12	0,08	6,82	3,23
56	141	10	80	1,2	1,78	1,09	1,86	0,11	0,08	9,17	4,49
58	131	10	125	0,8	2,16	0,88	2,0	0,08	0,16	10	7,41
55	146	9	60	1,36	1,76	1,28	1,76	0,08	0	5,88	0
Среднее значение погрешностей								0,073	0,07	5,79	3,49

В результате экспериментов было определено, что средняя погрешность в геометрических размерах сварного шва составляет: 5,79% для глубины проплавления; 3,49% для ширины шва, – что удовлетворяет технологическим требованиям.

Автоматизированная система управления диффузионной сваркой

Структурная схема системы автоматизированного управления диффузионной сваркой представлена на рисунке 37.

В результате проведенных исследований был разработана система автоматизированной диффузионной сварки, позволяющая получать качественные неразъемные соединения элементов ответственного оборудования, которая внедрена на АО «ИСС».

Проверка эффективности работы системы проводилась при сварке контрольной партии изделий (сборка «большой оси» и «малой оси»).

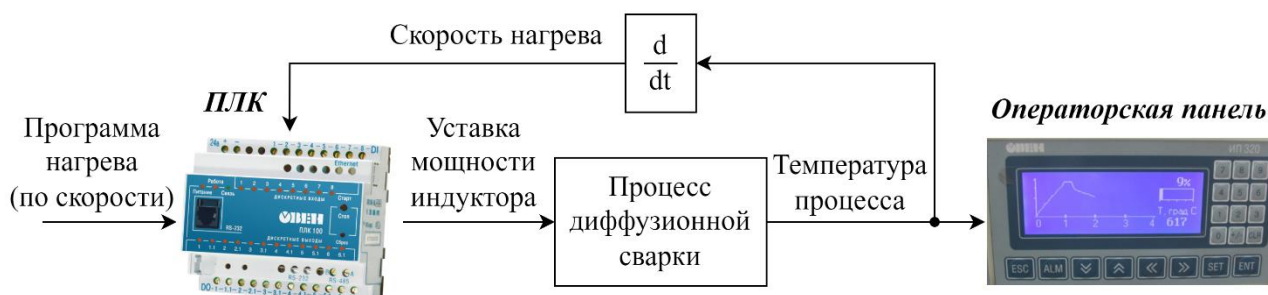


Рисунок 37 – Структурная схема автоматизированной диффузионной сварки

По результатам средних значений показателей качества управления процессом (таблица 5) можно заключить, что система автоматизированного управления диффузионной сваркой позволяет обеспечить выполнение всех заданных технологических требований.

Таблица 5 – Значения показателей выполнения технологических требований

Наименование требования	Значение по технологии	Значение по натурным экспериментам			
		«Большая ось»		«Малая ось»	
Скорость первоначального нагрева изделия до температуры стабилизации 1100 °С, °С/ч	800 – 1200	Среднее	881,6	Среднее	1133
		Мин.	843	Мин.	1107,4
		Макс.	912,7	Макс.	1156
Скорость контролируемого остывания изделия с 900 °С до 600 °С, °С/час	200 – 300	Среднее	257,1	Среднее	253,5
		Мин.	232,7	Мин.	246,4
		Макс.	284	Макс.	260,7
Перерегулирование при выходе на режим стабилизации, °С	0 – 10	Среднее	3,1	Среднее	1,3
		Мин.	0	Мин.	0
		Макс.	4,7	Макс.	3,4

Предел разрушения по «большой оси» составил в среднем 5600 кгс, по «малой оси» – 1620 кгс, что не только соответствует установленным требованиям, но и превышает их на 35–40%.

В **заключении** диссертации обобщаются результаты, полученные в ходе исследования, делаются выводы по применимости результатов диссертационного исследования на предприятиях РКО, а также намечаются дальнейшие пути продолжения исследований по теме диссертации.

В **приложении** представлены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и копии актов о внедрении результатов работы на предприятиях РКО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие **результаты**:

1. Проведен анализ методов и средств управления технологическими процессами создания неразъемных соединений на предприятиях РКО, позволивший выявить основные недостатки существующих систем и технологических решений, и предложить новую методологию управления, построенную на основе применения цифровых двойников процессов, что позволит перевести производство неразъемных соединений тонкостенных конструкций на четвертый этап технологической революции.

2. На основе аппарата теории тепловых процессов для индукционной пайки волноводных трактов разработан комплекс математических моделей, позволяющих оценивать распределение температуры по поверхности элементов паяемых конструкций и эффективность технологического процесса в целом. Также разработаны модели режимов ввода и вывода луча в процессе ЭЛС тонкостенных конструкций.

3. На основе предложенных математических моделей технологических процессов создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций разработаны модели оптимизации управления индукционной пайкой и ЭЛС, позволяющие уменьшить тепловложения в околошовную зону. Модели представляют двухкритериальные задачи оптимизации, для решения которых применен гибридный многокритериальный эволюционный алгоритм.

4. Разработаны алгоритмы управления технологическим процессом индукционной пайки в одноконтурной и двухконтурной реализации, а также алгоритм оптимального управления. Для технологического процесса ЭЛС предложен алгоритм оптимального управления, позволяющий формировать эффективные управляющие траектории без необходимости проведения этапа предварительных испытаний по настройке технологических параметров.

5. Все предложенные решения реализованы в виде программ для компьютерного управления технологическими процессами индукционной пайки, электронно-лучевой и диффузионной сварки. При этом комплексное обеспечение указанных технологических процессов такими средствами автоматизации позволит не только повысить качество управления процессами создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций, но и снизить влияние человеческого фактора на результаты.

В результате проведенных исследований был разработан универсальный набор алгоритмов управления технологическими процессами создания неразъемных соединений, позволяющий учитывать различную компоновку производственного оборудования и повысить эффективность управления и качество производимых изделий, а именно:

1. В задачах управления индукционной пайкой – снизить среднюю ошибку соотвественности технологии до уровня менее 1°C , уменьшить разницу температур спаиваемых элементов до уровня менее 2°C , сократить величину перерегулирования до уровня менее $0,2^{\circ}\text{C}$, довести количество успешно выполненных процессов до 99%.

2. В задачах управления ЭЛС – уменьшить общее время сварки на 17%, сократить расстояние повторного прохода лучом сварного шва до 65%, снизить отклонение геометрии сварного шва на участке ввода-вывода более чем в три раза.

3. В задачах управления диффузионной сваркой – обеспечить выполнение на всех этапах процесса управления технологических требований по скорости первоначального нагрева изделия до температуры стабилизации и скорости контролируемого остывания изделия, снизить величину перерегулирования в среднем до $3,1^{\circ}\text{C}$ и $1,3^{\circ}\text{C}$ для большой и малой осей изделия соответственно, обеспечить прочность сварных соединений по пределу разрушения с запасом в 35–40% сверх установленных требований.

Таким образом, результаты диссертационного исследования позволяют повысить эффективность технологических процессов создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций на предприятиях ракетно-космической отрасли за счет улучшения качества управления такими процессами для обеспечения технологических требований к сварным и паяным соединениям.

В качестве **направлений дальнейших исследований** можно выделить следующие:

1. Распространение предложенной методологии построения систем управления технологическими процессами, основанной на использовании цифровых двойников, на процесс диффузионной сварки, широко применяемый на предприятиях РКО при производстве ответственных конструкций.

2. Исследование, проектирование и программно-аппаратная реализация систем компьютерного зрения на основе методов машинного обучения как для определения этапов технологических процессов по объективной визуальной информации из зоны нагрева, так и для автоматического определения брака в готовой продукции.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Монография:

1. Тынченко, В.С. Автоматизированная пайка методом индукционного нагрева: монография / А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин, В.С. Тынченко, А.Н. Бочаров, О.А. Бочарова ; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2022. – 168 с.

Наиболее значимые публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России.

Категория К1:

2. Тынченко, В.С. Автоматизированная система оптимального управления индукционной пайкой волноводных трактов космических аппаратов / В.С. Тынченко, С.О. Курашкин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 1. – С. 22–34.

3. Тынченко, В.С. Модель анализа и прогнозирования технологических параметров для процесса электронно-лучевой сварки / В.С. Тынченко, В.Е. Петренко, С.О. Курашкин, И.А. Головенко // Программные продукты и системы. – 2021. – Т. 34. – № 2. – С. 316–323.

4. Тынченко, В.С. Программное обеспечение автоматизированной системы управления электронно-лучевой сваркой тонкостенных конструкций / В.С. Тынченко, В.Е. Петренко, А.В. Милов // Программные продукты и системы. – 2020. – № 33(2). – С. 319–327.

5. Тынченко, В.С. Программное обеспечение идентификации и коррекции ненормативных погрешностей средств измерений в процессе индукционной пайки / В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин, А.В. Милов // Программные продукты и системы. – 2020. – № 33(3). – С. 502–509.

6. Тынченко, В.С. Система автоматизации индукционной пайки на основе двух контуров управления с позиционированием заготовки / В.С. Тынченко, В.Д. Лаптенко, В.Е. Петренко, А.В. Мурыгин, А.В. Милов // Программные продукты и системы. – 2019. – № 32(1). – С. 167–173.

7. Тынченко, В.С. Программное обеспечение технологического процесса пайки волноводных трактов космических аппаратов / В.С. Тынченко, А.Н. Бочаров, В.Д. Лаптенко, Ю.Н. Серегин, С.К. Злобин // Программные продукты и системы. – 2016. – №2 (114). – С. 128–134.

Категория К2:

8. Тынченко, В.С. Автоматизированная система тестирования алгоритмов управления процессом индукционной пайки волноводных трактов / В.С. Тынченко, А.В. Милов, С.О. Курашкин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2021. – №. 1 – С. 3–13.

9. Тынченко, В.С. Программная система математического моделирования процесса электронно-лучевой сварки / А.В. Мурыгин, В.С. Тынченко, С.О. Курашкин, А.Н. Бочаров, В.Е. Петренко // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2021. – Т. 22. – № 2. – С. 261–274.

10. Тынченко, В.С. Применение коллектива искусственных нейронных сетей для управления индукционной пайкой волноводных трактов космических аппаратов /

А.В. Милов, В.С. Тынченко, С.О. Курашкин // Интеллектуальные системы. – 2021. – Т. 19. – № 2. – С. 72–82.

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

12. Тынченко, В.С. Автоматизация ввода электронного луча при сварке тонкостенных конструкций / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, Д.В. Рогова // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 9. – С. 10–14.

13. Тынченко, В.С. Моделирование электронно-лучевой сварки волноводных трактов космических аппаратов / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, Д.В. Рогова // Вестник МГТУ «Станкин». – 2020. – № 4(55). – С. 84–89.

14. Тынченко, В.С. Применение метода градиентного бустинга для поддержки принятия технологических решений в процессе электронно-лучевой сварки / В.С. Тынченко, И.А. Головенко, В.Е. Петренко, А.В. Милов, А.В. Мурыгин // Сибирский журнал науки и технологий. – 2020. – № 21(2). – С. 206–214.

15. Тынченко, В.С. Оптимизация режима ввода электронного луча в процессе сварки тонкостенных конструкций / В.С. Тынченко, С.О. Курашкин, Д.В. Рогова // Системы управления и информационные технологии. – 2020. – № 4(82). – С. 64–67.

16. Тынченко, В.С. Методы интеллектуального управления индукционной пайкой волноводных трактов космических аппаратов / А.В. Милов, В.С. Тынченко // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2019. – № 11. – С. 18–29.

17. Тынченко, В.С. Управление индукционной пайкой на основе косвенных измерений температуры процесса / В.С. Тынченко, В.Е. Петренко, А.В. Милов // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 4(78). – С. 50–54.

18. Тынченко, В.С. Двухконтурное управление индукционной пайкой волноводных трактов из алюминиевых сплавов / В.С. Тынченко, В.Д. Лаптенко, В.Е. Петренко, А.В. Милов, А.В. Мурыгин // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – № 4(74). – С. 65–71.

19. Тынченко, В.С. Влияние флюса на точность измерений в процессе индукционной пайки алюминиевых волноводных трактов / А.В. Милов, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – Т. 60. – № 4. – С. 38–46.

20. Тынченко, В.С. Применение методов нечеткой логики для автоматизации процесса индукционной пайки / В.С. Тынченко, В.Е. Петренко, А.В. Милов, А.В. Мурыгин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – Т. 58. – № 2. – С. 49–56.

21. Тынченко, В.С. Автоматизированное оборудование и технология для пайки волноводных трактов космических аппаратов / С.К. Злобин, М.М. Михнев, В.Д. Лаптенко, Ю.Н. Серегин, А.Н. Бочаров, В.С. Тынченко, Ю.П. Дубец, Б.Б. Долгополов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2014. – № 4(56). – С. 219–229.

Категория К3:

22. Тынченко, В.С. 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. Вестник МЭИ. – 2021. – № 3. – С. 88–95.

23. Тынченко, В.С. Моделирование теплового поля в процессе электронно-лучевой сварки с использованием динамически изменяемых параметров сплавов

изделий / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин, Д.В. Рогова // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 131–145.

Публикации в журналах, входящих в Q1/Q2 Web of Science и/или Scopus:

24. Tynchenko, V.S. Mathematical modeling of induction heating of waveguide path assemblies during induction soldering / V.S. Tynchenko, S.O. Kurashkin, V.V. Tynchenko, V.V. Bukhtoyarov, V.V. Kukartsev, R.B. Sergienko, A.V. Kukartsev, K.A. Bashmur // Metals. - 2021. - Vol. 11. - No. 5. - P. 697.

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

26. Tynchenko, V.S. Investigation of the solid-phase joint of vt-14 titanium alloy with 12kh18n10t stainless steel obtained by diffusion welding through intermediate layers / A.V. Lavrishchev, S.V. Prokopenko, V.S. Tynchenko, A.V. Myrugin, V.V. Kukartsev, K.A. Bashmur, R.B. Sergienko, V.V. Tynchenko, A.V. Lysyannikov // Metals. - 2021. - Vol. 11. - No. 8. - P. 1325.

27. Tynchenko, V.S. Algorithms for selecting the operating mode of the technological process of waveguide paths induction brazing / V.S. Tynchenko, A.V. Milov, V.V. Kukartsev, V.V. Tynchenko, V.V. Bukhtoyarov, K.A. Bashmur // Journal of Applied Engineering Science. - 2021. - Vol. 19. - No. 2. - P. 424-431.

28. Tynchenko, V.S. The use of collections of artificial neural networks to improve the control quality of the induction soldering process / A.V. Milov, V.S. Tynchenko, S.O. Kurashkin, V.V. Tynchenko, V.V. Kukartsev, V.V. Bukhtoyarov, R. Sergienko, V.A. Kukartsev, K.A. Bashmur // Sensors. - 2021. - Vol. 21. - No. 12. - P. 4199.

29. Tynchenko, V.S. Intelligently informed control over the process variables of oil and gas equipment maintenance / V.V. Bukhtoyarov, A.V. Milov, V.S. Tynchenko, E.A. Petrovskiy, S.V. Tynchenko // International Review of Automatic Control. - 2019. - Vol. 12. - No. 2. - P. 59-66.

30. Tynchenko, V.S. Intellectualizing the process of waveguide tracks induction soldering for spacecrafts / V.S. Tynchenko, A.V. Milov, V.V. Tynchenko, V.V. Bukhtoyarov, V.V. Kukartsev // International Review of Aerospace Engineering. - 2019. - Vol. 12. - No. 6. - P. 280-289.

Некоторые публикации в изданиях, входящих в Web of Science и/или Scopus:

31. Tynchenko, V.S. Software for Modeling the Electron-Beam Welding in Steady State / Tynchenko V., Kurashkin S. // Lecture Notes in Electrical Engineering. - 2022. - Vol. 857 LNEE. - P. 237-246.

32. Tynchenko, V.S. Hardware Control of the Electron Beam Energy Density by the Heating Spot / Kurashkin S., Tynchenko V., Seregin Y., Murygin A., Bocharov A. // Lecture Notes in Networks and Systems. - 2022. - Vol. 235. - P. 71-78.

33. Tynchenko, V.S. Ensemble of artificial neural networks to control the induction soldering of spacecraft's waveguide paths / Milov A., Tynchenko V., Kurashkin S., Tynchenko V. // 2021 IEEE MetroInd 4.0 and IoT 2021 - Proceedings. - 2021. - P. 9488524.

34. Tynchenko, V.S. Modeling the Temperature Field Distribution at the Stages of Input-Output of the Electron Beam / Kurashkin S., Tynchenko V., Murygin A., Seregin Y., Tynchenko V. // Lecture Notes in Networks and Systems. - 2021. - Vol. 230. - P. 331-339.

35. Tynchenko, V.S. Automation of Electron Beam Input During the Welding of Thin-Walled Structures / Tynchenko V., Kurashkin S., Tynchenko V., Dokshanin S., Leonteva A. // Lecture Notes in Networks and Systems. - 2021. - Vol. 230. - P. 88-99.
36. Tynchenko, V.S. Energy Distribution Modeling During the Electron Beam Welding Using Dynamically Changing Thermophysical Parameters of the Product / Kurashkin S., Tynchenko V., Seregin Y., Murygin A., Kukartsev V., Tynchenko V. // Lecture Notes in Networks and Systems. - 2021. - Vol. 230. - P. 47-58.
37. Tynchenko, V.S. Mathematical Software for Testing and Setting up the Induction Soldering Process / Milov A., Tynchenko V., Petrenko V., Kukartsev V. // Communications in Computer and Information Science. - 2020. - Vol. 1304. - P. 114-124.
38. Tynchenko, V.S. Software for Structure Selection of an Artificial Neural Network to Control the Induction Soldering Process / Milov A., Tynchenko V., Bukhtoyarov V., Tynchenko V., Kukartsev V. // Advances in Intelligent Systems and Computing. - 2020. - Vol. 1295. - P. 480-490.
39. Tynchenko, V.S. Algorithmic and Software Support for Technological Decision-Making in the Process of Induction Soldering / Milov A., Tynchenko V., Petrenko V., Kurashkin S. // Advances in Intelligent Systems and Computing. - 2020. - Vol. 1224 AISC. - P. 521-530.
40. Tynchenko, V.S. Intellectualization of the Induction Soldering Process Control System Based on a Fuzzy Controller / Petrenko V.E., Tynchenko V.S., Murygin A.V. // Lecture Notes in Electrical Engineering. - 2020. - Vol. 641 LNEE. - P. 292-304.
41. Tynchenko, V.S. Experimental Verification of Flux Effect on Process of Aluminium Waveguide Paths Induction Soldering / Milov A.V., Tynchenko V.S., Murygin A.V. // Lecture Notes in Electrical Engineering. - 2020. - Vol. 641 LNEE. - P. 282-291.
42. Tynchenko, V.S. Intellectual Control of Induction Soldering Process using Neuro-fuzzy Controller / Milov A., Tynchenko V., Petrenko V. // Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019 (IEEE). - 2019. - P. 8867787.
43. Tynchenko, V.S. Intelligent Control of the Diffusion Welding Technological Process / Milov A., Tynchenko V., Murygin A. // Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019 (IEEE). - 2019. - P. 8867763.
44. Tynchenko, V.S. Neural network modeling to control process of induction soldering / Milov A.V., Tynchenko V.S., Murygin A.V. // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. - 2019. - P. 8743031.
45. Tynchenko, V.S. Control of the induction soldering on the basis of process temperature indirect measurements / Tynchenko V.S., Petrenko V.E., Murygin A.V. // MATEC Web of Conferences. - 2018. - Vol. 224. - P. 01054.
46. Tynchenko, V.S. Automated induction heating system for diffusion welding / Tynchenko V.S., Milov A.V., Murygin A.V. // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018 (IEEE). - 2018. - P. 8501798.
47. Tynchenko, V.S. Development of an automated information system for controlling the induction soldering of aluminum alloys waveguide paths / Murygin A.V., Laptenok V.D., Tynchenko V.S., Emilova O.A., Seregin Y.N. // RPC 2018 - Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. - 2018. - P. 8482209.
48. Tynchenko, V.S. Algorithmic and Software to Identify Errors in Measuring Equipment during the Formation of Permanent Joints / Milov A.V., Tynchenko V.S., Petrenko V.E. // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 (IEEE). - 2018. - P. 8602515.

Патент на изобретение:

49. Пат. 2647964 Российская Федерация, МПК В23К 1/002, Н01Р 11/00. Способ пайки волноводных трактов / М.М. Михнев, С.К. Злобин, В.Д. Лаптенко, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин, А.Н. Бочаров; заявитель и патентообладатель АО ИСС им. ак. М.Ф. Решетнева, СибГАУ им. ак. М.Ф. Решетнева. – No 2016104858 ; заявл. 12.02.16 ; опубл. 17.08.17, Бюл. No 23.

Наиболее значимые свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

50. Тынченко, В.С. Программная система управления режимами ввода-вывода луча в процессе электронно-лучевой сварки / В.С. Тынченко, С.О. Курашкин, Я.А. Тынченко, В.В. Бухтояров // М.: Роспатент. – 2021. Свидетельство №2021663138 от 12.08.2021.

51. Тынченко, В.С. Программа моделирования распределения энергии при вводе и выводе электронного луча в процессе сварки тонкостенных конструкций / С.О. Курашкин, В.С. Тынченко // М.: Роспатент. – 2021. Свидетельство №2021617194 от 11.05.2021.

52. Тынченко, В.С. Автоматизированное рабочее место технолога электронно-лучевой сварки / И.А. Головенко, В.С. Тынченко, С.О. Курашкин, А.В. Мурыгин // М.: Роспатент. – 2021. Свидетельство №2021617039 от 05.05.2021.

53. Тынченко, В.С. Программное приложение для мониторинга технологических параметров электронно-лучевой установки А.306 / В.С. Тынченко, Ю.Н. Серегин, А.Н. Бочаров, В.Е. Петренко, А.В. Мурыгин, А.В. Милов // М.: Роспатент. – 2019. Свидетельство №2019666592 от 12.12.2019.

54. Тынченко, В.С. Модуль управления вводом-выводом электронного луча в процессе сварки для системы автоматизации электронно-лучевой сварки / В.С. Тынченко, В.Е. Петренко // М.: Роспатент. – 2019. Свидетельство №2019666591 от 12.12.2019.

55. Тынченко, В.С. Модуль мониторинга и верификации технологических параметров системы автоматизации электронно-лучевой сварки / В.Е. Петренко, В.С. Тынченко, А.В. Милов // М.: Роспатент. – 2019. Свидетельство №2019666590 от 12.12.2019.

56. Тынченко, В.С. Автоматизированная система индукционного нагрева для установки диффузионной сварки / В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин, В.Д. Лаптенко, А.Н. Бочаров // М.: Роспатент. – 2018. Свидетельство №2018618401 от 12.07.2018.

57. Тынченко, В.С. Модуль поддержки проведения экспериментальных исследований процесса индукционной пайки АСУ «Пайка» / В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин, В.Е. Петренко, В.Д. Лаптенко, А.Н. Бочаров, Ю.Н. Серегин // М.: Роспатент. – 2017. Свидетельство №2017663602 от 07.12.2017.

58. Тынченко, В.С. Модуль автоматизации процесса индукционной пайки на основе двухконтурного управления АСУ «Пайка» / В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин, В.Е. Петренко, В.Д. Лаптенко, А.Н. Бочаров, Ю.Н. Серегин // М.: Роспатент. – 2017. Свидетельство №2017663601 от 07.12.2017.

59. Тынченко, В.С. Модуль управления процессом индукционной пайки на основе пропорционального регулятора / В.С. Тынченко, А.Н. Бочаров, Ю.Н. Серегин, В.Д. Лаптенко // М.: Роспатент. – 2015. Свидетельство №2015618267 от 04.08.2015.

60. Тынченко, В.С. Модуль взаимодействия с аппаратным обеспечением АСУ «Пайка» / В.С. Тынченко, А.Н. Бочаров, Ю.Н. Серегин, В.Д. Лаптенко // М.: Роспатент. – 2015. Свидетельство №2015611846 от 06.02.2015.