

На правах рукописи

БОЧАРОВА ОЛЕСЯ АНДРЕЕВНА

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск - 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева)

Научный руководитель:

Мурыгин Александр Владимирович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты

Захаренко Владимир Андреевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроника»
Омского государственного технического
университета

Лившиц Александр Валерьевич
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе
Иркутского государственного университета
путей сообщения

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет

Защита состоится "14" октября 2022 г. в 13.00ч. на заседании диссертационного совета 24.2.403.01, созданного на базе Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева по адресу: 660037, г. Красноярск, пр. им. газ. Красноярский рабочий, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева и на сайте <https://www.sibsau.ru>

Автореферат разослан " ____ " _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Панфилов
Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Для выполнения качественной и герметичной сборки волноводных трактов и трубопроводов, применяющихся в конструкции космических аппаратов или иного оборудования, производимого на предприятиях ракетно-космической отрасли, применяется индукционная пайка. Пайка представляет собой процесс соединения металлов или неметаллических материалов посредством расплавленного присадочного металла, называемого припоем и имеющего температуру плавления ниже температуры плавления основного металла (или неметаллического материала). Монтажная пайка трубопроводов токами высокой частоты, в основном, получила своё применение в стратегических отраслях машиностроения, таких как авиационная, ракетостроение, судостроение, военной техники, где требуется высокая надежность соединения и невозможно применить другой тип соединения ввиду ограниченного пространства. Индукционную пайку применяют для трубопроводов из различных материалов. Часто индукционный нагрев используют при пайке концевых соединений труб, реже – для пайки промежуточных соединений. В последнем случае обычно применяют специальные приспособления, фиксирующие местоположение соединительных деталей на трубе. Процесс индукционной пайки волноводных трактов и трубопроводов усложняется наличием ряда внешних факторов, среди которых низкая степень повторяемости неавтоматизированного, ручного процесса пайки, сложность, а порой и невозможность, визуального контроля нагрева деталей, искажение электромагнитного поля индуктора вследствие взаимодействия его с различными проводящими телами, находящимися вблизи зоны пайки, влияние человеческого фактора. Совокупность этих и других факторов приводит к образованию бракованных соединений, подлежащих переделке (до 40%) и неисправимых дефектов, не подлежащих исправлению (до 5 %). Для снижения влияния указанных особенностей индукционной пайки и повышения качества паяных соединений ответственных деталей необходимо автоматизировать процесс индукционной пайки. Поэтому тема диссертационного исследования является актуальной.

Степень изученности темы исследования. Вопросам теории и практики индукционного нагрева, расчету и проектированию элементов индукционных установок, разработке систем автоматического управления посвящено большое количество работ таких ученых, как А.В. Слухоцкий, С.Е. Рыскин, В.С. Немков, В.Д. Лаптенко, С.В. Шапиро, А.С. Васильев, А. В. Мурыгин, М.М. Михнев, В.В. Демидович, А.А. Шуляк, Л.Э. Рогинская, а так же ряда российских и иностранных предприятий, таких как ВНИИТВЧ-ЭСТЭЛ (г. С.-Петербург), НКТБ «Вихрь», НПП «Курай», НПО «Параллель» (г. Уфа), НПП «Элсит» (г. Томск), ООО «Эком» (г. Красноярск), АВВ, INDUCTIONHEAT (США). В этих работах исследуются распределения температурных полей в зоне пайки, предложена автоматизированная технология индукционной пайки волноводно-распределительных трактов, включающая пирометрический контроль температуры соединяемых элементов и управление процессом нагрева по заданной программе.

Анализ этих работ показывает, что со времени первого внедрения в производство технологии индукционной пайки накоплен значительный опыт применения различных систем управления для автоматизации процессов пайки (в том числе системы с применением технического зрения, системы управления энергетическими параметрами и др.). В то же время задачи, обусловленные вопросами обеспечения требуемой точности, повторяемости при использовании АСУ

процессом пайки, требуемых характеристик оборудования и технологической оснастки до настоящего времени имеют ограниченные решения и нерешенные проблемы. Для решения существующих проблем широко применяются методы численного и имитационного моделирования электротермических процессов. Современные пакеты моделирования, такие как Comsol Multiphysics, Ansys Multiphysics, Elcut, Flux, Matlab, позволяют эффективно имитировать электромагнитные и тепловые процессы для многих физических явлений, включая индукционную пайку. В существующих установках индукционной пайки трубопроводов, как правило, реализован принцип регулирования температуры путем управления мощностью индукционного нагрева только одного элемента паяемого соединения. При этом температура второго элемента паяемого соединения не регулируется, а только контролируется. Недостатком данного принципа управления является возможность появления значительной разницы температур паяемых элементов, превышающей допустимые значения. Это часто приводит к браку.

Целью диссертационного исследования является повышение качества паяных соединений за счет создания принципов управления автоматизированной технологии индукционной пайки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить комплекс задач:

1. Осуществить анализ методов и устройств автоматизации процесса индукционной пайки, средств и методов контроля качества паяных соединений.
2. Провести моделирование электротермических процессов, проходящих при индукционном нагреве паяных соединений.
3. Разработать экспериментальную установку для автоматизированного управления индукционной пайкой.
4. Провести моделирование системы управления экспериментальной установки индукционной пайки и разработать алгоритмы управления процессом.
5. Выполнить экспериментальные исследования процесса пайки экспериментальных образцов с помощью экспериментальной установки управления индукционной пайкой и для подтверждения полученных алгоритмов управления процессом пайки.

Научная новизна:

1. Разработана новая математическая модель индукционного нагрева элементов волноводной сборки из фланцев и трубопроводов, учитывающая конструкцию и размеры волноводов и трубопроводов, физические параметры материалов, начальные и граничные условия процесса, а также неравномерное распределение плотности вихревого тока в системе, позволяющая более точно рассчитывать и имитировать технологические параметры процесса индукционной пайки для повышения качества паяных соединений.
2. Предложены новые алгоритмы управления скоростью нагрева и положением детали относительно индуктора, позволяющие эффективно перераспределять энергию индукционного нагрева в системе «индуктор – деталь», отличающиеся от известных тем, что в процессе достижения необходимой температуры деталей и получения паяного соединения управление производится одновременно изменением мощности генератора и положения деталей относительно индуктора.
3. Разработана новая модель двухконтурной автоматизированной системы управления процессом индукционной пайки, основанная на применении пирометрического контроля температуры элементов паяного соединения и управлении мощностью генератора и позиционированием заготовки, позволяющая

максимально приблизить зону нагрева деталей к индуктору и вести технологический процесс по заданным требованиям.

Теоретическая значимость.

Предложенная математическая модель индукционного нагрева, а также результаты моделирования электротермических процессов протекающих при индукционной пайке позволяют проводить исследования в области создания эффективных технологических комплексов и проектировать автоматизированные системы для индукционной пайки ответственных деталей.

Разработанная модель и алгоритмы могут быть востребованы в процессе теоретических разработок при переходе к передовым цифровым технологиям и интеллектуальным производственным технологиям, применяемым при создании ответственных деталей.

Практическая ценность работы.

Результаты работы использовались при создании автоматизированной системы индукционной пайки в рамках грантов РФФИ совместно с Красноярским краевым фондом поддержки научной и научно-технической деятельности №16-48-242029 по теме «Математическое и физическое моделирование процессов, происходящих при индукционной пайке элементов волноводных трактов», №18-48-242006 по теме «Математическое и физическое моделирование процессов, происходящих при индукционной пайке трубопроводов в защитных средах».

Методология и методы исследования. Для достижения поставленных целей и решения задач использованы основные положения теории электромагнитных и тепловых полей, методы теории автоматического регулирования и управления. При моделировании электротермических процессов индукционной пайки использовались программные пакеты Elcut 5.1 и COMSOL Multiphysics 5.3. Для проведения исследований двухконтурной системы управления применялся программный пакет Matlab.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель индукционного нагрева элементов волноводной сборки и трубопроводов учитывает конструкцию и размеры волноводов и трубопроводов, физические параметры материалов, начальные и граничные условия, а также неравномерное распределение плотности вихревого тока в системе, и позволяет имитировать технологические параметры процесса индукционной пайки для повышения качества паяных соединений.

2. Алгоритмы управления скоростью нагрева и положением детали относительно индуктора позволяют эффективно перераспределять энергию индукционного нагрева в системе «индуктор – деталь» и производить процесс управления одновременно, как по изменению мощности генератора, так и положения деталей относительно индуктора.

3. Модель двухконтурной автоматизированной системы управления процессом индукционной пайки позволяет максимально приблизить зону нагрева и вести технологический процесс по заданным требованиям, с достижением необходимого качества паяных соединений.

4. Экспериментальные исследования технологии автоматизированной индукционной пайки, подтверждают повышение качества паяных соединений элементов волноводных трактов и трубопроводов.

Степень достоверности полученных результатов основывается на корректном использовании математического аппарата, непротиворечивостью применяемым

физическим явлениям и законам, подтверждается сведениями, полученными от других авторов, моделированием на ЭВМ, а также экспериментальными исследованиями, выполненными при различных параметрах технологического процесса индукционной пайки.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XII Междунар. науч.-практ. конф. Актуальные проблемы авиации и космонавтики, посвященной Дню космонавтики (10–15 апреля 2016 г., Красноярск), XV Междунар. науч. конф. бакалавров, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации (12 мая 2016, г. Красноярск), Науч. конф., посвященной году образования в Содружестве Независимых Государств (15–25 апреля 2016 г.) Проспект Свободный-2016, XX, XXII, XXIII Междунар. науч.-практ. конф. Решетневские чтения, посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 нояб. 2016, 12–16 ноября 2018, 11–15 ноября 2019, г. Красноярск), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016, 2017г., 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC), Международной конференции «Современные технологии и инновации в науке и промышленности» NIRM-2019, 6 мая, г. Красноярск, Международной конференции «Сварка в России – 2019: современное состояние и перспективы», посвящённая 100-летию со дня рождения Б.Е. Патона, 3-7 сентября 2019 года, г. Томск, Третьей международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии», «Национальный Исследовательский Университет "МЭИ" 12-15 ноября 2019 года, г. Москва.

Публикации. Основные результаты работы изложены в 21 научной публикации, в том числе две статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, десять статей, в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, одной монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 132 страницы, в том числе 85 рисунков и 9 таблиц. Библиография содержит 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика проблемы, обоснована актуальность темы, определены цель и задачи работы, отражены новизна и практическая ценность научных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние вопросов и проблем автоматизации индукционной пайки в промышленности. Проведен анализ применения различного оборудования, систем измерения для автоматизации индукционной пайки. Выявлены основные параметры, по которым осуществляется контроль и управление индукционной пайкой. Также показаны методы контроля качества паяных соединений, полученных при индукционной пайке. Проведен обзор основных направлений и подходов при моделировании индукционной пайки. Отмечено, что при моделировании процессов, протекающих в индукционном нагреве, широко используются вычислительные средства и пакеты прикладных программ Comsol Multiphysics, Ansys Multiphysics, Elcut, Flux.

Проведенные исследования выявили необходимость повышения степени автоматизации процесса индукционной пайки деталей, необходимость разработки систем автоматизации, основанных на использовании современных средств измерения и новых алгоритмов управления. Отмечается, что наиболее часто процесс управления основан на контроле температуры деталей, а также на точном позиционировании детали относительно индуктора. Делается вывод о том, что важным этапом при разработке автоматизированных систем является моделирование различных аспектов индукционного процесса, начиная от теплопереноса и заканчивая методами расчета индукторов.

Вторая глава посвящена исследованию электротермических процессов, протекающих при индукционном нагреве отдельных структурных элементов волноводного тракта и трубопровода. Сделано физическое и математическое описание явлений, происходящих при индукционном нагреве.

Для обобщенной модели тепловых процессов, протекающих при индукционной пайке волноводных трактов, используем дифференциальное уравнение теплопроводности. Так как нагрев волновода идет за счет вихревых токов, протекающих в нём, то в формулу добавляется постоянно действующий источник тепла:

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial y^2} \right) + q(I_b), \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала; T – температура; t – время; x, y – декартовы координаты; $q(I_b) = I_b(x, y, t)$ – постоянно действующий источник теплоты, зависящий от распределения плотности вихревых токов $I_b(x, y, t)$.

Чтобы провести моделирование тепловых процессов, протекающих при индукционной пайке, необходимо к уравнению (1) добавить следующие условия: вихревые токи протекают по поверхности деталей, плотность вихревых токов распределена неравномерно из-за формы деталей и расположения индуктора относительно деталей, теплофизические характеристики материала деталей постоянны, начальная температура детали одинакова по всей его длине: $T(x, y) = T_n = const$; теплообмен с окружающей средой (граничное условие III рода) осуществляется поверхностью детали: $\alpha \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = b(T(x, t) - T_{cp})$, $\alpha \frac{\partial T(y,t)}{\partial y} = b(T(y, t) - T_{cp})$, где b – коэффициент теплообмена; T_{cp} – температура среды.

Для решения уравнения (1) используется метод конечных разностей. Дискретизация уравнения (1) проводится в два этапа. На первом этапе, на промежуточном временном шаге $\tau/2$ проводится дискретизация по оси X , на втором этапе проводится дискретизацию по оси Y . Получаем два одномерных уравнения по каждой из осей. Представляем уравнение (1) в разностном виде, используя неявную схему на каждом полшаге по времени:

$$\frac{T_{ij}^{k+1/2} - T_{ij}^k}{\tau/2} = a \left(\frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - 2T_{ij}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2}}{h_x^2} \right) + q_{ij}^{k+1/2}, \quad (2)$$

$$\frac{T_{ij}^{k+1} - T_{ij}^{k+1/2}}{\tau/2} = a \left(\frac{T_{i,j+1}^{k+1} - 2T_{ij}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1}}{h_y^2} \right) + q_{ij}^{k+1}, \quad (3)$$

где $T_{ij}^k = T(x_i, y_j, t_k)$; $q_{ij}^k = I_b(x_i, y_j, t_k)$.

Решая сначала уравнение (2), а затем уравнение (3) определяется поле температуры на целом шаге по времени.

Аппроксимация граничных условий выглядит следующим образом:

$$a \frac{T_{i,j+1}^k - T_{i,j}^k}{h_y} = b(T_{i,j}^k - T_{cp}), \text{ при } 0 \leq i \leq N_x, j=0, \quad (4)$$

$$a \frac{T_{i,j-1}^k - T_{i,j}^k}{h_y} = b(T_{i,j}^k - T_{cp}), \text{ при } 0 \leq i \leq N_x, j=N_y. \quad (5)$$

При моделировании электротермических процессов индукционной пайки были выбраны два объекта: участок волноводной трубы и фланца (рисунок 1); трубопроводы (таблица 1). Моделирование проводилось в программной системе Elcut 5.1 и COMSOL Multiphysics 5.3.

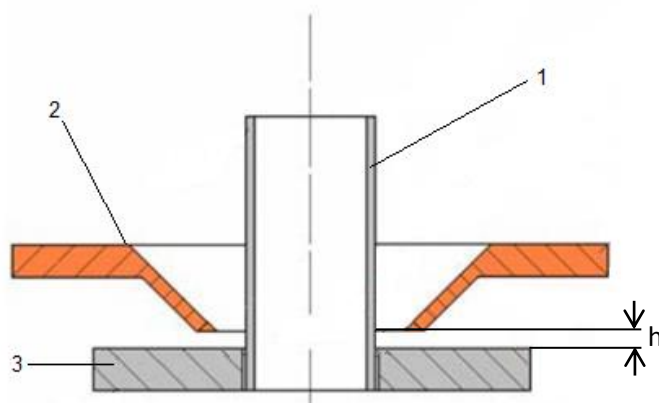


Рисунок 1 – Исследуемая система «индуктор – волновод»: 1 - волноводная труба; 2 - индуктор; 3 – фланец, h – зазор между фланцем и индуктором

Таблица 1 – Типы соединений трубопроводов

	Трубопроводы				
	1	2	3	4	5
Тип соединения	Т-образное без тройника 5мм	Т-образное с тройником 5мм	Т-образное с тройником 2,5мм	Наконечник 5мм	Наконечник 2,5мм
Схема соединения					

Результаты расчета показывают, что вихревые токи в деталях распределены неравномерно. Плотность вихревых токов зависит от формы деталей. На рисунке 2 и 4 видно, что вихревые токи резко увеличиваются на угловых поверхностях трубы и фланца волновода. Кроме того, на рисунке 2 и 3 видно, что плотность вихревых токов резко снижается в толщине стенок деталей.

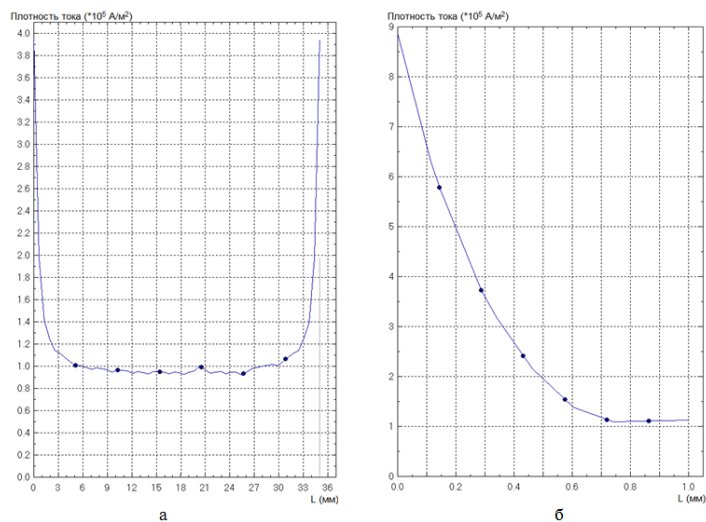


Рисунок 2 – Распределение плотности вихревого тока трубы для типоразмера 35×15мм: а - по большой стороне трубы; б – по толщине трубы

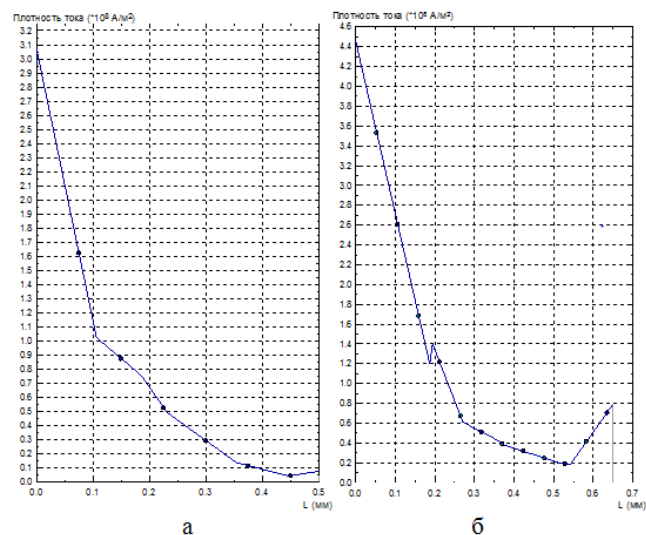


Рисунок 3 – График распределения вихревого тока по толщине: а - толщина стенки трубопровода, б - толщина стенки переходника трубопровода

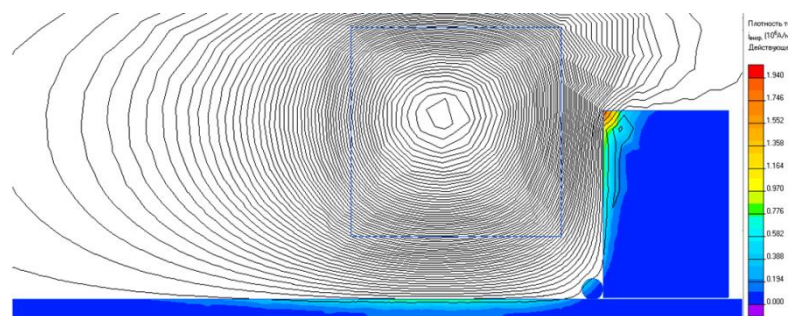


Рисунок 4 – Распределение плотности вихревого тока в системе «индуктор-волновод» для типоразмера 35×15мм

Также на рисунках 4 - 6 видно, что области протекания вихревых токов хорошо локализованы.

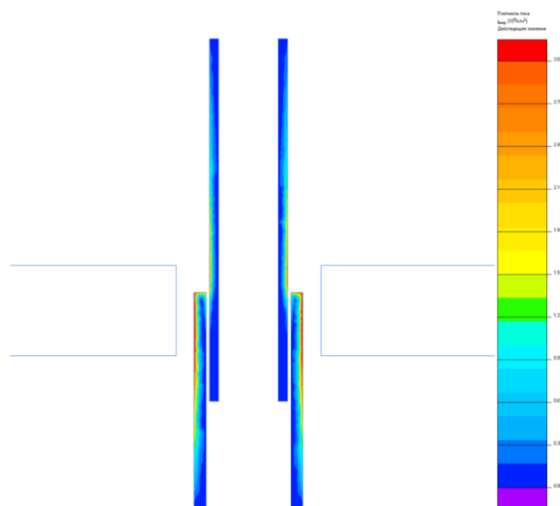


Рисунок 5 – Картина плотности вихревого тока в трубопроводе

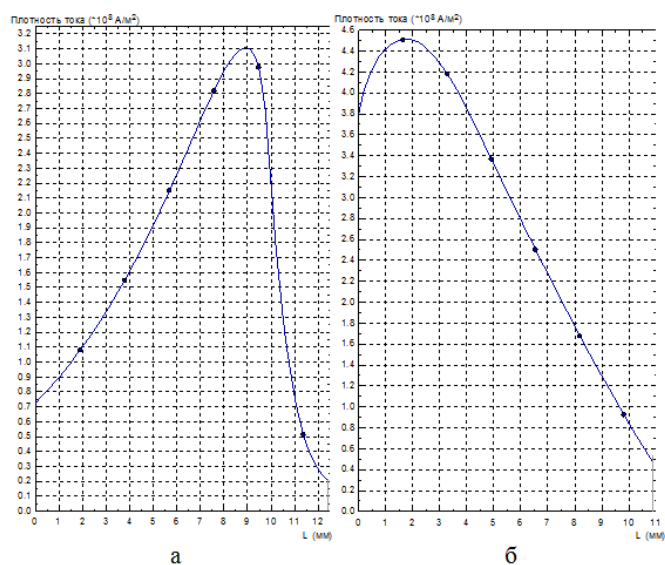


Рисунок 6 – График распределения вихревого тока по длине внешней стенки переходника трубопровода: а - длина внешней стенки трубопровода, б - длина внешней стенки переходника трубопровода

Установлено, что, распределение теплового поля деталей при индукционном нагреве зависит от положения индуктора относительно детали, где δ_r - расстояние от середины индуктора до верхнего края трубы (рисунок 7).

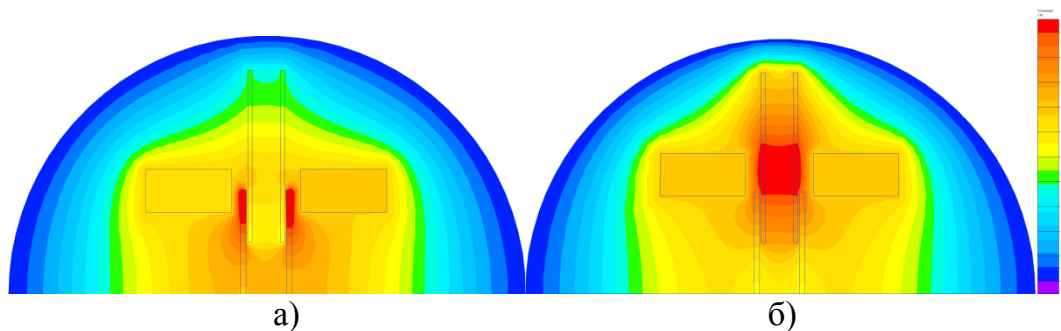


Рисунок 7 – Распределение теплового поля при изменении положения индуктора вверх относительно заготовки: а) при $\delta_r=1$ мм, б) при $\delta_r=3$ мм

В третьей главе рассматриваются вопросы разработки экспериментальной установки для автоматизированного управления индукционной пайкой. В качестве бесконтактных датчиков температуры были выбраны пирометры AST A250/A450 FO-PL. Для управления процессом пайки используется промышленный компьютер с платой сбора данных PCI-1710. Структурная схема приведена на рисунке 8.

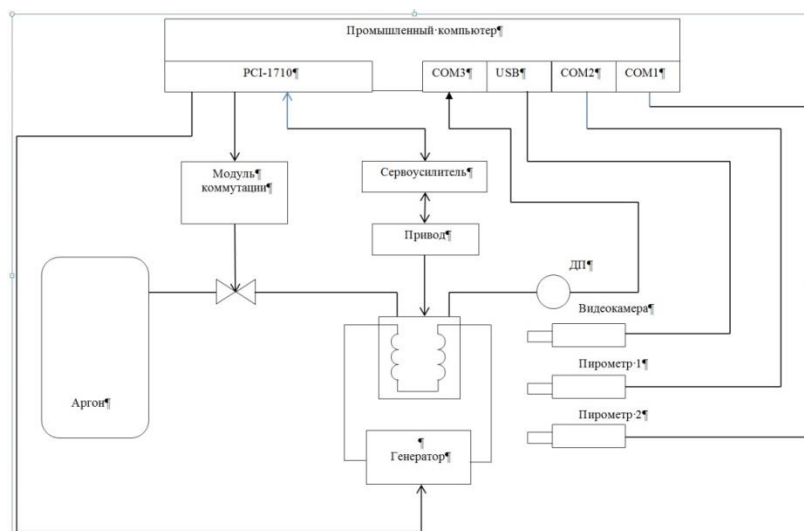


Рисунок 8 – Структурная схема экспериментальной установки для автоматизированной пайки трубопроводов в защитных средах

Управление процессом индукционной пайки осуществляется по двум параметрам: температура деталей и положение деталей относительно индуктора.

Для проведения исследований по применению двухконтурной системы управления в системе Matlab была разработана функциональная схема модели, представленная на рисунке 9, позволяющая моделировать одновременное управление, как по температуре волновода или трубопровода, так и положению деталей относительно индуктора.

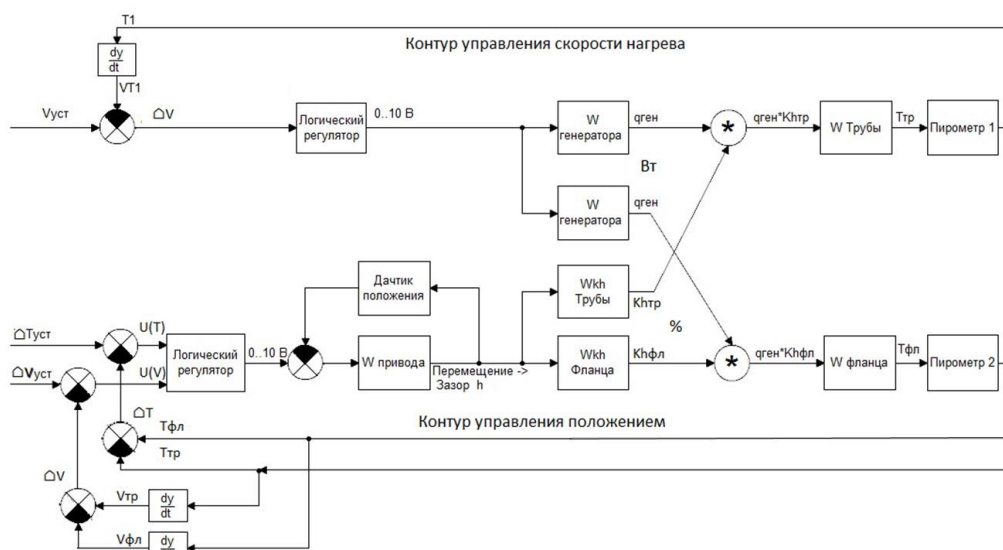


Рисунок 9 – Модель двухконтурной системы управления процессом индукционной пайки

Для контура управления по температуре в результате математического моделирования была найдена зависимость для управляющего воздействия по скорости нагрева, представляющая из себя логическую функцию:

$$u_1(t) = W_{int}(t) + imp(t, \tau_1, \tau_2) \times \begin{cases} 0, \text{ if } T_c < T_{sns} \\ \frac{|\Delta V(t)|}{\Delta V(t)} \cdot k_1, \text{ if } T_c(t) < T_{st} \text{ and } |\Delta V(t)| < V_{sns} \text{ and } T_c(t) > T_{sns}, \\ \frac{|\Delta V(t)|}{\Delta V(t)} \cdot k_2, \text{ if } T_c(t) < T_{st} \text{ and } |\Delta V(t)| > V_{sns} \text{ and } T_c(t) > T_{sns}, \\ -k_3, \text{ if } T_c(t) > T_{st} + T_{lim}, \end{cases} \quad (6)$$

где T_{sns} – нижняя граница измерения температуры датчиком (пирометром); $\Delta V(t)$ – разница скоростей нарастания контролируемой температуры одного из элементов паяемой сборки, по которому ведется контроль управления, и заданной программой; V_{sns} – порог допустимого отклонения контролируемой скорости нагрева от уставки; $T_c(t)$ – температура элемента паяемой сборки по которому ведется контроль управления; T_{st} – температура перехода в режим стабилизации; T_{lim} – допустимый предел превышения температуры стабилизации; k_1 – константа изменения управляющего сигнала на этапе нагрева заготовки до температуры стабилизации; k_2 – константа изменения управляющего сигнала на этапе стабилизации температур; k_3 – константа изменения управляющего сигнала при превышении допустимого предела нагрева на этапе стабилизации температур; W_{int} – интегральная составляющая с передаточной функцией.

По результатам математического моделирования для второго контура управления по положению была найдена зависимость для управляющего воздействия по положению детали относительно индуктора, представляющая из себя логическую функцию.

$$u_2(t) = imp(t, \tau_1, \tau_2) \times \begin{cases} \Delta T(t) \cdot k_1, \text{ if } |\Delta T(t)| > \Delta T_{max} \text{ and } T_{tb}(t) > T_{sns} \text{ and } T_{fl}(t) > T_{sns}, \\ \frac{(T_{fl}(t) - T_{sns}) \cdot k_1}{k_{simple}}, \text{ if } T_{fl}(t) > T_{sns} \text{ and } T_{tb}(t) < T_{sns}, \\ \frac{(T_{tb}(t) - T_{sns}) \cdot k_2}{k_{simple}}, \text{ if } T_{tb}(t) > T_{sns} \text{ and } T_{fl}(t) < T_{sns}, \\ \frac{|\Delta V(t)| \cdot k_2}{k_{simple}}, \text{ if } |\Delta T(t)| < \Delta T_{max} \text{ and } |\Delta V(t)| > \Delta V_{max}, \\ \frac{(\Delta V(t)) \cdot k_2 - |\Delta T(t)| \cdot k_3}{k_{simple}}, \text{ if } |\Delta T(t)| < \Delta T_{max} \text{ and } \Delta V_{min} < |\Delta V(t)| < \Delta V_{max}, \\ \frac{|\Delta T(t)| \cdot k_4}{k_{simple}}, \text{ if } |\Delta T(t)| < \Delta T_{max} \text{ and } |\Delta V(t)| < \Delta V_{min}, \end{cases} \quad (7)$$

где T_{sns} – нижняя граница измерения температуры датчиком (пирометром); $\Delta V(t)$ – разница скоростей нарастания температур элементов паяемой сборки; $\Delta T(t)$ – разница температур элементов паяемой сборки; $T_{fl}(t)$ – текущая температура фланца; $T_{tb}(t)$ – текущая температура волноводной трубы; $V_{fl}(t)$ – текущая скорость нагрева фланца; $V_{tb}(t)$ – текущая скорость нагрева фланца волноводной трубы; $\Delta V_{\max}$ – верхний порог включения регулятора по скорости нарастания температуры процесса; $\Delta V_{\min}$ – нижний порог включения регулятора по скорости нарастания температуры процесса; $\Delta T_{\max}$ – порог включения регулятора по температуре процесса; k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты усиления отдельных регуляторов; k_{simple} – общий коэффициент приведения к одному порядку.

На рисунке 10 представлен алгоритм работы контура управления скоростью нагрева. А на рисунках 11 и 12 представлены алгоритмы работы контура управления положением заготовки и расчета управляющего воздействия.

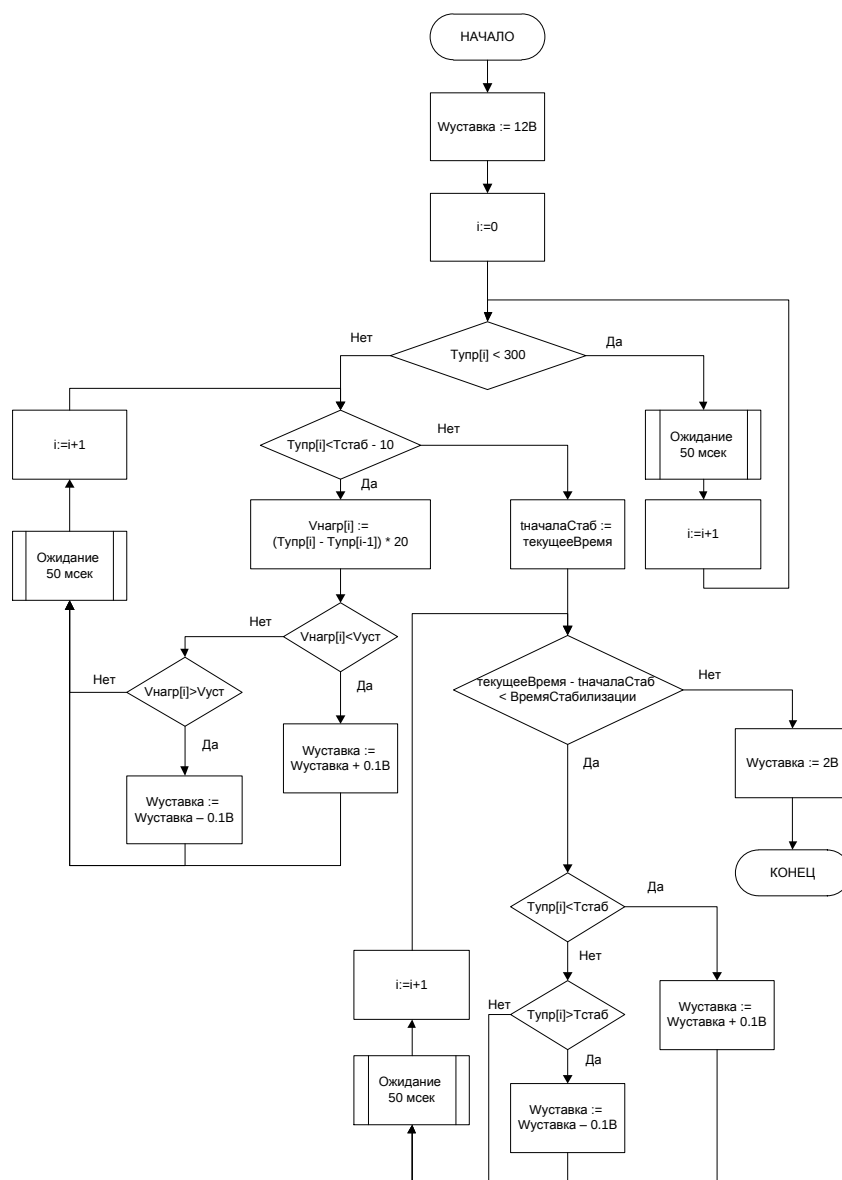


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма контура управления скоростью нагрева

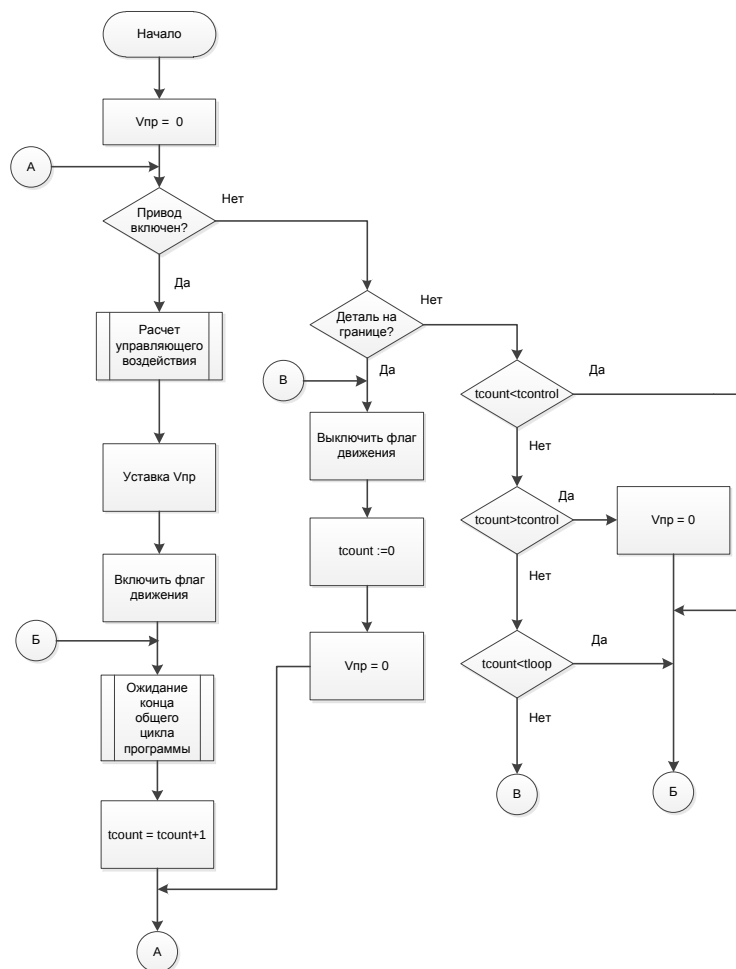


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма контура управления положением изделия относительно индуктора

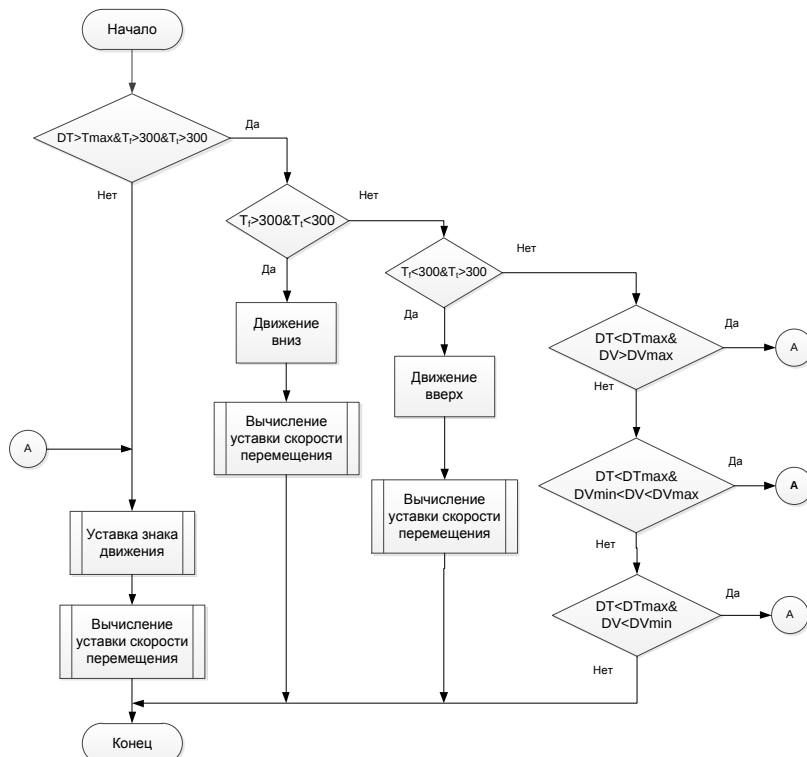


Рисунок 12 – Блок-схема алгоритма расчета управляющего воздействия

Внешний вид установки показан на рисунке 13.

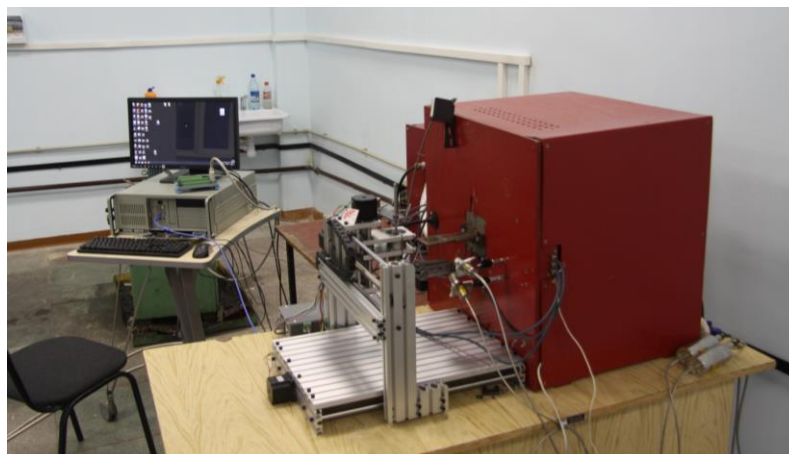


Рисунок 13 – Внешний вид двухконтурной системы управления для индукционной пайки

Четвертая глава. В рамках исследования эффективности применения разработанной системы автоматизации процесса индукционной пайки была проведена серия экспериментов на опытных образцах. При отработке технологических режимов пайки использовались следующие размеры волноводов: 28,5x12,6 мм; 35x15 мм; 58x25 мм и 19x9 мм. Для этих размеров была установлена единая скорость нагрева 5 град/сек. Повышение скорости нагрева приводит к росту перепада температур между верхней и нижней поверхностями фланца. Экспериментально были установлены необходимые зазоры между индуктором и фланцем, начальная мощность нагрева. Проведена оценка влияния флюса на погрешность измерения температуры пирометрами.

Изготовленные при помощи автоматизированной двухконтурной системы образцы волноводов подверглись ряду испытаний для подтверждения высокого качества их паяных соединений.

Результаты механических испытаний образцов, подтвердивших высокое качество паяных соединений, показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты контроля механической прочности паяных соединений

Типоразмер волновода	№ образца	Нагрузка разрушения, кгс	Место разрушения
35x15	2	1050	по основному металлу
		1040	по основному металлу
	3	1045	по основному металлу
		1040	по основному металлу
	4	1050	по основному металлу
		1045	по основному металлу

Микроструктура паяных швов волноводных трактов, выявленная при проведении металлографического контроля, изображена на рисунке 14. На фотографии видно, что в микроструктуре шва дефекты отсутствуют.



Рисунок 14 – Фрагмент паяного шва волновода сечением 35х15 мм, х500

Результаты проверки радиотехнических характеристик (РТХ) образцов показали, что коэффициент стоячей волны (КСВ) составляет 1,065, а потери 0,09 – 0,1 дБ/м, что соответствует международному стандарту на алюминиевые волноводы.

Результаты проведенных испытаний показывают, что качество полученных паяных соединений соответствует высоким требованиям конструкторской и нормативно-технической документации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Достигнута главная цель работы: повышение качества паяных соединений, путем создания принципов управления автоматизированной технологии индукционной пайки. Представленные результаты контроля качества паяных соединений волноводов подтверждают повышение стабильности качества паяных соединений элементов волноводных трактов путем устранения неисправимых дефектов.

1. Получена математическая модель индукционного нагрева элементов волноводной сборки из фланцев и трубопроводов, учитывающая конструкцию и размеры волноводов и трубопроводов, физические параметры материалов, начальные и граничные условия процесса, а также неравномерное распределение плотности вихревого тока в системе, позволяющая более точно рассчитывать и имитировать технологические параметры процесса индукционной пайки для повышения качества паяных соединений.

2. Моделирование электротермических процессов в пакетах Comsol Multiphysics и Elcut показало, что плотность вихревых токов распределена по детали неравномерно. Она резко увеличивается на угловых поверхностях деталей, а также плотность вихревого тока резко снижается в толщине стенок деталей. Области протекания вихревых токов хорошо локализованы и зависят от расположения детали относительно индуктора. Область нагрева деталей совпадает с распределением плотности вихревых токов. Нагрев начинается с поверхности деталей, и только потом температурное поле распространяется на всю нагреваемую область детали.

3. Разработана экспериментальная установка двухконтурной автоматизированной системы управления процессом индукционной пайки,

основанная на пирометрическом контроле температуры элементов паяного соединения и управлением мощностью генератора и позиционированием заготовки.

4. Разработана модель двухконтурной автоматизированной системы управления процессом индукционной пайки, позволяющая рассчитать требуемое распределение температур на нагреваемых элементах деталей и течение технологического процесса получения паяных соединений при различных алгоритмах управления.

5. Полученные алгоритмы управления скоростью нагрева и положением детали относительно индуктора, позволяют вести процесс управления индукционным нагревом одновременно по двум контурам управления и эффективно перераспределять энергию индукционного нагрева в системе «индуктор – деталь».

6. Проведены исследования процесса индукционной пайки деталей различных типоразмеров с установкой границ перемещения, начального положения, стартовой мощности и выборе точек контроля температур. Исследования показали необходимость точного позиционирования деталей относительно индуктора, выбора величины начальной уставки мощности и скорости пайки от которых зависит качество управления процесса, а также влияние флюса на погрешность измерения температуры деталей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бочарова О.А. Моделирование распределения температуры при электронно-лучевом нагреве / Т.Г. Орешенко, О.А. Бочарова, А.С. Свиридова, В.С. Тынченко, А.Н. Бочаров // Научно-технический вестник Поволжья. №5 2019г. – Казань: ООО «Научно-технический вестник Поволжья», 2019. – с.70-73

2. Бочарова О.А. Моделирование процесса индукционной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов / О.А. Бочарова, А.В. Мурыгин, А.Н. Бочаров, Р.В. Зайцев // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, №3. С. 266–273. Doi:10.31772/2587-6066-2020-21-2-266-273.

Программы для ЭВМ зарегистрированные в Роспатенте

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021612462 Программа для моделирования распределения температуры при нагреве фланца в процессе индукционной пайки волноводных трактов 17.02.2021 г. Бочарова О.А., Курашкин С.О., Бочаров А.Н.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах:

4. Emilova O.A. The automated system for technological process of spacecraft's waveguide paths soldering / V S Tynchenko, A V Murygin, O A Emilova, A N Bocharov, V D Laptanok// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016 (Scopus иWoS)

5. Emilova O.A. Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating / Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptanok V.D., Emilova O.A., Bocharov A.N. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. - Vol. 173. – №. 1. (Scopus)

6. Emilova O.A. Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering / Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptanok V.D., EmilovaO.A., Seregin Y.N. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 173. – №. 1. (Scopus)

7. Emilova O.A. A control algorithm for waveguide path induction soldering with product positioning / Tynchenko V.S., Murygin A.V., Petrenko V.E., Seregin Y.N., Emilova O.A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 255. – №. 1 (Scopus иWoS)

8. Emilova O.A. Optimizing the control process parameters for the induction soldering of aluminum alloy waveguide paths / Tynchenko V.S., Murygin A.V., Petrenko V.E., Emilova O.A., Bocharov A.N. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 255. – №. 1. (Scopus иWoS)

9. Emilova O.A. Development of an Automated Information System for Controlling the Induction Soldering of Aluminum Alloys Waveguide Paths / Murygin A.V., Laptенок V.D., Tynchenko V.S., Emilova O.A., Seregin Y.N. // 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). - IEEE, 2018. – P. 1-5. (Scopus+WOS)

10. Bocharova O.A. Temperature spread modeling of electron beam heating process / T G Oreshenko, O A Bocharova, V S Tynchenko, A N Bocharov, V E Petrenko and V VKukartsev // Journal of Physics: Conference Series 1353 (2019) 012040 doi:10.1088/1742-6596/1353/1/012040 (ссылка на полный текст <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1353/1/012040/pdf>)

11. Bocharova O.A. Induction heating simulation of the waveguide assembly elements / O A Bocharova, V S Tynchenko, A N Bocharov, T G Oreshenko, A V Murygin, I A Panfilov // Journal of Physics: Conference Series 1353 (2019) 012040 doi:10.1088/1742-6596/1353/1/012040 (ссылка на полный текст <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1353/1/012040/pdf>)

12. Bocharova, O.A. Simulation of electromagnetic and thermal processes during induction heating of pipelines in Elcut 5.1 / O. A. Bocharova, A. V. Murygin, V.S. Tynchenko, S O Kurashkin, A N Bocharov and V E Petrenko // MIST: Aerospace-III 202 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1047 (2021) 012046 doi:10.1088/1757-899X/1047/1/01204 (ссылка на полный текст <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1047/1/012046/pdf>)

13. Bocharova, O.A. Automated installation for pipelines brazing in protective environments using induction heating / A V Murygin, V S Tynchenko, S O Kurashkin, O A Bocharova, Yu N Seregin and A N Bocharov // MIST: Aerospace-III 202 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1047 (2021) 012110 doi:10.1088/1757-899X/1047/1/01211 (ссылка на полный текст <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1047/1/012110/pdf>)

Монография

14. Бочарова, О.А. 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, 2021. – 168 с.

В других изданиях:

15. Эмилова, О.А. Задачи автоматизации процесса индукционного нагрева и пути их решения / О.А. Эмилова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Дню космонавтики (10–15 апреля 2016 г., Красноярск) : в 2 т. Т. 1. – Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – 734-736 с. – URL: <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/mQ3Y0f8Bbz2HK18> (дата обращения: 15.09.2021). – Текст: электронный.

16. Emilova, O.A. Applying the method of induction heating for soldering waveguide paths. / O.A. Emilova // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации : материалы XV Междунар. науч. конф. бакалавров, магистрантов,

аспирантов и молодых ученых / под общ. ред. И. В. Ковалёва, М. В. Савельевой, Н. А. Шумаковой ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – 243-246 с. – URL: <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/KpUjdFxPv3dRdiW?path=%2F%D1%81%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B8%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B9> (дата обращения: 15.09.2021). - Текст: электронный.

17. Эмилова, О.А. Индукционная пайка: процесс и его особенности. / Эмилова О.А., В.С. Тынченко // материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. Решетневские чтения, посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2016. – Ч.2. – с. 173-174. – URL: <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/UGP7UcMvdmtYV7o> (дата обращения: 15.09.2021). - Текст: электронный.

18. Бочарова, О.А. Особенности технологии индукционной пайки алюминиевых волноводных трактов / О.А. Бочарова, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин // материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. Решетневские чтения, посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (12–16 нояб. 2018, г. Красноярск) : в 2 ч. СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2018. Ч. 2. – с. 186-187. – URL: <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/jaGmYOO4I73tGb1> (дата обращения: 15.09.2021). - Текст: электронный.

19. Бочарова, О.А. Применение мультифизической среды Comsol для моделирования процесса индукционного нагрева волноводных трактов / О.А. Бочарова // Материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. «Решетневские чтения» (11–15 нояб. 2019, г. Красноярск) : в 2 ч. / – СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2019. – Ч. 2. – с. 236-237. – URL: <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/XCKOVYFUJ5KBuVR> (дата обращения: 15.09.2021). - Текст: электронный.

20. Бочарова, О.А. Моделирование индукционного нагрева элементов волноводной сборки / О.А. Бочарова, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин. А.Н. Бочаров, Т.Г. Орешенко // Тезисы докладов Международной конференции «Сварка в России – 2019: современное состояние и перспективы». Посвящена 100-летию со дня рождения Б.Е. Патона / Под редакцией д.т.н., профессора Сараева Ю.Н. - Томск, Электрон.дан. – 2019. – с.57 – 58. – URL: <http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/%D0%A1%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%BA%D0%B0%202019.pdf> (дата обращения: 15.09.2021). - Текст: электронный.

21. Бочарова, О.А. Применение среды Comsol Multiphysics для моделирования тепловых полей в процессах ЭЛС и индукционной пайки / О.А. Бочарова, Т.Г. Орешенко, В.С. Тынченко, А.Н. Бочаров, А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин // Сборник докладов третьей международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии», «Национальный Исследовательский Университет "МЭИ" 12-15 ноября 2019 года. М.: Издательство МЭИ. – 2020. – с. 298 – 308. – URL: <http://ebw2019.mpei.ru/Pages/default.aspx> (дата обращения: 15.09.2021). - Текст: электронный.

Бочарова Олеся Андреевна

Автоматизированная система управления процессом индукционной пайки

Автореферат

Подписано к печати _____.____.20____. Формат 60x84/16 Уч. изд. л. 1.0 Тираж 100 экз.

Заказ № _____

Отпечатано в отделе копировальной и множительной техники

СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

660037, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31