

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Сибирский государственный университет науки и технологии
имени академика М.Ф. Решетнева»**

На правах рукописи

Бочарова Олеся Андреевна

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ**

2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Красноярск 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Автоматизированная пайка методом индукционного нагрева	11
1.1 Анализ методов и устройств автоматизации индукционной пайки	11
1.2 Моделирование индукционной пайки	18
1.3 Контроль качества паяных соединений	24
1.3.1 Исправление дефектов пайки	27
1.3.2 Выявление причин появления некачественного паяного соединения	38
Выводы	31
2 Моделирование процессов, протекающих при индукционной пайке ..	33
2.1 Физические основы индукционного нагрева	33
2.2 Математическая модель индукционного нагрева	36
2.3 Моделирование электротермических процессов, проходящих при индукционном нагреве	42
2.3.1 Моделирование электротермических процессов при индукционном нагреве волноводных трактов	44
2.3.2 Моделирование электротермических процессов при индукционном нагреве трубопроводов	47
Выводы	58
3 Автоматизированная система управления индукционной пайкой	59
3.1 Экспериментальная установка для автоматизированного управления индукционной пайкой.....	59
3.2 Модель автоматизированной системы управления индукционной пайкой	64
3.3 Разработка алгоритмов управления индукционной пайкой	68
3.3.1 Разработка алгоритма управления контуром скорости нагрева	70
3.3.2 Разработка алгоритма управления по положению изделия ..	73
3.4 Реализация алгоритмов управления двухконтурной	

автоматизированной системой индукционной пайки	80
Выводы	84
4 Экспериментальные исследования технологии индукционной пайки	86
4.1 Выбор положения пирометров	86
4.2 Отработка технологических режимов пайки волноводов заданных размеров	91
4.2.1 Исследование уставки начальной мощности	91
4.2.2 Исследование начального положения и границ перемещения	94
4.2.3 Оценка влияния флюса на измерение температуры пирометрами	97
4.2.4 Отработка технологии индукционной пайки волноводов	99
4.3 Исследование индукционной пайки трубопроводов в защитных средах	103
4.4 Исследование качества паяных соединений волноводных трактов	110
Выводы	113
Заключение	115
Библиографический список	117

ВВЕДЕНИЕ

Индукционная пайка изделий зарекомендовала себя как результативный метод создания неразъемных соединений, способный решать поставленные перед промышленностью задачи по снижению трудоемкости процессов, повышению их производительности и качества продукции.

Индукционная пайка может применяться для соединения широкого диапазона металлов: от черных до цветных. Причем индукционная пайка идеально подходит для соединения металлов с разной температурой плавления.

Индукционная пайка обеспечивает высокую скорость и локальность нагрева, а также дает возможность гибкого управления режимом нагрева.

Технологически правильное спаянное соединение обладает высокой прочностью, герметичностью и устойчивостью к коррозии. Индукционная пайка обеспечивает бесконтактный способ нагрева металлов, тем самым предохраняя изделие от деформаций.

Индукционная пайка 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 разных 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.

Применяется индукционная пайка и для соединения волноводных трактов космических аппаратов. 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 управления индукционной пайки. Поэтому тема диссертационного исследования является актуальной.

Целью диссертационного исследования является повышение качества паяных соединений путем 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.

Разработанные 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 Multiphysics5.3. 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 мощностью генератора, так и положению 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» HIRM-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 2-19 года, г. Томск, Третьей международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии», «Национальный Исследовательский Университет "МЭИ" 12-15 ноября 2019 года, г. Москва.

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

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 при индукционном нагреве, широко используются вычислительные средства и пакеты прикладных программ Elcut 5.1 и COMSOL Multiphysics 5.3.

Проведенные исследования выявили необходимость повышения степени автоматизации процесса индукционной пайки деталей, необходимость разработки систем автоматизации, основанных на использовании современных средств измерения и новых алгоритмах 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. Дано физическое и математическое описание явлений, происходящих в системах индукционного нагрева.

В третьей главе описана экспериментальная двухконтурная система автоматизированного управления процессом индукционной пайки. Разработана 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, повышающая качество паяных соединений. В ходе моделирования работы двухконтурной системы управления разработаны алгоритмы управления скоростью нагрева и положением детали относительно индуктора, позволяющие эффективно перераспределять энергию индукционного нагрева в системе «индуктор – деталь».

В четвертой главе проведено исследование индукционного нагрева элементов волноводной сборки и трубопроводов. Определены технологические параметры индукционного нагрева.

В заключении изложены основные выводы и результаты работы.

1 АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПАЙКА МЕТОДОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

1.1 Анализ методов и устройств автоматизации индукционной пайки

Основы применения и развития индукционного нагрева в России были заложены в 30-40-е годы прошлого столетия В. П. Вологдиным, М. Г. Лозинским. Первым официальным применением индукционного нагрева можно считать термообработку шеек коленчатого вала и кулачкового распределительного вала, представленном на рисунке 1.1, на главном автомобильном гиганте СССР (ЗИС). Массовое применение в промышленности индукционный нагрев получил во время Великой Отечественной войны, благодаря Вологдину, как наиболее эффективный процесс упрочнения сталей для деталей танков, самолётов, кораблей и другой техники [1].

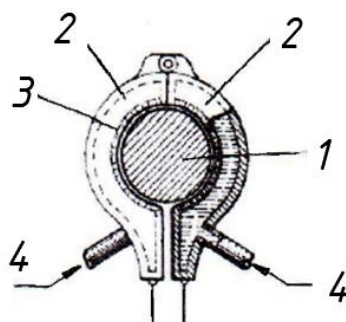


Рисунок 1.1 – Индуктор для закалки шеек коленчатого вала:

1 – вал; 2 –полуцилиндрические части индуктора (2 шт.); 3 –камера закалочного душа; 4 – штуцер для подвода и отвода охлаждения.

Вопросам теории и практики индукционного нагрева, расчету и проектированию элементов индукционных установок, разработке систем автоматического управления посвящено большое количество работ ряда российских предприятий, таких как ВНИИТВЧ-ЭСТЭЛ (г. С.-Петербург), НКTB «Вихрь», НПП «Курай», НПО «Параллель» (г. Уфа), НПП «ЭЛСИТ» (г. Томск), ООО «Эком» (г. Красноярск).

Индукционная пайка эффективный метод создания неразъемных соединений, способный соединять различные типы металлов. Индукционная пайка обеспечивает высокую скорость и локальность нагрева, а также дает возможность гибкого управления режимом нагрева [2].

Существует способ [3] контроля индукционного нагрева с помощью видеокамеры. В течение процесса индукционного нагрева заготовки фиксируется момент расплавления припоя, по изменению геометрической формы паяного шва с помощью видеокамеры автоматизированной системы управления. Недостатком данного способа является отсутствие контроля и управления температурой элементов паяемого изделия в процессе нагрева. Также нагрев предлагается производить стационарно, без изменения позиции паяемого изделия относительно индуктора, что при пайке изделий со значительными различиями в размерах, форме и/или массе отдельных частей значительно усложняет определение позиции, обеспечивающей равномерный нагрев в зоне пайки без перегрева и разрушения периферийных зон изделия.

В способе автоматического управления нагревом при пайке [4] предлагается предварительный нагрев изделий на максимальной мощности нагревателя с одновременным измерением температуры в нескольких точках поверхности, для чего используются термопары. По окончании предварительного нагрева регулирование мощности нагревателя осуществляют в зависимости от контролируемых параметров, которыми являются скорость изменения максимального перепада температур в изделии и максимальный градиент температуры в измеряемых точках, определяемый по формуле:

$$\max \left(\frac{dT_i}{dt} \right) = C_1 \left(T_r - \left(T_i + C_2 \frac{dT_i}{dt} \right) \right),$$

где $\frac{dT_i}{dt}$ – градиент температуры в i – точке измерения, град/м; T_r – температура газа в печи, град; T_i – температура изделия в i – точке измерения, град; $\frac{dT_i}{dt}$ –

скорость изменения температуры в i – точке измерения, град/сек; C_1 и C_2 – постоянные коэффициенты.

В устройстве для управления процессом пайки [5] предлагается осуществлять управление процессом пайки по интегральному коэффициенту излучения материала припоя. Устройство содержит оптический датчик, усилитель постоянного тока, дифференцирующую цепочку, релейный исполнительный механизм и силовой блок (рисунок 1.2). Устройство обеспечивает постепенный разогрев припоя, вплоть до температуры его плавления. Оптический датчик контролирует излучение только с поверхности припоя. При достижении припоем температуры плавления происходит резкое изменение его интегрального коэффициента излучения, что приводит к формированию единичного импульса на входе релейного исполнительного механизма, что приводит к срабатыванию данного механизма и обесточивания силового блока. Тем самым прерывая нагрев изделия. Недостатком устройства является нестабильность получения качественного изделия.

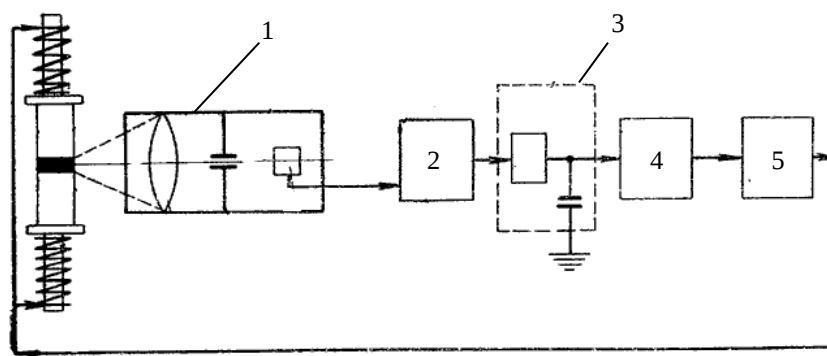


Рисунок 1.2 – Система управления процессом индукционной пайки по излучению материала припоя: 1 – оптический датчик; 2 – усилитель постоянного тока; 3 – дифференцирующая цепочка; 4 – релейный исполнительный механизм; 5 – силовой блок

Управлять процессом индукционной пайки можно скачкообразным изменением мощности индукционной нагревательной печи [6, 7]. В процессе индукционного нагрева производится измерение температуры в печи и

управление процессом нагрева путем скачкообразного изменения мощности индукционной нагревательной печи. Данный подход позволяет выравнивать температуру трубной заготовки по средней температуре каждого участка заготовки. Сравнивая полученные данные с заданной температурой, система изменяет мощность на величину, пропорциональную разнице температур. Недостатком способа является низкая точность управления нагревом.

В способе [8] автоматического управления индукционной пайкой крупногабаритных изделий сложной формы увеличивают скорость нагрева за счет учета инерционности процесса нагрева и опережающего регулирования градиента температуры на стадии нагрева. В процессе нагрева изделия производят измерение температуры в различных точках поверхности изделия, определяя разницу температур между максимальной точкой нагрева и минимальной, также вычисляется скорость нагрева этих точек. По данным параметрам осуществляется управление мощностью нагрева. При достижении температуры максимально нагретой точки значения, при котором скорость изменения температуры достигает заранее установленного значения, нагреватель отключают. Данное значение температуры отключения определяется расчетным путем или экспериментально путем однократного предварительного нагрева технологического образца.

Установки для проведения индукционной пайки изделий обычно содержат генератор, согласующее устройство, к которому подключается индуктор, и промышленный компьютер или контроллер для управления процессом индукционной пайки. Типы используемых датчиков могут различаться в зависимости от изготовителя установки.

Например, в полезной модели [9] рассматривается универсальная автоматизированная установка для индукционного нагрева, которая содержит технологический пост для пайки, технологический пост для закалки и технологический пост для наплавки (рисунок 1.3). Силовая часть – высокочастотный генератор выполнен на полупроводниковой технике (транзисторах), что позволяет повысить КПД установки. Система управления

выполнена на основе программируемого контроллера и связанного с ним промышленного компьютера.

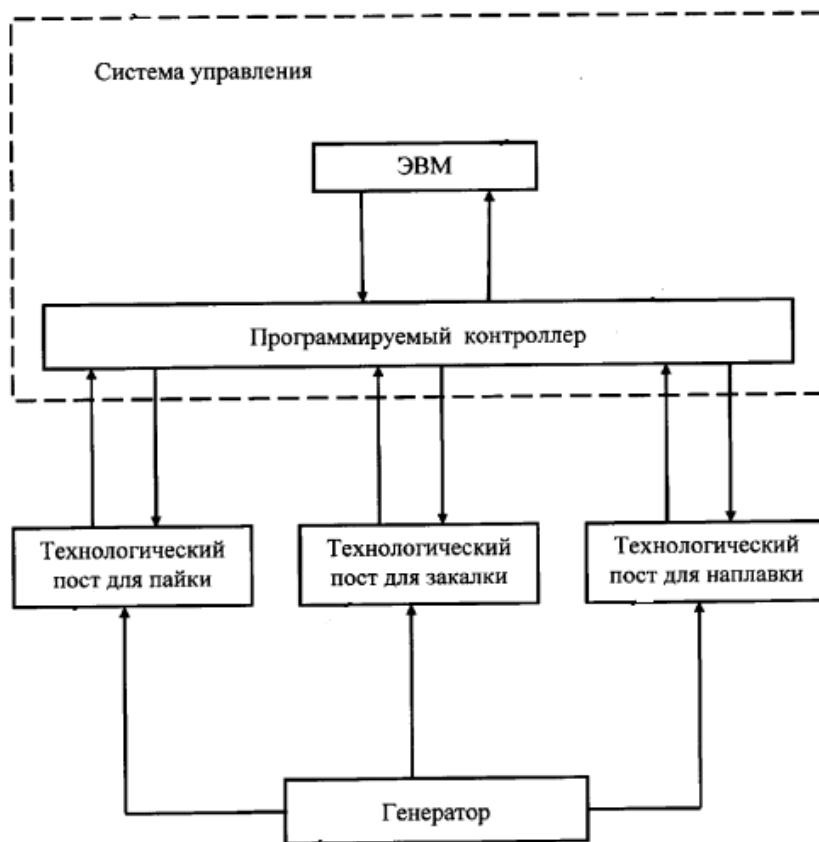


Рисунок 1.3 – Структурная схема универсальной автоматизированной установки для индукционного нагрева

На рисунке 1.4 технологический пост для пайки универсальной автоматизированной установки. Система управления обеспечивает алгоритм работы установки в заданном оператором режиме. После выбора режима программным обеспечением производится расчет технологических параметров индукционного нагрева на основе тепловых, электромагнитных, оптимизационных и статистических моделей процесса индукционного нагрева. Для этого используются следующие исходные данные: материал,

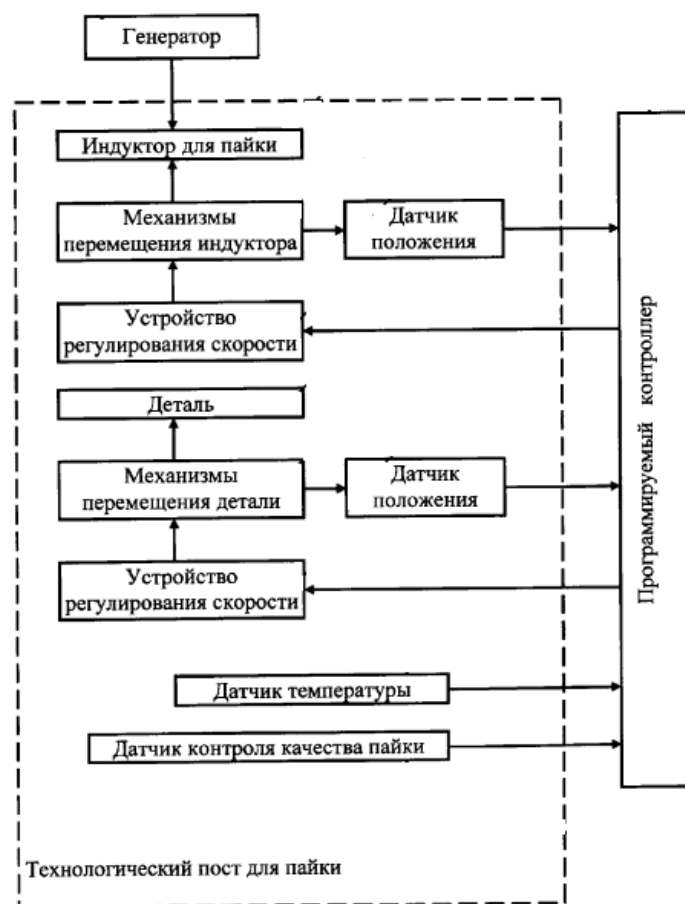


Рисунок 1.4 – Структурная схема технологического поста пайки универсальной автоматизированной установки для индукционного нагрева

геометрия изделия, параметры индуктора. Затем значения технологических параметров передаются в программируемый логический контроллер. Программируемый контроллер ведет процесс индукционной пайки, опираясь на показания датчика температуры и управляя мощностью генератора. Для позиционирования деталей пост имеет средства перемещения индуктора и детали, а также датчики контроля их положения.

Большое внимание уделяется непосредственно автоматизации оборудования для индукционной пайки. В работе [10] представлена открытая платформа для управления индукционной пайкой. Основу системы управления составляет панельный контроллер СПК107. Для мониторинга процесса создано автоматизированное рабочее место оператора на базе персонального компьютера с SCADA-системой. Кроме этого данные технологического процесса могут храниться в облачном сервисе, где также может осуществляться мониторинг

процесса. Оборудование предназначено для пайки изделий в вакуумной камере в среде защитных газов. Работа оборудования полностью автоматизирована (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 - Структурная схема автоматизированной системы управления пайкой

В работе [11 - 13] рассмотрена автоматизированная технология и специализированное оборудование для индукционной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов (рисунок 1.6). Автоматизированная система построена на базе промышленного компьютера. Для управления течением процесса пайки использовалась плата ввода/вывода PCI – 1710. Измерение температуры проводилось с помощью пирометров, подключенных к промышленному компьютеру по интерфейсу RS-232. Для калибровки установки по температуре в состав системы включена термопара. Так как волноводы имеют большой спектр типоразмеров с различными массогабаритными параметрами, а также существует небольшая разница температур плавления припоя и основного материала при средней скорости нагрева 10 – 15 град/с., то данная система используется для пайки

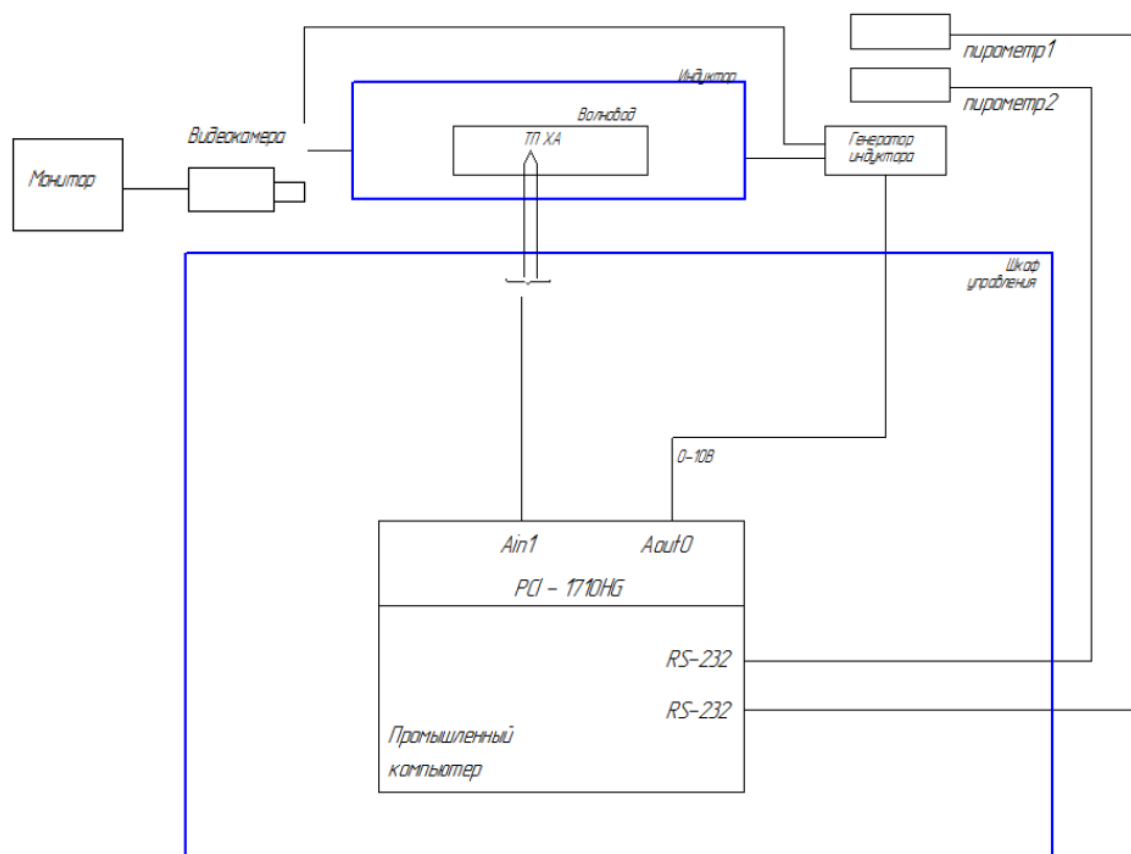


Рисунок 1.6 – Структурная схема комплекса автоматизированного оборудования для пайки волноводных трактов с использованием индукционного нагрева

волноводных трактов, а также для отработки технологии пайки для различных типоразмеров волноводов. Так в результате исследования распределения температурных полей в зоне пайки разработаны и оптимизированы конструкции индукторов, позволяющие приблизить зону максимального нагрева к зоне пайки. Данная автоматизированная система управления имеет один контур управления. Волновод перемещается относительно индуктора вручную.

1.2 Моделирование индукционной пайки

Математическое моделирование один из ответственных этапов в успешной разработке систем индукционной пайки. Приступая к математическому моделированию индукционной пайки необходимо иметь четкое представление о природе и физике этого процесса. Применяя математическую модель необходимо

хорошо понимать ее ограничения, допущения и возможные ошибки. Необходимо учитывать влияние на модель определенных параметров, таких как граничные условия, свойства материалов, начальные условия, что может привести как к усложнению модели, так и к ее упрощению.

Рассматривая процесс индукционной пайки, видно, что он представляет сложную комбинацию электромагнитных, тепловых и металлургических процессов, зависящих от множества факторов.

Перенос тепла и электромагнетизм тесно взаимосвязаны, так как физические свойства нагреваемых материалов могут сильно зависеть от интенсивности магнитного поля и температуры.

В общем случае пространственно-временное распределение температуры в нагреваемом изделии описывается сложной системой взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитных и температурных полей. Решение задачи индукционного нагрева сводится к решению системы нестационарных линейных дифференциальных уравнений [14].

Для моделирования индукционной пайки используют различные подходы. Для расчета процесса теплового нагрева можно использовать аналитическое решение дифференциальных уравнений. Решение задач нестационарной теплопроводности можно осуществить методами разделения переменных, операционными методами, эффективно используются интегральные преобразования Лапласа, Фурье и Ханкеля, а также метод интегрирования по распределению источников тепла, основанный на применении функции Грина. Решения уравнения теплопроводности для безразмерных чисел подобия сведены в таблицы, иллюстрированы графиками, что позволяет быстро производить технические расчёты [15 - 18].

Однако данные методы позволяют получить приемлемую точность расчета лишь для узкого класса устройств индукционного нагрева. И данный подход обычно используется для геометрически простых систем или отдельных частей сложных систем.

Весьма широкое распространение получило решение уравнений Максвелла и Фурье численными методами. Наиболее распространёнными подходами здесь являются методы конечных разностей и методы конечных элементов [16 - 23]. При использовании данных методов происходит последовательное решение ряда задач, связанных с исследованием электромагнитных и тепловых полей.

При этом при численных расчетах может учитываться зависимость электрофизических характеристик нагреваемого от температуры, нелинейный характер распределения внутренних источников тепла по изделию, а также наличие нескольких видов теплообмена на границах изделия [24, 25]. В работе [20] показано исследование электромагнитного поля и вихревых токов при индукционной пайке. Уравнения Максвелла решены на основе метода конечных разностей. Результаты моделирования также указывают, что вихревые токи распределены в заготовке неравномерно. Максимальная плотность вихревых токов достигается на поверхности заготовки и в углах.

При индукционном нагреве необходимым условием является равномерное распределение температуры. Требуемое распределение температуры зависит от распределения плотности тока по поверхности изделия. Необходимых результатов можно добиться индуктором определенной формы. Поэтому существенным моментом в проектировании индукционной установки является выбор конструкции индуктора и воздушного зазора между его внутренней рабочей поверхностью и поверхностью нагреваемого изделия. Особенно сложными для нагрева оказываются детали с острыми углами и поверхностями с резкой кривизной в нескольких направлениях [18, 26, 27].

Успешным решением задачи проектирования индукторов является применение двухмерной или трехмерной модели индукционной пайки. Поэтому численные методы исследования индукционной пайки могут использоваться для оптимизации конструкции индукторов и энергетических параметров индукционных установок [27, 28].

Экспериментальное исследование численных моделей индукционного нагрева обычно проводится путем измерения временного хода температуры в

изделии с помощью термопар [29 - 31] или с помощью термографических камер [32, 33]. Основными преимуществами измерения температуры с помощью термопар являются: высокая точность точечных измерений, возможность измерения внутренней температуры с помощью датчиков, размещенных внутри детали, и низкая стоимость. Однако есть несколько трудностей, связанных с использованием термопар для измерения температуры в больших объемах заготовок. Большое количество термопар, расположенных внутри заготовки или на ее поверхности, может влиять на процесс индукционного нагрева. Кроме того, измерение температуры поверхности с помощью термопар может быть затруднено на производственной линии. Другим важным ограничением является время реакции термопары, так как индукционный нагрев является относительно быстрым процессом. Чтобы избежать этих ограничений, можно использовать бесконтактный метод измерения, основанный на термографии.

Термография - это форма инфракрасного (ИК) измерения, которая обеспечивает цветовое кодирование теплового профиля поверхности мишени. Термографические устройства формирования изображения, такие как термографическая камера, используют матрицы фокальной плоскости датчиков, которые реагируют на электромагнитное излучение в ИК-диапазоне. Изображения или видео, полученные с помощью термографической камеры, могут быть сохранены для последующих исследований или они могут обрабатываться в режиме реального времени. Эти данные могут также использоваться для обнаружения дефектов материала в заготовках [34, 35] или для наблюдения температурных распределений и динамических изменений в процессе нагрева, поскольку современные термографические камеры способны отслеживать очень быстрые температурные изменения в микросекундном домене.

Современное компьютерное моделирование способно эффективно имитировать электромагнитные и тепловые явления для многих процессов, включая те, которые связаны с явлением электромагнитной индукции [36 - 45]. Такие пакеты моделируют широкий круг задач, не только процессы при

индукционном нагреве. В основе работы таких пакетов лежит метод конечных элементов.

Весь расчет в подобных пакетах проводится в интерактивном режиме и при этом не нужно писать сложных уравнений электромагнитных и тепловых процессов, что позволяет проводить расчеты широкому кругу исследователей и разработчиков. Строится графическая модель, вводятся свойства материала и определяются граничные условия и далее сам программный продукт разбивает пространство моделирования на конечные элементы. Результаты выводятся в числовом и графическом виде [46].

Пакет COMSOL позволяет моделировать практически все физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями. Программа содержит различные решатели, которые могут справиться с самыми сложными задачами [46 - 52].

В работе [53, 54] в COMSOL Multiphysics моделировался индукционный нагрев стальной детали цилиндрической формы при различных режимах нагрева. При моделировании учитывались температурно-зависимые свойства материала, и оценивалось их влияние на процесс нагрева. Результаты моделирования также сравнивались с экспериментальными исследованиями процесса индукционного нагрева. Контроль нагрева заготовки осуществлялся с помощью термографической камеры.

Исследование влияния параметров индукторов на эффективность нагрева деталей и на зону максимального нагрева с использованием для моделирования системы COMSOL представлено в работе [55]. Моделирование параметров электромагнитного поля проведено в диапазоне частот 22 – 100 кГц. Результаты моделирования показали, что наибольшая скорость нагрева достигается при более низких частотах, т. к. в этом случае глубина проникновения электромагнитного поля в материал деталей выше.

В работе [56] представлена математическая модель температурного поля в прокатном валке при термической обработке с помощью индукционного нагрева токами различных частот. Реализация предложенной модели в виде программного

продукта позволяет определять распределение нестационарных температурных полей в прокатном валке. Данное программное обеспечение может быть использовано для обоснованного выбора режима термической обработки деталей.

Исследователи, выполнившие работу [57], предлагают объединить математический аппарат исследования электромагнитных и температурных процессов для оптимизации управления источником индукционного нагрева.

В работе [58] для моделирования процессов нагрева ферромагнитных заготовок и последующей выработки алгоритмов управления использовалась связка COMSOL Multiphysics и Simulink.

ANSYS Multiphysics [59 – 63] также является комплексным программным продуктом, включающим в себя большинство существующих физических дисциплин. Например, расчет напряженно-деформированного состояния конструкции, теплообмен, гидрогазодинамику, электромагнетизм и т.д. Пакет также содержит специальные междисциплинарные элементы, которые позволяют напрямую решать связанные задачи. В комплекте ANSYS Multiphysics есть модуль ANSYS Emag. Данный пакет ориентирован на решение задач низкочастотных электромагнитных приложений и обеспечивает всесторонний анализ различных электромагнитных явлений на всех этапах проектирования [46, 64].

В работе [65] пакет ANSYS применялся для прогнозирования квазистационарного теплового поля в заготовках различных размеров и форм при различных способах движения. При моделировании тепловых полей применялись различные подходы, такие как прямой массоперенос, внешнее смещение температурного поля, изменение электромагнитного поля и имитация вращения заготовок с помощью анизотропной теплопроводности.

Также пакет ANSYS может работать в связки с другими программами численного моделирования. В работе [66] проводилось моделирование индукционного нагрева плазменно-напыленных износостойких покрытий. Строились электромагнитные и тепловые поля, а в программе SYSWELD

остаточные напряжения в покрытии. Результаты моделирования проверялись посредством экспериментальных исследований.

ELCUT – интегрированная диалоговая система программ, позволяющая решать осесимметричные и плоские задачи следующих типов: расчет электрического поля, расчет магнитного поля, задачи теплопередачи, задачи механической прочности, мультидисциплинарные задачи. Дружественный пользовательский интерфейс, простота описания моделей позволяют широко применять его для научно-исследовательских и инженерных расчетов. Является одним из немногих программных продуктов российского производства в этой области [46, 67, 68].

Программный пакет FLUX – один из немногих программных продуктов – предоставляет возможность построения трехмерных моделей объектов любой сложности. Пакет FLUX предназначен для многопараметрического анализа электромагнитных и тепловых полей методом конечных элементов. Он подходит для проектирования установок индукционного нагрева деталей сложной формы. Особенностью пакета FLUX является возможность создания электрических схем элементов индукционной установки [27, 69 - 71].

1.3 Контроль качества паяных соединений

Паяное соединение, как и любое другое, подлежит контролю для обнаружения скрытых дефектов. Для оценки качества паяного соединения применяют контроль без разрушения и с разрушением. Применение разрушающих методов контроля паяного изделия оговаривается техническими условиями на изделие или иной конструкторской документацией.

Для обнаружения внутренних дефектов используют следующие методы неразрушающего контроля [72]:

- рентгеновский метод контроля применяется для обнаружения дефектов паяного соединения: трещин, наплывов припоя на внутренних поверхностях изделия, смещения арматуры относительно стыка труб, пор, раковин.

Расшифровку рентгенограмм паяных монтажных соединений изделий производят по зонам (рисунок 1.7).

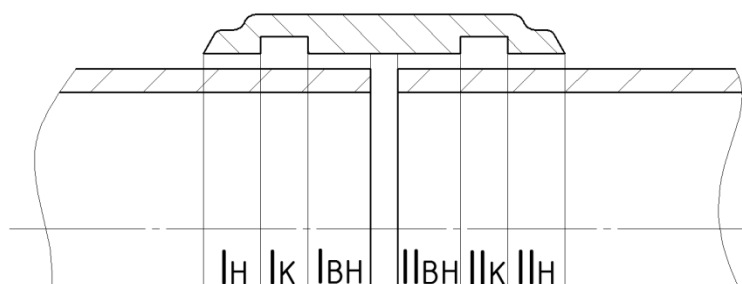


Рисунок 1.7 – Зоны контроля при расшифровке рентгенограмм

В зонах Iк и IIк – степень заполнения припоем и состояние его поверхности не контролировать. В зонах Iн, Iвн, IIн, IIвн–контролировать степень заполнения припоем всей их поверхности. Рентгеновскому методу контроля подвергают 100% паяных соединений.

- радиоскопический метод позволяет наблюдать изображение контролируемого участка одновременно с просвечиванием;
- радиометрический метод, который позволяет проводить автоматическую обработку результатов контроля;
- ксерорадиографический метод, схожий по-своему действия с радиографическим методом, применяется только на плоских пластинах;
- ультразвуковой метод, основанный на способности ультразвуковых колебаний отражаться от поверхности внутренних неоднородностей материала. Данным методом выявляют трещины, поры, раковины, шлаковые включения;
- магнитопорошковый и магнитографические методы, основанные на резком изменении параметров магнитного поля в дефектных зонах.

Для определения поверхностных дефектов используют методы неразрушающего контроля, указанные в таблице 1.1 [72].

Таблица 1.1 – Методы неразрушающего контроля для обнаружения поверхностных дефектов

Вид контроля	Метод контроля	Характеристика метода		Область применения
		Чувствительность	Особенности метода	
Оптический	Визуально-оптический	По ГОСТ 23479-79	Для обнаружения мелких дефектов величиной менее 0,1 мм используют оптические приборы с увеличением до 30×.	Соединения, имеющие доступные для осмотра поверхности.
Капиллярный	Цветной	По ГОСТ 18442-80	Достоверность метода зависит от шероховатости контролируемой поверхности паяного соединения. Проведение контроля - по ГОСТ 18442-80.	Соединения, имеющие доступные для нанесения пенетрантов и осмотра
	Люминесцентный			
Вихретоковый	Трансформаторный		Параметр шероховатости поверхности контролируемых соединений - ≤ 40 мкм. Одновременно с поверхностными дефектами выявляют дефекты, расположенные на глубине до 2 мм от поверхности	Соединения, имеющие доступные для преобразователей дефектоскопов
	Параметрический			

Визуальный контроль позволяет дать оценку паяного соединения по наличию плавной круговой галтели, качеству защиты зоны нагрева, отсутствию наплывов на наружных поверхностях трубопроводов и арматуры (муфт, крестовин, проходников и т. д.), отсутствию наружных трещин, пор, раковин, свищей, прожогов и подрезов после пайки.

С помощью капиллярного метода определяются наружные, поверхностные и внутренние дефекты или их отсутствие, а также изменения в зоне нагрева для соединяемых деталей. Капиллярным контролем можно выявить практически все дефекты паяного соединения: поры, трещины, раковины. Суть метода заключается в том, что используются специальные жидкости, которые имеют свойство глубоко проникать в любые материалы, если в них есть пустоты. Следы

жидкости можно обнаружить визуально, если она проникла насквозь, или с помощью специальных приборов [73].

Вихретоковый метод контроля основан на взаимодействии внешнего электрического поля и поля вихревых токов. Вихревые токи наводятся в области анализа объекта. Возникает электромагнитное поле, которое фиксируется вихревым датчиком. На основании обработки данных можно выявить геометрию изделия, а также наличие несплошностей и место их расположения, трещин, раковин, расслоений, пор и прочих дефектов [73].

Еще одним методом контроля является металлографический метод. Данный метод дает возможность осмотреть на микрошлифе величину непропая паяного соединения и растворения металла припоем, величину. Данный метод контроля периодический и проводится раз в месяц или раз в несколько комплектов паяных изделий. Также данный метод позволяет оценить качество плавной круговой галтели, на допустимые цвета побежалости на поверхности зоны нагрева, на отсутствие наплывов припоя на внутренних поверхностях трубопровода и арматуры; на отсутствие трещин свищей, прожогов [74].

1.3.1 Исправление дефектов пайки

Наличие дефекта в паяном соединении не всегда является критичным, поскольку некоторые виды дефектов, возможно, устранить или допустить в дальнейшее производство, если величина дефекта не превышает установленную норму.

Нормы допустимых дефектов для монтажной пайки трубопровода описаны в разделе 10 отраслевого стандарта ОСТ 1 41138-2005. При обнаружении паяных соединений с дефектами, превышающими норму допустимого, соединения подлежат исправлению путём однократного нагрева; или заменяются путем вырезки с выполнением дополнительного стыка, причем вырезка осуществляется только при пайке непосредственно на самолёте, вырезка на образцах-свидетелях не осуществляется.

Исправлению однократным нагревом подлежат соединения с дефектами, не вызванными окислением поверхностей в зоне паяного шва, такими как:

- полный или частичный невыход припоя из соединительного зазора;
- наличие раковин и непропаев сверх допустимых норм;
- отсутствие герметичности при условии соблюдения величины размеров соединительного зазора.

Паяные соединения, имеющие наплывы, натеки и поверхностные утяжины металлургического происхождения подлежат зачистке, в зонах доступных для их устранения, не допуская утонения стенки трубы и основного материала арматуры в местах зачистки на расстоянии, не превышающем соединительного зазора.

При наличии в наружной галтели паяного соединения видимых дефектов типа пор, раковин допускается механическая зачистка галтели до величины соединительного зазора, при этом повреждение основного металла не допускается. Паяные соединения, имеющие наплывы и натеки по внутреннему диаметру трубы и в зазоре между трубами, превышающие допустимые нормы, подлежат замене путем вырезки только на изделии, на образцах-свидетелях данная манипуляция не выполняется.

1.3.2 Выявление причин появления некачественного паяного соединения

На качество пайки значительное влияние оказывают следующие факторы [75]:

- режимы пайки (температура нагрева, время нагрева (скорость нагрева), выдержка при заданной температуре, расход защитного газа);
- подготовка паяемой поверхности деталей перед пайкой;
- соответствие деталей чертежу в части нанесения покрытий и соблюдения точности геометрических размеров паяемой части трубопровода;
- смачиваемость и заполнение зазора припоем.

Заполнение зазора припоем очень важно для обеспечения прочности и герметичности паяного соединения. Неравномерное растекание припоя при достижении температуры плавления ведет к тому, что в паяемом шве образуются пустоты, раковины [75, 76]

На качество пайки существенно влияет скорость нагрева. Очень быстрый нагрев может быть причиной неудовлетворительного качества пайки. Нагрев паяемого соединения должен быть равномерным. В значительной мере это зависит от теплопроводности соединения, определяемой величиной зазора между соединяемыми деталями. Наряду с физическими свойствами металла деталей трубопровода (теплоёмкость, теплопроводность, магнитное насыщение и т. д.) при определении оптимальных режимов пайки особое внимание уделяется величине зазора между проходником и трубопроводом.

Смачивание припоем и равномерное растекание припоя обеспечивает прочность соединения проходника и трубы. Процесс смачивания и степень растворимости спаиваемых металлов в припое, определяющие качество пайки, зависят от [75, 76]:

- подготовки соединяемых поверхностей. Окисление или загрязнение соединяемых поверхностей препятствует протеканию процесса пайки, поэтому поверхности должны быть тщательно очищены;
- окисления поверхностей и припоя в процессе пайки. В процессе пайки поверхности и припой должны быть предохранены от окисления с помощью специальных паяльных флюсов, путем создания газовой защиты или вакуума;
- температуры пайки. Чем ближе температура пайки к температуре плавления спаиваемых материалов, тем степень диффузии припоя выше. Однако, чрезмерный перегрев снижает механическую прочность паяного соединения и ведет к неравномерному растеканию припоя.

Качество пайки будет хорошим, если шов паялся с одной стороны, а припой всюду протек на противоположную сторону шва с образованием галтели. В противном случае пайка считается некачественной и паяное соединение бракуется. Скрытые дефекты пайки, такие как неполное заполнение шва припоем,

пористость и мелкие трещины, выявляются при помощи рентгена. Причиной возникновения непропаев является неравномерный прогрев паяного соединения в момент растекания припоя, в места недостаточно прогретые, припой не затекает. (Всегда следует учитывать, что припой хорошо распространяется в сторону увеличения нагрева.) Причиной образования в паяном шве мелких пор чаще всего является применение флюса, содержащего гигроскопическую или кристаллизационную воду, при безводном флюсе пористость шва бывает незначительной [73, 75].

Причиной возникновения трещин в паяном шве является неосторожное обращение с запаянным соединением в момент кристаллизации припоя, когда он еще не обладает достаточной прочностью. Во избежание этого дефекта необходимо следить за тем, чтобы во время затвердевания припоя деталь не двигали и не подвергали толчкам и ударам. Для устранения имеющихся дефектов нужно детали распаять, зачистить места соединения и вновь подвергнуть их пайке. Наружная подпайка шва является не вполне надежным устранением дефекта. Как правило, при подпайке, часто происходит перегрев, выгорание части компонентов припоя - это все отрицательно сказывается на итоговом результате пайки.

Качество паяного соединения зависит, в частности, от степени подготовки поверхностей под пайку, структуры и фазового состава материалов, величины зерна, шероховатости поверхности и т.д. Каждый из этих показателей, как в отдельности, так и в совокупности может повлиять на качество паяного соединения [75].

При плохой подготовке поверхностей под пайку, т. е. при наличии оксидной пленки на поверхности, загрязнений и т. д., ухудшается растекаемость припоя. Припой собирается в виде капель, образуя «схватывание» в отдельных точках между соединяемыми поверхностями. Неоднородность структуры и изменение фазового состава приводит к увеличению или уменьшению объема металла. В обоих случаях будет изменяться зазор между паяемыми поверхностями, отчего появятся дефекты: при увеличении зазора непропай из-за дефицита припоя, при

его уменьшении до «молекулярного» значения также непропай, но из-за ограничений проникновения припоя между паяемыми поверхностями.

Шероховатость в значительной мере снижает прочность паяного соединения. Например, при шероховатости, переходящей в волнистость, площадь спаива уменьшается в несколько раз, так как пайка происходит в основном только по вершинам гребешков.

Из описанного выше, следует, что для обеспечения полноценной пайки необходимо проводить тщательный контроль, как качества металла, так и подготовки деталей на стадии, предшествующей пайке,

Контроль качества очистки и обезжиривания поверхностей проходника и трубопровода перед пайкой осуществляется визуально после протирки салфеткой смоченной в спирте.

В ряде случаев чистоту обезжиренной поверхности контролируют по методу водяной пленки, являющемуся наиболее удобным и простым для производства. Сущность его заключается в том, что при чистой поверхности образуется сплошная водяная пленка; при наличии загрязнений вода скапливается в виде капель.

Поры, раковины и холодный спай. Мелкие поры образуются при выделении газов, попадании в припой оксидных пленок, перегреве припоя при пайке. Раковины образуются при усадке, при кристаллизации и недостаточном заполнении зазора припоем.

Так же следует отметить, что зачастую, длина паяемых изделий (трубопроводов, волноводов) значительно больше длины паяемых образцов, а, следовательно, и теплопередача в изделии при пайке будет отличаться, что так же сказывается на скорости нагрева паяемого соединения.

Выводы:

1. Индукционная пайка - эффективный метод создания неразъемных соединений, способный соединять различные типы металлов. Индукционная

пайка обеспечивает высокую скорость и локальность нагрева, а также дает возможность гибкого управления режимом нагрева.

2. Для анализа процессов, протекающих при индукционной пайке, используются методы аналитического и численного моделирования электротермических процессов.

3. 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.

4. Для оценки качества паяных соединений осуществляется контроль скрытых дефектов, который проводится на основе методов без разрушения или на основе методов с разрушением изделия. Паяное соединение подлежит контролю для обнаружения скрытых дефектов. Применение методов контроля паяного изделия оговаривается техническими условиями на изделие или иной конструкторской документацией.

5. На качество пайки значительное влияние оказывают следующие факторы: режимы пайки, подготовка паяемой поверхности перед пайкой, смачиваемость и заполнение зазора припоем, соответствие деталей чертежу в части нанесения покрытий и соблюдения точности геометрических размеров паяемой части трубопровода.

6. Анализ патентных и литературных источников показывает, что со времени первого внедрения в производство технологии сборки индукционной пайкой элементов волноводных трактов накоплен значительный опыт применения различных систем автоматического управления (САУ) 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 САУ процессом пайки, требуемых характеристик оборудования и технологической оснастки, обеспечения качества паяных соединений до настоящего времени имеют ограниченные решения и нерешенные проблемы.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКЕ

Рассмотрена математическая модель индукционного нагрева элементов волноводной сборки и трубопровода, учитывающая неравномерное распределение плотности вихревых токов. Проведено моделирование электротермических процессов, протекающих при индукционной пайке волноводов и трубопроводов. Моделирование процессов проводилось в *ELCUT5.1 Professional* и *COMSOL Multiphysics5.3*.

2.1 Физические основы индукционного нагрева

При индукционном нагреве паяемые детали получают тепло не из окружающей среды или постороннего тела, как при других видах пайки, а от внутренних источников, т. е. от саморазогрева под действием наведённых в них вихревых токов. Принцип работы индукционных нагревательных установок основан на поглощении электромагнитной энергии индукции металлическим телом, помещённым в переменное электромагнитное поле индуктора, представляющим собой один или несколько витков провода, чаще всего медного провода [77, 78]. В индукторе, изображенном на рисунке 2.1, с помощью генератора G наводятся мощные токи I_1 различных частот, в результате чего вокруг индуктора возникает электромагнитное поле с напряжённостью H и магнитным потоком Φ , которое наводит вихревые токи (токи Фуко) I_2 в теле заготовки и разогревает её [77].

Теоретически система «индуктор-заготовка» представляет собой бессердечниковый трансформатор, индуктор первичная обмотка, заготовка - вторичная, магнитный поток Φ между ними замыкается по воздуху. В индукторе должен быть зазор (между индуктором и заготовкой) для исключения короткого замыкания [77].

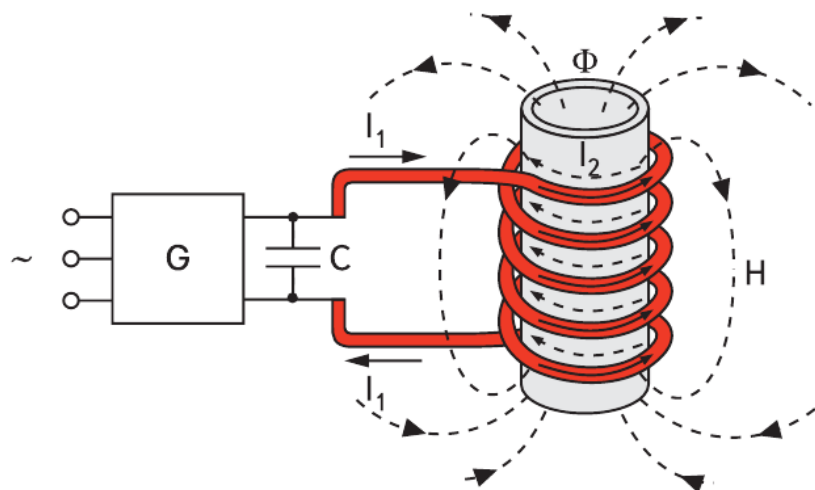


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема индукционной системы нагрева

Согласно закону электромагнитной индукции в проводящем теле, движущемся с определённой скоростью в направлении оси X через магнитное поле с магнитным потоком Φ , возникает индуцированное напряжение [77]

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.1)$$

где dt – промежуток времени, за которое происходит изменение магнитного потока.

Возникающее напряжение вызывает в проводящем теле вихревые токи, которые генерируют электрическую мощность нагрева в соответствии с законом Джоуля-Ленца[77]

$$P_i = \rho \times S^2, \quad (2.2)$$

где ρ – электрическое сопротивление материала;

S – плотность тока.

Согласно скин-эффекту вихревые токи, возникающие в проводниках при изменении пронизывающего их магнитного потока Φ , расположены не

равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое и плотность их внутри проводящего тела подчиняется следующему выражению [79]

$$S_x = S_0 \times \exp\left(\frac{-x}{\delta}\right), \quad (2.3)$$

где S_0 – плотность тока на поверхности;

δ – глубина проникновения тока.

Распределение мощности нагрева по толщине в соответствии с формулами (2.2) и (2.3) примет вид

$$P_i = P_{i0} \times \exp\left(\frac{-2x}{\delta}\right), \quad (2.4)$$

где P_{i0} – плотность тока на поверхности;

δ – глубина проникновения тока.

Согласно выражению (2.4) до 86% мощности нагрева создаётся в поверхностном слое проводящего тела толщиной δ .

Глубина проникновения тока зависит от частоты тока f , удельного электрического сопротивления материала ρ и магнитной проницаемости μ

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi} \times f \times \mu_0 \times \mu}, \quad (2.5)$$

где μ_0 – магнитная постоянная поля.

Расчёт выделяемой в изделии мощности при индукционном нагреве достаточно сложен, однако для большинства практических применений эту мощность можно определить, используя следующее выражение:

$$P = H^2 \times S_H \times \frac{K}{\delta}, \quad (2.6)$$

где H – напряжённость магнитного поля;

S_H – площадь поверхности в нагретой зоне;

K – коэффициент передачи, зависящий от формы и размеров тела.

Фактор передачи энергии принимает максимальные значения при ярко выраженном поверхностном (скин) эффекте, что в свою очередь обусловлено выбором частоты.

Обобщая всё выше сказанное, можно сделать вывод о том, принципиальной особенностью индукционного нагрева является возможность регулирования скорости и глубины нагрева путём подбора, передаваемой в паяемый узел энергии и частоты тока. Благодаря быстрому нагреву достаточно узкой зоны уменьшается коробление и окисление паяемого узла, повышается производительность процесса [80].

2.2 Математическая модель индукционного нагрева

Для обобщенной модели тепловых процессов, протекающих при индукционной пайке изделий, возьмем дифференциальное уравнение теплопроводности [18, 81, 82]. Так как нагрев детали идет за счет вихревых токов, протекающих в нём, то в формулу добавляется постоянно действующий источник тепла:

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial y^2} \right) + q(I_B), \quad (2.7)$$

где α – коэффициент температуропроводности материала;

T – температура;

t – время;

x, y – декартовы координаты;

$q(I_6) = I_6(x, y, t)$ – постоянно действующий источник теплоты, зависящий от распределения плотности вихревых токов $I_6(x, y, t)$.

Уравнение (2.7) описывает множество вариантов течения процесса нагрева детали. Поэтому чтобы провести моделирование тепловых процессов, протекающих при индукционной пайке, необходимо к уравнению (2.7) добавить условия однозначности, которые могут содержать геометрические, физические, начальные и граничные условия. Данные условия выглядят следующим образом:

- в качестве геометрической модели принимается упрощенная двухмерная модель детали;
- вихревые токи протекают по поверхности детали;
- плотность вихревых токов распределена неравномерно из-за формы детали и расположения индуктора относительно изделия.
- теплофизические характеристики материала детали 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 численного решения уравнения (2.7) применим метод конечных разностей [83 - 85]. При аппроксимации уравнения (2.7) методом конечных разностей представим область моделирования в виде совокупности узлов с координатами (рисунок 2.2): $x_i = i \cdot h_x$, $y_j = j \cdot h_y$, $t_k = k\tau$, где h_x , h_y – шаг по координатной сетке x , y ; τ – шаг по времени.

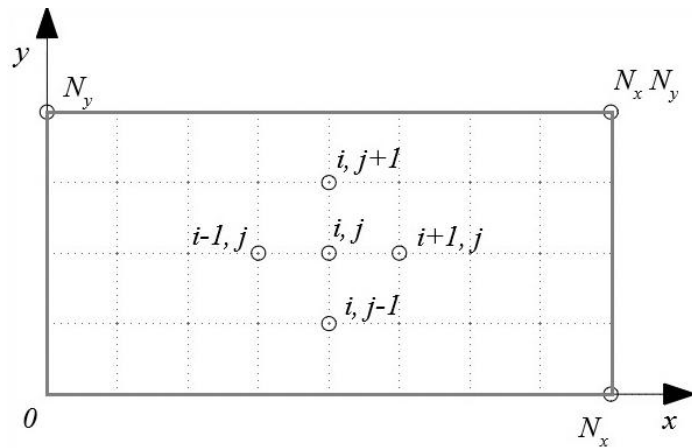


Рисунок 2.2 - Разностная сетка области решения

Проведем дискретизацию уравнения (2.7) в два этапа. На первом этапе, на промежуточном временном шаге $\tau/2$ проводим дискретизацию по оси x , на втором этапе проводим дискретизацию по оси y . Получаем два одномерных уравнения по каждой из осей. Представляем уравнение (2.7) в разностном виде, используя неявную схему на каждом полушаге по времени [85]:

$$\frac{T_{ij}^{k+1/2} - T_{ij}^k}{\tau/2} = \alpha \left(\frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - 2T_{ij}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2}}{h_x^2} \right) + q_{ij}^{k+1/2}, \quad (2.8)$$

$$\frac{T_{ij}^{k+1} - T_{ij}^{k+1/2}}{\tau/2} = \alpha \left(\frac{T_{i,j+1}^{k+1} - 2T_{ij}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1}}{h_y^2} \right) + q_{ij}^{k+1}, \quad (2.9)$$

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 (2.8), а затем уравнение (2.9) определяем поле температуры на целом шаге по времени.

Аппроксимация граничных условий выглядит следующим образом:

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

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

Для решения разностных уравнений (2.8) и (2.9) используем метод прогонки [85]. Рассмотрим данный метод на примере решения уравнения (2.8). Преобразуем уравнение (2.8) [84]:

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

Затем

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

Отсюда получаем

$$a_i T_{i,j}^{k+1/2} = b_i T_{i+1,j}^{k+1/2} + c_i T_{i-1,j}^{k+1/2} + d_i + q_{i,j}^{k+1/2}, \quad (2.10)$$

где $a_i = \frac{1}{\tau/2} + \frac{2\alpha}{h_x^2}$; $b_i = c_i = \frac{\alpha}{h_x^2}$; $d_i = \frac{1}{\tau/2} T_{i,j}^k$.

Для граничных точек 0 и N_x уравнение (2.10) запишем в следующем виде:

$$a_0 T_{0,j}^{k+1/2} = b_0 T_{1,j}^{k+1/2} + d_0 + q_{0,j}^{k+1/2}, \quad (2.11)$$

$$a_N T_{N,j}^{k+1/2} = c_N T_{N-1,j}^{k+1/2} + d_N + q_{N,j}^{k+1/2}. \quad (2.12)$$

Алгоритм прогонки начинается с записи уравнения (2.11) в виде:

$$T_{0,j}^{k+1/2} = P_0 T_{i,j}^{k+1/2} + Q_0, \quad (2.13)$$

где $P_0 = \frac{b_0}{a_0}$, $Q_0 = \frac{d_0 + q_{0,j}^{k+1/2}}{a_0}$ определяются начальными и граничными условиями моделирования.

Соотношение (2.13) подставляем в (2.10) для $i=0$. Продолжая процесс последовательной подстановки можно выразить $T_{i,j}^{k+1/2}$ через $T_{i+1,j}^{k+1/2}$:

$$T_{i,j}^{k+1/2} = P_i T_{i+1,j}^{k+1/2} + Q_i, \quad (2.14)$$

где P_i и Q_i новые коэффициенты, полученные в процессе подстановки.

Используя выражения (2.14) и (2.10) можно получить формулы для расчета P_i и Q_i :

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}}, \quad (2.15)$$

$$Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}}. \quad (2.16)$$

При вычислении P_{N_x} и Q_{N_x} получаем, что $P_{N_x} = 0$, $b_{N_x} = 0$. Следовательно, T_{N_x} будет равна Q_{N_x} . Рассчитав, таким образом, T_N можно начать процесс обратной прогонки для получения T_{N-1} , $T_{N-2}, \dots, T_2, T_1, T_0$ [85].

$$T_{i-1,j}^{k+1/2} = P_{i-1} T_{i,j}^{k+1/2} + Q_{i-1}. \quad (2.17)$$

Исходя из выше изложенного, можно сформулировать алгоритм решения:

1. Вычисляются P_0 и Q_0 , коэффициенты a_0 , b_0 , d_0 определяются с помощью начальных и граничных условий.
2. Вычисляются P_i и Q_i для $i=1, 2, \dots, N_x$, используя выражения (2.15) и (2.16).
3. Полагаем $T_N = Q_N$.

4. Подставляем T_N в формулу (2.17) и определяем $T_{N-1}, T_{N-2}, \dots, T_2, T_1, T_0$.

Алгоритм решения уравнения (2.9) аналогичен. Коэффициенты, входящие в уравнение (2.9) примут следующий вид:

$$a_i = \frac{1}{\tau} + \frac{a}{h_y^2}, b_i = c_i = \frac{a}{h_y^2}, d_i = \frac{1}{\tau/2} T_{i,j}^{k+1/2}.$$

Прогонка будет осуществляться по индексу j .

На рисунке 2.3 показан процесс индукционного нагрева заготовки. Реализация и расчет модели по изложенному выше алгоритму был проведен в системе Matlab.

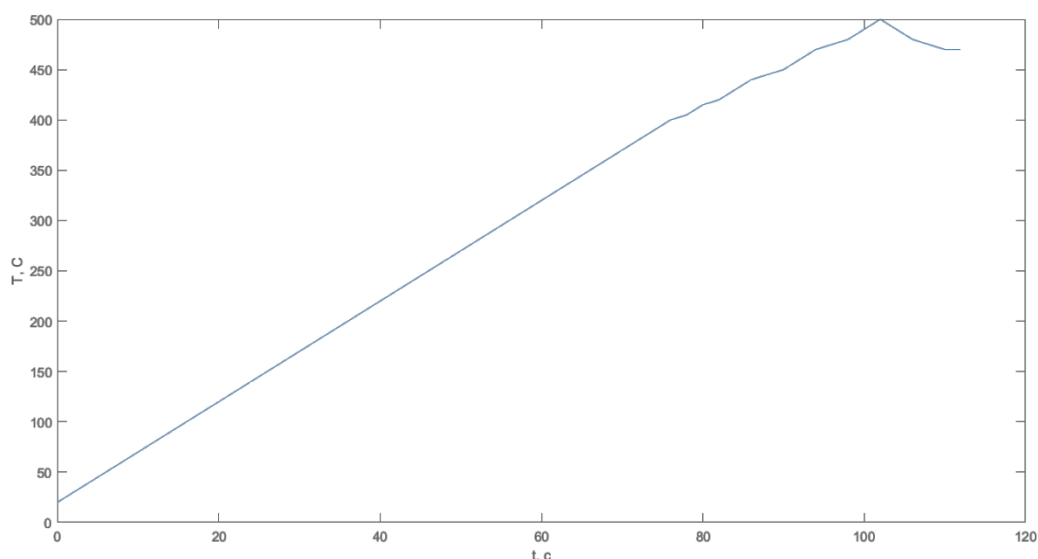


Рисунок 2.3 – Процесс индукционного нагрева заготовки

Нагрев осуществлялся при постоянной мощности, а после достижения температуры $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ имитировалось отключение нагрева.

2.3 Моделирование электротермических процессов, проходящих при индукционном нагреве

В качестве объектов для моделирования электротермических процессов, протекающих при индукционном нагреве, взяты конструктивные элементы космических аппаратов: волноводные тракты и трубопроводы.

Для обеспечения функционирования космического аппарата и его бортовой аппаратуры в соответствии с заданной программой применяются системы волноводных трактов, состоящие преимущественно из алюминиевых сплавов с улучшенными массогабаритными и электротехническими параметрами. Системы волноводных трактов представляют собой сложную конструкцию из различных элементов с разнообразной геометрией (рисунок 2.4) [86, 87].

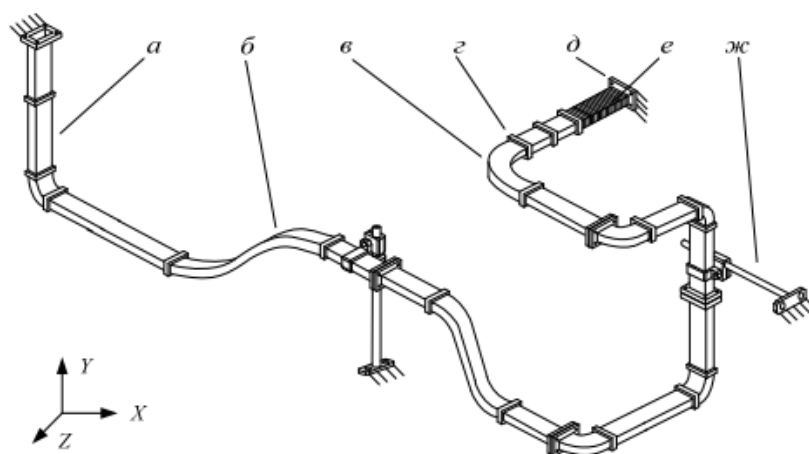


Рисунок 2.4 - Пример участка волноводно-распределительной системы:
а – прямой элемент, б – криволинейный элемент с переменным радиусом кривизны, в – криволинейный элемент с постоянным радиусом кривизны, г – соединительная муфта, д – фланец, е – гибкая секция, ж – промежуточная опора

При сборке элементов волноводных трактов, а именно тонкостенной трубы прямоугольного сечения, муфты и фланца применяется индукционная пайка. Применение данного способа пайки позволяет получать паяные соединения волноводных труб с толщиной стенки от 0,5 «мм» с более массивными фланцами (толщиной до 7 «мм»), муфтами и уголками [80]. Индукционная пайка

тонкостенных волноводных трактов из алюминиевых сплавов – сложный технологический процесс, обладающий рядом особенностей [86, 89, 90 - 92]:

1. Относительно небольшая разница температуры плавления основного материала АД31 (695– 663 °С) и припоя Св. АК12 (577–580 °С) при средней скорости индукционного нагрева 20-25 °С/сек. требует точной отработки и воспроизведения технологических режимов;

2. Применяемые для производства элементов волноводных трактов алюминиевые сплавы практически не изменяют цвет в процессе нагрева, что делает невозможным визуально контролировать наличие локальных перегревов паяемых изделий;

3. Большое разнообразие типоразмеров элементов волноводных трактов представляет сложность при отработке и последующем воспроизведении технологических параметров процесса индукционной пайки;

4. Зоны максимального нагрева элементов волноводных трактов не совпадают с зонами пайки.

5. Равномерный нагрев паяемых элементов обеспечивается за счет подбора оптимальных технических параметров оборудования, особенно это касается формы индукторов и рабочей частоты и мощности генератора [93].

Трубопроводы, применяемые в космических аппаратах, изготовлены из нержавеющей стали. Диаметр трубопроводов составляет от 2,5 до 5 мм. Все типоразмеры трубопроводов и виды соединений представлены в таблице 2.1.

Из таблицы 2.1 [94] видно, что основной элемент конструкции трубопроводов, к которому применяется индукционная пайка, являются тройники и наконечники. Именно к ним предъявляются требования по обеспечению высокого качества соединения. Применение индукционной пайки обеспечивает бесконтактный, быстрый и локальный разогрев места пайки. Это позволяет уменьшить энергетическое воздействие на деталь. А использование во время пайки среды защитных газов уменьшает окисление поверхности детали.

Таблица 2.1 – 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					

Перечисленные выше факторы значительно усложняют отработку и последующее воспроизведение технологического процесса индукционной пайки, оказывают влияние на стабильность качества выпускаемой продукции, требуют высокой квалификации задействованного в производстве персонала. Для понимания процессов протекающих при индукционном нагреве необходимо провести моделирование отдельных структурных элементов и в целом изделия.

2.3.1 Моделирование электротермических процессов при индукционном нагреве волноводных трактов

В качестве типового объекта для рассмотрения процесса индукционного нагрева волноводного тракта выбрано соединение прямолинейного участка волноводной трубы и фланца (рисунок 2.5).

Индуктор (без рассмотрения силовой части индукционного оборудования) представляет собой кольцо, сделанное из меди, рисунок 2.5. Индуктор является источником переменного магнитного поля, формирующего вихревые токи, протекающие в волноводе.

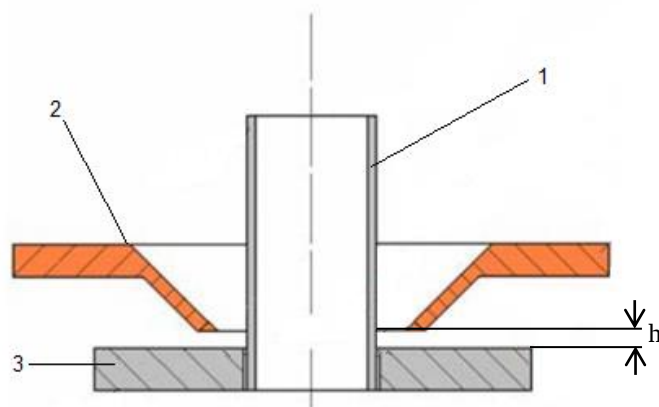


Рисунок 2.5 - Исследуемая система «индуктор – волновод»: 1 - волноводная труба; 2 - индуктор; 3 – фланец; h – зазор между фланцем и индуктором

Моделирование системы было произведено в программе для проведения инженерного анализа и моделирования методом конечных элементов ELCUT5.1 Professional [95].

Выделяют несколько основных этапов построения моделей в программе ELCUT. Решение полевой задачи сводится к нескольким последовательным шагам [96]:

- выбор типа решаемой задачи (поле переменных токов, нестационарная теплопередача, электростатика, магнитостатика и т. д.);
- выбор класса задачи (плоская или осесимметричная); Осесимметричная задача выбирается, если моделируемый объект является телом вращения: цилиндрическая заготовка, труба, соленоид и т. д.);
- создание геометрической модели (чертежа объекта);
- задание свойств материалов (электропроводность, магнитная проницаемость, теплопроводность и т. д.);
- задание нагрузок (величины токов, мощности тепловыделения);
- задание граничных условий (величины потенциалов поля на границах расчетной области, значения температур на границах и т. д.);
- построение сетки конечных элементов;
- решение задачи;

– обработка результатов решения (построение цветowych карт, графиков изменения переменной по какому-либо контуру, расчет интегральных значений и т. д.).

С помощью программного комплекса ELCUT был проведен расчет распределения плотности вихревого тока в волноводной трубе и фланце [97]. Результаты подтверждают принятые ранее допущения при постановке задачи моделирования. На рисунке 2.6 и 2.7 видно, что плотность вихревых токов резко увеличивается на угловых поверхностях трубы и фланца волновода. Кроме того на рисунке 2.6 плотность вихревого тока резко снижается в толщине стенок трубы и фланца. Области протекания вихревых токов хорошо локализованы (рисунок 2.7) и зависят от расположения детали относительно индуктора.

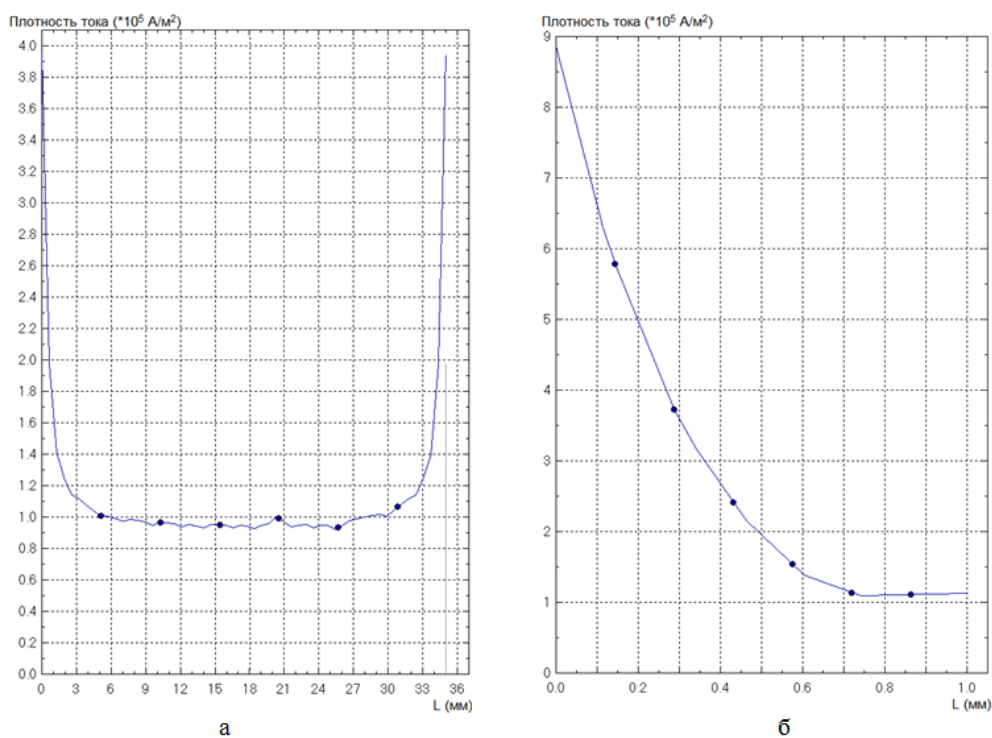


Рисунок 2.6 - Распределение плотности вихревого тока трубы для типоразмера 35×15мм: а - по большой стороне трубы; б – по толщине трубы

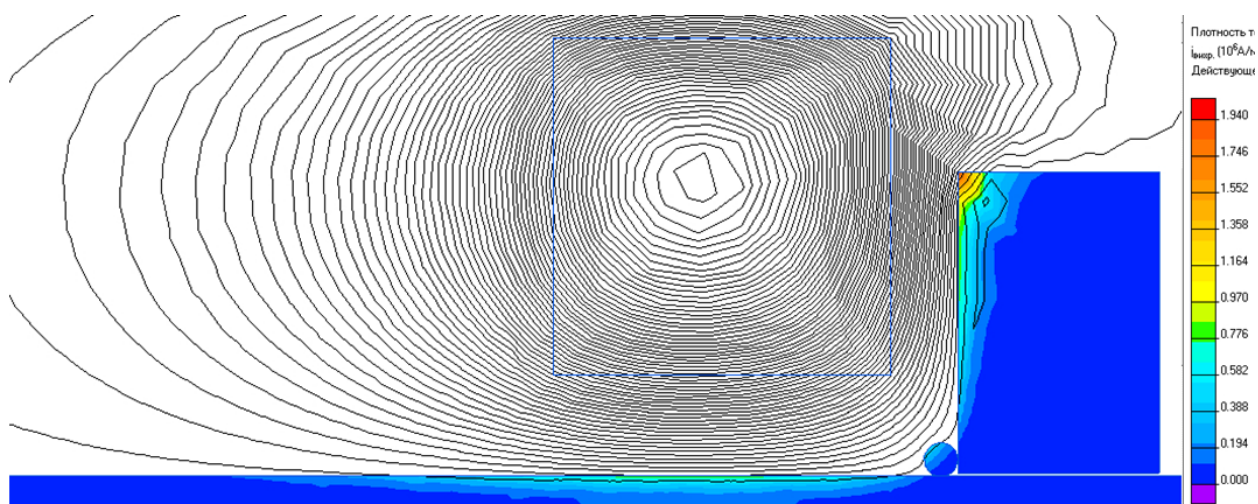


Рисунок 2.7 - Распределение плотности вихревого тока в системе «индуктор-волновод» для типоразмера 35×15мм

На рисунке 2.8 показаны результаты расчета нагрева волновода. Хорошо видно, что область нагрева совпадает с распределением плотности вихревых токов. А также нагрев начинается с поверхности деталей, и только потом температурное поле распространяется на всю нагреваемую область детали.

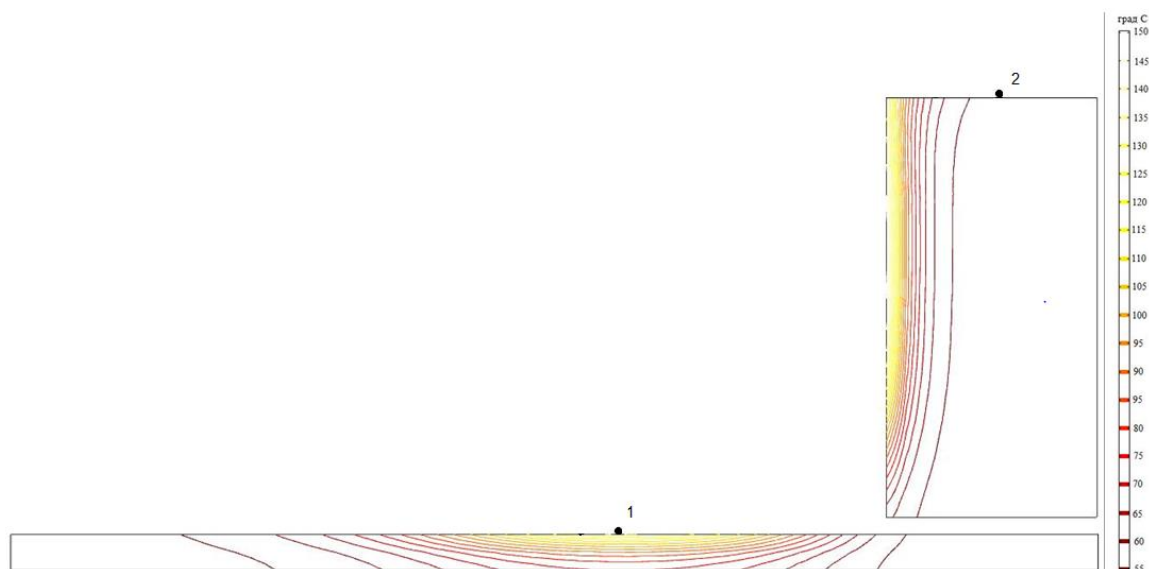


Рисунок 2.8 - Температурные поля волновода при индукционном нагреве

2.3.2 Моделирование электротермических процессов при индукционном нагреве трубопроводов

Процесс моделирования индукционной нагревательной системы состоит из двух совместных задач: электромагнитной и тепловой. Результатами данных

задач являются картины магнитного и теплового полей, распределения плотности тока и тепловыделения, графики температуры, плотности тока.

Для проведения моделирования трубопроводов нам требуется не вся деталь, а только область соединения трубы с наконечником или тройником.

2.3.2.1 Моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве трубопроводов в программе Elcut 5.1

Для проведения моделирования и получения решения тепловой задачи необходимо решить 2 типа связанных мультифизических задач [98].

Первой необходимо решить задачу вихревых токов, тип задачи – магнитное поле переменных токов, класс задачи в нашем случае – осесимметричная задача, т.к. основным объектом моделирования является трубопровод. Частота тока процесса индукционного нагрева равна 66 кГц.

На следующем этапе строим геометрическую модель системы «Индуктор – трубопровод». На рисунке 2.9 представлена упрощенная геометрия трубопровода, соединительного элемента и индуктора.

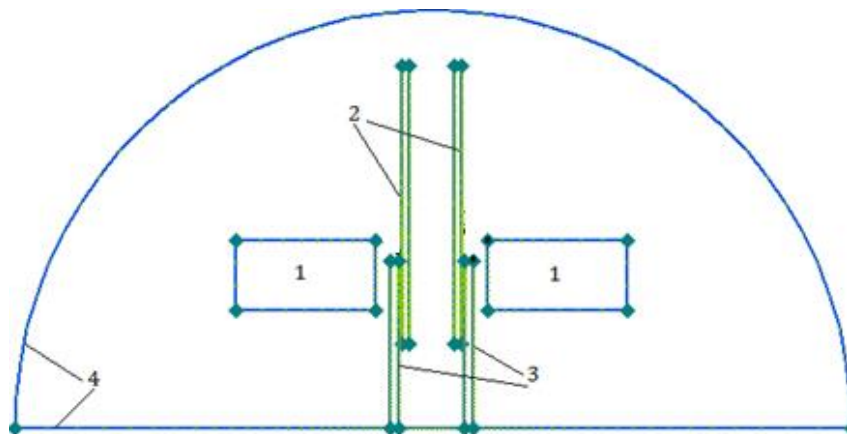


Рисунок 2.9 – Геометрия модели «Индуктор-трубопровод»:

1 – индуктор, 2 – труба, 3 – соединительный элемент (переходник) трубопровода,
4 – граничные условия области расчетов

На следующем этапе построения модели зададим параметры объекта моделирования и исходные данные, представленные в таблице 2.2 .

Таблица 2.2 – Исходные данные для моделирования системы «Индуктор - трубопровод

Параметр	Среда			
	труба (сталь)	индуктор (медь)	аргон	переходник (сталь)
Наружный радиус трубы, мм	5	-	-	6,3
Толщина стенки трубы, мм	0,5	-	-	0,65
Относительная магнитная проницаемость	200	1	1	200
Удельная электропроводность, См/м	7 000 000	56 000 000	-	7 000 000
Теплопроводность, Вт/(К·м)	50	401	0,0173-0,057	50
Теплоемкость, Дж/(К·кг)	462	385	-	462
Начальная температура, К	293	293	293	293

Перед началом расчетов и задания сетки необходимо ограничить область моделирования, то есть задать граничные условия.

На рисунке 2.9 представлены два вида границ. Граница в виде половины круга ограничивает область расчета среды защитного газа аргона. Нижняя граница в виде прямой линии должна совпадать с линией оси X координат. После этого строится сетка заданных элементов и осуществляется решение задачи.

При протекании тока в индукторе вокруг него возникает электромагнитное поле, силовые линии которого воздействуют на стенки трубопровода и переходника (рисунок 2.10). Данное поле наводит в заготовке вихревые токи, с помощью которых и происходит выделение тепла непосредственно в самой заготовке [98].

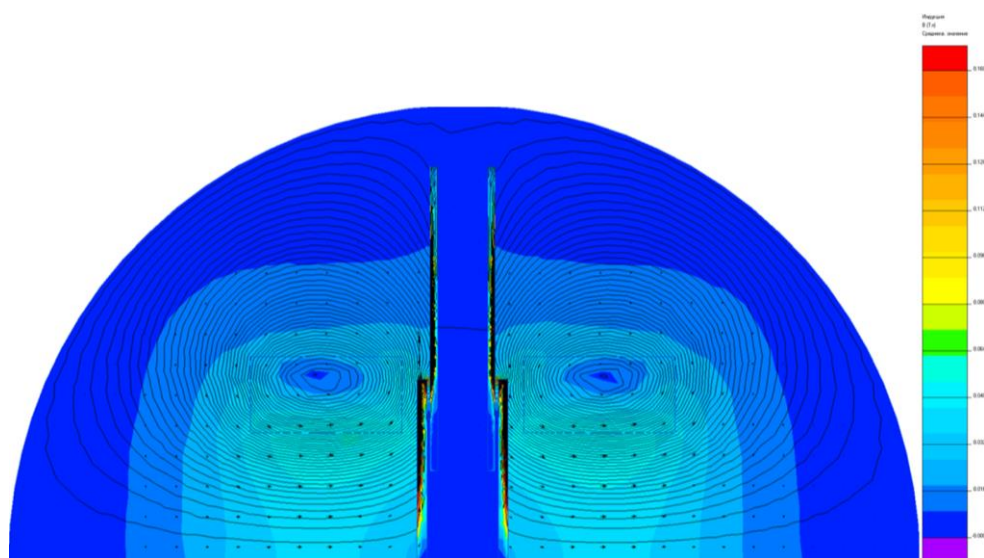


Рисунок 2.10 – Силовые линии магнитного поля и вектор магнитной индукции, В (Тл)

На рисунке 2.11 показано распределение плотности тока в системе «Индуктор – трубопровод» [98].

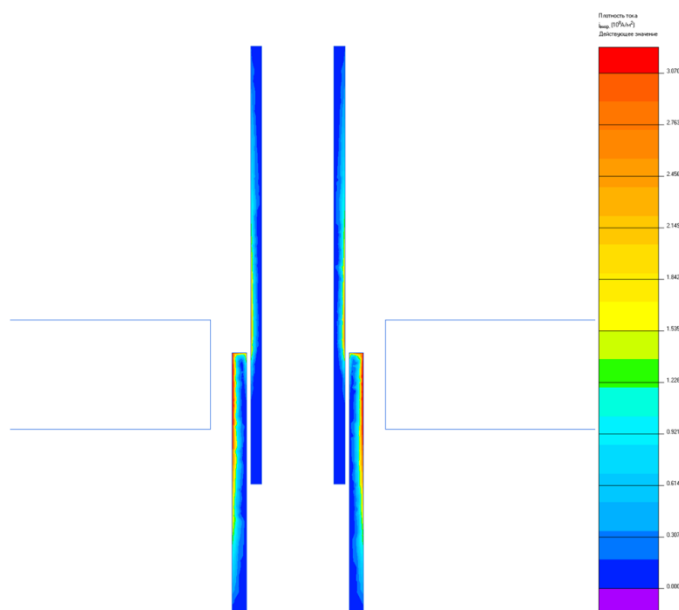
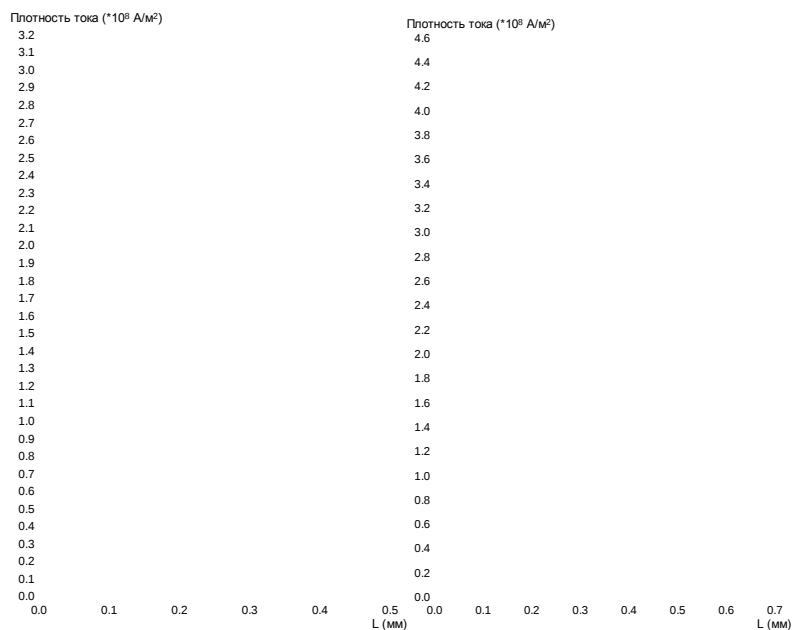


Рисунок 2.11 – Картина плотности вихревого тока в системе «Индуктор – трубопровод»

Как видно из рисунка 2.12 ток в деталях протекает не по всей толщине стенки, а только в поверхностном слое и преимущественно там, где индукция магнитного поля максимальна [98].



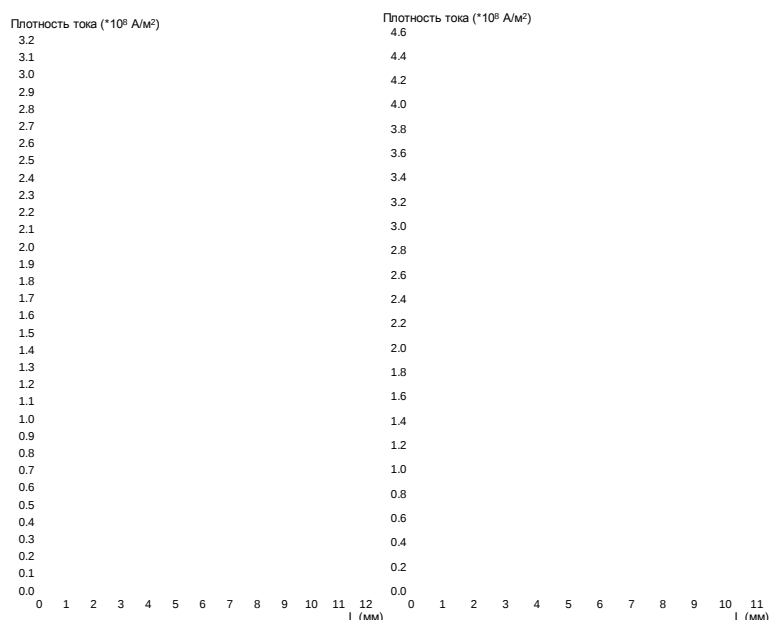
а

б

Рисунок 2.12 – График распределения вихревого тока по толщине:

а - толщина стенки трубопровода, б - толщина стенки переходника трубопровода

На рисунке 2.13 представлены графики распределения плотности тока по длине внешней стенки трубопровода (рис. 2.13, а) и по длине внешней стенки переходника трубопровода (рис. 2.17, б).



а

б

Рисунок 2.13 – График распределения вихревого тока по длине внешней стенки переходника трубопровода: а - длина внешней стенки трубопровода, б - длина внешней стенки переходника трубопровода

Моделирование электротермических процессов показывает, что плотность распределения вихревых токов неравномерна, а, следовательно, нагрев в системе «Индуктор – трубопровод» также будет неравномерно зависеть от значения плотности вихревых токов и области их протекания (рисунок 2.14) [98].

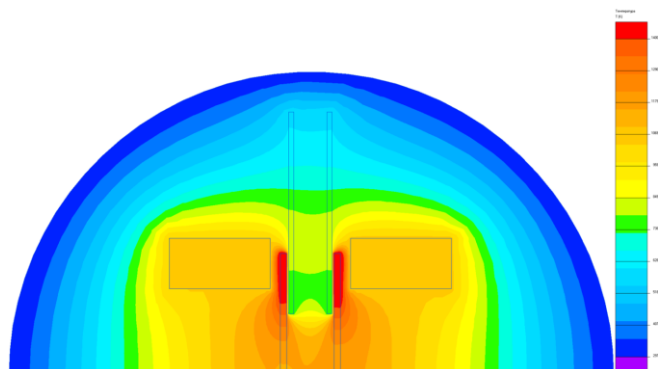


Рисунок 2.14 – Картина теплового поля при индукционном нагреве системы «Индуктор – трубопровод»

Исходя из полученных данных видно, что область нагрева зависит от положения детали относительно индуктора (рисунки 2.15 и 2.16), где δ_r - расстояние от середины индуктора до верхнего края трубы.

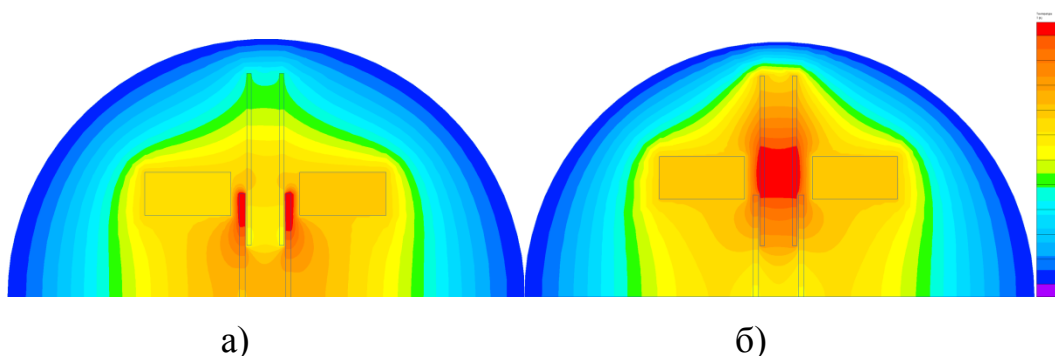


Рисунок 2.15 – Картина теплового поля при изменении положения индуктора вверх относительно заготовки: а) при $\delta_r=1$ мм, б) при $\delta_r=3$ мм

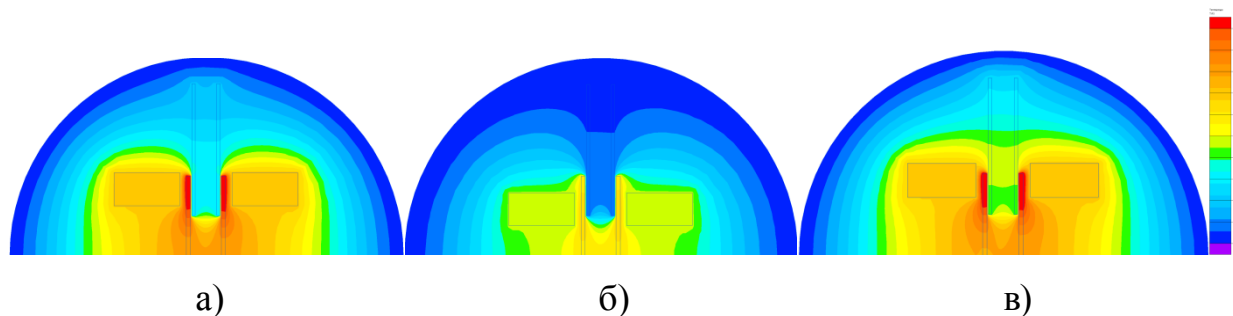


Рисунок 2.16 – Картина теплового поля при изменении положения индуктора вниз относительно заготовки: а) при $\delta_r=-1$ мм, б) при $\delta_r=-3$ мм, в) при $\delta_r=0$ мм

При изменении положения индуктора относительно заготовки трубопровода и переходника вверх на рисунке 2.15б можно увидеть перераспределение теплового поля и большой нагрев самого трубопровода в отличие переходника, что подтверждает данные, что зона наиболее интенсивного нагрева находится около индуктора.

При изменении положения индуктора относительно заготовки трубопровода и переходника вниз на рисунке 2.16а можно увидеть снижение теплового поля самого трубопровода в отличие переходника, переходник сохранил прежнюю концентрацию теплового поля (рисунок 2.16а). При шаге вектора переноса $\delta_r = -3$ мм (рис. 2.16б) наблюдается полное изменение картины распределения теплового поля, температура нагрева не соответствует нормальным показателям для осуществления процесса пайки стали.

2.3.2.2 Моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве трубопроводов в программе COMSOL

Для исследования электротермических процессов, происходящих при индукционной нагреве трубопроводов, используется мультифизическая среда моделирования *COMSOL Multiphysics 5.3*, которая позволяет произвести анализ протекающих тепловых и электромагнитных процессов в системе «трубопровод – индуктор» [99 - 104].

В качестве объекта для моделирования выбран наконечник. Нагрев осуществляется с помощью одновиткового медного индуктора. Исходя из формы наконечника и индуктора, рабочая модель в системе COMSOL может быть представлена в виде двухмерной осесимметричной модели. Для этого в блоке «*ModelWizard*» выбрана размерность пространства «*Axisymmetric2D*». Далее, для проведения моделирования индукционного процесса выбран физический процесс для исследования – «*Inductionheating*», после чего задаются параметры вычисления, в которых заложена возможность исследования с регулируемой частотой тока – «*FrequencyTransient*».

С помощью модуля «*Geometry*» нарисованы элементы, которые участвуют в процессе исследования, учитывая, что это тела вращения. Полученная геометрическая модель представлена на рисунке 2.17.

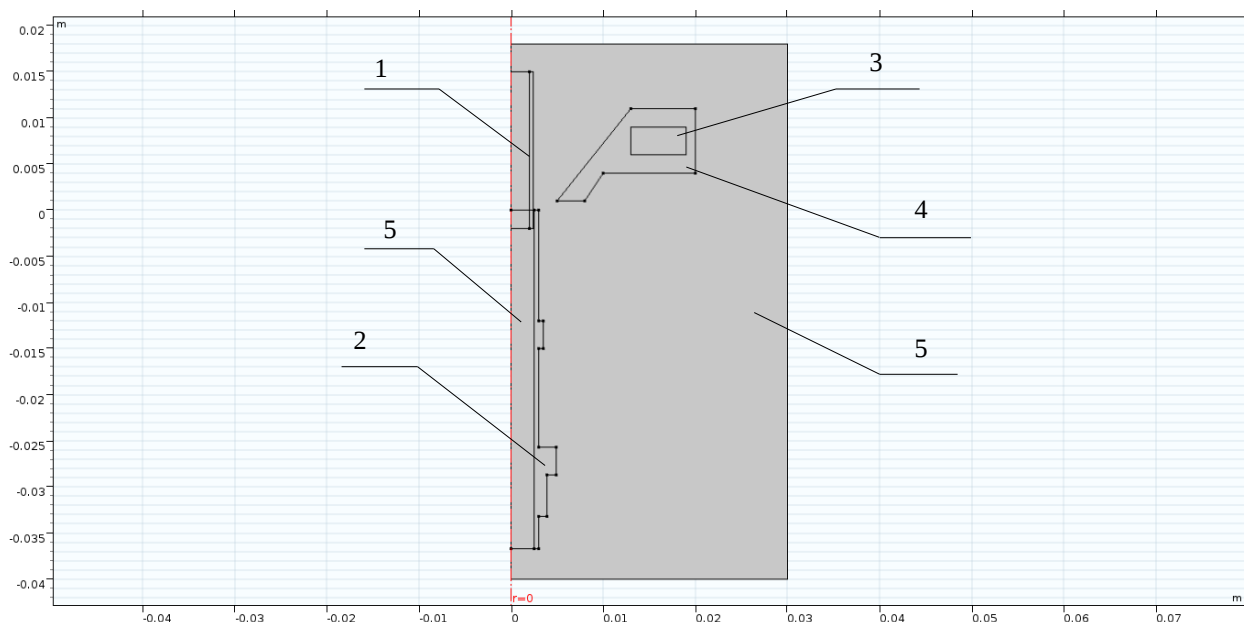


Рисунок 2.17 – Геометрическая модель системы «трубопровод-индуктор»:

1 – труба; 2 – наконечник; 3 – вода; 4 – индуктор; 5 - аргон

В данной модели вода и аргон необходимы для приближения процесса моделирования к реальности. Вода используется для охлаждения индуктора. Аргон является защитной средой, в которой протекает процесс индукционной пайки. Задание области 5 «аргон» ограничивает решение задачи и позволяет рассмотреть не только процесс взаимодействия между элементами, но и с окружающей средой, при этом сокращая количество итераций при расчете. Также в модуле «*Geometry*» геометрическим элементам присваиваются, задаются свойства материалов.

Процесс индукционной пайки основан на нагреве объекта вихревыми токами, возникающими под воздействием переменного магнитного поля, которое генерирует индуктор, поэтому рассматриваемая модель дополняется модулями «*MagneticFields*» и «*Heattransferinsolids*», в которых имеются основные функции магнитных и тепловых полей.

Среда COMSOL используется для решения дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. Поэтому для решения задачи необходимо задать сетку. Для ее задания используется автоматизированное построение сетки с помощью оператора «*Physics-controlled mesh*» с выбором размера элементов «*Normal*» (рисунок 2.18).

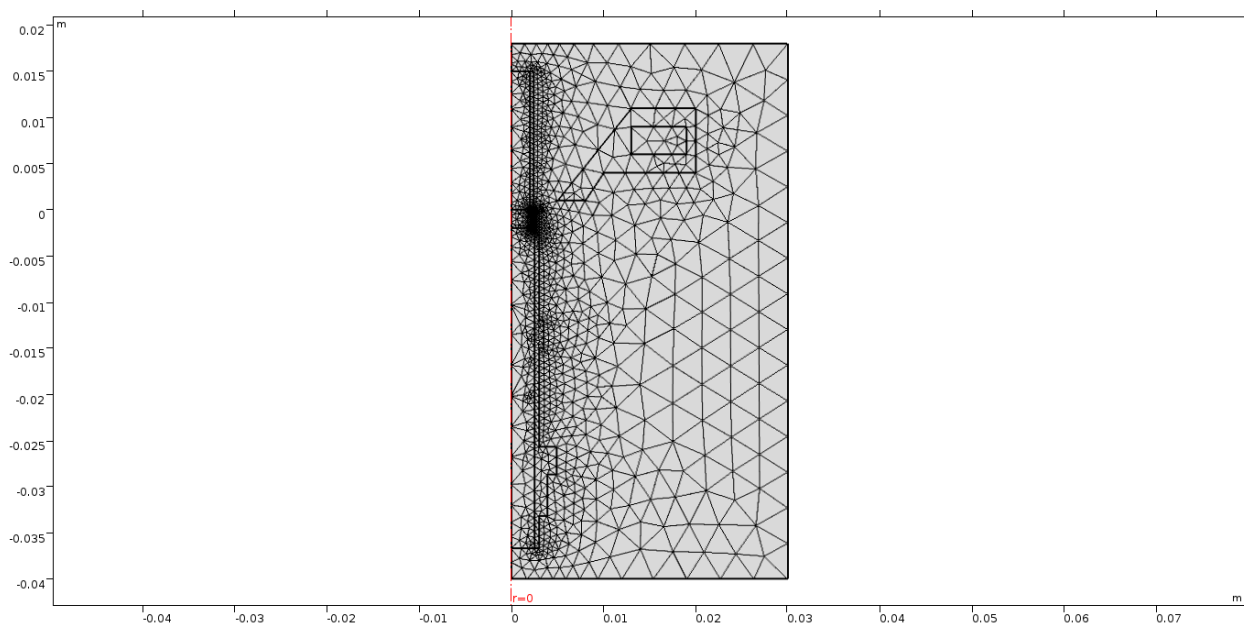


Рисунок 2.18 – Сетка конечных элементов для модели «трубопровод – индуктор»

Далее с помощью функции решателя «*Solve*» получаем распределение тепловых и электромагнитных полей.

Распределение магнитного поля в модели «трубопровод – индуктор» показано на рисунке 2.19.

На рисунке 2.20 показана плотность распределения магнитного потока вдоль линии, пересекающей по нормали плоскость трубы и наконечника. Из графика видно, что распределение магнитного потока максимально в трубе и на поверхности наконечника. В теле трубопровода магнитный поток ослабляется. Вне деталей магнитный поток падает до минимального значения.

С модели также получены температурные распределения в теле детали в зависимости от времени воздействия. Процесс теплового воздействия на трубу рассматривался в течение 30 секунд (рисунок 2.22). На рисунке 2.21 показаны контрольные точки, в которых фиксировалась температура изделия.

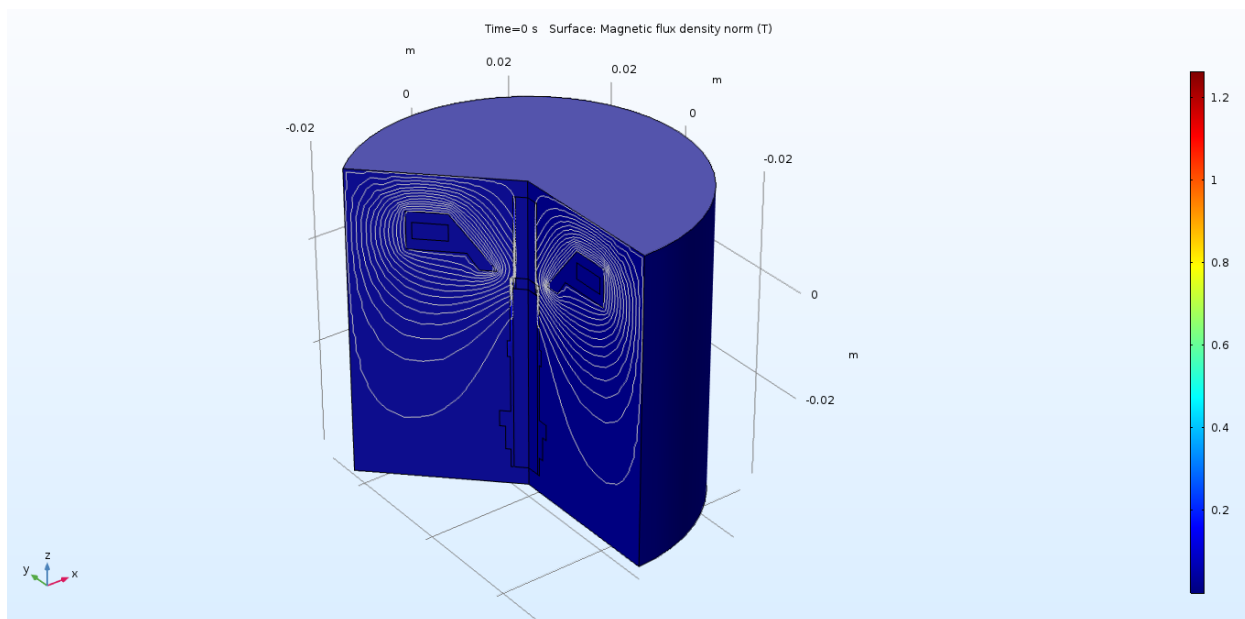


Рисунок 2.19 – Распределение магнитного поля в модели «трубопровод-индуктор» в 3D

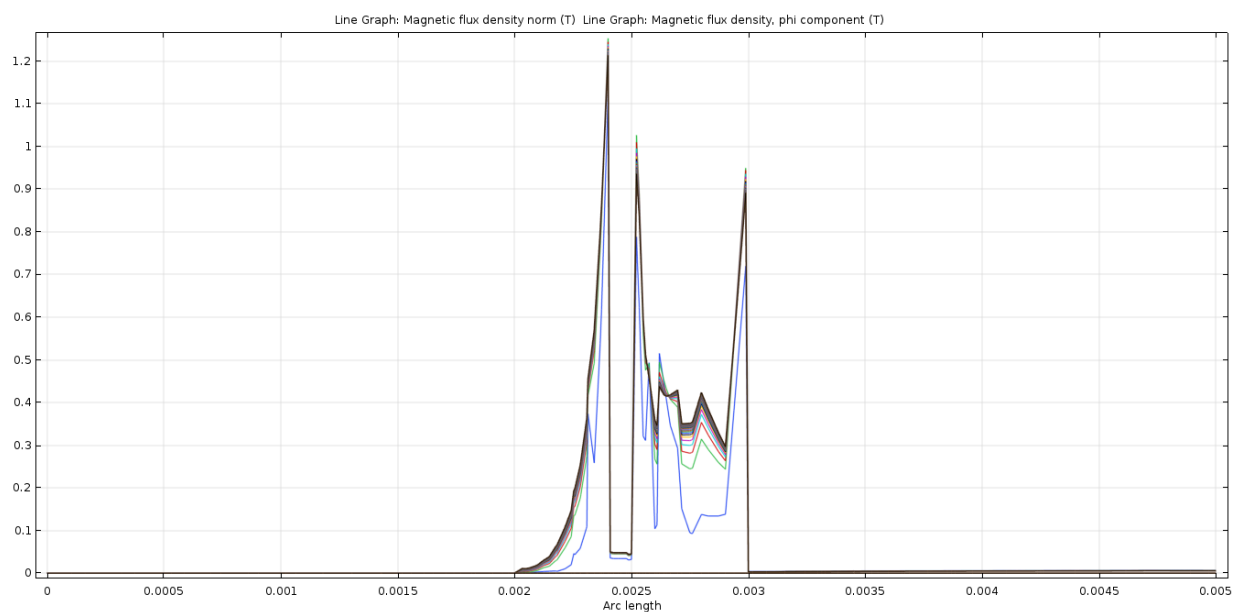


Рисунок 2.20 – Распределение плотности магнитного потока по нормали к плоскости трубы и трубопровода

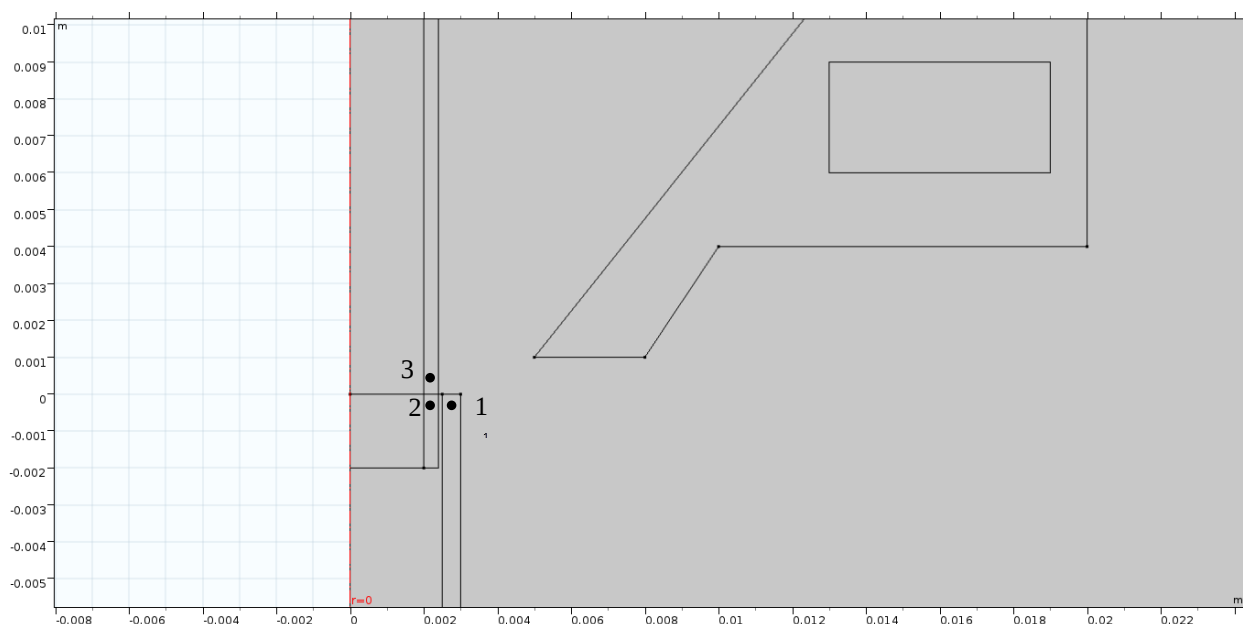


Рисунок 2.21 – Контрольные точки измерения температуры

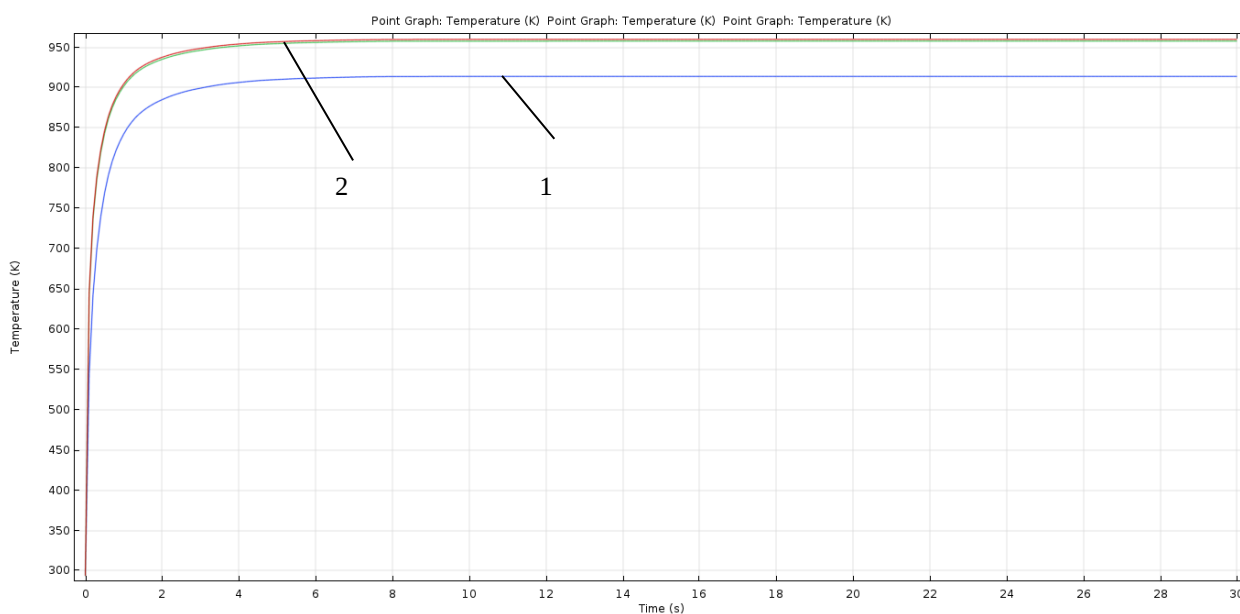


Рисунок 2.22 – Распределение температуры при индукционном нагреве:

1 – Контрольная точка «1»; 2 – Контрольные точки «2» и «3»

Как видно из рисунка 2.22, при максимальной мощности нагрева трубопровод и труба нагреваются примерно за 5 секунд. Так же видно, что разность температур трубы и трубопровода составляет 50°C .

Выводы:

1. Разработанная математическая модель индукционного нагрева элементов волноводной сборки и трубопровода, учитывающая конструкцию и размеры волноводов и трубопроводов, физические параметры материалов, начальные и граничные условия, а также неравномерное распределение плотности вихревого тока в системе:

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial y^2} \right) + q(I_B),$$

где α – 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 плотности распределения плотности вихревых токов $I_B(x, y, t)$.

2. В качестве объектов моделирования взяты конструктивные элементы космических аппаратов: волноводные тракты и трубопроводы. Моделирование электротермических процессов, протекающих при индукционном нагреве, проводились в пакетах моделирования Comsol Multiphysics, Elcut и пакете для научных и инженерных расчетов Matlab.

3. Моделирование 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.

4. 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 АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКОЙ

Разработана автоматизированная система управления индукционной пайкой. Система представляет собой двухконтурную систему управления. Управление основано на обратной связи, отражающее разницу температур соединяемых деталей, то есть сигнал является результатом вычитания сигналов полученных с датчиков температуры. Вторым контуром осуществляется процесс регулирования позиционера таким образом, чтобы постоянно сводить разность температур к нулю, точнее, разность температур не должна превышать значение $10 - 20^{\circ}\text{C}$. Разработаны алгоритмы управления автоматизированной системы. Проверка алгоритмов проведена на модели данной системы, разработанной в среде моделирования MATLAB.

3.1 Экспериментальная установка для автоматизированного управления индукционной пайкой

Для проведения индукционной пайки волноводов и трубопроводов была разработана экспериментальная установка для автоматизированного управления индукционной пайкой [94]. К оборудованию и программному обеспечению данной установки предъявляются следующие требования [105]:

- нагрев до температуры пайки должен вестись со скоростью $10-20^{\circ}\text{C}/\text{сек}$;
- экспериментальная установка должна обеспечивать возможность выдержки программы режимов пайки с основной приведенной погрешностью до 1 % вне зависимости от внешних факторов, то есть колебаний напряжения питающей сети, температуры охлаждающей индуктор жидкости, температуры окружающей среды и её состава (аргон, азот, газовые смеси и др.);
- экспериментальная установка должна обеспечивать управление процессом пайки с использованием системы бесконтактной пирометрии, обеспечивая поддержание температуры соединяемых элементов по заданному временному закону;

- экспериментальная установка должна обеспечивать управление, регулировку и контроль заданных параметров, с возможностью их изменения, согласно заданному технологическому процессу, а также отображать и сохранять всю необходимую информацию о процессе;

- экспериментальная установка должна иметь функцию разграничения доступа к управлению настройками для оператора, который имеет ряд ограничений на выполнение некоторых операций по управлению, редактированию и отображению служебной информации, для технолога с возможностью полного доступа к управлению процессом;

- технологические процессы, принятые к реализации автоматизированной системой управления, должны быть представлены в виде программных блоков, размещенных в базе данных, и обеспечивать технологические процессы пайки трубопроводов из нержавеющей стали.

Установка предназначена не только для автоматизации процесса индукционной пайки, но и для выработки оптимальных технологических решений и режимов. Автоматическая регистрация температур, контролируемых пирометрами, позволяет осмысленно принимать решения по конструкции индукторов, анализировать распределение температур в деталях в процессе пайки, исследовать режимы нагрева и определять их оптимальные параметры.

Структурная схема установки показана на рисунке 3.1 [106].

В качестве силовой части установки используется среднечастотный бестрансформаторный генератор с рабочей частотой 66 КГц (СБГ-16), модернизированное согласующее устройство СУ(М), комплект индукторов с рабочими окнами различных сечений.

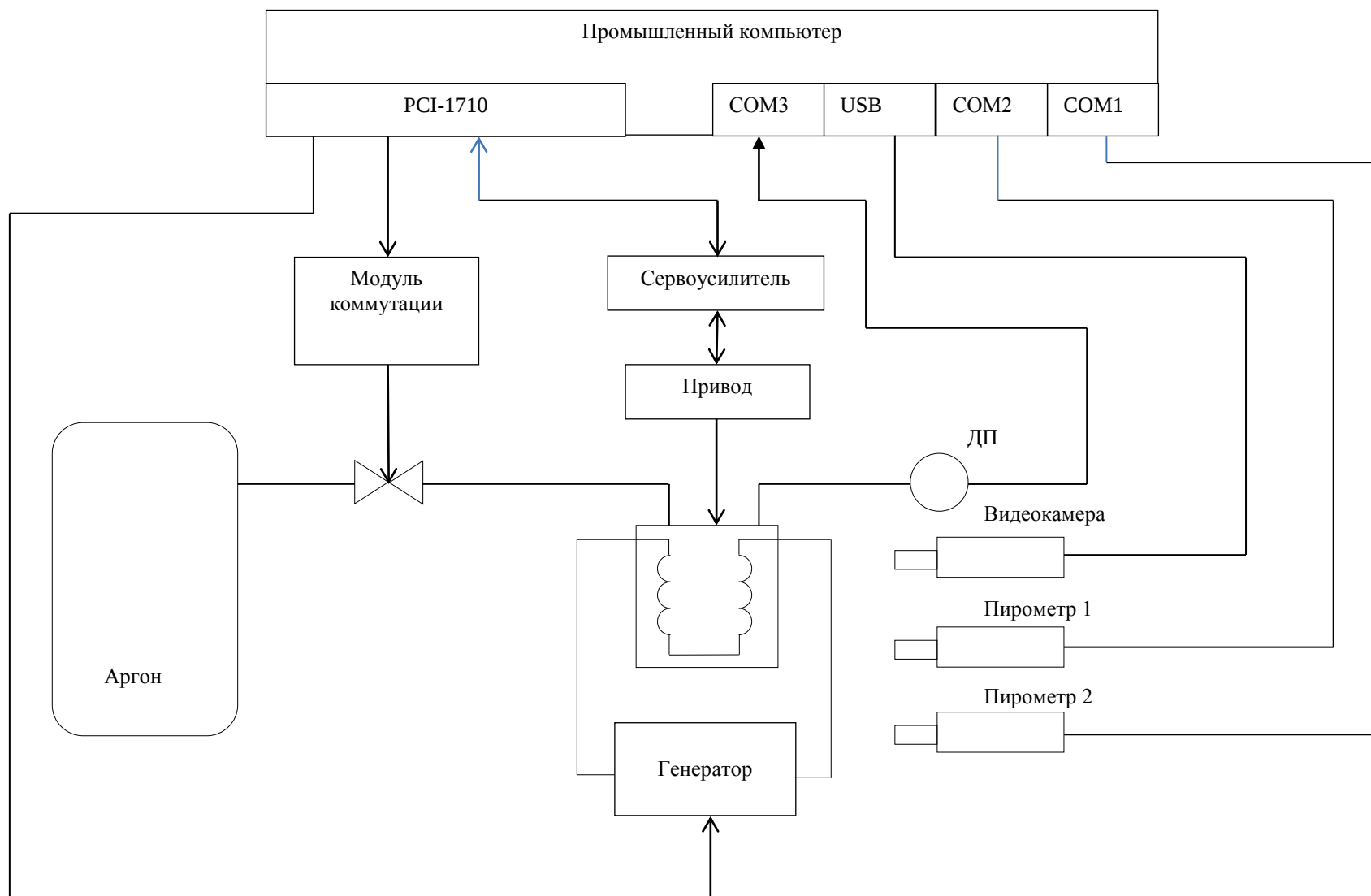


Рисунок 3.1 Структурная схема экспериментальной установки для автоматизированного управления индукционной пайкой

Для управления процессом пайки используется промышленный компьютер со встроенной интерфейсной картой PCI – 1710. В качестве бесконтактных датчиков температуры используются пирометры AST250. Внешний вид пирометра изображен на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 - Внешний вид пирометра AST A250/A450 FO-PL

Пирометры AST A250/A450 FO-PL являются высокоточными цифровыми одноканальными пирометрами с волоконно-оптическим кабелем, специально разработанные для температурных измерений металлов, керамики, графита в экстремальных условиях. Диапазон измерения пирометров от 300 °C до 2500 °C [107].

Излучение от горячего объекта фокусируется на моноволокне, расположенном в гибком металлическом рукаве из нержавеющей стали, и передается по волокну к фотоприемнику, где превращается в электрический сигнал. Этот сигнал затем преобразуется в температурный отсчёт и выдается через цифровой и аналоговый выходы.

Пирометры AST A250/A450 FO-PL имеют минимальное время реакции 2,0 мс. Для подключения к промышленному компьютеру используется интерфейс RS – 232 (COM1, COM2). Постоянная времени, излучательная способность, шкала аналогового выхода, выбор типа пиковой регистрации

может устанавливаться при выпуске прибора, а также оператором в процессе эксплуатации.

Диаметр контрольного пятна для пирометра на рабочей дистанции в 200 мм составляет всего 1 мм, что выгодно отличает его от других аналогичных приборов.

Для введения контура управления положением детали относительно окна индуктора установка содержит лазерный датчик расстояния LS5 (ДП), внешний вид которого показан на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 - Внешний вид оптического датчика положения LS5

Для управления положением детали относительно индуктора используется привод, управляемый промышленным компьютером через сервоусилитель. Изменяя положение деталей, относительно индуктора, и контролируя температуру нагрева деталей, можно будет регулировать количество энергии передаваемой деталям, а, следовательно, обеспечить их равномерный нагрев в процессе индукционной пайки.

Для проведения пайки в защитных средах, например трубопроводы, установка укомплектована баллоном с аргоном и управляемым вентилем.

Внешний вид экспериментальной установки для автоматизированной пайки показан на рисунке 3.4.

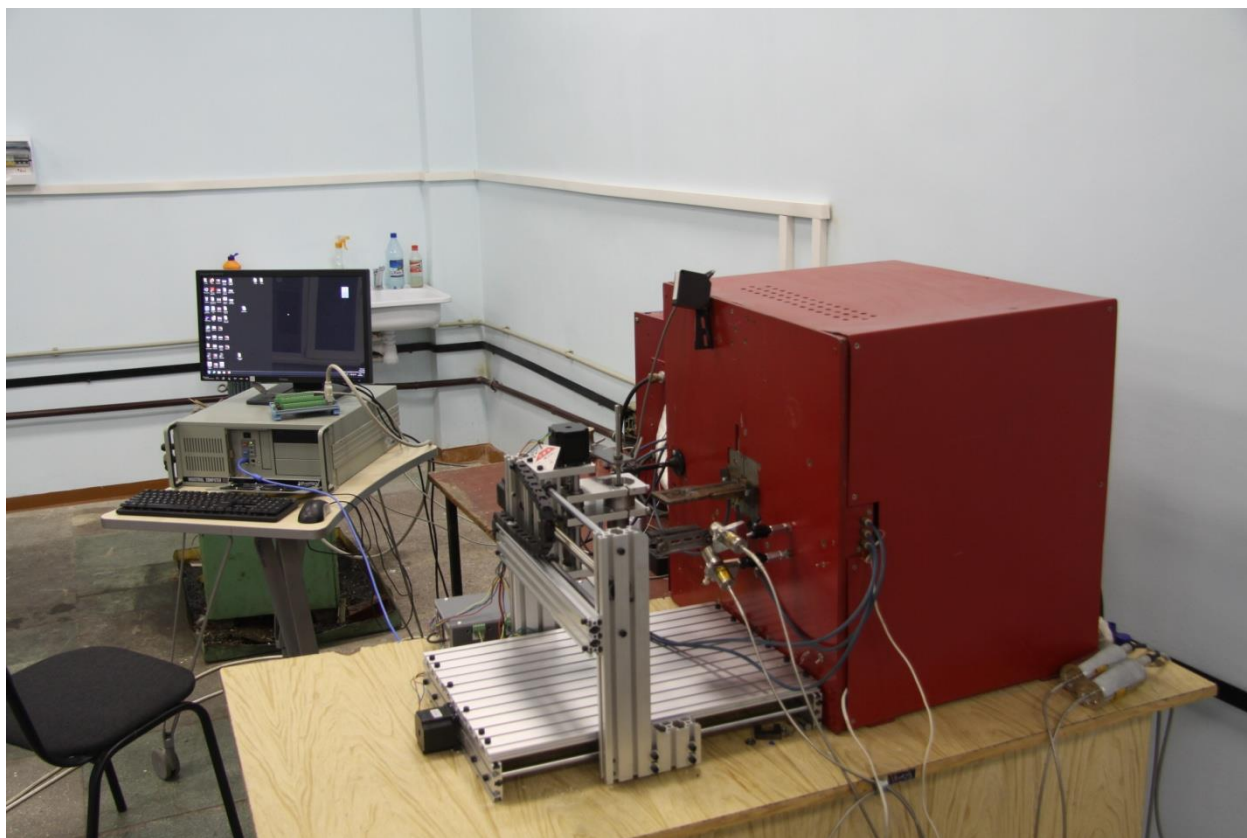


Рисунок 3.4 - Внешний вид экспериментальной установки для автоматизированного управления индукционной пайкой

3.2 Модель автоматизированной системы управления индукционной пайкой

Экспериментальная установка представляет собой двухконтурную систему управления (рисунок 3.5). В данной системе имеется два контура:

- 1) Контур управления индукционным генератором.
- 2) Контур управления привода;

ЭВМ генерирует управляющее воздействие на индукционный генератор для нагрева составных элементов паяного соединения. В данном случае на рисунке 3.5 показаны элементы волноводного тракта (фланец и труба) из-за наибольшей трудоемкости процесса управления нагревом при индукционной пайке. Нагрев элементов соединения контролируется с помощью пирометра 1 и пирометра 2. На основании разницы температур

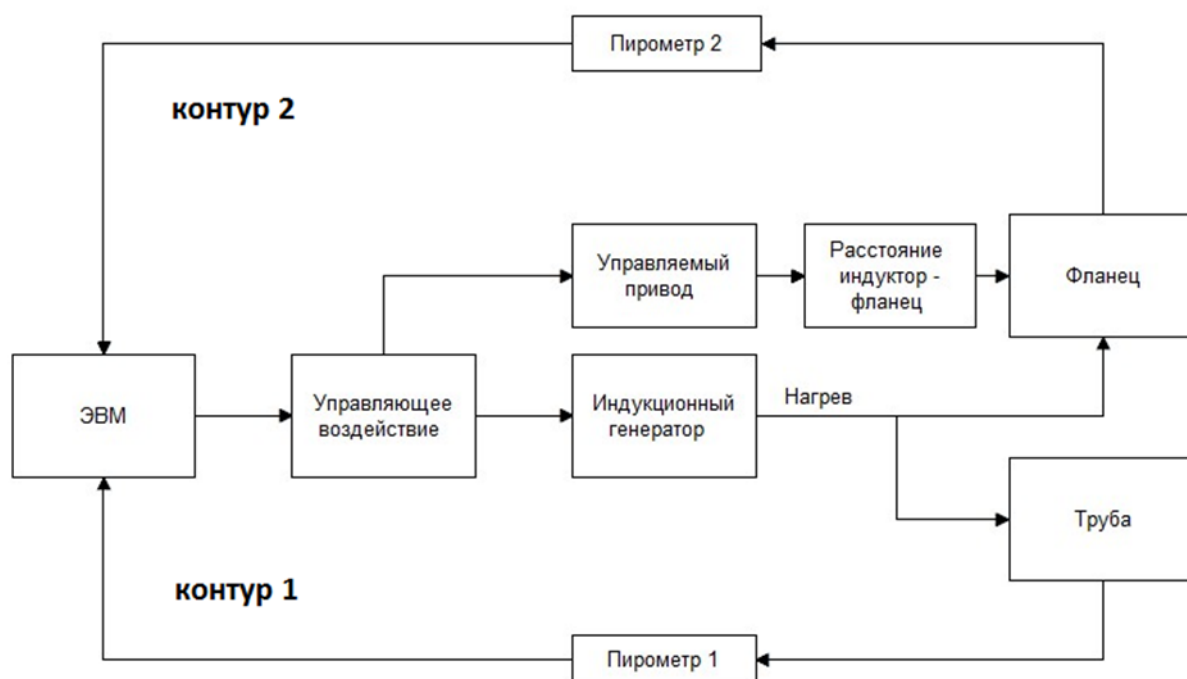


Рисунок 3.5 – Структурная схема двухконтурной системы автоматизированного управления индукционной пайкой

$$\Delta T = T_{\text{трубы}} - T_{\text{фланца}},$$

система по заданной в ЭВМ рабочей программе осуществляет управление мощностью индукционного генератора. Это первый контр управления.

Во втором контуре осуществляется контроль зазора между деталью (фланец) и индуктором. Также на основании разницы температур деталей ΔT управляемый привод изменяет зазор между деталью и индуктором, что в свою очередь приводит к изменению количества энергии, передаваемой деталям (фланцу и трубе). Таким образом, можно корректировать нагрев деталей соединения.

Введение второго контура позволит более равномерно нагревать детали соединения, а также свести разность температур деталей ΔT к минимуму.

Для отладки алгоритмов управления индукционной пайкой разработана модель двухконтурной системы автоматизированного управления. Структурная схема модели представлена на рисунке 3.6.

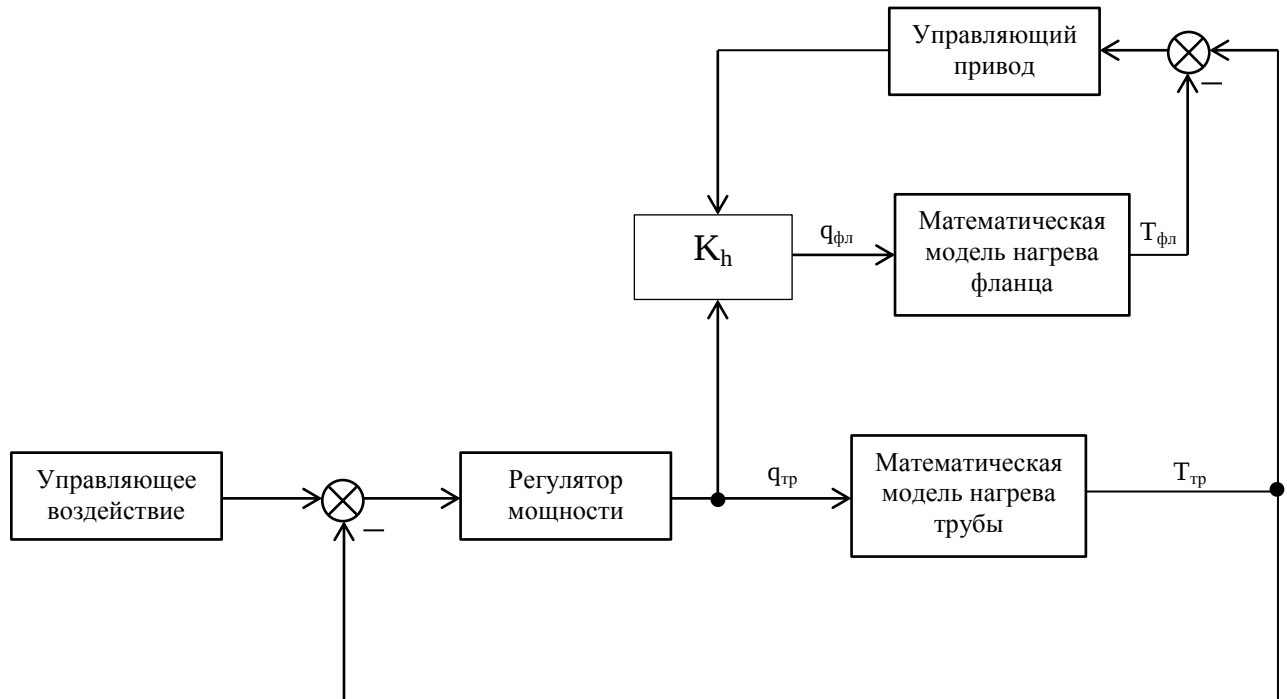


Рисунок 3.6 – Структурная схема модели двухконтурной системы автоматизированного управления индукционной пайкой

Управляющее воздействие, генерируемое ЭВМ, управляет регулятором мощности (индукционный генератор). Распределение энергии регулятора мощности представлено в следующем виде:

$$q_{\text{ген}} = q_{\text{тр}} + q_{\text{фл}}$$

$$q_{\text{фл}} = q_{\text{тр}} * K_h$$

$$K_h = \alpha * h$$

где $q_{\text{ген}}$ – мощность, выдаваемая генератором;

$q_{\text{тр}}$ – мощность, полученная трубой;

$q_{\text{фл}}$ – мощность, полученная переходником (муфтой);

K_h - коэффициент зависимости переданной энергии от расстояния;
 h – расстояние от индуктора до переходника (муфты);
 α – коэффициент, отражающий зависимость расстояния между изделием и индуктором, и переданной ему мощности.

Расчет температуры фланца (муфты) и трубы ведется на основании модели (2.7), рассмотренной в главе 2. На основании данной модели в Matlab была разработана программа расчета тепловых полей [108].

В качестве передаточных функций управляемого привода и генератора решено использовать типовые передаточные функции [109, 110].

Передаточная функция управляемого привода имеет вид:

$$W_{\text{пр}} = \frac{K_{\text{пр}}}{S(T_{\text{пр}}S+1)}.$$

Передаточная функция генератора имеет вид:

$$W_{\text{ген}} = \frac{K_{\text{ген}}}{T_{\text{ген}}S+1}.$$

Таким образом, получена схема системы автоматизированного управления с приводом, управляемым обратной связью, основанной на сигнале, отражающем разницу температур трубы и фланца. Стоит отметить, что моделируемая система управления отражает процесс регулирования позиционера таким образом, чтобы постоянно сводить разность температур трубы и фланца к нулю, а конкретнее, она должна стремиться к состоянию равновесия и разность результирующих сигналов температур не должна превышать 10 - 20⁰С, что в свою очередь позволит избежать прожога изделия.

Для того чтобы добиться устойчивости работы двухконтурной системы необходима корректировка сигнала, показанная на рисунке 3.7.

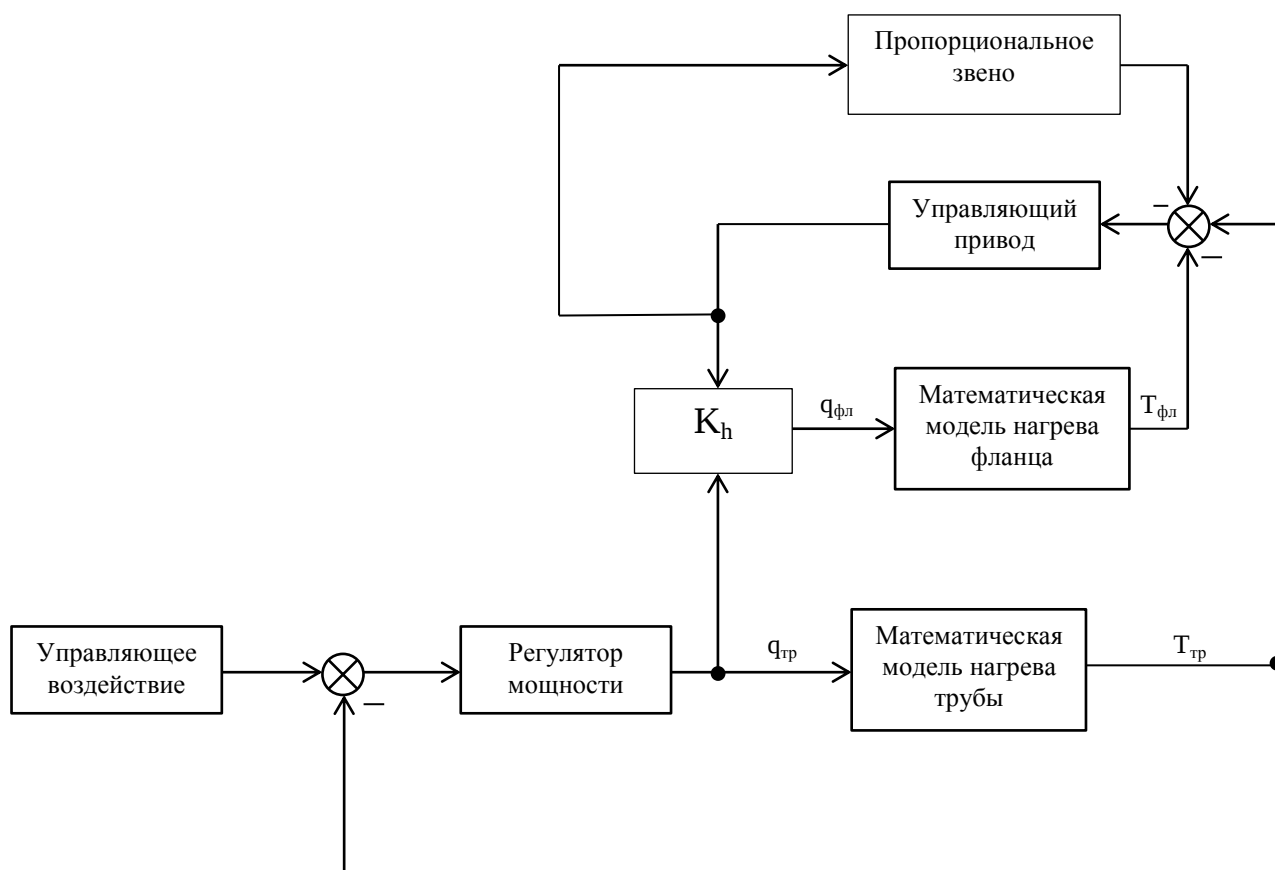


Рисунок 3.7 - Схема моделируемой двухконтурной системы автоматизированного управления индукционной пайкой с корректирующей обратной связью

Была выбрана коррекция при помощи обратной связи по положению, а именно, сигнал с выхода управляемого привода вычитается из сигнала, поступающего на его вход, предварительно проходя через пропорциональное звено.

3.3 Разработка алгоритмов управления индукционной пайкой

Для проведения исследований по применению двухконтурной системы управления в системе Matlab [111 - 113] была разработана функциональная схема модели [106, 114], представленная на рисунке 3.8, позволяющая

осуществлять одновременное управление, как по температуре трубопровода, так и расстоянию от переходника/муфты до индуктора.

На рисунке 3.8 используются следующие обозначения:

- $V_{уст}$ – уставка скорости нагрева;
- $T_{уст}$ – температура стабилизации нагрева;
- $q_{ген}$ – мощность генератора, передаваемая нагреваемому изделию;
- $K\%(h)$ – распределение энергии генератора между элементами изделия.

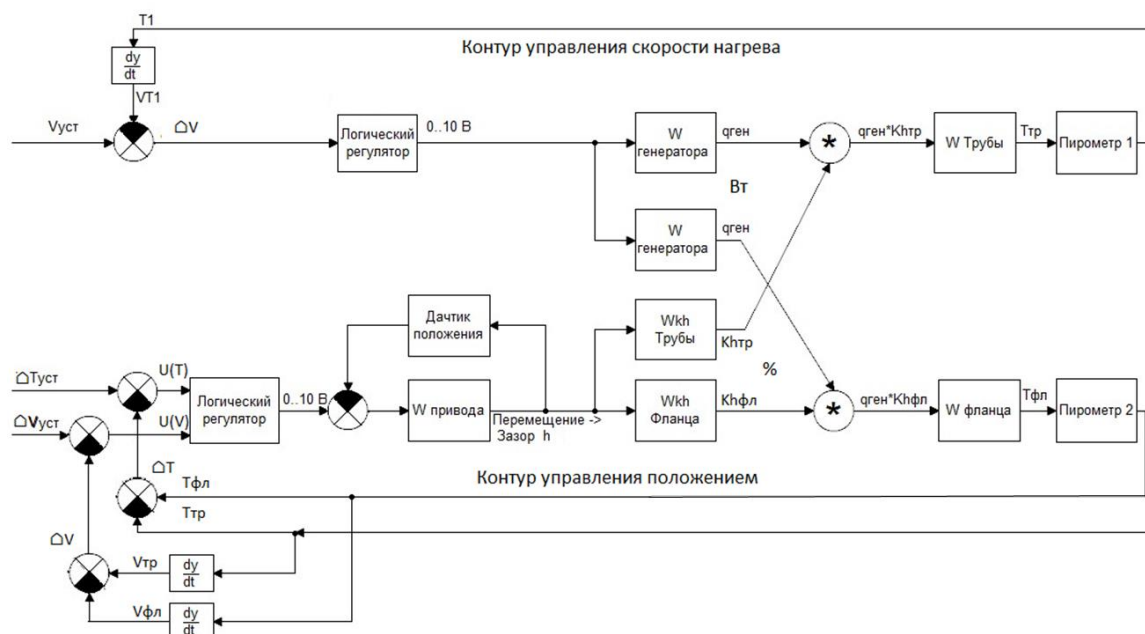


Рисунок 3.8 – Функциональная схема модели двухконтурной автоматизированной системы управления индукционной пайкой

В обычных задачах поддержание заданного режима нагрева используется параметрический интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. Однако в данной задаче одна из цепей управления (расстояние между индуктором и устройством) является косвенной и использование ПИД-регулятора на всех стадиях процесса малоэффективно.

Современные исследования рассматривают типы и комбинации параметрических (П) и дифференциальных (Д) регуляторов, которые позволили бы регулировать скорость нагрева и разность температур между элементами изделия независимо от контура управления: П-контроллер позволяет

контролировать разность температур, а Д-контроллер позволяет управлять скоростью нагрева каждого из элементов.

Вследствие введения в систему контура управления положением заготовки относительно окна индуктора, данная система управления приобретает свойства многосвязности и нелинейности. При этом взаимное влияние контуров, возможно, ослабить посредством импульсного управления системой таким образом, что каждый из контуров независимо друг от друга подчиняется закону с постоянными интервалами управления и ожидания [106, 114]:

$$imp(t, \tau_1, \tau_2) = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{mod}\left(\frac{t}{\tau_1 + \tau_2}\right) \leq \tau_1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

где τ_1 – интервал управления, с;

τ_2 – интервал ожидания, с;

$\text{mod}\left(\frac{t}{x_1 + x_2}\right)$ – вычисление остатка от деления x_1 на x_2 ;

t – время, с.

Такой подход позволяет отказаться от необходимости вычисления точной меры взаимного влияния контуров и повышает качество управления в целом по следующим причинам:

- устраняется проблема высокой инерционности объекта управления относительно устройства управления объектом;

- уменьшается взаимное влияние контуров. В этом случае при выборе достаточно небольших интервалов управления и ожидания (200 – 400 мс) взаимное влияние контуров управления будет представлять собой пренебрежимо малую величину по отношению к управляющему воздействию.

3.3.1 Разработка алгоритма управления контуром скорости нагрева

При регулировании скорости нагрева управление осуществляется на основе логического интегрального регулятора для отклонения температуры нагрева паяных элементов изделия выше определенного порога. Кроме того, отдельные режимы работы могут быть выбраны в зависимости от стадии технологического процесса:

- 1) разогрев;
- 2) основной нагрев;
- 3) этап стабилизации.

Во время этапа разогрева необходимо поддерживать определенную мощность генератора, поскольку на данном этапе нельзя контролировать температуру элементов изделия из-за конструктивных особенностей пирометров. А также постоянная мощность обеспечит повторяемость процесса при прочих неизменных начальных условиях.

Во время основного этапа нагрева задача управления состоит в поддержании скорости нагрева одного из элементов изделия в соответствии с уставкой. Поскольку корректировка отклонения скорости нагрева не является задачей требующей значительного изменения управляющего воздействия, основой контура будет И – регулятор.

На этапе стабилизации температуры регулятор должен поддерживать текущую температуру нагрева, а также предотвращать перегрев в случае его возникновения. Уставка скорости нагрева должна быть выставлено в ноль, а пороговое значение температуры при его достижении будет вызывать ослабление управляющего воздействия.

Для контура управления по температуре в результате проведения исследований посредством математического моделирования была найдена зависимость для управляющего воздействия, представляющая из себя логическую функцию (3.1) [106, 114]:

$$u_1(t) = W \text{int}(t) + \text{imp}(t, \tau_1, \tau_2) \times \begin{cases} 0 \text{ if } T_c < T_{sns} \\ \frac{|\Delta V(t)|}{\Delta V(t)} \cdot k_1, \text{ if } T_c(t) < T_{st} \text{ and } |\Delta V(t)| > V_{sns} \text{ and } T_c(t) > T_{sns}, \\ \frac{|\Delta V(t)|}{\Delta V(t)} \cdot k_2, \text{ if } T_c(t) < T_{st} \text{ and } |\Delta V(t)| > V_{sns} \text{ and } T_c(t) > T_{sns}, \\ -k_3, \text{ if } T_c(t) > T_{st} + T_{lim}, \end{cases} \quad (3.1)$$

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 заданной программой, вычисляемая по формуле:

$$\Delta V(t) = V_{proc}(t) - V_c(t),$$

где $V_{proc}(t)$ – уставка скорости нагрева;

$V_c(t)$ – скорость нагрева элемента паяемой сборки;

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:

$$W_{int} = \frac{1}{a * s}, a \rightarrow 0.$$

3.3.2 Разработка алгоритма управления по положению изделия

Управление во втором контуре системы, то есть управление по положению изделия относительно индуктора, представляет собой гораздо более сложную задачу по отношению к первому контуру управления.

Управление процессом индукционной пайки волновода можно разделить на отдельные этапы, в каждом из которых система может принимать различные состояния. На основе анализа возможных состояний можно выделить желаемый закон управления на определенном этапе и при нахождении системы в конкретном состоянии. Поскольку система является нестационарной, многосвязной и нелинейной, задача управления не может быть решена тривиальным способом с использованием типового закона управления и требует определенного структурного решения, охватывающего все множество возможных состояний.

В таблице 3.1 представлены взаимосвязь этапов технологического процесса, состояний объекта управления и логично вытекающих из этого идей управления.

Для каждого этапа управления, представленного в таблице 3.1, подходит определенный закон управления, который можно реализовать в виде отдельного логического регулятора с определенными коэффициентами.

При моделировании поведения двухконтурной системы управления индукционной пайкой был проведен перебор основных регуляторов и различных коэффициентов усиления.

Таблица 3.1 - Этапы технологического процесса индукционной пайки

Этап технологического процесса	Состояние объекта управления	Идея управления
Разогрев. Предварительный нагрев заготовки до 300 °С и выравнивание температур элементов изделия.	Начальный разброс температур спаиваемых элементов.	Как можно быстрее устранить величину рассогласования.
Основной нагрев Нагрев изделия до температуры пайки	Переходный процесс или установившееся значение в системе, при котором температуры элементов равны и имеют одинаковую скорость нагрева	Обеспечить схождение температур элементов и выравнивание скоростей их нагрева. Удержание скорости нагрева и разности температур в допустимых пределах.
Стабилизация Плавление припоя и формированием паяного соединения.	Нелинейный процесс, сопровождающийся изменением температурных полей за счет теплообмена между элементами	Поддержание значений температур на заданном уровне - температуре плавления припоя. Недопущение перегрева основного материала.

На рисунке 3.9 показана работа двухконтурной системы управления с П-регулятором. Использование П-регулятора позволяет сводить графики температур нагрева элементов спаиваемого соединения, однако система находится в колебательном режиме, а величина рассогласования сигнала постоянно изменяется. При этом П-регулятор с малыми коэффициентами

усиления позволяет корректировать малые отклонения системы от заданного режима, а с большими устранять сильные рассогласования сигнала. Кроме того из графика видно, что импульсный характер управления позволил существенно снизить взаимное влияние контуров. Перемещение изделия относительно индуктора, по результатам моделирования, больше не вызывает сильных отклонений в скорости нагрева.

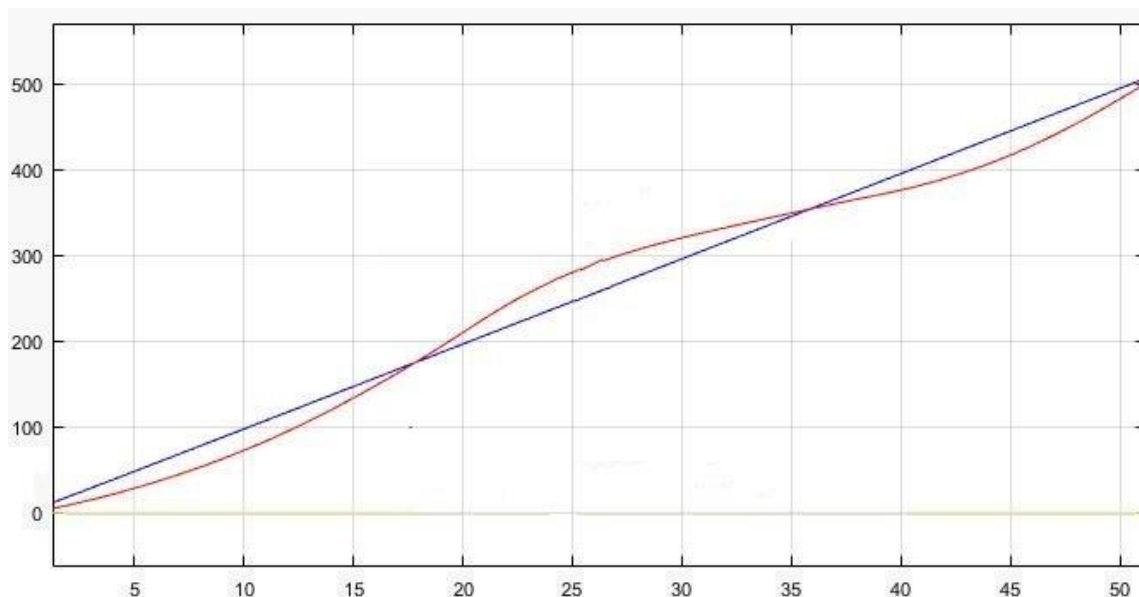


Рисунок 3.9 - Моделирование работы двухконтурной системы управления с П-регулятором: ось y – температура, ось x – время, синий график – температура трубы, красный график – температура фланца

На рисунке 3.10 показана работа двухконтурной системы управления с Д-регулятором. Введение Д-регулятора в контур управления положением изделия относительно индуктора позволяет уравнивать скорости нагрева элементов изделия, однако величина разности температур спаиваемых элементов остается постоянной. Учитывая факт нелинейности системы в целом и не учтенность многих аспектов реального процесса можно заключить, что Д – регулятор не может быть использован в чистом виде, поскольку он не учитывает разность температур между элементами изделия. Однако он позволяет в достаточно короткий промежуток времени уравнивать скорости нагрева.

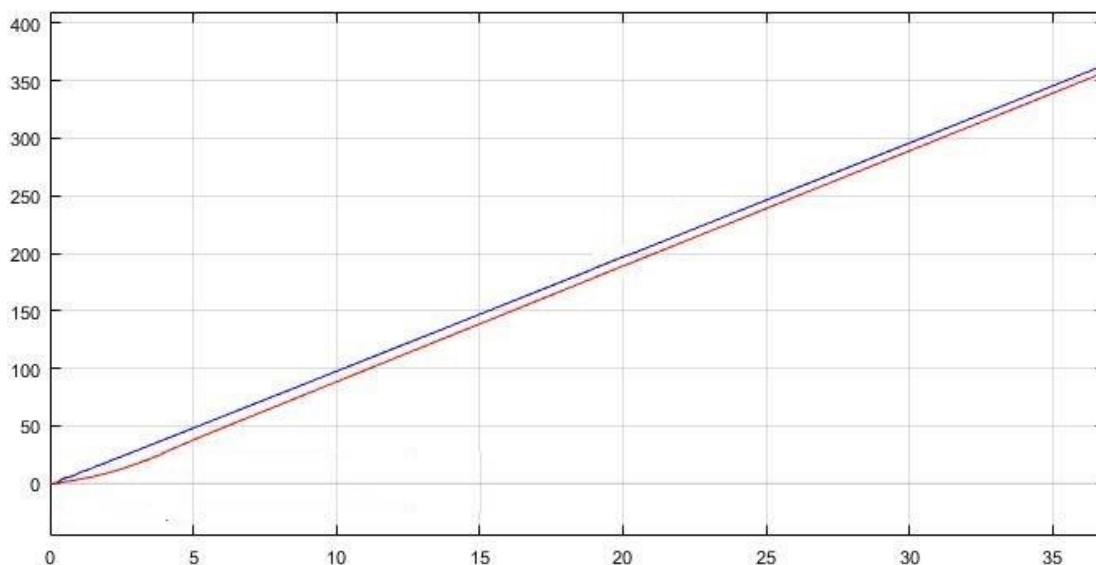


Рисунок 3.10 - Моделирование работы двухконтурной системы управления с Д-регулятором: ось y – температура, ось x – время, синий график – температура трубы, красный график – температура фланца

Из выше сказанного следует, что разработка закона управления на основе различных комбинаций П- и Д- регуляторов может в полной мере обеспечить потребность к качеству управления. В таблице 3.2 представлена взаимосвязь между выявленными выше идеями управления и их реализацией в виде определенных типов регуляторов.

Законы управления, рассмотренные в таблице 3.2, были использованы при разработке логического регулятора, который меняет законы управления в соответствии с этапами индукционной пайки. Результат моделирования данного логического регулятора показан на рисунке 3.11.

Таблица 3.2 – Взаимосвязь идей управления и регуляторами

Идея управления	Регулятор
Как можно быстрее устранить величину рассогласования температур	П-регулятор (с высоким коэффициентом усиления).
Обеспечение схождения температур и выравнивание скоростей нагрева.	Д-регулятор. ПД-регулятор.
Удержания скорости нагрева и разности температур.	П-регулятор (с низким коэффициентом усиления).
Поддержание значения температур на температуре плавления припоя	ПД-регулятор.
Недопущение перегрева основного материала	

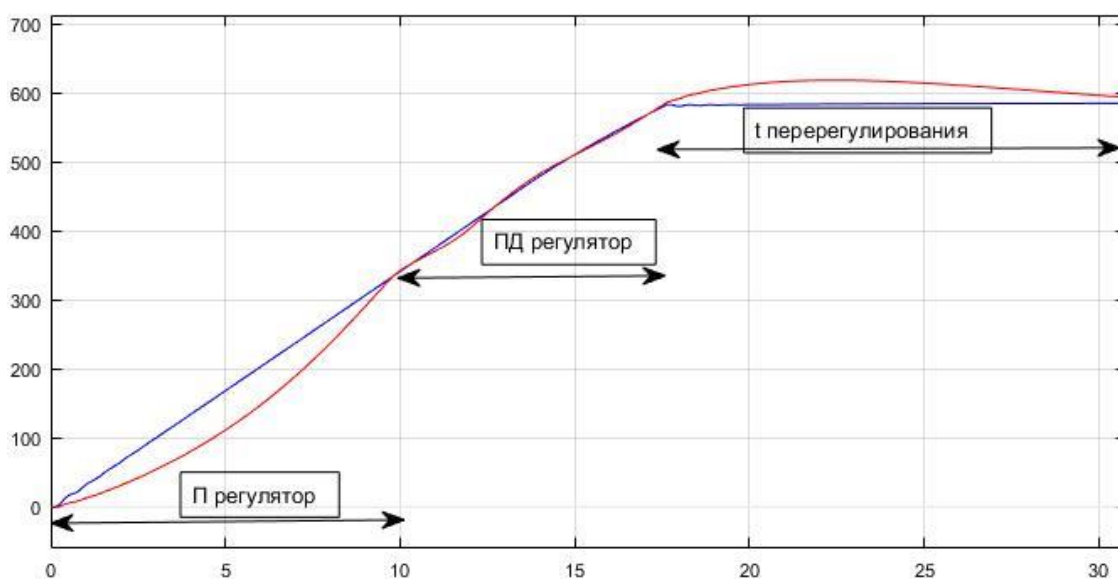


Рисунок 3.11 – Моделирование двухконтурной системы управления с логическим регулятором в контуре положения: ось y – температура, ось x – время, синий график – температура трубы, красный график – температура фланца

Полученный логический регулятор позволяет управлять процессом нагрева, удерживая систему в устойчивом состоянии, которое соответствует режиму, при котором возможно получение качественного паяного соединения. Тем не менее, на этапе стабилизации температур видно большое превышение температуры фланца над уровнем температуры стабилизации. Это следствие на порядок большей инерции температурного поля фланца в сравнении с температурным полем трубы. Поскольку температуры плавления припоя и основного материала относительно близки, такой режим управления приведет к оплавлению фланца. Для устранения данной проблемы в логический регулятор был введен алгоритм коррекции стабилизации температур. Результаты моделирования модифицированного логического регулятора представлены на рисунке 3.12.

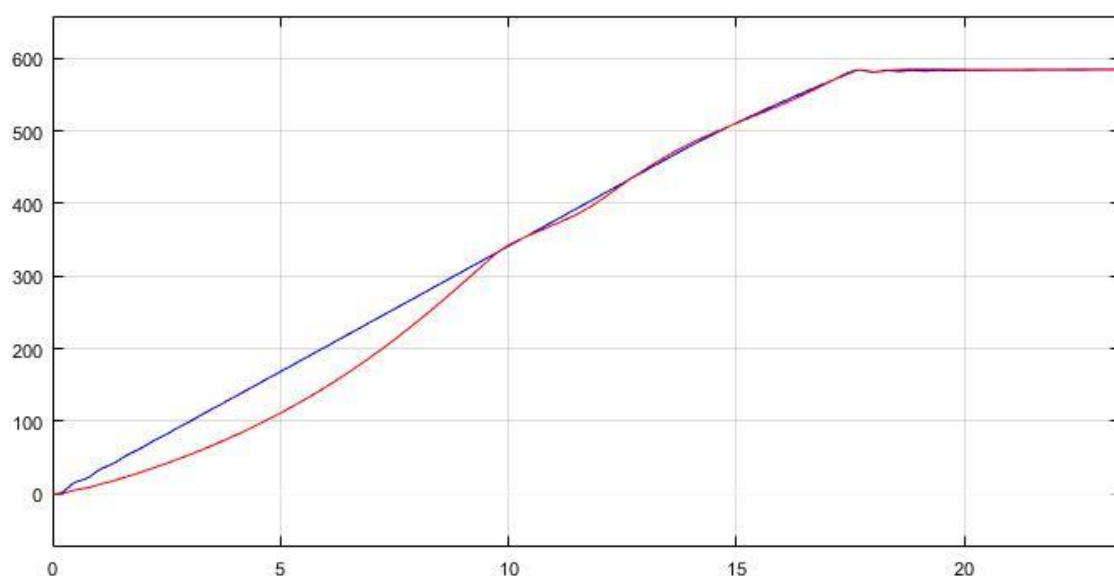


Рисунок 3.12 - Моделирование с логическим регулятором и коррекцией режима стабилизации в контуре положения: ось y – температура, ось x – время, синий график – температура трубы, красный график – температура фланца

По результатам математического моделирования для второго контура управления по положению изделия относительно индуктора была найдено уравнение, представляющего собой логическую функцию [106, 114]:

$$u_2(t) = \text{imp}(t, \tau_1, \tau_2) \times \left\{ \begin{array}{l} \Delta T(t) \cdot k_1, \text{ if } |\Delta T(t)| > \Delta T_{\max} \text{ and } T_{tb}(t) > T_{sns} \text{ and } T_{fl}(t) > T_{sns}, \\ \frac{(T_{f1}(t) - T_{sns}) \cdot k_1}{k_{simple}}, \text{ if } T_{fl}(t) > T_{sns} \text{ and } T_{tb}(t) < T_{sns}, \\ \frac{(T_{tb}(t) - T_{sns}) \cdot k_2}{k_{simple}}, \text{ if } T_{tb}(t) > T_{sns} \text{ and } T_{fl}(t) < T_{sns}, \\ \frac{|\Delta V(t)| \cdot k_2}{k_{simple}}, \text{ if } |\Delta T(t)| < \Delta T_{\max} \text{ and } |\Delta V(t)| > \Delta V_{\max}, \\ \frac{(\Delta V(t)) \cdot k_2 - |\Delta T(t)| \cdot k_3}{k_{simple}}, \text{ if } |\Delta T(t)| < \Delta T_{\max} \text{ and } \Delta V_{\min} < |\Delta V(t)| < \Delta V_{\max}, \\ \frac{|\Delta T(t)| \cdot k_4}{k_{simple}}, \text{ if } |\Delta T(t)| < \Delta T_{\max} \text{ and } |\Delta V(t)| < \Delta V_{\min}, \end{array} \right. \quad (3.2)$$

где T_{sns} – нижняя граница измерения температуры датчиком (пирометром);

$\Delta V(t)$ – разница скоростей нарастания температур элементов паяемой сборки, вычисляется:

$$\Delta V(t) = V_{fl}(t) - V_{tb}(t)$$

$\Delta T(t)$ – разница температур элементов паяемой сборки, вычисляется:

$$\Delta T(t) = T_{fl}(t) - T_{tb}(t)$$

$T_{fl}(t)$ – 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.

Полученный контур управления позволяет перераспределять энергию индукционного нагрева между элементами изделия и вести технологический процесс в заданных пределах на всех выделенных этапах. Коэффициенты должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить универсальность регуляторов по отношению к различным типоразмерам изделий. При использовании двухконтурного управления с применением полученных логических функций определяющим фактором для процесса становится установка начальных параметров:

- 1) скорость нагрева;
- 2) начальное положение заготовки;
- 3) ограничение перемещения;
- 4) начальная мощность.

3.4 Реализация алгоритмов управления двухконтурной автоматизированной системой индукционной пайки

Для управления экспериментальной установкой индукционной пайки была использована информационная система управления индукционной пайкой [106, 115 - 118]. Что бы реализовать алгоритмы управления двухконтурной системы в информационную систему были добавлены новые модули логических контроллеров, отвечающих за управление по первому и второму контурам двухконтурной системы управления.

На рисунке 3.13 представлен алгоритм работы контура управления скоростью нагрева.

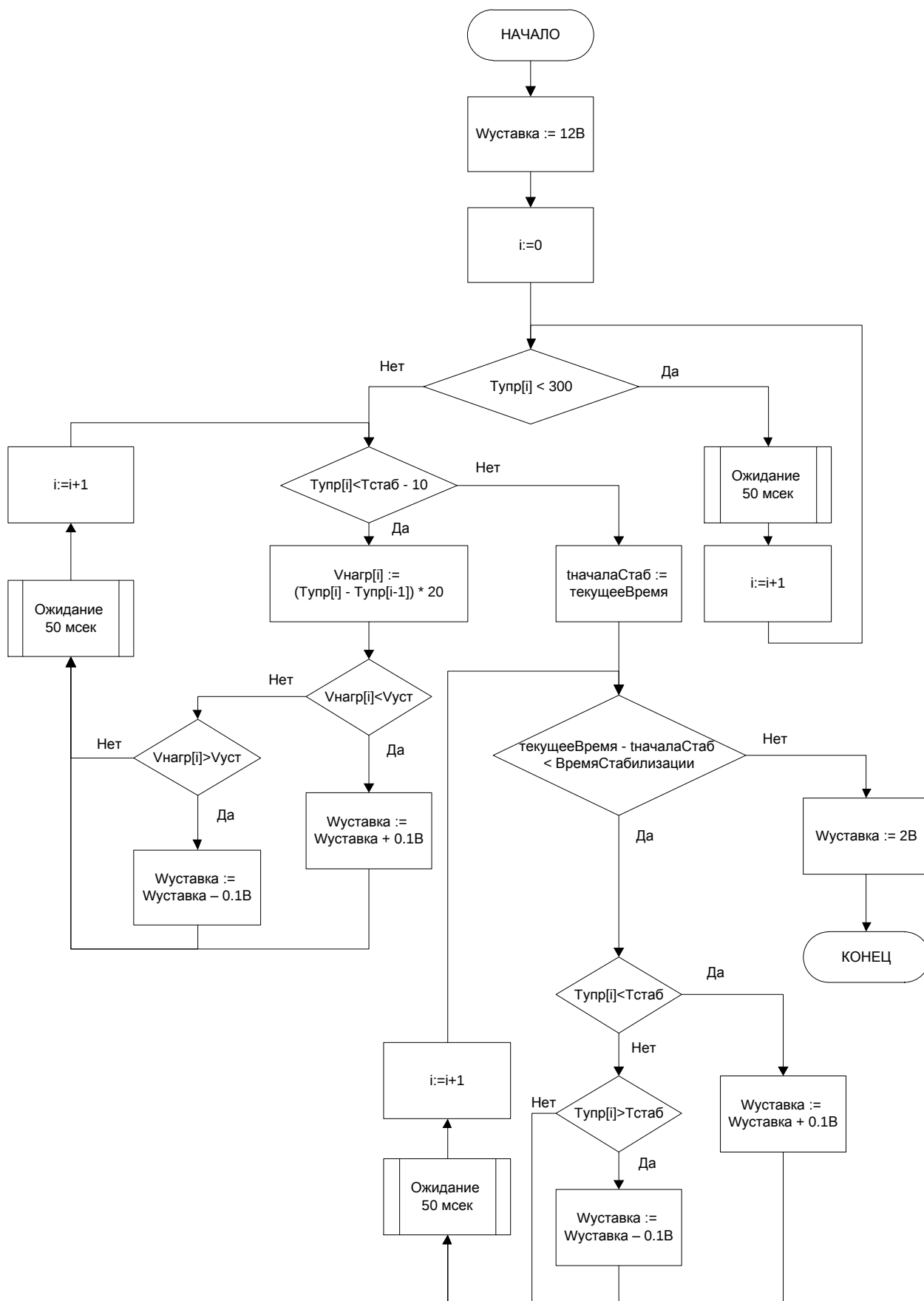


Рисунок 3.13 – Блок-схема алгоритма контура управления скоростью нагрева

На рисунке 3.13 использованы следующие обозначения:

1) Wуставка – уставка мощности генератора в вольтах. Изменяется от 2В до 12В, где 2В – это 0% мощности генератора, 12В – это 100% мощности;

2) Тупр – значение температуры, полученное с пирометра, введенного в контур управления;

3) Тстаб – значение температуры стабилизации, на которой происходит расплавление припоя. Задается как технологический параметр процесса;

4) Vнагр – скорость нагрева изделия;

5) Vуст – требуемая скорость нагрева, которую необходимо выдерживать. Задается как технологический параметр процесса;

6) tначалаСтаб – отметка времени, когда система начала процесс стабилизации;

7) Время Стабилизации – время, в течение которого необходимо выдерживать изделие при Тстаб. Задается как технологический параметр процесса.

Такая схема управления на основе логического регулятора (формула (3.1)) позволяет эффективно регулировать скорость нагрева на каждом новом цикле задержки времени, определенным в 50 мс (минимальное время ответа пирометра на запрос об измерении температуры) при условии разрешающего импульса с внешнего цикла основной программы. Такое разделение позволяет одновременно снизить негативное влияние контура управления перемещением заготовки и обеспечить поддержание заданных параметров технологического процесса.

На рисунке 3.14 и 3.15 представлены алгоритмы работы контура управления положением изделия относительно индуктора.

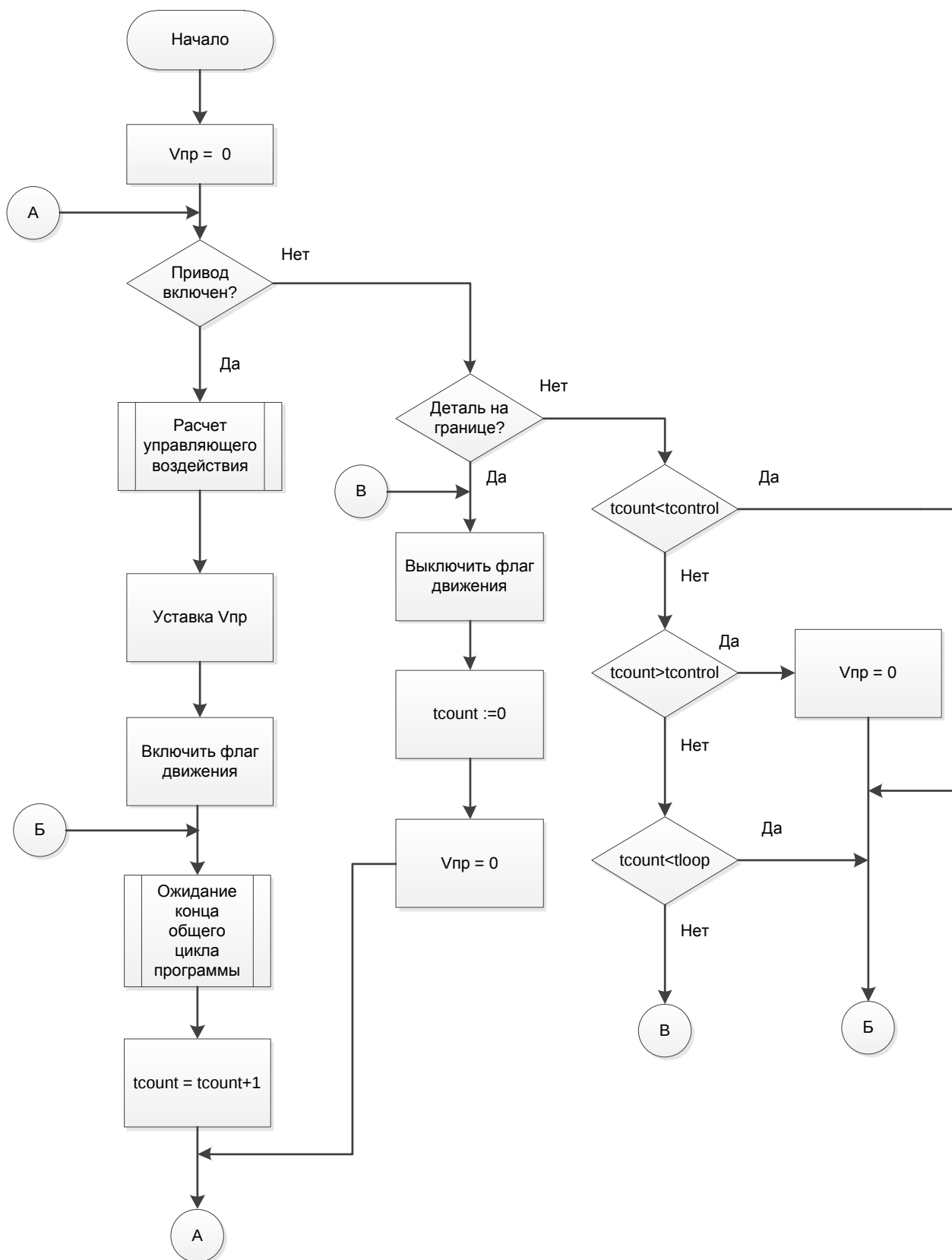


Рисунок 3.14 – Блок-схема алгоритма контура управления положением изделия относительно индуктора

На рисунке 3.14 использованы следующие обозначения:

- 1) $V_{пр}$ – скорость перемещения привода;
- 2) t_{count} – счетчик длительности импульса управления;
- 3) $t_{control}$ – длительность импульса управления;
- 4) t_{loop} – период импульса управления;
- 5) расчет управляющего воздействия - подпрограмма формирующая управляющее воздействие, подаваемое на привод в соответствии с формулой (3.2);
- 6) ожидание конца общего цикла программы – обеспечивает задержку принятия решения алгоритмом, с целью поддержания равномерной длительности импульсов управления.

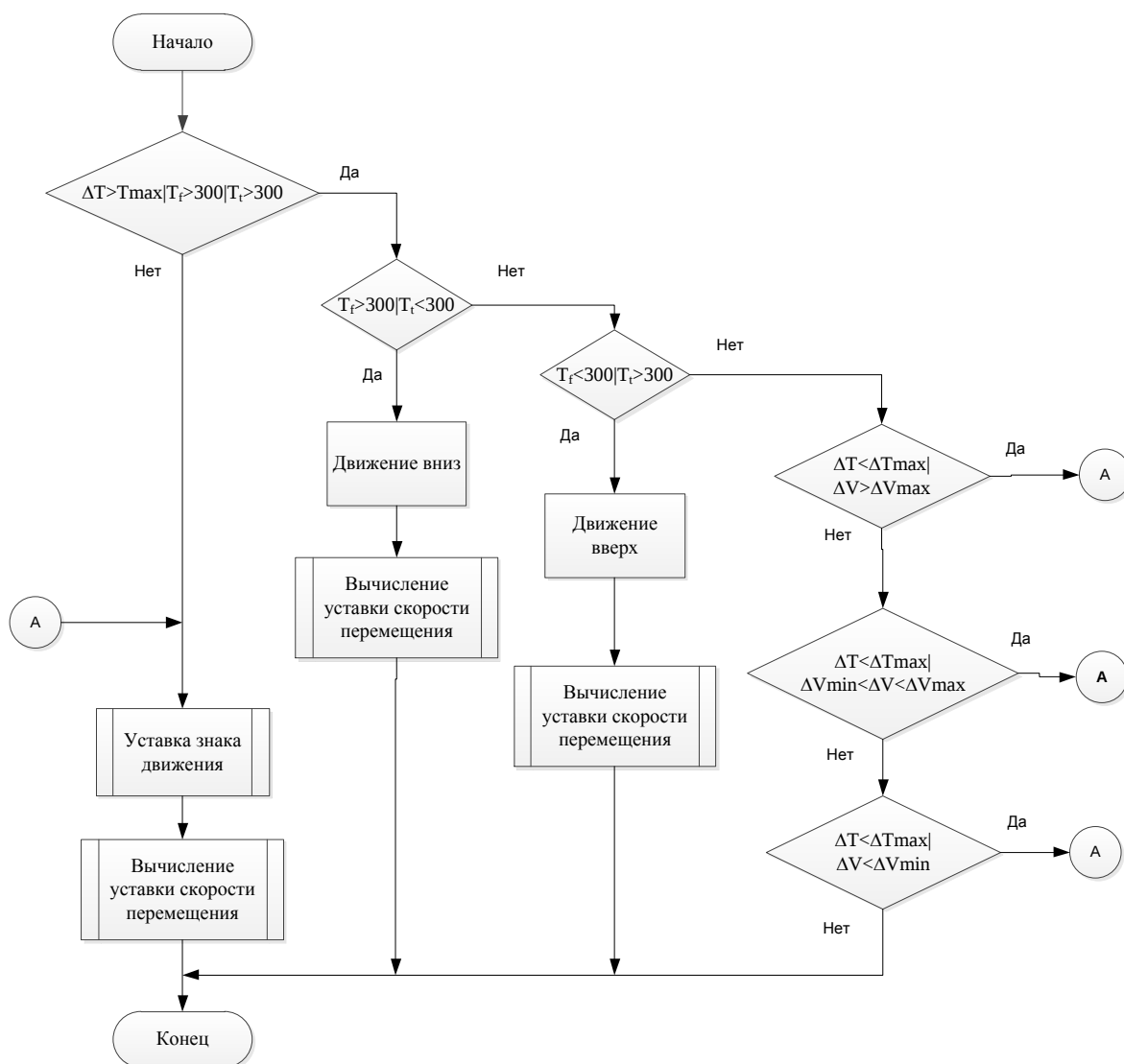


Рисунок 3.15 – Блок-схема алгоритма расчета управляющего воздействия

ΔV – разница скоростей нарастания температур элементов паяемой сборки;

ΔT – разница температур элементов паяемой сборки;

T_f – текущая температура фланца;

T_t – текущая температура волноводной трубы;

$\Delta V_{\max}$ – верхний порог разности скорости нагрева элементов сборки;

$\Delta V_{\min}$ – нижний порог разности скорости нагрева элементов сборки.

Представленный алгоритм контура управления положения позволяет обеспечить программную реализацию логического регулятора (3.2). Контур дополнительно защищен от выхода за установленные границы перемещения. При достижении граничных значений перемещения изделия и неизменном направлении движения, происходит остановка привода, и перемещение изделия разрешается только в противоположном направлении.

Выводы:

1. 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.

2. 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.

3. 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».

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ

Разнообразие типоразмеров изделий требует проведения отработки технологии индукционной пайки. Для качественной пайки изделий необходимо найти оптимальные значения параметров: скорость нагрева, начальная мощность нагрева, начальное положение изделия относительно индуктора, расположение пирометров и точки контроля температуры. Для контроля температуры использовались два пирометра AST A250 FO-PL. Все исследования проводились на экспериментальной установке для автоматизированного управления индукционной пайкой

4.1 Выбор положения пирометров

Для автоматизации процесса индукционной пайки в качестве обратной связи по температуре применяются бесконтактные пирометрические датчики, с возможностью корректировки технологических параметров и выравнивания температуры зон нагрева непосредственно в процессе пайки. В качестве бесконтактных датчиков температуры были выбраны пирометры AST A250 FO-PL.

В ходе исследований было выявлено следующее: разброс температуры нагрева изделия зависит от конструкции индуктора и позиционирования изделия относительно окна индуктора. Измерение температуры пирометрами необходимо проводить на обеих соединяемых деталях одновременно, причем для измерения должны выбираться точки с наибольшей температурой нагрева. Согласно паспортным характеристикам пирометры должны быть одинаково удалены от измеряемой поверхности. Вместе с этим расстояние выбирается таким, чтобы снизить зависимость измеряемой температуры от угла наклона пирометра к измеряемой поверхности. Экспериментально было выбрано расстояние 200 мм.

Расположение пирометров показано на рисунке 4.1.

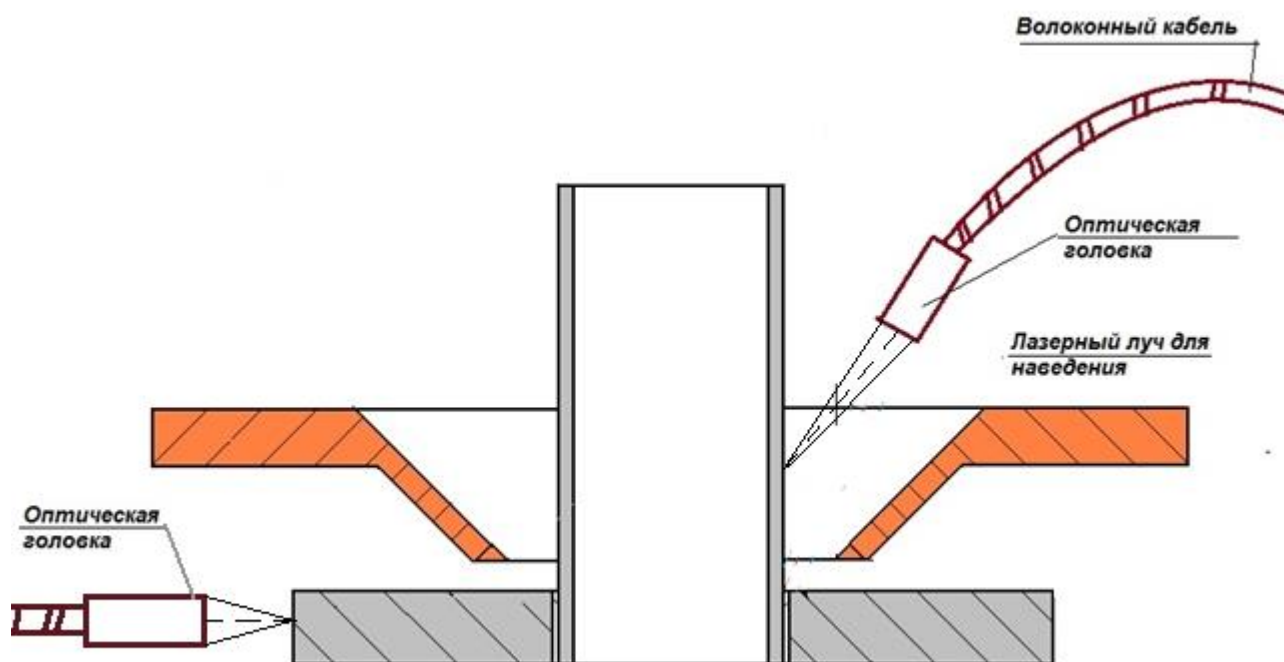


Рисунок 4.1 - Расположение оптических головок и зоны обзора пирометров относительно волновода и индуктора

Для контроля температуры с помощью пирометров последние должны быть оттарированы. Для тарировки использовался образец волновода с зачеканенной в него термопарой ХА. Пирометры наводились на одну точку контролируемой поверхности образца, расположенной вблизи размещения термопары. Процесс нагрева образца проводился с помощью автоматизированной системы управления. Стабилизация температуры в зоне нагрева составляла 500 °С. Тарировку пирометров осуществляли подстройкой коэффициентов пирометров и добивались их идентичных показаний температуры с температурой, измеренной с помощью термопары.

Первоначально пирометры для контроля температуры трубы был закреплен на неподвижное основание, а пирометр для контроля температуры фланца/муфты на подвижное основание (рисунок 4.2).

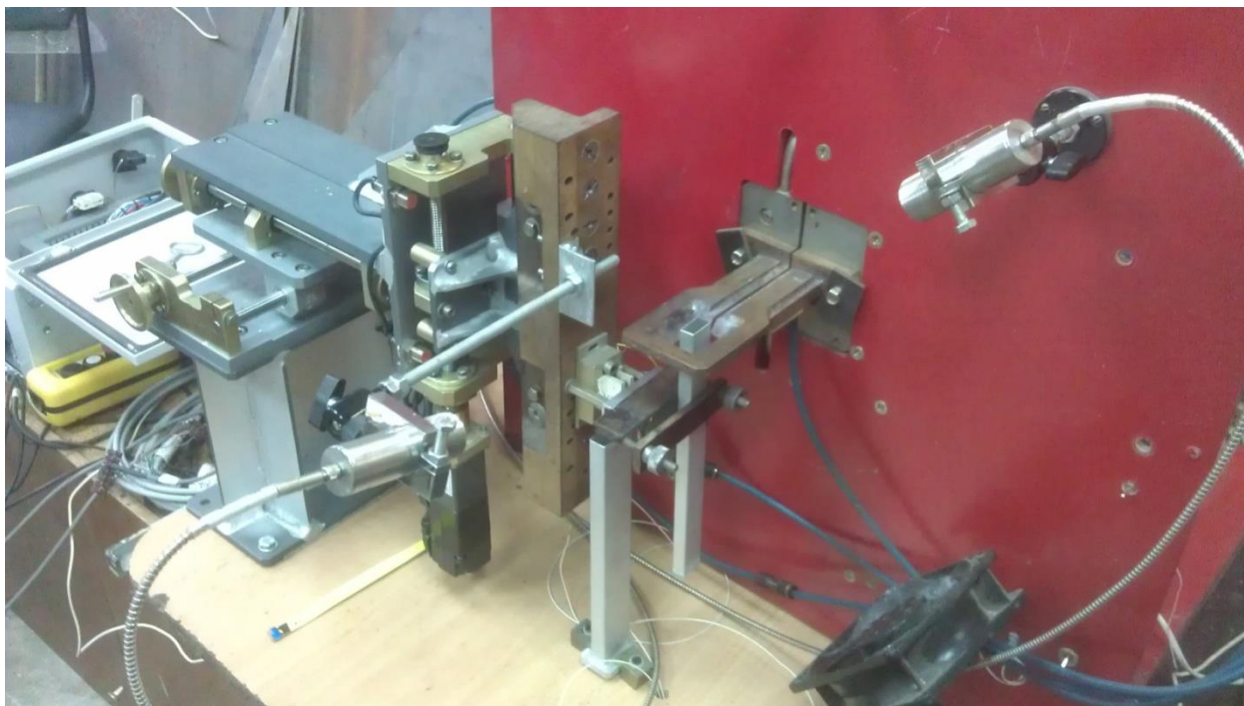


Рисунок 4.2 - Крепление пирометров. Фланец/муфта – подвижное основание, труба – неподвижное основание

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены графики нагрева при описанной схеме крепления пирометров.

На представленных графиках видно, что с перемещением заготовки относительно индуктора, перемещается и точка контроля температуры на трубе. Это негативно сказывается на процессе пайки. Используя такой подход к измерению температуры, не удалось получить повторяемости процесса и стабильности результатов пайки, возникали недоплавы припоя и локальные прожоги трубы. Это связано с тем, что во время перемещения пирометр переставал контролировать температуру в зоне пайке и в конце процесса мог быть направлен на расстояние 10 – 12 мм от начальной точки, кроме этого температурное поле трубы не стационарно. В связи выше изложенным, было решено закрепить оба пирометра на подвижное основание (рисунок 4.5).

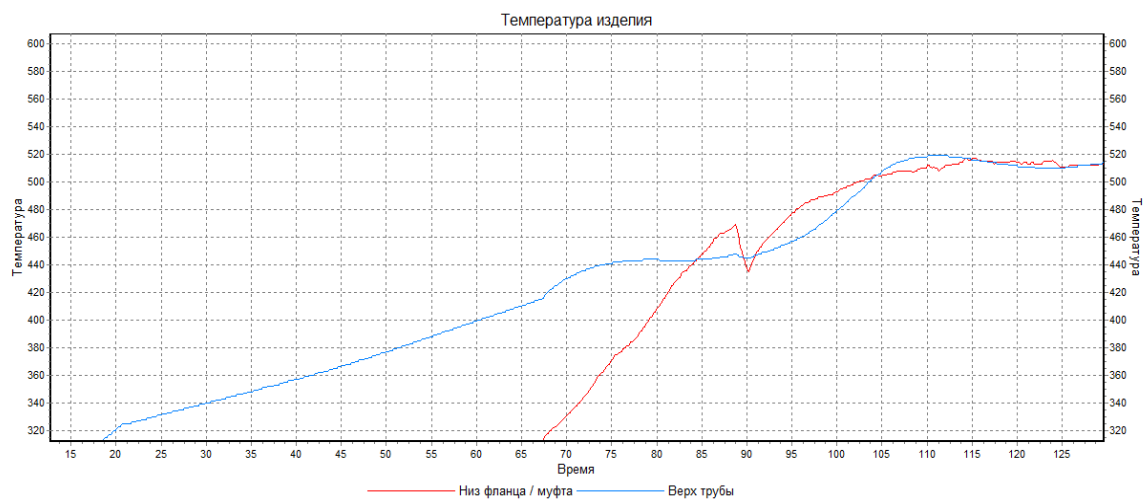


Рисунок 4.3 – Графики нагрева при заниженном положении фланца относительно индуктора

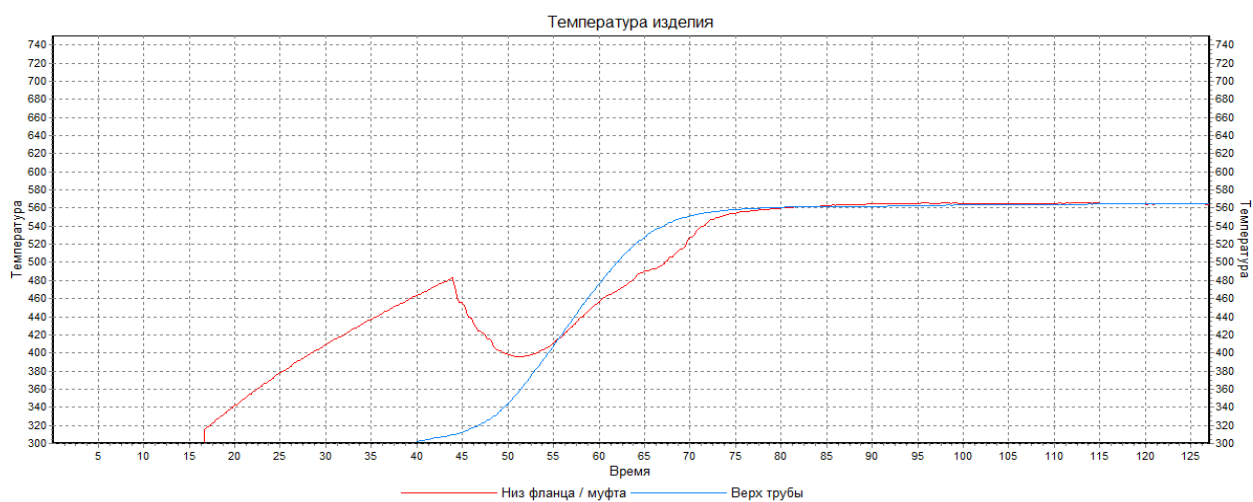


Рисунок 4.4 – Графики нагрева при минимально удаленном положении фланца относительно индуктора

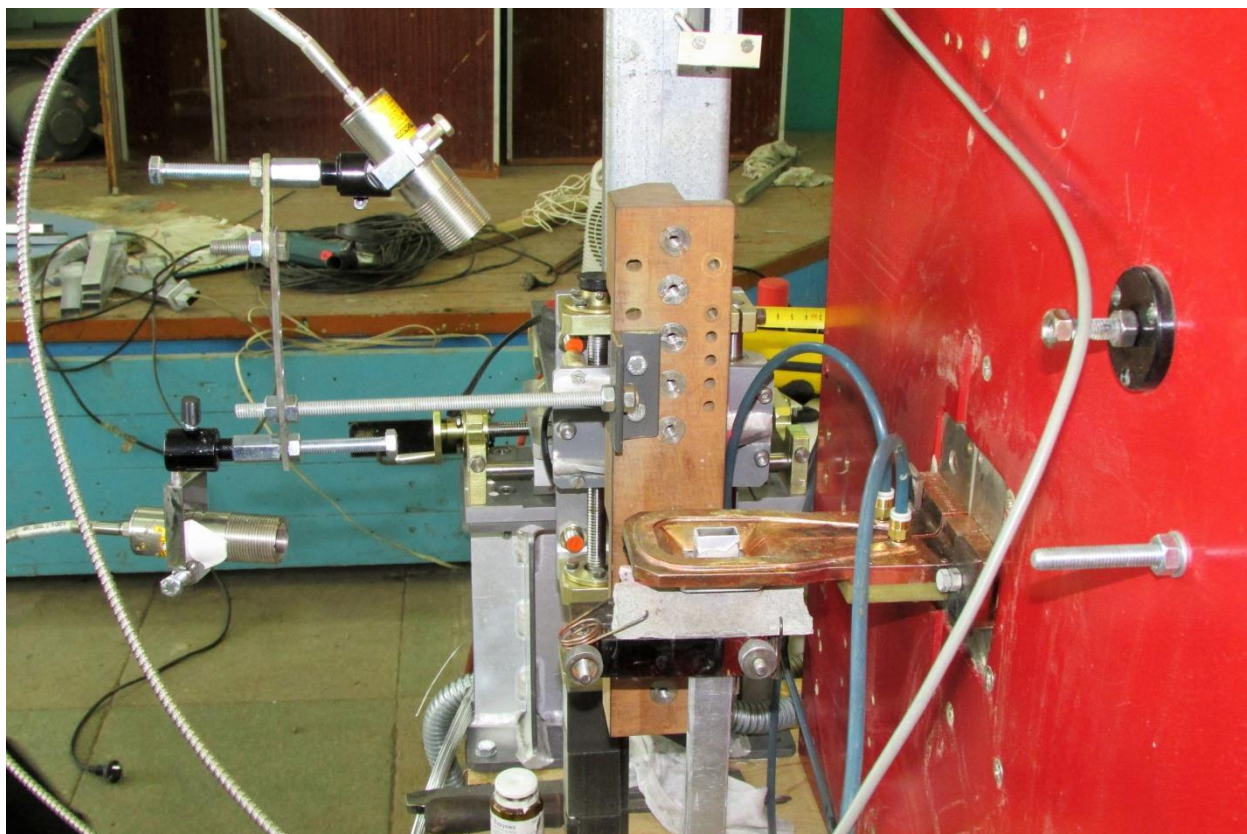


Рисунок 4.5 – Крепление пирометров на подвижное основание.

Такое крепление пирометров позволило контролировать температуру в одних и тех же точках во время всего процесса. Графики нагрева представлены на рисунках 4.6 и 4.7, на которых видно, что качество регулирования процесса улучшилось, что привело к повторяемости процесса.

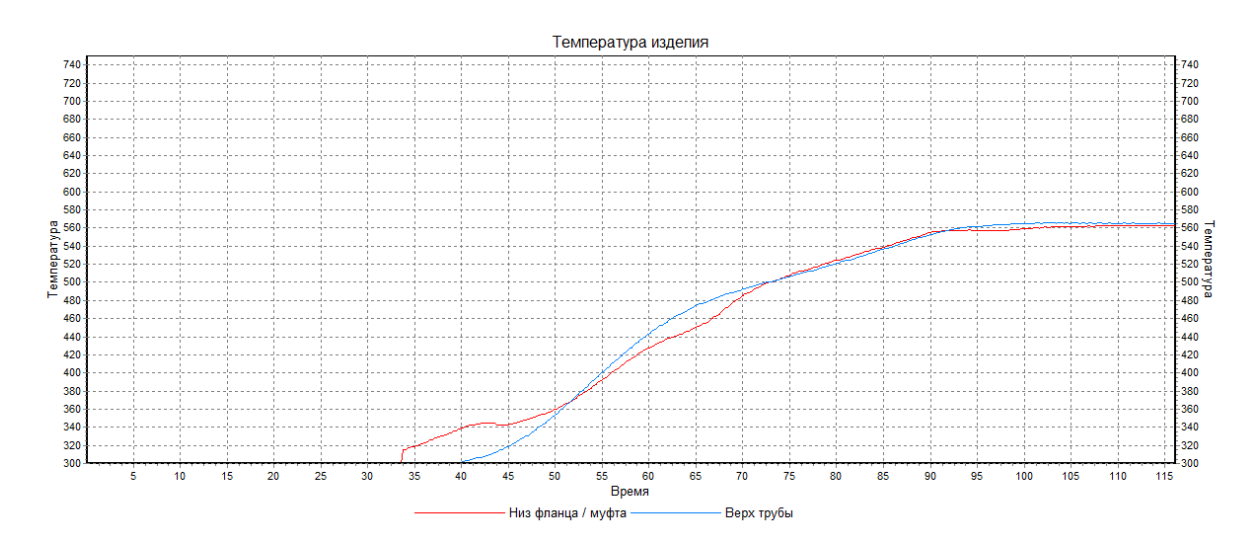


Рисунок 4.6 – Графики нагрева при заниженном положении фланца относительно индуктора

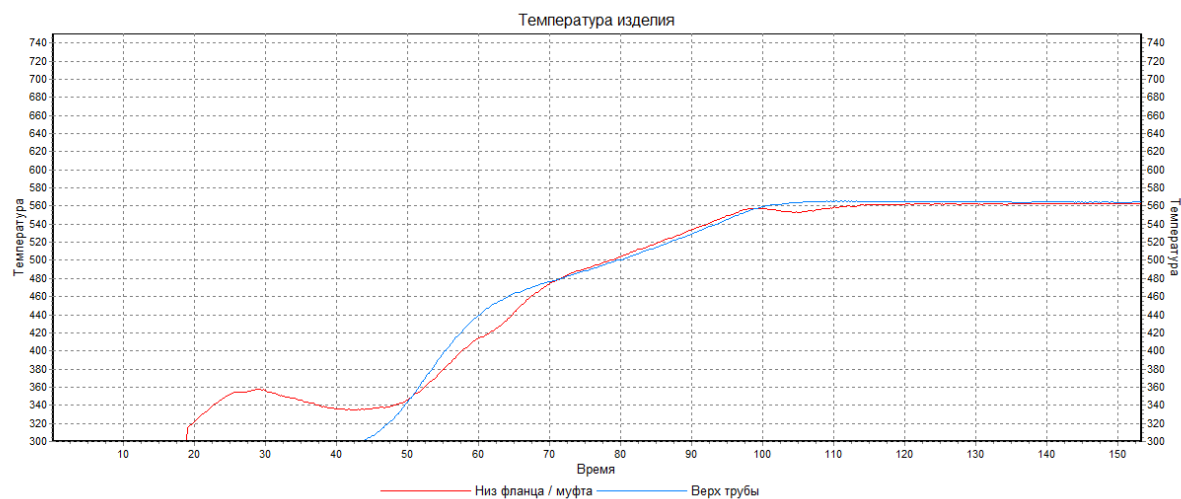


Рисунок 4.7 – Графики нагрева при минимально удаленном положении фланца относительно индуктора

Для обеспечения равномерной температуры по контуру нагрева необходимо позиционирование волновода относительно окна индуктора. Погрешность позиционирования не должна превышать 0,1 мм.

4.2 Отработка технологических режимов пайки волноводов заданных размеров

4.2.1 Исследование уставки начальной мощности

На рисунках 4.8 и 4.9 представлены графики нагрева соединения труба-муфта типоразмера 58х25 с уставкой мощности генератора 100% при пуске процесса (мощность генератора 10кВт) и с начальным расположением изделия относительно индуктора 3мм и 6 мм соответственно.

На рисунках 4.10 и 4.11 представлены графики нагрева соединения труба-фланец типоразмера 58х25 уставкой мощности генератора 100% при пуске процесса (мощность генератора 12кВт) и с начальным расположением изделия относительно индуктора 3мм и 9 мм соответственно.

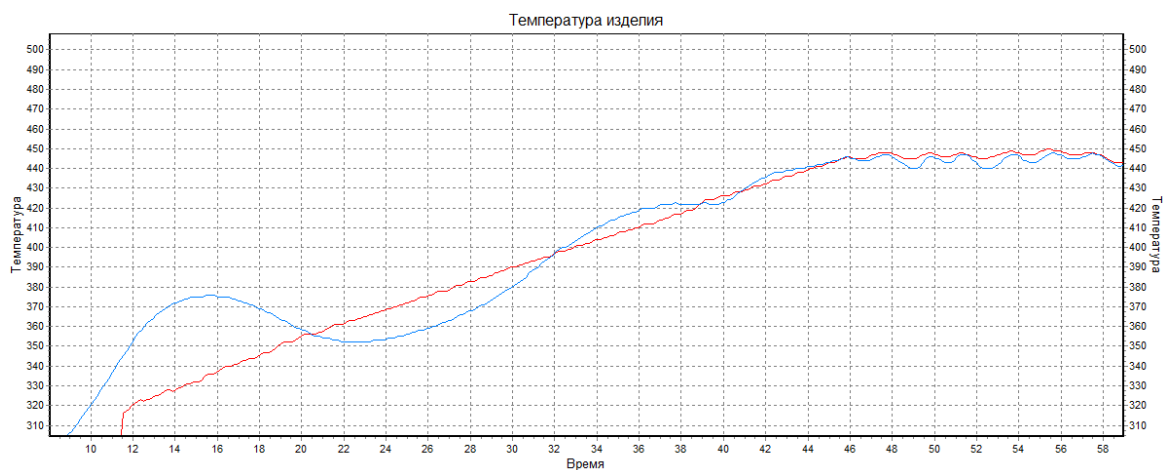


Рисунок 4.8 – Графики нагрева соединения труба-муфта (начальное положение 3 мм): красный график – фланец/муфта, синий график - труба

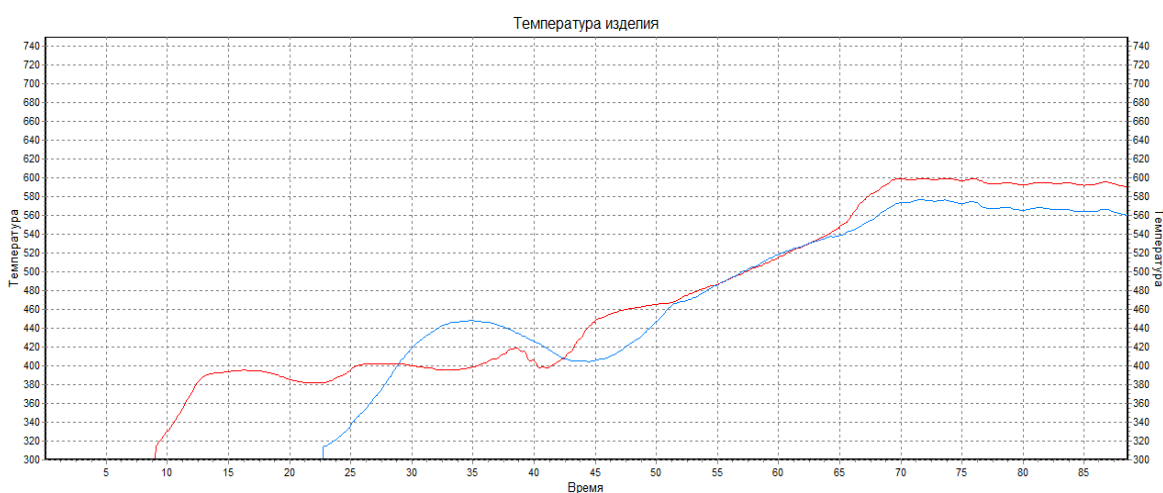


Рисунок 4.9 - Графики нагрева соединения труба-муфта (начальное положение 6 мм): красный график – фланец/муфта, синий график - труба

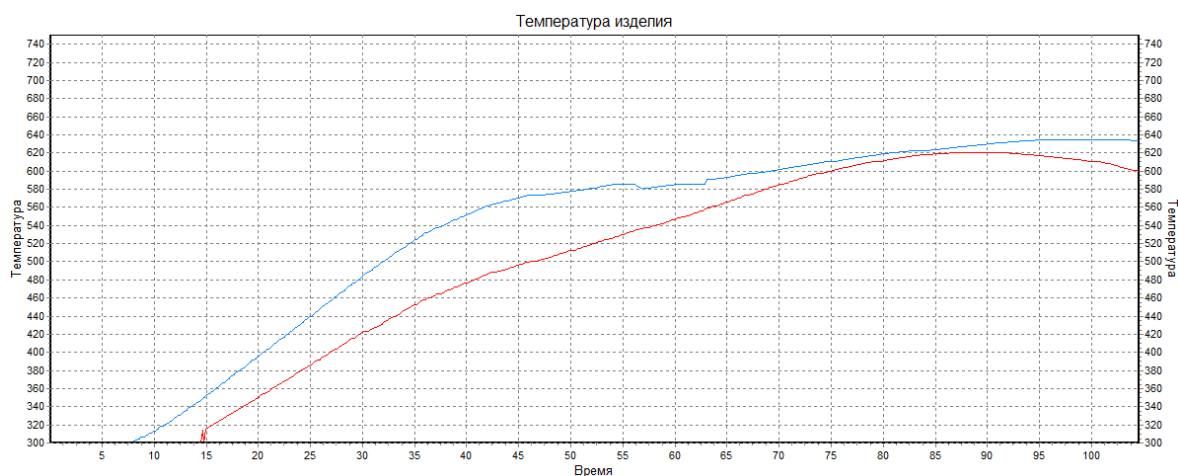


Рисунок 4.10 - Графики нагрева соединения труба-фланец (начальное положение 3 мм): красный график – фланец/муфта, синий график - труба

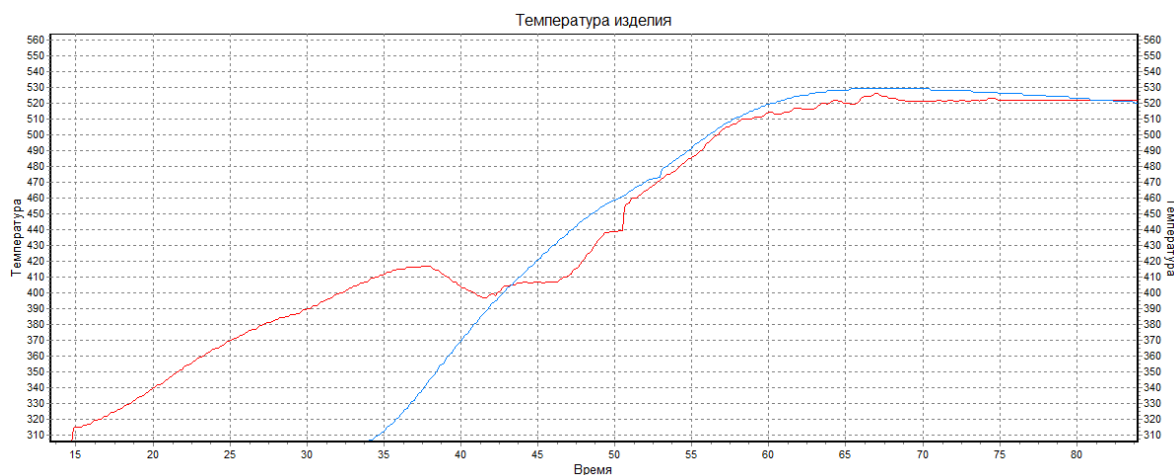


Рисунок 4.11 - Графики нагрева соединения труба-фланец (начальное положение 9 мм): красный график – фланец/муфта, синий график - труба

Из графиков видно, что большая уставка мощности генератора в начале процесса пайки негативно сказывается на качестве регулирования. Для муфт (рисунок 4.8, 4.9) это выражается в возникновении длительного переходного процесса, для фланцев (рисунок 4.10, 4.11) - в уменьшении реакции системы на управление. Прежде всего, это обусловлено неравномерностью температурного поля в отдельных элементах изделия при быстром нагреве, а также большой разницей температур между ними в момент начала регистрации температур пирометрами.

В общем случае, чем ниже мощность, тем меньше разброс температур при начальном позиционировании в неоптимальной точке (точка, при которой регистрация температур фланца и трубы происходит с разностью не более 1 секунды). Работа на большой мощности ведет к явно выраженному неравномерному температурному полю в момент регистрации температур обоими пирометрами, что в свою очередь негативно сказывается на управляемости процесса (особенно для муфт - велика вероятность локального перегрева). Установлено, что режим, при котором первой регистрируется температура трубы, предпочтительнее режима, при котором первой регистрируется температура фланца. Выбор величины начальной мощности процесса позволяет расширить диапазон стартовых точек (величин зазора

«индуктор – фланец/муфта»), при которых система, с учетом выбранной скорости нагрева, имеет временной запас для регулирования. Таким образом, чем выше стартовая мощность и чем выше скорость нагрева, тем более точным должно быть начальное позиционирование заготовки относительно индуктора.

4.2.2 Исследование начального положения и границ перемещения

На рисунках 4.12 – 4.14 представлены графики нагрева волновода 58×25 с различными начальными зазорами «индуктор - фланец». Из графиков видно влияние стартового зазора между индуктором и фланцем на распределение энергии между элементами паяемого волновода. Величина стартового зазора между индуктором и фланцем должна обеспечивать минимальный временной разброс в поступлении сигналов с пирометров. Небольшой стартовый зазор между индуктором и фланцем (менее 2,5 мм) ведет к перегреву фланца относительно трубы на начальном этапе процесса и как следствие к его значительному затягиванию, кроме того слишком большой стартовый зазор (более 8мм) также негативно сказывается на процессе нагрева, но не в такой ярко выраженной степени.

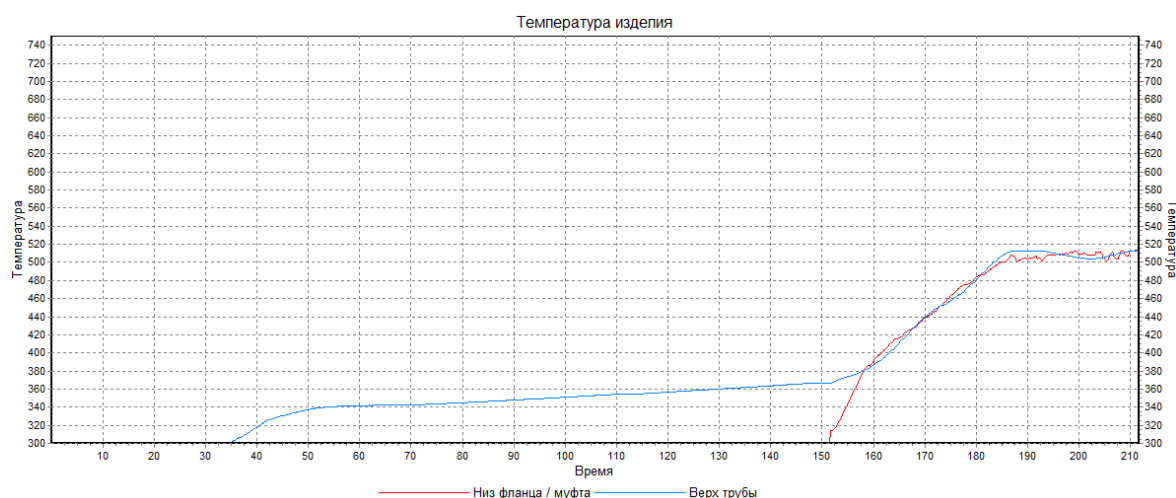


Рисунок 4.12 – Графики нагрева труба - фланец 58×25 при начальном зазоре между индуктором и фланцем 3 мм

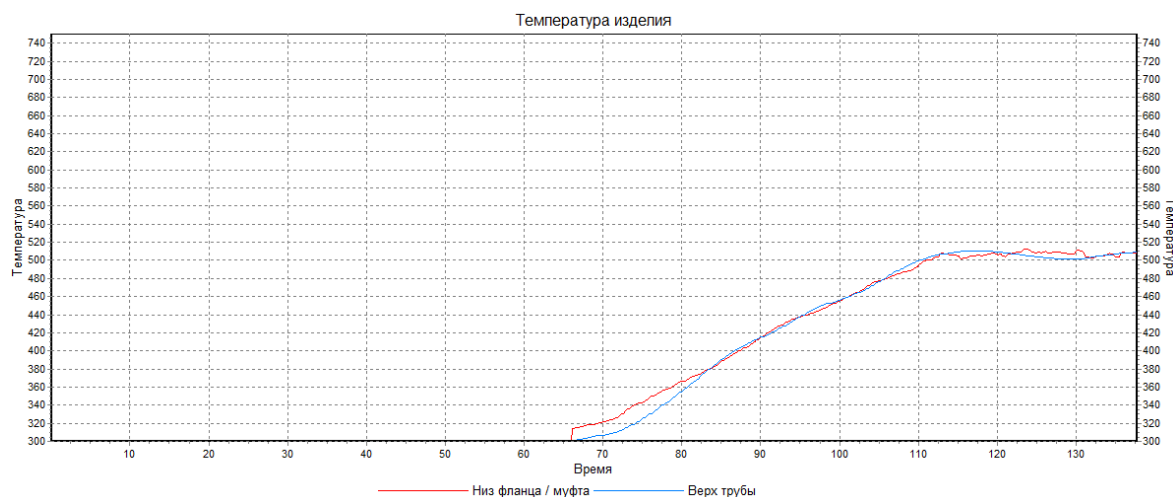


Рисунок 4.13 – Графики нагрева труба - фланец 58×25 при начальном зазоре между индуктором и фланцем 6 мм

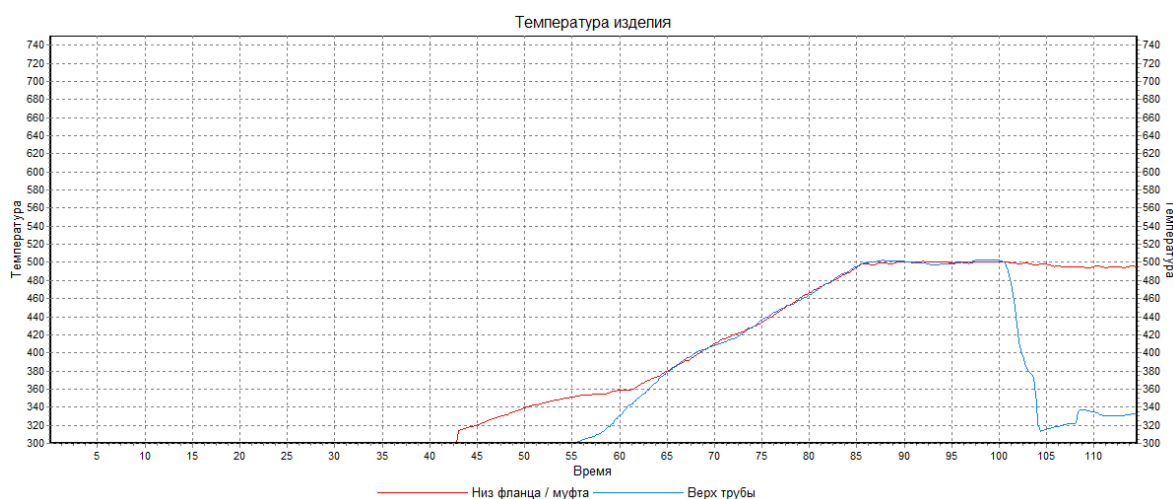


Рисунок 4.14 – Графики нагрева труба - фланец 58×25 при начальном зазоре между индуктором и фланцем 9 мм

На рисунках 4.15 – 4.18 представлены графики нагрева муфт типоразмера 58×25 и 35×15 с различными начальными положениями заготовки в окне индуктора. Граничным положением, от которого можно вести отсчет перемещения, выбрана середина муфты. Из графиков видно, что для муфт в отличие от фланца не так критичен выбор стартового положения, поскольку оба элемента заготовки довольно быстро нагреваются и остывают, тем не менее, стартовое положение для второго шва должно быть ближе, чем для первого. Это связано с тем, что между муфтой и уже припаянной трубой идет теплообмен, как внутри одного тела.

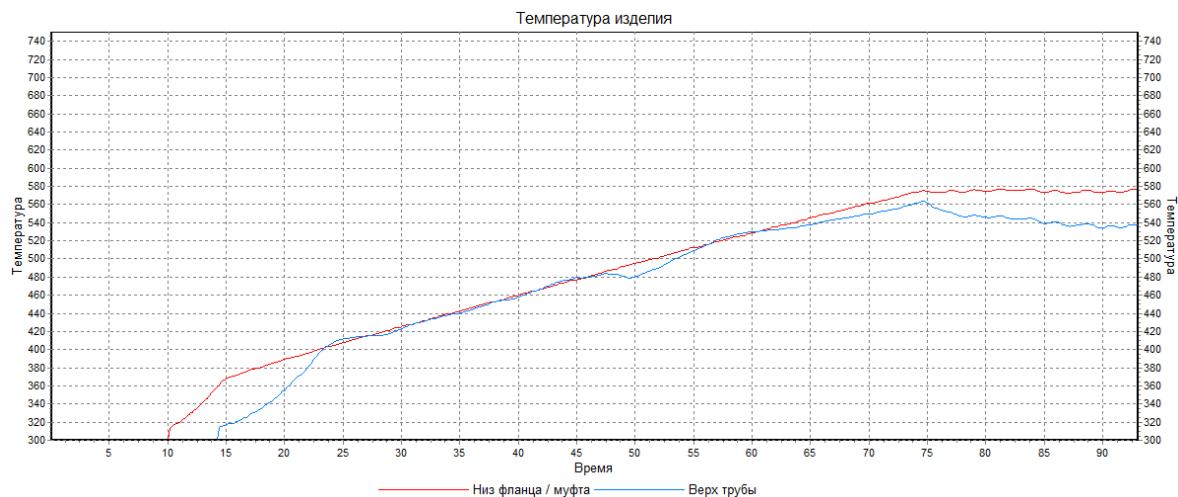


Рисунок 4.15 – Графики нагрева труба - муфта 58×25 при начальном зазоре между индуктором и муфтой 3 мм (шов 1)

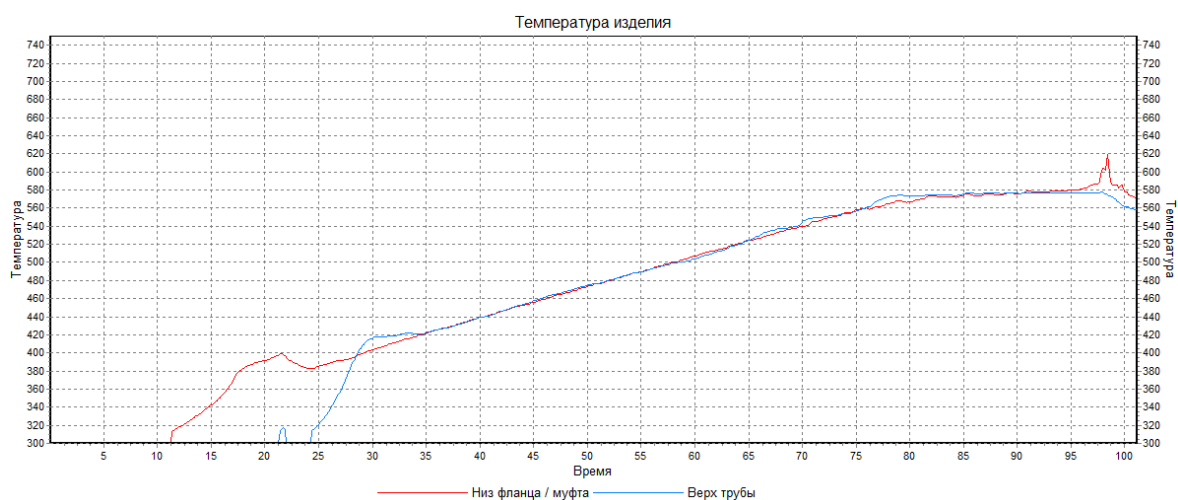


Рисунок 4.16 – Графики нагрева труба - муфта 58×25 при начальном зазоре между индуктором и муфтой 6 мм (шов 2)

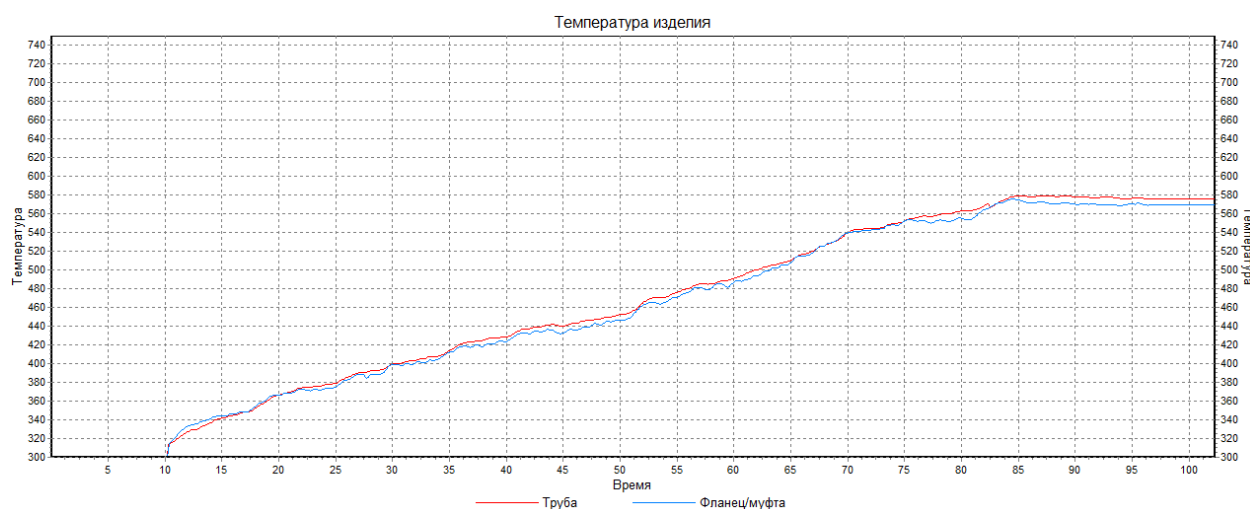


Рисунок 4.17 – Графики нагрева труба - муфта 35×15 при начальном зазоре между индуктором и муфтой 3 мм (шов 1)

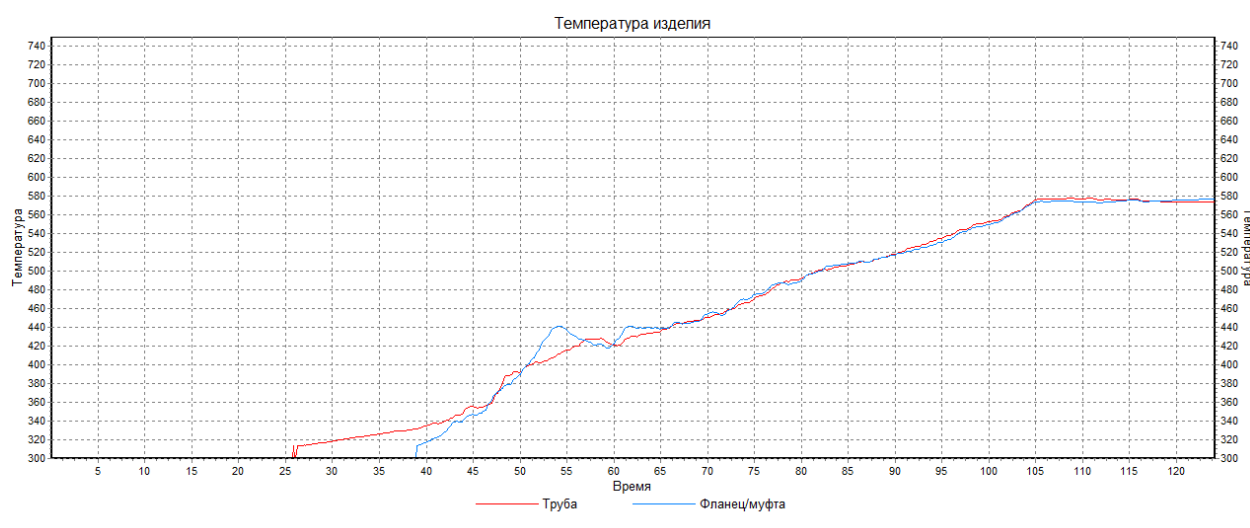


Рисунок 4.18 – Графики нагрева труба - муфта 35×15 при начальном зазоре между индуктором и муфтой 6 мм (шов 2)

4.2.3 Оценка влияния флюса на измерение температуры пирометрами

Проводилась экспериментальная оценка влияния флюса на излучательную способность материала. Было установлено, что флюс, попавший в зону обзора пирометра, завышает показания измеренной температуры объекта. Результаты представлены на рисунках 4.19 - 4.21.

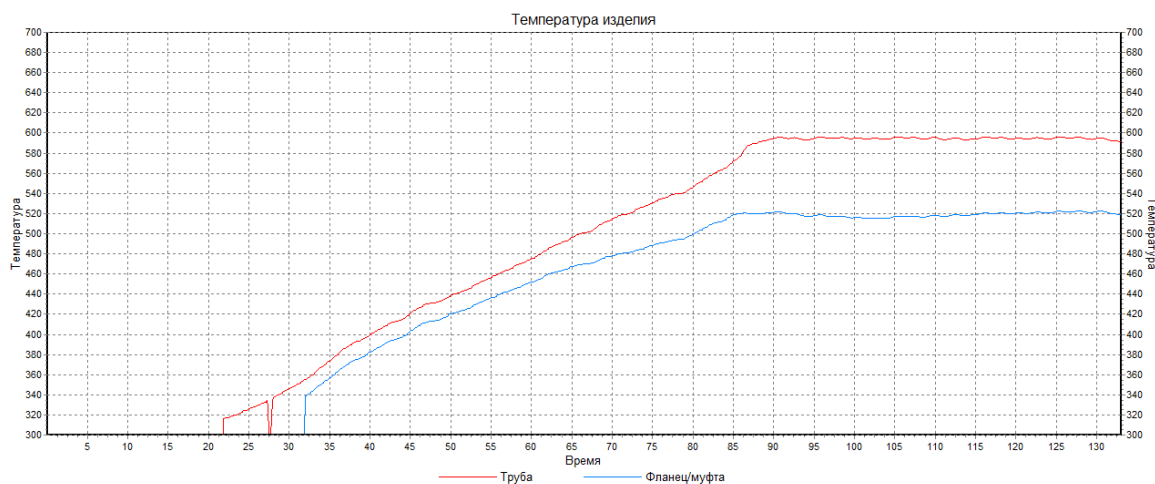
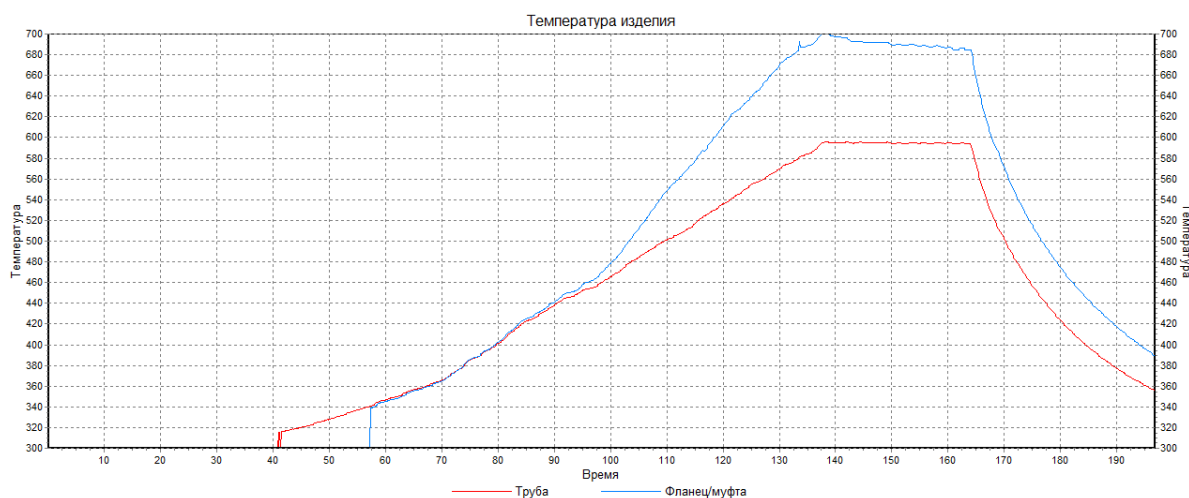


Рисунок 4.19 – Пирометр, ориентированный на трубу волновода, направлен на поверхность, закрытую флюсом. Пирометр, ориентированный на фланец (муфту) волновода, направлен чистый металл.



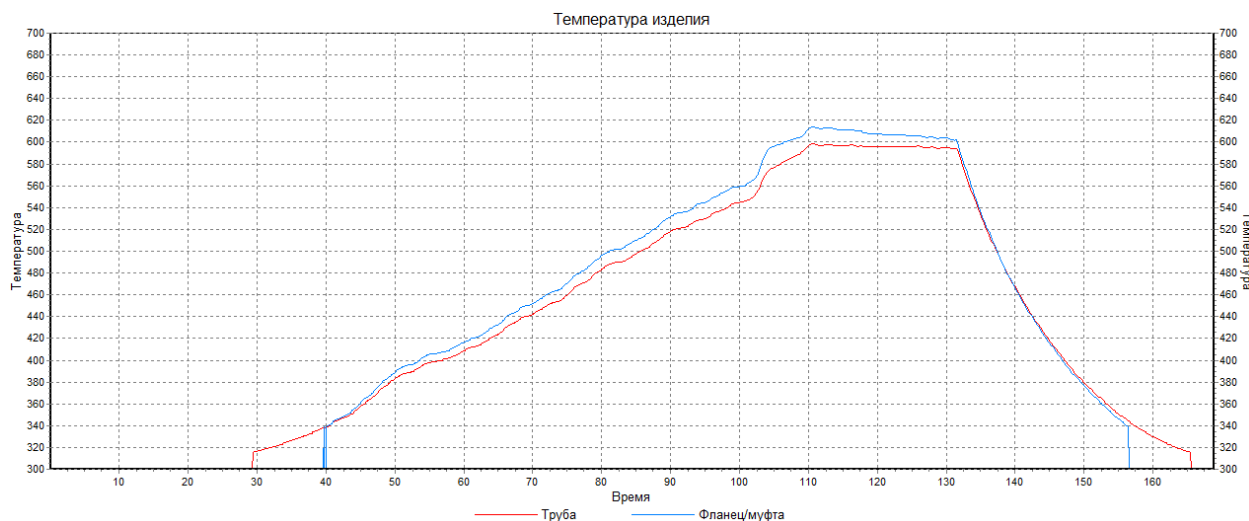


Рисунок 4.21 –Пирометр, ориентированный на трубу волновода, направлен на поверхность, закрытую флюсом. Пирометр, ориентированный на фланец (муфту) волновода, направлен на поверхность, закрытую флюсом.

Из результатов эксперимента можно сделан вывод: во время процесса пайки, флюс не должен попадать в зону обзора пирометра, это вносит погрешность измерение на уровне 20 – 100⁰С. в зависимости от установленных коэффициентов излучательной способности. Если это не представляется возможным, то остается возможность нанесения флюса в область контроля температур обоих пирометров, с предварительной тарировкой их на значение температур.

4.2.4 Отработка технологии индукционной пайки волноводов

На рисунках 4.22 – 4.28 представлены графики, полученные в процессе индукционного нагрева различных типоразмеров с установкой границ перемещения, начального положения, стартовой мощности и выборе точек контроля температур в соответствии с таблицами 4.1, 4.2.

Таблица 4.1 – Начальные параметры для пайки фланцев

Типоразмер	Верхняя граница (относительно индуктора), мм	Стартовая точка (относительно установленной границы), мм	Мощность генератора (Полная / стартовая), КВт
58x25	4 ± 1	$2,5 - 4 \pm 0,5$	10 - 12 / 65 - 75 %
35x15	$3 \pm 0,5$	$1,5 - 3 \pm 0,5$	7 - 10 / 60 - 80 %
19x9,5	$2 \pm 0,5$	$1,5 - 2,5 \pm 0,5$	5 - 7 / 60 - 80 %

Таблица 4.2 – Начальные параметры для пайки муфт

Типоразмер	Верхняя граница (относительно индуктора), мм	Стартовая точка (относительно установленной границы), мм (1 шов / 2 шов)	Мощность генератора (Полная / стартовая), КВт
58x25	$\frac{1}{2} \dots \frac{3}{4}$ муфты	$5 \pm 0,5 / 3 \pm 0,5$	7 - 10 / 50 - 70 %
35x15	$\frac{1}{2} \dots \frac{3}{4}$ муфты	$4 \pm 0,5 / 3 \pm 0,5$	7 - 10 / 50 - 70 %
19x9,5	$\frac{1}{2} \dots \frac{3}{4}$ муфты	$2,5 \pm 0,5 / 1,5 \pm 0,5$	5 - 7 / 50 - 70 %

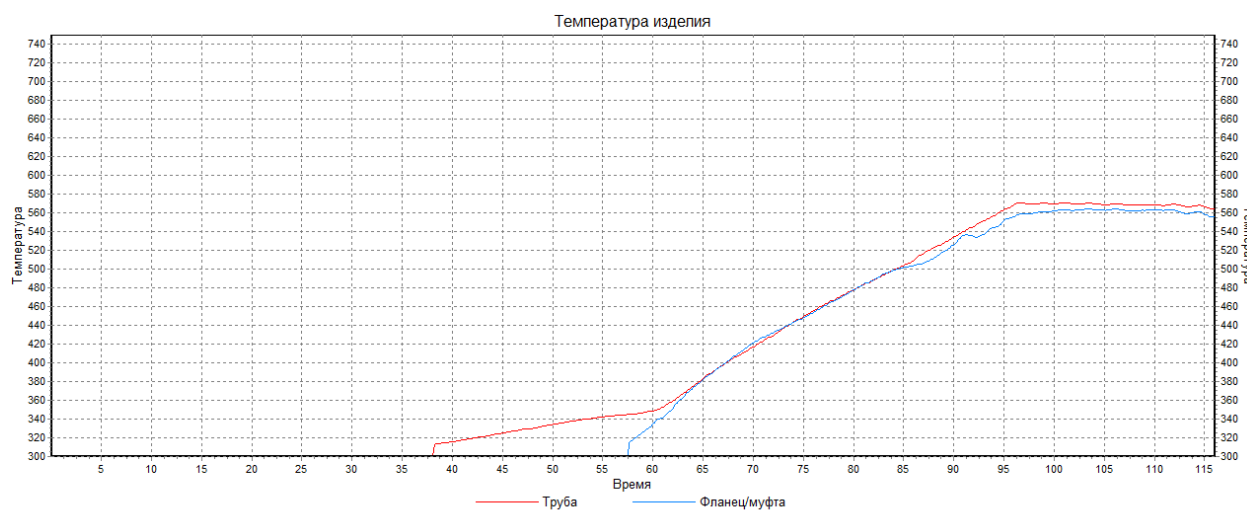


Рисунок 4.22 – Графики нагрева труба - муфта 58×25, шов 1

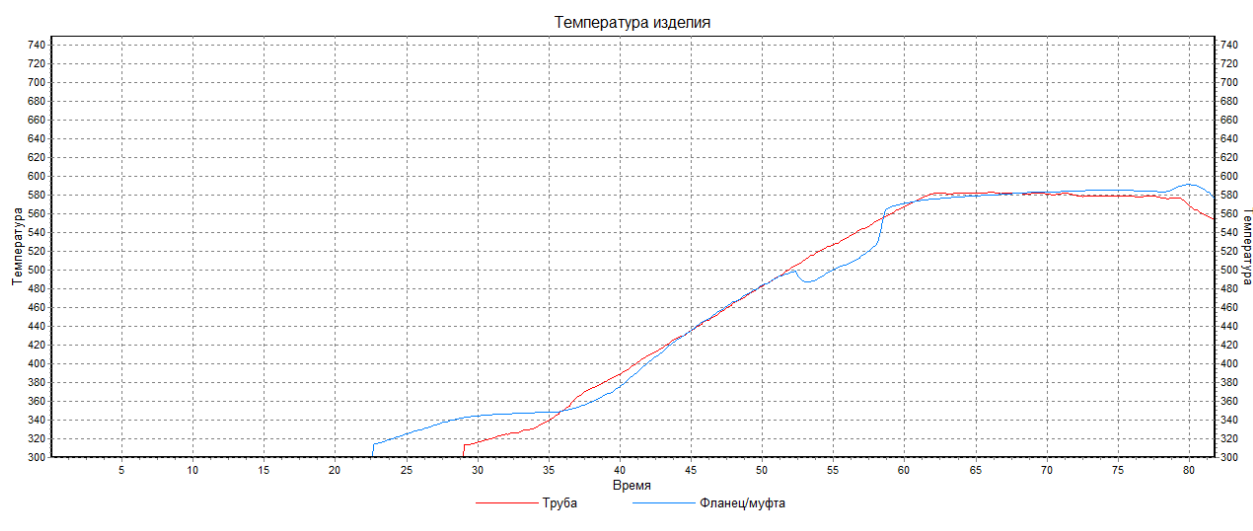


Рисунок 4.23 – Графики нагрева труба - муфта 58×25 шов 2

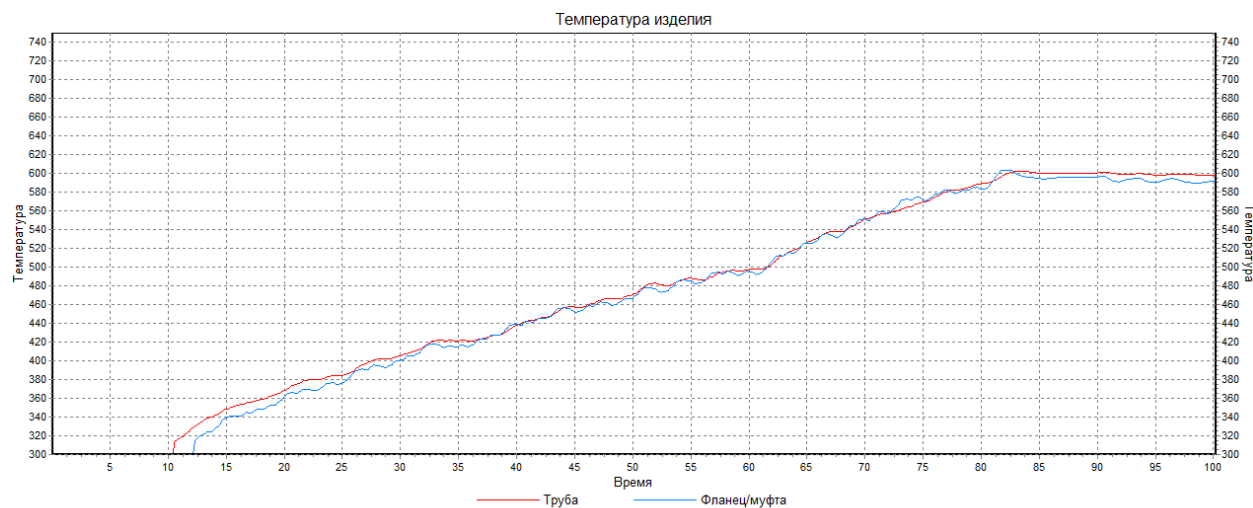


Рисунок 4.24 – Графики нагрева труба - муфта 19x9,5 шов 1

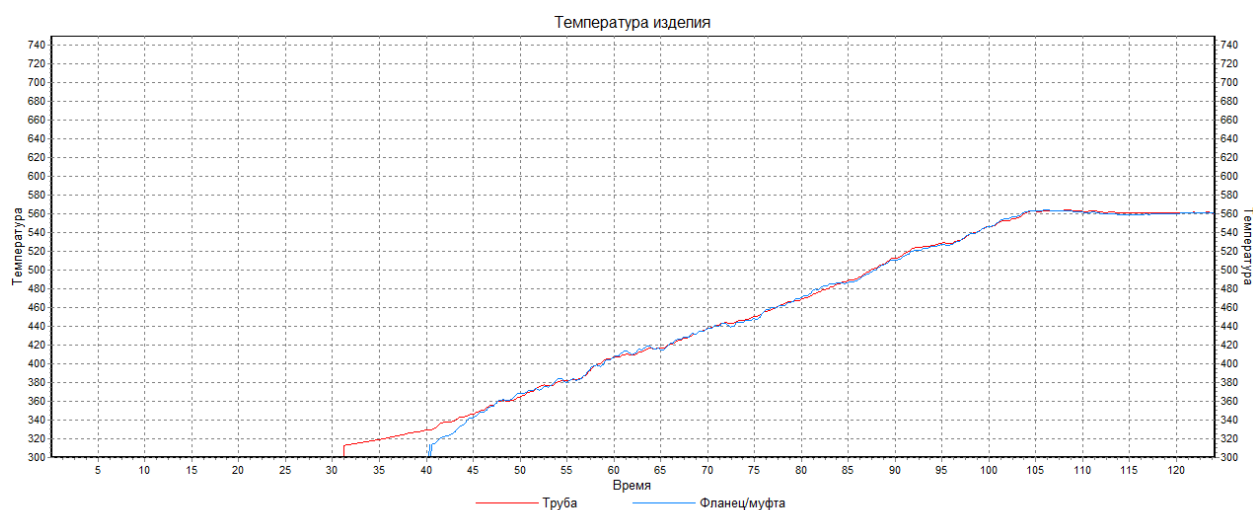


Рисунок 4.25 – Графики нагрева труба - муфта 19x9,5 шов 2

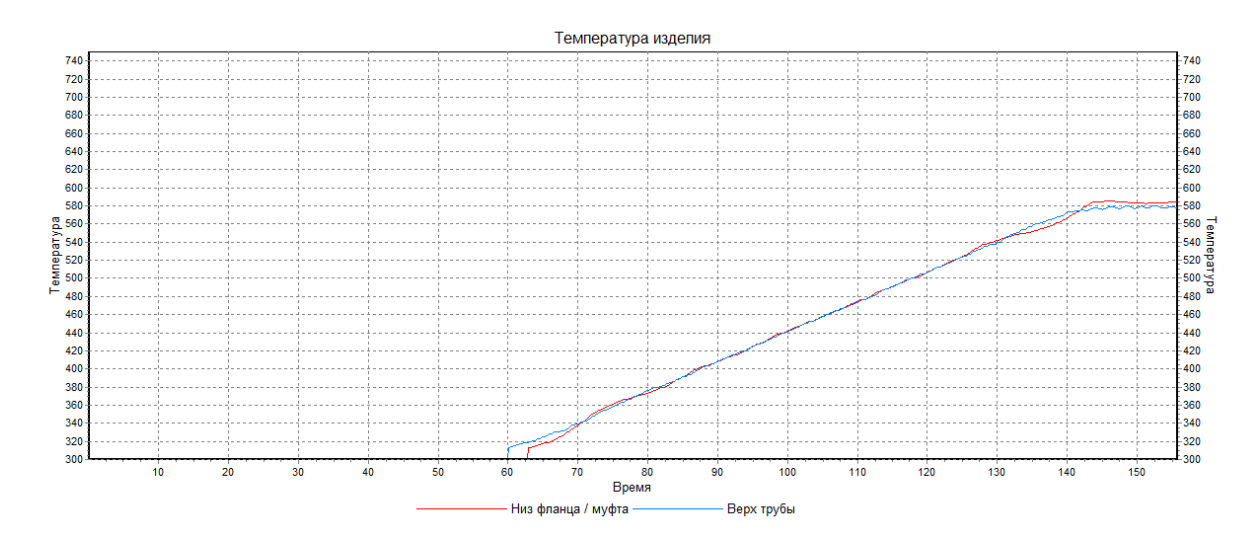


Рисунок 4.26 – Графики нагрева труба - фланец 58×25

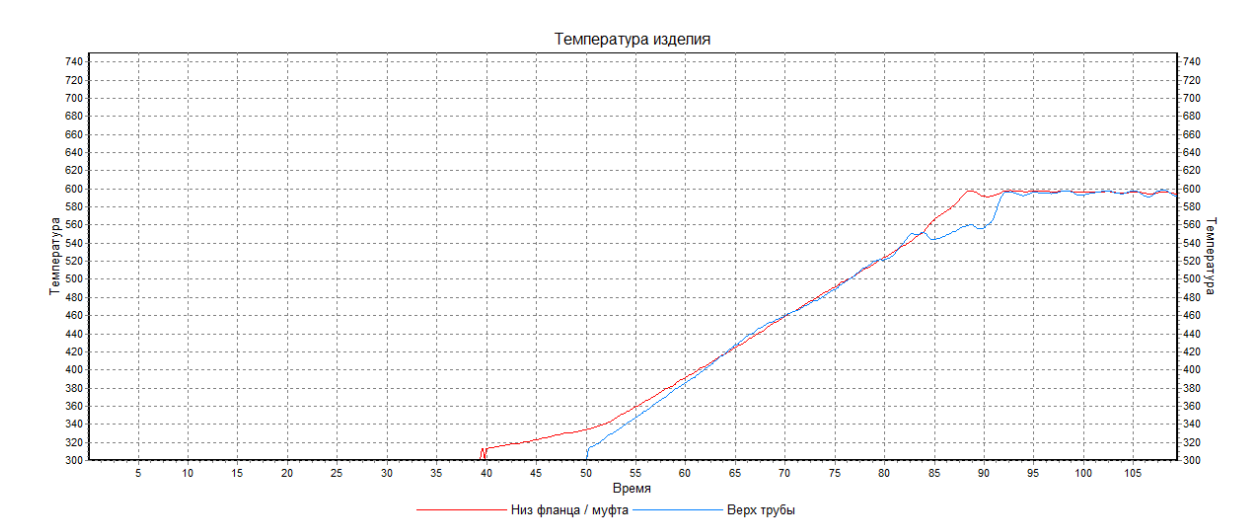


Рисунок 4.27 – Графики нагрева труба - фланец 35x15

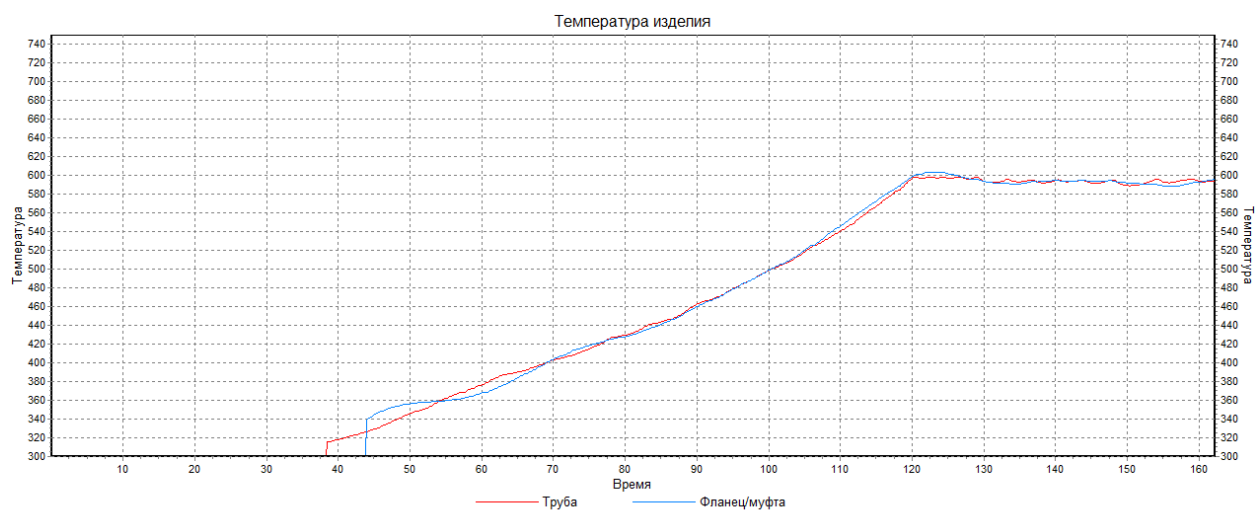


Рисунок 4.28 – Графики нагрева труба - фланец 19x9,5

4.3 Исследование индукционной пайки трубопроводов в защитных средах

В рамках исследования эффективности применения технологии индукционной пайки трубопроводов в защитных средах была проведена серия экспериментов на опытных образцах.

Работа системы при выполнении технологического процесса пайки в защитных средах разбивается на 3 этапа:

- 1) нагрев изделия до температуры плавления припоя,
- 2) выдержка при температуре плавления припоя установленное по технологии время,
- 3) остывание изделия до комнатной температуры.

На рисунке 4.29 показано изделие до начала индукционного нагрева.

На рисунке 4.30 показано изделие на первом технологическом этапе - индукционном нагреве до температуры плавления припоя.

На рисунке 4.31 показано изделие на втором технологическом этапе - выдержке при температуре плавления припоя.

На рисунке 4.32 показано изделие на третьем технологическом этапе - остывании до комнатной температуры.

Как видно из рисунков, в процессе пайки происходил равномерный нагрев изделия в области соединения, что позволило получить качественное паяное соединение.

Припой, применявшийся в процессе пайки, равномерно заполнил технологическую полость. При этом не произошло перегрева и окисления изделия.

Отработка технологии индукционного нагрева наконечников проводилась при мощности установки 12 кВт, начальная мощность нагрева составляла 50%. Температура контролировалась с помощью пирометров AST A250 FO-PL непосредственно на наконечники и трубе.



Рисунок 4.29 - Состояние изделия до начала индукционного нагрева

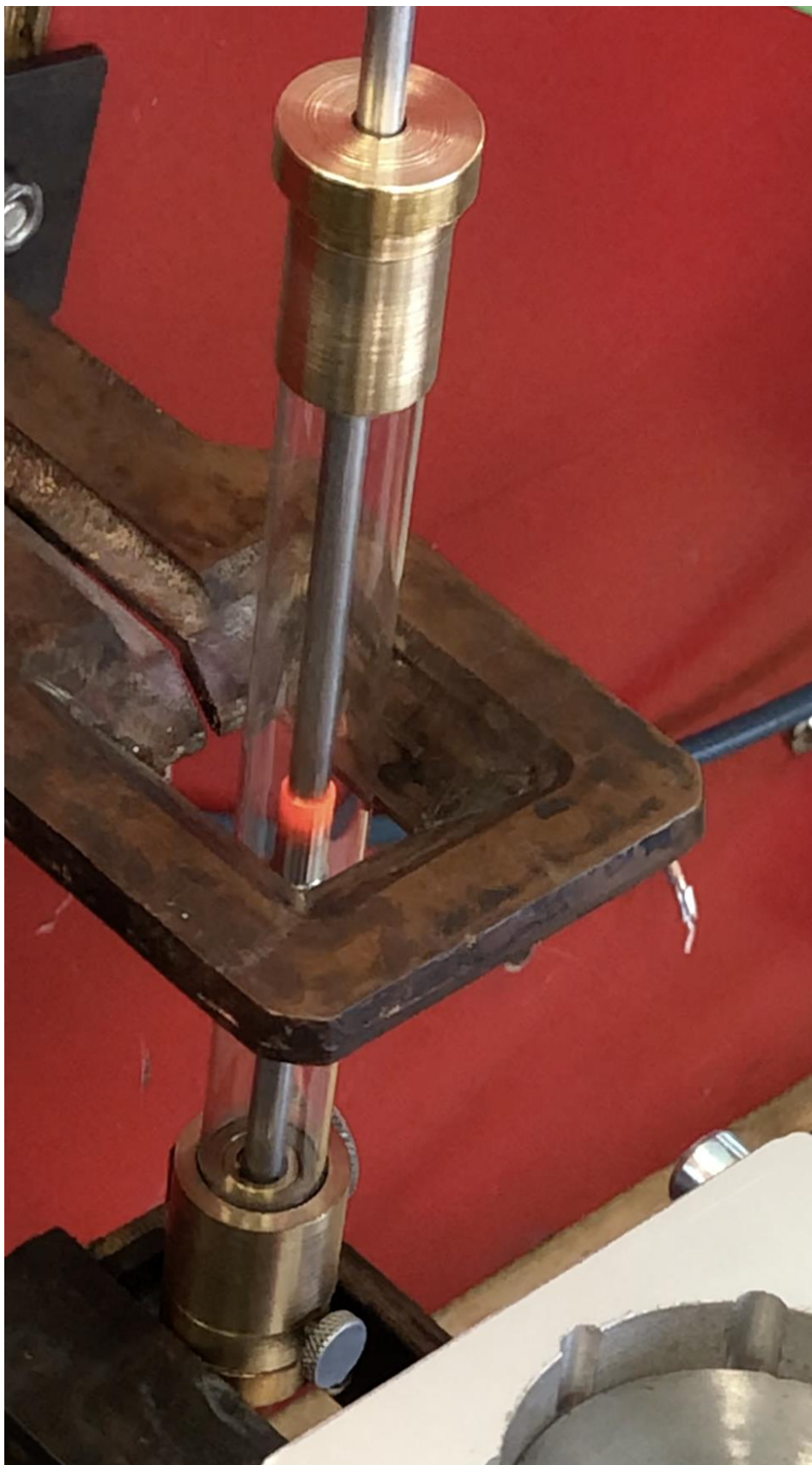


Рисунок 4.30 - Изделие на первом технологическом этапе - индукционном нагреве до температуры плавления припоя

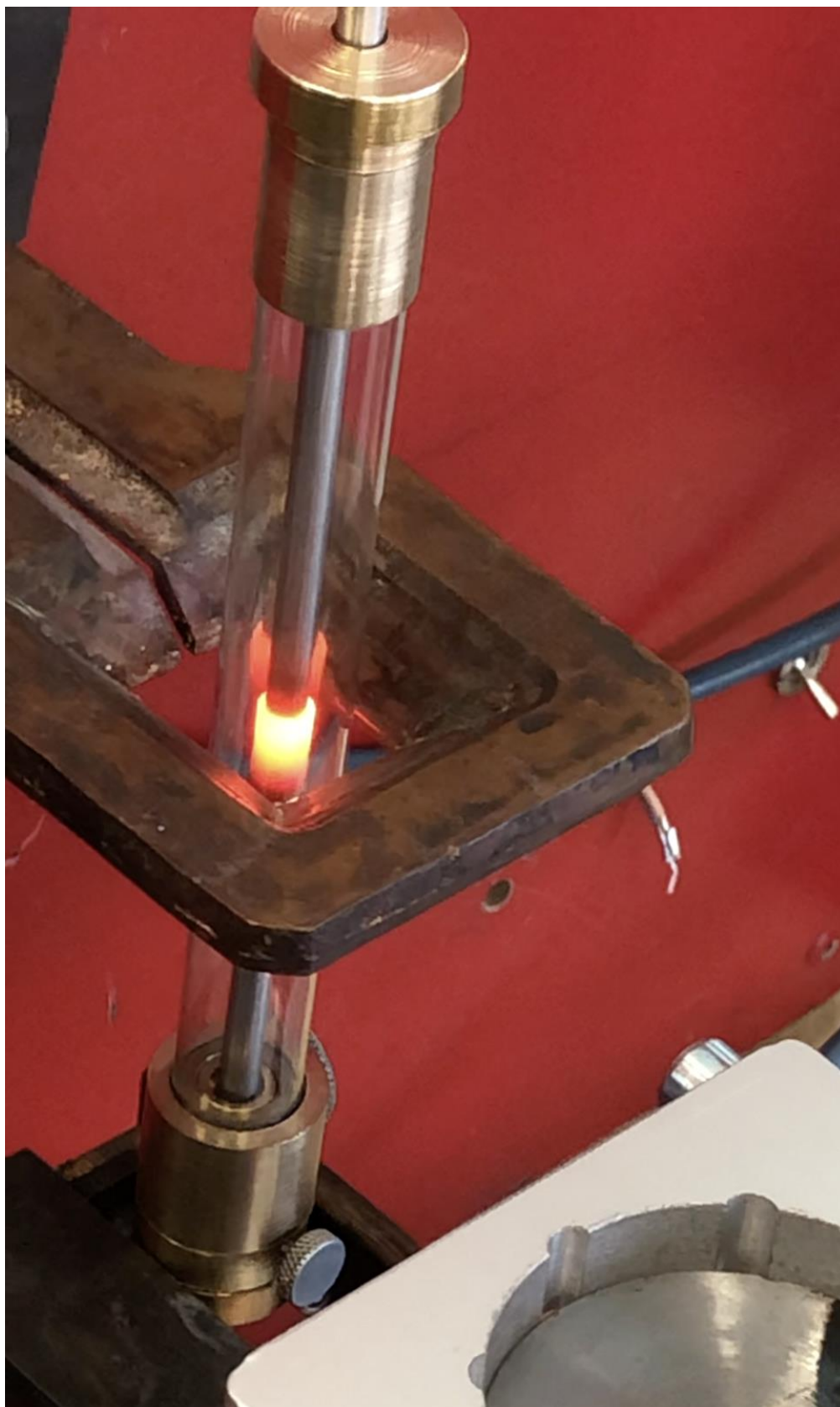


Рисунок 4.31 - Изделие на втором технологическом этапе - выдержке при температуре плавления припоя

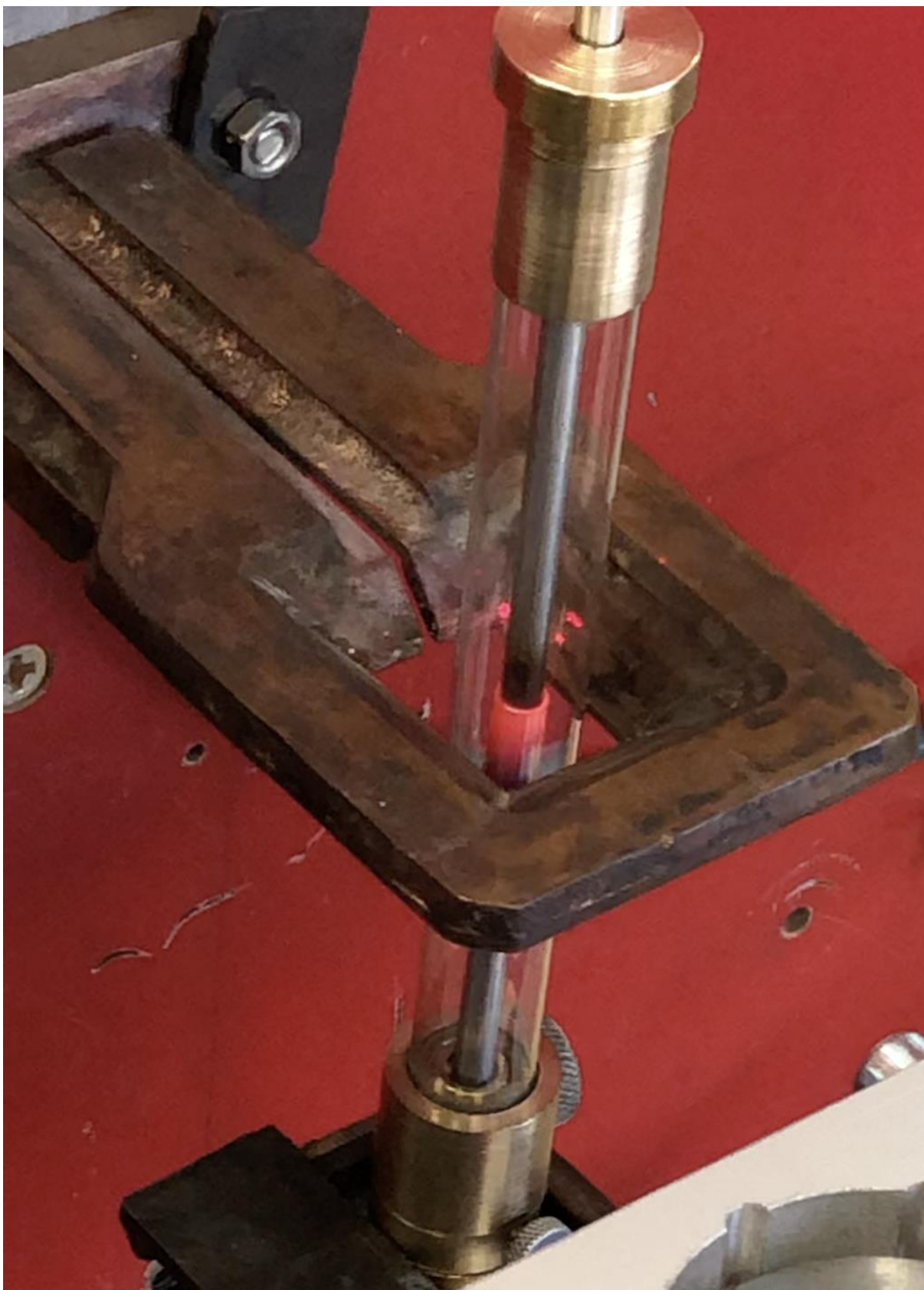


Рисунок 4.32 - Изделие на третьем технологическом этапе - остывании до комнатной температуры

Первоначально проводился нагрев изделия без управления положением заготовки относительно индуктора и с постепенным наращиванием мощности нагрева. Из рисунка 4.33 видно, что при нагреве возникает расхождение температуры в контрольных точках, которая достигает 100 °С.

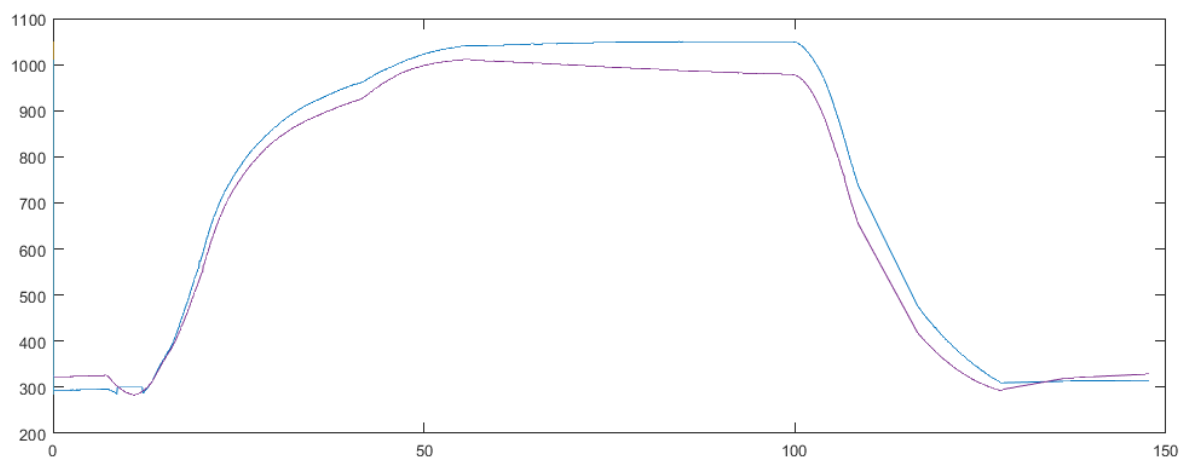


Рисунок 4.33 – График нагрева заготовки без корректировки положения заготовки относительно индуктора: синий – наконечник; красный - труба

При корректировке положения заготовки относительно индуктора можно свести расхождения температуры заготовки и трубы к минимальному значению (рисунок 4.34).

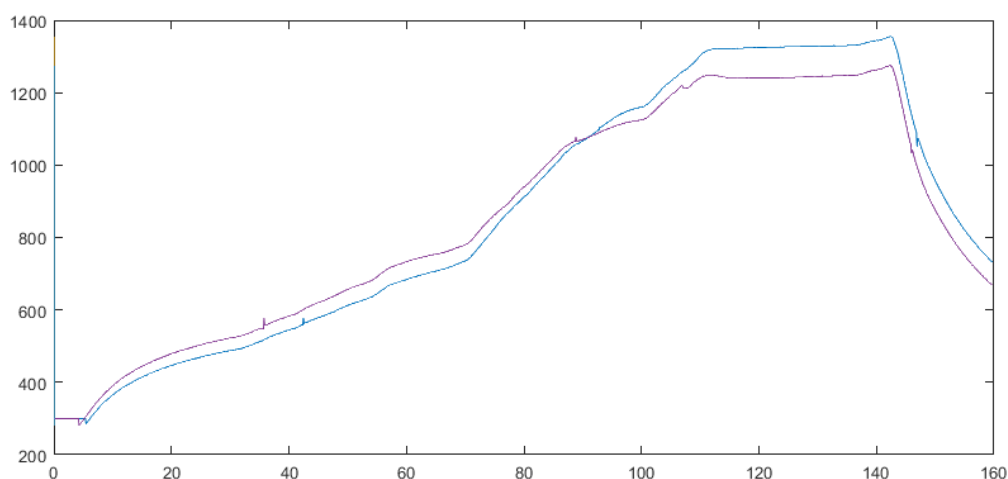


Рисунок 4.34 – График нагрева заготовки с корректировкой положения заготовки относительно индуктора: синий – наконечник; красный – труба

Также, управляя мощностью нагрева, можно добиться минимального расхождения температуры заготовки и трубы в зоне пайки (рисунок 4.35).

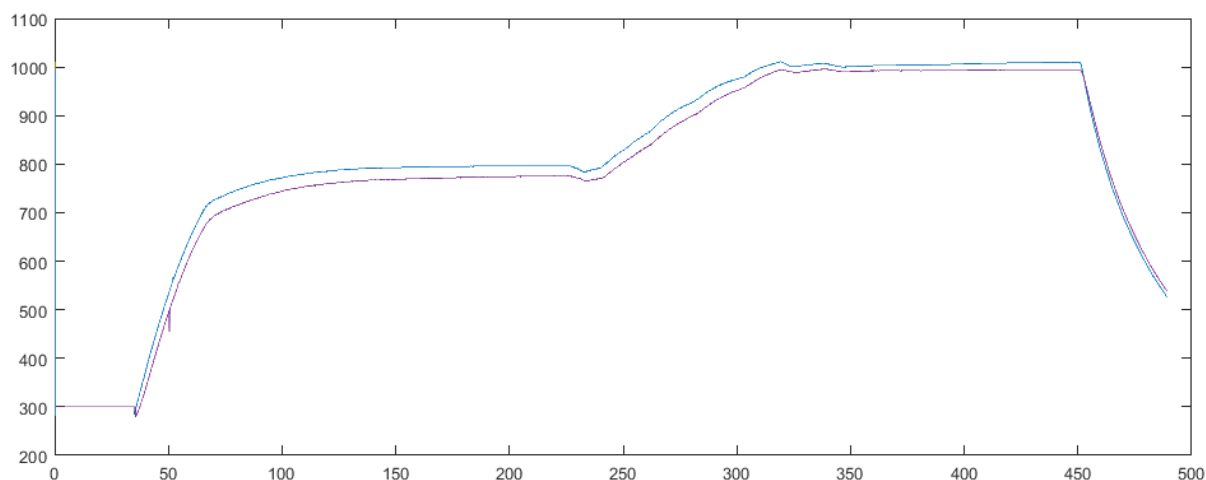


Рисунок 4.35 – График нагрева заготовки при управлении мощностью нагрева:
синий – наконечник; красный – труба

Учитывая выше сказанное, были проведены контрольные пайки наконечников. Результаты индукционной пайки наконечников показаны на рисунке 4.36.



Рисунок 4.36 – Результаты индукционной пайки наконечников

4.4 Исследование качества паяных соединений волноводных трактов

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

В качестве образцов выступали волноводы типоразмера 35х15 (соединение фланец-труба-муфта-труба-фланец), выполненные из материала АД 31Т1. В качестве припоя использовался припой Св.АК-12 (рисунок 4.37).

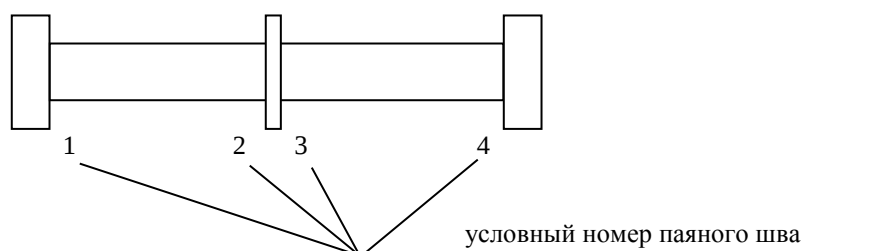


Рисунок 4.37 – Схема волноводного тракта с расположением паяных швов

Программа испытаний включала следующие виды контроля (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Контролируемые параметры и методы контроля

№ п/п	Контролируемые параметры	Метод контроля
1	Внешний вид	Визуальный метод
2	Наличие флюса и припоя на внутренней поверхности волновода	Визуальный метод
3	Фактическая величина пропая паяного соединения	Металлографический метод
4	Наличие дефектов в паяном шве на соответствие ОСТ 92-1190	Металлографический метод
5	Пережог металла	Металлографический метод
6	Радиотехнические характеристики	В соответствии с 154.5321-000 ТУ
7	Механическая прочность паяного соединения	Проведение испытаний на разрывной машине до полного разрушения образца

Были проведены механические испытания 3-х образцов, подтвердившие требуемую прочность паяных соединений элементов волноводных трактов. Результаты испытаний показаны в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Результаты контроля механической прочности паяных соединений

Типоразмер волновода	№ образца	Нагрузка разрушения, кгс	Место разрушения
35х15	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

На рисунке 4.38 показан внешний вид волноводов после испытания на механическую прочность.

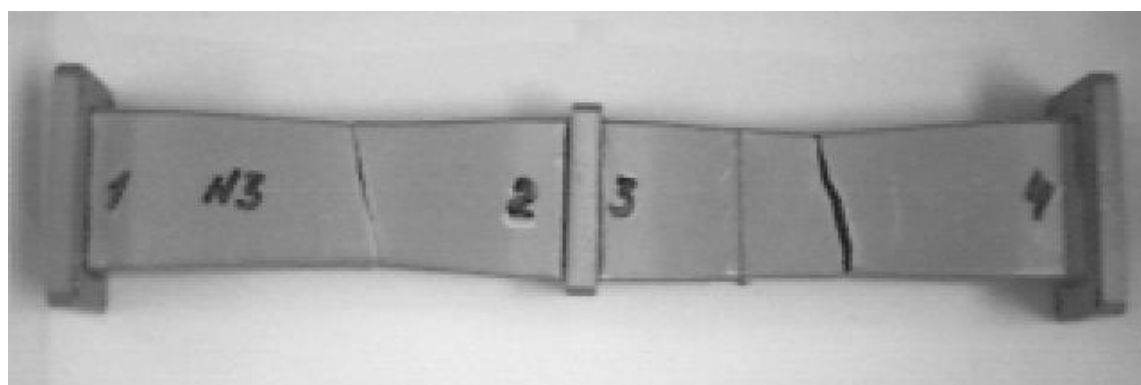
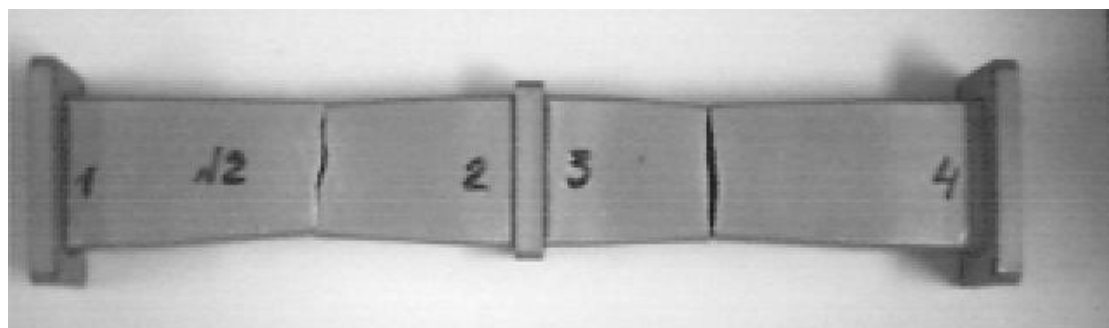


Рисунок 4.38 – Внешний вид волноводных трактов после испытания на растяжение до разрушения

Металлографическому контролю подвергались паяные швы образцов волноводных трактов в поперечном сечении (швы № 2, 3) и по длине паяного шва (швы № 1), согласно рисунку 4.38. Паяные швы № 2 и 3 контролировались в четырех сечениях (рисунок 4.39).

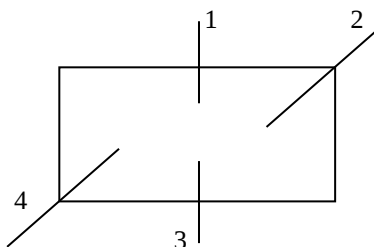


Рисунок 4.39 – Схема расположения сечений для металлографического контроля

Микроструктура паяных швов волноводных трактов, выявленная при проведении металлографического контроля, изображена на рисунке 4.40 – 4.41. На фотографии видно, что в микроструктуре шва дефекты отсутствуют.

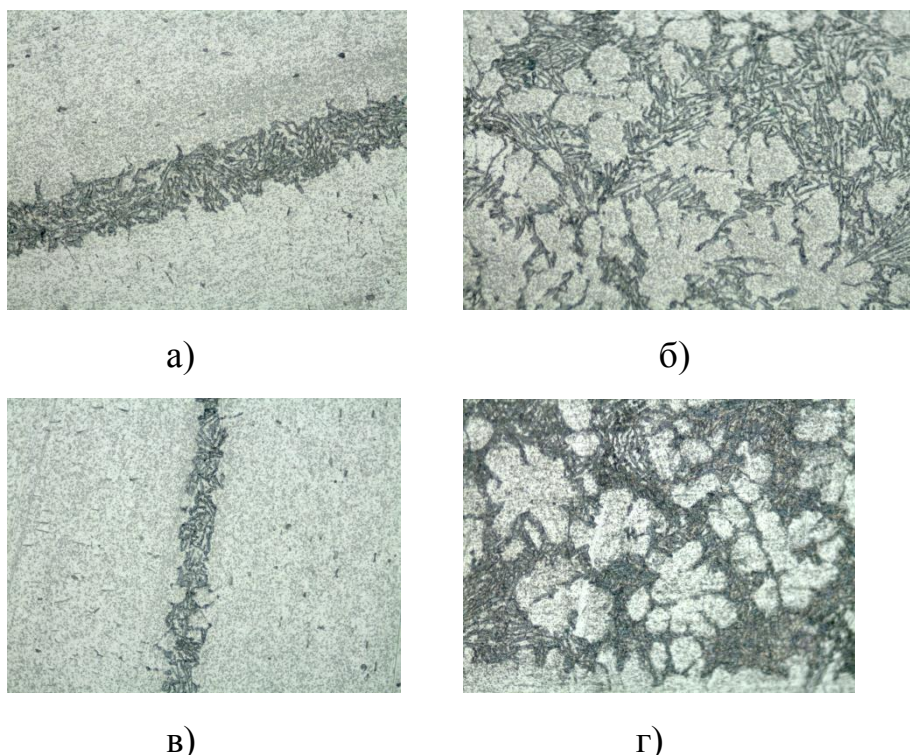


Рисунок 4.40 – Шлифы шва № 2, х500: а) шлиф № 1; б) шлиф № 2;
в) шлиф № 3; г) шлиф № 4

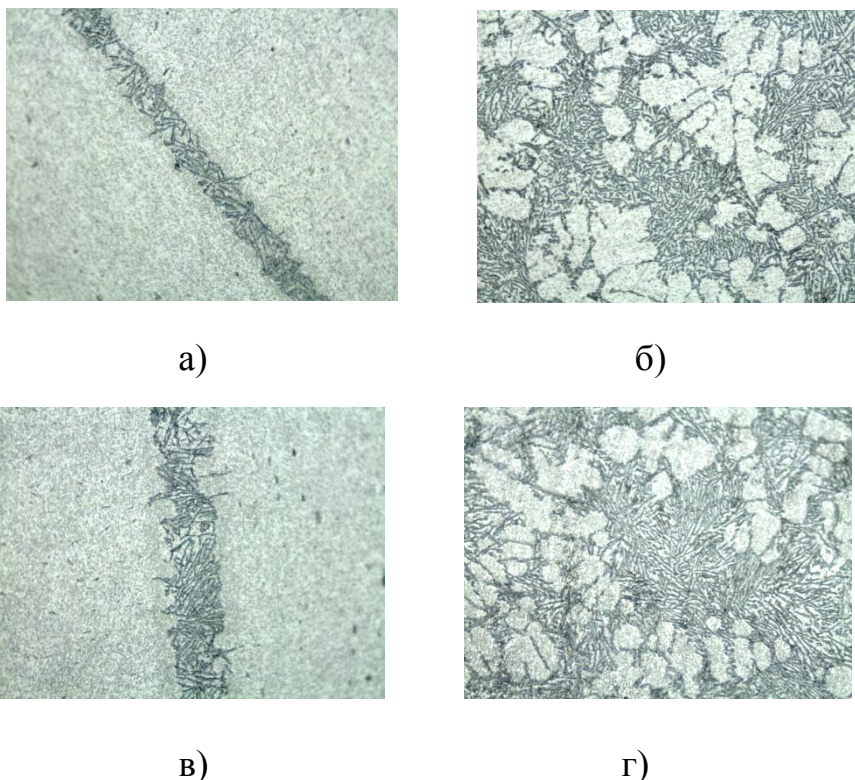


Рисунок 4.41 – Шлифы шва № 3, х500: а) шлиф № 1; б) шлиф № 2;
в) шлиф № 3; г) шлиф № 4

Результаты проверки радиотехнических характеристик (РТХ) образцов показали, что для диапазона частот 10 – 15 ГГц 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.

Выводы:

1. Проведены исследования процесса индукционной пайки деталей различных типоразмеров с установкой границ перемещения, начального положения, стартовой мощности и выборе точек контроля температур.

2. Для контроля температуры в одних и тех же точках объекта пайки пирометры должны быть расположены на подвижном основании и перемещаться вместе с объектом пайки.

3. Для обеспечения равномерной температуры нагрева необходимо позиционирование волновода относительно окна индуктора. Погрешность позиционирования не должна превышать 0,2 мм.

4. Выбор величины начальной мощности процесса позволяет расширить диапазон стартовых точек (величин зазора «индуктор – фланец/муфта»), при которых система, с учетом выбранной скорости нагрева, имеет временной запас для регулирования. Чем выше стартовая мощность и чем выше скорость нагрева, тем выше должно быть качество управления процессом.

5. Во время процесса пайки, флюс не должен попадать в зону обзора пирометра, так как это вносит погрешность измерения в диапазоне 20 – 100⁰С. в зависимости от установленных коэффициентов излучательной способности. Если это не представляется возможным, то остается возможность нанесения флюса в область контроля температур обоих пирометров, с предварительной тарировкой их на значение температур.

6. Представленные результаты контроля качества паяных соединений волноводов подтверждают повышение стабильности качества паяных соединений элементов волноводных трактов путем устранения неисправимых дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 управление процесса, а также влияние флюса на погрешность измерения температуры деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Мюльбауэр, А., Васильев А. Краткая история техники индукционного нагрева и плавки /А. Мюльбауэр, А. Васильев. – Текст: электронный // Амбит: «История развития индукционного нагрева» URL: <http://ambit.pro/istoriya/> (дата обращения 23.02.2017).

2 Эмилова, О.А. Индукционная пайка: процесс и его особенности / О.А. Эмилова, В.С. Тынченко // материалы XX Юбилейной междунар. науч. -практ. конф. Решетневские чтения, посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск).– Красноярск, 2016. Ч. 2. – с. 173-174с.

3 Патент № 2317184 Российская федерация, МПК В23К31/02/ Способ изготовления волноводно-распределительных систем из алюминиевых сплавов: Оpubл. 20.02.2008 /Михнев М.М., Чупилко В.Д., Липин А.Н. и др. – Текст: непосредственный.

4 Способ автоматического управления нагревом при пайке: А.С. SU 1771898 : В 23 К 1/00 / Э.А. Гладков, А.В. Малолетков, П.В. Полянский. – Текст: непосредственный.

5 Устройство для управления процессом пайки: А.С. SU 393735 : М. Кл. G 05d 23/27 В 23k 9/10 / Б.И. Голубь, В.М. Комиссарчик. Оpubл. 10.08.1973.– Текст: непосредственный.

6 Способ автоматического нагрева трубных заготовок: А.С. 567762 :М. кл. С 21 D 11/00 Н 05 В 1/02 / А.С. Потанин, В. И. Аршин, Б.Г. Барменков и др. Оpubл. 05.08.1977. - Текст: непосредственный.

7 Система автоматического управления нагревом заготовок в проходной индукционной печи: А.С. 600200 :М. кл. С 21 D 11/00 Н 05 В 1/02 / А.С. Потанин, В. И. Аршин, Б.Г. Барменков и др. Оpubл. 30.03.1978. - Текст: непосредственный.

8 Способ автоматического управления нагревом при пайке: А.С. SU 1442342 : МПК В23К 1/00 / Н.А. Ширковский, П.В. Полянский, Э.А. Гладков и

др. Оpubл. 07.12.1988. - Текст: непосредственный

9 Универсальная автоматизированная установка для индукционного нагрева: Полезная модель 73336: М. кл. C21D 1/42 B23K 13/08 H03B 1/02 / В.В. Вологодин, В.В. Вологодин. Оpubл. 20.05.2008. - Текст: непосредственный.

10 Опарина, И.Б. Автоматизированная система управления пайкой / И.Б. Опарина, А.Г. Колмаков, И.М. Хейфец // Инновационные технологии в машиностроении: сборник материалов международной научно-технической конференции, 21 – 22 апреля 2020. – Полоц. гос. ун-т.; под ред. В.К. Шелега, Н.Н. Попок. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т., 2020, с. 69 – 71. - Текст: непосредственный.

11 Злобин, С.К. Автоматизированное оборудование и технология для пайки волноводных трактов космических аппаратов/ С.К. Злобин, В.Д. Лаптенюк, М.М. Михнев, А.Н. Бочаров, Ю.Н. Серегин, В.С. Тынченко, Ю.П. Дубец, Б.Б. Долгополов // Вестник СибГАУ, 2014. № 4. с. 219 – 229. - Текст: непосредственный.

12 Злобин, С.К. Пайка тонкостенных волноводных трактов из сплавов на основе алюминия с использованием индукционного нагрева/ С.К. Злобин // Решетневские чтения: материалы XIV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева; Красноярск: СибГАУ, 2010. с. 59 – 60. - Текст: непосредственный.

13 Злобин, С.К. Технология изготовления паяных соединений элементов волноводно-распределительных трактов (волноводная труба - литой уголок) с применением источника индукционного нагрева / С.К. Злобин, В.Д. Лаптенюк, М.М. Михнев, Р.В. Зайцев, В.Ю. Гусев // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов ОАО «ИСС». - Железногорск, 2011г. с. 308 – 309. - Текст: непосредственный.

14 Rapoport, E. Optimal Control of Induction Heating Processes / Edgar Rapoport, Yulia Pleshivtseva. - CRC Press, 2007. 347 с. - Текст: непосредственный.

15 Цыганов, В.А. Плавка цветных металлов в индукционных печах / В.А.

Циганов // М.: Металлургия, 1974. 248 с. - Текст: непосредственный.

16 Кузьмин, М.П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена / М.П. Кузьмин. М.: Энергия, 1974, 416 с. - Текст: непосредственный.

17 Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г.И. Бабат. – М. : Энергия, 1965. – 552 с - Текст: непосредственный.

18 Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с. - Текст: непосредственный.

19 Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – с. 296. - Текст: непосредственный.

20 Tavakoli, M. H. Computational modeling of induction heating process / M.H. Tavakoli, H. Karbaschi, F. Samavat // Progress In Electromagnetics Research Letters, 2009. Vol. 11. с. 93 – 102. – direct text.

21 Bay, F. A numerical model for inductionheating processes coupling electromagnetism and thermomechanics / F. Bay, V. Labbe, Y. Favenne, J.L. Chenot // Int. J.Numer. Meth. Eng. 58 (2003). - p. 839–867. - direct text.

22 Bodart, O. Numerical investigation of optimal control of induction heating processes / O. Bodart, A.V. Boureau, R. Touzani // Appl. Math.Model. 25 (2001) p. 697–712. - direct text.

23 Davies E.J. Conduction and Induction Heating / E.J. Davies // Peter Peregrinus, UnitedKingdom, London, 1990. - direct text.

24 Данилушкин, А. И. Трехфазная индукционная система для технологического нагрева / А.И. Данилушкин, Д.Н. Пименов, А.Ю. Таймолкин // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2013. Т.1. с. 6 – 8. Текст: непосредственный.

25 Данилушкин, А. И. Моделирование электротепловых процессов

двухчастотного индукционного нагревателя / А.И. Данилушкин, А.П. Мостовой, Я. М. Ошкин // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2013. Т.1. с. 9 – 11. - Текст: непосредственный.

26 Злобин, С.К. Особенности пайки элементов волноводно-распределительных трактов из алюминиевых сплавов с применением источника индукционного нагрева / С.К. Злобин, В.Д. Лаптенко, М.М. Михнев, Р.В. Зайцев // Решетневские чтения: материалы XIV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2012. – Ч. 2. – с. 16 – 17. - Текст: непосредственный.

27 Ключкова, Н.Н. Моделирование индукционной установки специального назначения средствами программного пакета FLUX / Н.Н. Ключкова, А.В. Обухова, А.Н. Проценко, А.С. Брятов // Вестник СГТУ, 2015. № 2. с. 57 – 63. - Текст: непосредственный.

28 Долгих, И.Ю. Моделирование индукционного нагрева плоским индуктором в программе COMSOL MULTIPHYSICS / И.Ю. Долгих, А.Н. Королев, В.Д. Лебедев // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2013. Т.1. с. 12 – 15. - Текст: непосредственный

29 Codrington, J. Induction heating apparatus for high temperature testing of thermo-mechanical properties / J. Codrington, P. Nguyen, S.Y. Ho, A. Kotousov // Appl. Therm. Eng. 29 (2009). - p. 2783–2789. - direct text.

30 Kurose, H. 3-D Eddy Current Analysis of Induction Heating Apparatus Considering Heat Emission, Heat Conduction, and Temperature Dependence of Magnetic Characteristics / H. Kurose, D. Miyagi, N. Takahashi, N. Uchida, K.

Kawanaka // IEEE InstElectrical Electronics Engineers Inc. (2009). - p. 1847–1850. - direct text.

31 Chaboudez, C. Numerical modeling in induction heating for axisymmetric geometries / C. Chaboudez, S. Clain, R. Glardon, D. Mari, J. Rappaz, M. Swierkosz // IEEE Trans. Mag. 33 (1997). - p. 739–745. - direct text.

32 Fabbri, M. Experimental and numerical analysis of DC induction heating of aluminum billets / M. Fabbri, M. Forzan, S. Lupi, A. Morandil, P.L. Ribani // IEEE Trans. Mag. 45 (2009). - p. 192–200. - - direct text.

33 Huang, M.-S. Effect of multi-layered induction coils on Efficiency and uniformity of surface heating / M.-S. Huang, Y.-L. Huang // Int. J. Heat Mass Transfer 53(2010). p. 2414–2423. - direct text.

34 Huang, Y.S. Infrared Thermal Image Segmentations Employing the Multilayer Level Set Method for Non-destructive Evaluation of Layered Structures / Y.S. Huang, J.W. Wu // Ndt&E International, vol. 43, 2010, p. 34–44. - direct text.

35 Omar, M. IR self-referencing thermography for detection of in-depth defects / M. Omar, M.I. Hassan, K. Saito, R. Alloo // Infrared Phys. Technol. 46 (2005). - p. 283–289. - direct text.

36 Wei H. P. et al. Prediction of Statistical Distribution of Vibration-Induced Solder Fatigue Failure Considering Intrinsic Variations of Mechanical Properties of Anisotropic Sn-Rich Solder Alloys // 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). –2018. – P. 741-747.

37 Satheesh A., Kattisseri M., Vijayan V. Numerical estimation of localized transient temperature and strain fields in soldering process // 2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). –2018. – P. 1-5.

38 Karban P., Pánek D., Doležel I. Model of induction brazing of nonmagnetic metals using model order reduction approach // COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. – 2018.

39 Lanin V. L. Sizing up the efficiency of induction heating systems for soldering electronic modules // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2018. – Vol. 54, No. 4. – P. 401-406.

40 Tan J. S. et al. Effect of Solder Joint Width to the Mechanical Aspect in Thermal Stress Analysis //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 551, No. 1. – P. 012105.

41 Dudek R. et al. Stress Analyses in HPC-Soldered Assemblies by Optical Measurement and FEA //2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). – 2018. – P. 1-6.

42 Ribes-Pleguezuelo P. et al. Method to simulate and analyse induced stresses for laser crystal packaging technologies //Optics Express. – 2017. – Vol. 25, No. 6. – P. 5927-5940.

43 Seehase D. et al. Selective soldering on printed circuit boards with endogenous induction heat at appropriate susceptors //Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. – Vol. 62, No. 4. – P. 172-180.

44 Wang S., Xu H., Yao Y. Annealing optimization for tin–lead eutectic solder by constitutive experiment and simulation //Journal of Materials Research. – 2017. – Vol. 32, No. 16. – P. 3089-3099.

45 Sarhadi A., Bjørk R., Pryds N. Optimization of the mechanical and electrical performance of a thermoelectric module //Journal of Electronic Materials. – 2015. – Vol. 44, No. 11. – P. 4465-4472.

46 Беззубцева, М.М. Аналитический обзор пакета прикладных программ для моделирования энергетических процессов потребительских систем АПК / М.М. Беззубцева, В.С. Волков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015. - № 6. с. 191 – 195. - Текст: непосредственный

47 Patidar, B Simulation and Experimental Validation of Induction Heating of MS Tube for Elevated Temperature NDT Application / B Patidar, M.M. Hussain, Sanjoy Das, F.P. Tiwari. URL: <https://www.comsol.dk/paper/experimental-validation-of-induction-heating-of-ms-tube-for-elevated-temperature-26982/> - Текст: Электронный

48 Малыгин, Е.Н. Моделирование и расчет процессов индукционного нагрева прессового оборудования при производстве резинотехнических изделий

/ Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, С.В. Карпов. URL: <http://engineering-science.ru/doc/541632.html>. – Текст: электронный.

49 Zhou S., Rabczuk T., Zhuang X. Phase field modeling of quasi-static and dynamic crack propagation: COMSOL implementation and case studies //Advances in Engineering Software. – 2018. – Vol. 122. – P. 31-49.

50 Panagakos G. et al. Modeling Multi-physics problems for energy applications with Comsol Multi-Physics. – NETL, – 2017 – No. NETL-PUB-21189.

51 Wei Z., Weavers L. K. Combining COMSOL modeling with acoustic pressure maps to design sono-reactors //Ultrasonics sonochemistry. – 2016. – Vol. 31. – P. 490-498.

52 Sezgin B. et al. Modeling and sensitivity analysis of high temperature PEM fuel cells by using Comsol Multiphysics //International journal of hydrogen energy. – 2016. – Vol. 41, No. 23. – P. 10001-10009.

53 V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, Handbook of Induction Heating, Marcel Dekker, New York, 2003. – direct text.

54 Kranjc, Matej Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating / Matej Kranjc, Anze Zupanic, Damijan Miklavcic, Tomaz Jarm // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010. № 53. с. 3585 – 3951. – direct text.

55 Rendler L. C. et al. Thermomechanical stress in solar cells: Contact pad modeling and reliability analysis //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2019. – Vol. 196. – P. 167-177.

56 Вдовин К. Н., Егорова Л. Г., Гуков М. В. Программное обеспечение для математического моделирования индукционного нагрева и закалки цилиндрических деталей //Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – №. 2. – С. 40-45. - Текст: непосредственный.

57 Долгих И. Ю., Королев А. Н., Захаров В. М. Математическое моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве //Электротехника. Энергетика. Машиностроение. – 2014. – С. 85-88. - Текст: непосредственный.

58 Базаров, А. А. Комплексное моделирование и управление процессом непрерывного индукционного нагрева ферромагнитных заготовок / А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. 2016. № 2. с. 128 – 137. - Текст: непосредственный.

59 Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering analysis with ANSYS software. – Butterworth-Heinemann, 2018.

60 Lee H. H. Finite element simulations with ANSYS Workbench 18. – SDC publications, 2018

61 Alawadhi E. M. Finite element simulations using ANSYS. – CRC Press, 2015.

62 Menter F. R., Lechner R., Matyushenko A. Best practice: generalized $k-\omega$ two-equation turbulence model in ANSYS CFD (GEKO). – Technical Report, ANSYS, 2019.

63 Медникова, В.А. Численная двумерная ANSYS модель непрерывного процесса индукционного нагрева / В.А. Медникова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – № 3. – С. 64-68. - Текст: непосредственный

64 Елшин, В.В. Моделирование процесса индукционного нагрева с использованием программного комплекса ANSYS / В.В. Елшин, Ю.В. Жильцов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2011. - № 2. с. 67 – 71. - Текст: непосредственный

65 Galunin, S Numerical analysis of coupled physics for induction heating of movable workpieces / S. Galunin, M. Zlobina, K. Blinov, A. Nikanorov, T. Zedler, B. Nacke // International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing Hannover, October 27-29, 2008. – с. 59 – 64. – direct next.

66 Скиба, В.Ю. Моделирование процесса индукционного нагрева плазменно-напыленных износостойких покрытий / В.Ю. Скиба, Е.А. Зверев, Н.В. Вахрушев, А.К. Гаврилов // International research journal. – 2016. № 6. т. 2. с. 130 – 134. - Текст: непосредственный.

67 Черных, И.В. Пакет ELCUT: моделирование устройств индукционного

нагрева / И.В. Черных // Exponenta Pro: Математика в приложениях, 2003. № 2. с. 4 – 8. - Текст: непосредственный.

68 Волков, В.В. Исследование энергетических характеристик индукционного нагрева в программе ELCUT / В.В. Волков, И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Энергия-2014: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных / ИГЭУ. – Иваново, 2014. – Т. 3. Ч. 2. – С. 7-11. - Текст: непосредственный.

69 Шарапов, О. Ю. Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX //Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2010. – №. 7.

70 Шарапов, О.Ю. Создание численной модели индукционно нагревательной установки периодического действия в среде наукоемкого расчетного программного комплекса FLUX / О.Ю. Шарапов // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы международной заочной научной конференции (г. Санкт-Петербург, март 2011) /Под общ. ред. Г.Д. Ахметовой. – СПб: Реноме, 2011. – 191 – 194. - Текст: непосредственный.

71 Плешивцева, Ю.Э. Сравнительный анализ программных продуктов ANSYS и Cedrat FLUX на примере моделирования проходной индукционной нагревательной установки / Ю.Э. Плешивцева, О.Ю. Шарапова, В.А. Медникова // XII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» – Самара, 2011. – С. 78-84. - Текст: непосредственный.

72 Соединения паяные. Методы контроля качества. Государственный стандарт: ГОСТ 24715-81; введ. 01.01.1983- М. : Изд-во стандартов

73 Герасимова, Л.П. Контроль качества сварных и паянных соединений: справочное издание / Л.П. Герасимова // М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 376 с. - Текст: непосредственный.

74 Тейлор, А. Рентгеновская металлография / А Тейлор // Перевод с английского Лютцау В. Г., Костюковой Е. П., Синайского В. М., Светлова И. Л. Под редакцией Пинеса Б. Я. М.: Изд-во Металлургия, 1965 г. – 664 с. -

Текст: непосредственный.

75 Лашко, С.В. Пайка металлов / С.В. Лашко, Н.Ф. Лашко // 4 –е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с. - Текст: непосредственный.

76 Справочник по пайке / Под ред. И. Е. Петрунина. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 480 с. - Текст: непосредственный.

77 Индукционная пайка / В. В. Вологдин, Э. В. Куш, В. В. Асамов; под ред. А. Н. Шамова. – 5-е изд. перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение 1989. – 72 с. – Текст: непосредственный.

78 Глуханов, Н. П. Физические основы высокочастотного нагрева / Под ред. А. Н. Шамова. — 5-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, 1989. — 56 с.

79 В. Bay, O. Nachkevych, T. Kournyts'kyi, A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids, Int. J. HeatMass Transfer 50 (2007). – p. 616–624. – direct text.

80 Матвеев, А. Н. Электричество и магнетизм: учеб.пособие / А.Н. Матвеев. – М.:Высш. школа, 1983. – 463 с. – Текст: непосредственный.

81 Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков // М. : Высшая школа, 1967. – 599с. - Текст: непосредственный.

82 Рапопорт, Э.Я. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева – М.: Наука, 2012. – 309 с. - Текст: непосредственный.

83 Пасконов, В.М. Численное моделирование процессов тепло-массообмена / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов // М. : Наука, 1984 – 288с. - Текст: непосредственный.

84 Патанкар, С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах / С.В. Патанкар. – Пер. с англ. Е.В. Калабина; под ред. Г.Г. Янькова. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 312 с. - Текст: непосредственный.

85 Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский // М. : Наука, 1977. – 388 с. - Текст: непосредственный.

86 Злобин, С. К. Особенности производства волноводно-распределительных трактов антенно-фидерных устройств космических аппаратов / С. К. Злобин, М. М. Михнев, В. Д. Лаптёнок, А. Н. Бочаров, Б. Б. Долгополов // Вестник СибГАУ. 2013. -№ 6. -с.196 - 201. - Текст: непосредственный.

87 Эмилова, О.А. Индукционная пайка: процесс и его особенности / О.А. Эмилова, , В.С. Тынченко // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2016. – Т.2. – с. 173-174. - Текст: непосредственный.

88 Злобин, С.К. Пайка тонкостенных волноводных трактов из сплавов на основе алюминия с использованием индукционного нагрева // Решетневские чтения: материалы XIV Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2010. – Т. 1. – с. 59-60. - Текст: непосредственный.

89 Злобин, С. К. Особенности пайки элементов волноводно-распределительных трактов из алюминиевых сплавов с применением источника индукционного нагрева / С. К. Злобин, М. М. Михнев, В. Д. Лаптенок и др. // Решетневские чтения : материалы XVI междунар. научн. конф. : в 2 ч. Красноярск, 2012 , ч. 1. с. 16 – 17. - Текст: непосредственный.

90 Emilova, O.A. Applying the method of induction heating for soldering waveguide paths. / О.А. 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.

91 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.

92 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.

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

94 Bocharova, O.A. Automated installation for pipelines brazing in protective environments using induction heating / A V Murygin, VSTynchenko, S O Kurashkin, O A Bocharova, Yu N Seregin and A N Bocharov // MIST: Aerospace-III 202 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineerin 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>)

95 ELCUT - программа моделирования: - URL: https://elcut.ru/allnews/elcut51_r.htm (дата обращения 16.09.2020). - Текст: электронный.

96 Черных, И.В. Пакет ELCUT: моделирование устройств индукционного нагрева / И.В. Черных // Exponenta Pro : Математика в приложениях, 2003, - №2 (2) с. 4 – 8. - Текст: непосредственный.

97 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, No3. С. 266–273. Doi:10.31772/2587-6066-2020-21-2-266-273.

98 Bocharova, O.A. Simulation of electromagnetic and thermal processes during inductionheating 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 Engineerin 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>)

99 Математическое моделирование физико-химических процессов в среде Comsol Multiphysics 5.2 : учебное пособие / А. В. Коваленко, А. М. Узденова, М. Х. Уртенов, В. В. Никоненко. - Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 228 с. – Текст: непосредственный

100 COMSOL: сайт – Москва, 2020 – URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения 12.10.2020). – Текст: электронный

101 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>)

102 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.

103 Бочарова, О.А. Применение среды ComsolMultiphysics 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.

104 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.

105 Murygin, A.V. Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering / Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptanok V.D., Emilova O.A., Seregin Y.N. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 173. – №. 1. (ссылка на полный текст: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/173/1/012026/pdf>). - Текст: электронный.

106 Мурыгин, А.В. 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.

107 Digital pyrometer with mono fiber optic cable: URL : <http://www.tempsens.com/pdf/pyrometers/A250-450-FO-pl.pdf> (дата обращения 08.03.2017). – Текст: электронный.

108 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.

109 Типы регуляторов и законы регулирования: URL: <http://automation-system.ru/main/15-regulyator/type-of-control.html> (дата обращения: 10.09.2020). - Текст: электронный.

110 Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник : в 3 -х т. Т. 1. Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / под ред. Н. Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 748 с. - Текст: непосредственный.

111 Chaturvedi D. K. Modeling and simulation of systems using MATLAB and Simulink. – CRC press, – 2017.

112 Klee H., Allen R. Simulation of dynamic systems with MATLAB and Simulink. – CRC Press, – 2016

113 Yakimenko O. A. Engineering Computations and Modeling in MATLAB®/Simulink®. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., – 2019.

114 Tynchenko, V. S / V. S. Tynchenko, A. V. Murygin, V. E. Petrenko, O. A. Emilova and A. N. Bocharov A control algorithm for waveguide path induction soldering with product positioning // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 255. – №. 1. – P . 012018. (ссылка: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/255/1/012018>) (doi:10.1088/1757-899 X /255/1/012018). - Текст: электронный.

115 Murygin, A V Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating / A V Murygin, V S Tynchenko, V D Laptinok, O A Emilova and A N Bocharov // IOP Conference Series: Materials

Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 173. – №. 1. – С. 012023. (doi:10.1088/1757-899X/173/1/012023) (ссылка на полный текст:<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/173/1/012023/pdf>). - Текст: электронный.

116 Murygin, A V Development of an Automated Information System for Controlling the Induction Soldering of Aluminum Alloys Waveguide Paths / A.V. Murygin, V.D. Laptenok, V.S. Tynchenko, O.A. Emilova, Y.N. Seregin // 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). - IEEE, 2018. – P. 1 - 5. ((ссылка на полный текст: https://www.researchgate.net/publication/328158237_Development_of_an_Automated_Information_System_for_Controlling_the_Induction_Soldering_of_Aluminum_Alloys_Waveguide_Paths)). - Текст: электронный.

117 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.

118 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 Laptenok// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016