

и 86102

Московский
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи

МАЛЮЕТКОВ Алексей Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПЕЧНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ ИЗДЕЛИЙ
СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ

06.03.06. -Технология и машины сварочного производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
кандидата технических наук



Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного знамени государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель - лауреат Государственной премии
доктор технических наук, профессор
Гладков Э. А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Стеклов О. И.
кандидат технических наук, доцент
Якушин Б. Ф.

Ведущее предприятие - НИИТМ

Защита диссертации состоится "11" июня 1992 г. на заседании специализированного совета К053.15.03 в Московском ордена Ленина, Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного знамени государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим высылать по указанному адресу.

_____ в библиотеке МГТУ

_____ 1992 г.

В. И. Гирш

_____ исано к печати 27.04.92.
_____ я ул., д. 5.

М 86102

Актуальность проблемы. За последнее время число изделий сложной формы (ИСФ), изготавливаемых из разнообразных, в том числе и разнородных, материалов, используемых в различных отраслях промышленности, значительно возросло. Одновременно усложнилась геометрия данных изделий и выросла их номенклатура.

При создании частей ИСФ используются различные технологии, обеспечивающие получение сложных пространственных поверхностей. Это приводит к тому, что доступ к зоне контакта соединяемых частей при сборке ИСФ либо весьма ограничен, либо вообще невозможен. В этой ситуации использование сварки затруднительно и единственным способом получения неразъемных соединений в данных изделиях является пайка.

В большинстве случаев пайка является последней технологической операцией при изготовлении ИСФ и от качества пайки зависит качество всего ИСФ. Наиболее перспективным и надежным способом пайки ИСФ является печная индукционная в атмосфере инертных газов при использовании защитного контейнера. При данном способе пайки качество соединения в значительной степени обуславливается процессом распространения температуры в ИСФ, который характеризует термодформационное состояние ИСФ и механизмы образования паяного шва в соединении. Распространение температуры в ИСФ зависит от формы, размеров и материала изделия и полностью определяется термическим циклом пайки (ТЦП). Как показывают исследования советских и зарубежных авторов качество паяного соединения при печной пайке полностью определяется точностью соблюдения параметров ТЦП и временем нагрева под пайку.

Используемые в настоящее время методы построения ТЦП предполагают проведение экспериментальных нагревов, что приводит к потере готового ИСФ. Кроме того построенные таким образом ТЦП не учитывают точность сборки, отклонения в форме и размерах ИСФ, изменения в условиях нагрева в процессе пайки.

Не могут удовлетворить возросших требований к соблюдению заданного ТЦП и существующие способы и оборудование управления нагревом ИСФ в печи. В настоящее время точность соблюдения ТЦП

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1086102

Маполетков А.В. Повышение



для большинства изделий составляет $5-10^{\circ}\text{C}$ во всем диапазоне температур нагрева при достижимой точности на существующем оборудовании не более $10-15^{\circ}\text{C}$. Это приводит к тому, что стабильность качества пайки различных изделий невысокая.

Перспективным путем преодоления данных проблем при пайке ИСФ в индукционных печах является использование микропроцессорных систем управления (МПСУ) нагревом, обеспечивающих адаптивное построение ТЦП, повышенную точность соблюдения его параметров, отработку внешних возмущающих воздействий и эффективную работу паяльного оборудования.

Цель работы. Целью работы является повышение стабильности качества паяных соединений в ИСФ при отсутствии предварительных данных о поведении изделия в процессе нагрева в индукционной печи и наличии случайных возмущающих воздействий на процесс пайки.

Для достижения поставленной цели в процессе работы потребовалось решить следующие задачи :

- разработать методику оценки влияния отдельных параметров процесса нагрева ИСФ на выполнимость заданного ТЦП;
- определить влияние случайных возмущающих воздействий на характер нагрева ИСФ;
- построить общую прогнозирующую модель нагрева ИСФ в индукционной печи;
- построить функциональную схему МПСУ нагревом ИСФ и создать алгоритмы работы МПСУ;
- создать автоматизированную технологию пайки ИСФ в индукционной печи при использовании модельного образца МПСУ.

Методы исследования. Основные задачи решались расчетными и экспериментальными методами. Эксперименты проводились при использовании индукционной печи типа ВПЧ-1 питаемой машинным преобразователем ВПЧ-100-2400 с управлением от тиристорного усилителя У-252. Выбор количества экспериментальных данных и их обработка производилась методами математической статистики.

Анализ формирования паяного соединения и классификация технологических возмущений производились методами системного и функционального анализа. Обработка информации и применение результатов обработки базируется на методах теории автоматического управления.

Все расчеты для теоретических исследований, а также весь процесс снятия информации при пайке и обработка данных велась на ЭВМ. Испытания аппаратных и программных средств МПСУ проходили в лабораторных условиях.

Научная новизна. Теоретическими и экспериментальными исследованиями показано, что повышение качества паяного соединения в ИСФ при сокращенном цикле нагрева с использованием индукционного источника возможно при обеспечении минимальных градиентов температуры в теле изделия, когда имеет место интенсивное термометформирование ИСФ, активация поверхности соединения флюсом и энергичное металлургическое взаимодействие расплава припоя с материалом изделия. Показано, что, в условиях преобладания переноса тепла через механизм излучения, комплексным критерием, оценивающим кинетику процесса перераспределения тепла в объеме изделия, может служить максимальная толщина стенки в изделии, распределенность частей изделия в пространстве и соотношение их массивности.

Построена общая математическая модель, описывающая нагрев различных ИСФ при пайке в контейнере в индукционной печи при наличии случайных возмущающих воздействий на процесс пайки, базирующаяся на результатах идентификации конкретного ИСФ на начальном этапе пайки при использовании предложенного комплексного критерия, оценивающего кинетику перераспределения тепла в ИСФ. Для количественной оценки данного критерия рекомендовано использовать критерий Био.

Разработан алгоритм адаптации предложенной общей математической модели поведения ИСФ при нагреве в печи к изменению формы, размеров и материалов при пайке конкретного изделия, уточняющий отдельные параметры модели нагрева в процессе пайки, при температуре нагрева ниже температуры пайки (Тпайки).

Практическая ценность. Разработаны способы контроля процесса пайки ИСФ по показаниям датчиков температуры, установленных на поверхности ИСФ, методики идентификации изделия по показаниям датчиков и построения ТЦП на базе данной идентификации. Разработаны способы управления источником нагрева (ИН), обеспечивающие повышение точности соблюдения заданного ТЦП. Созданы функциональная схема МПСУ нагревом и ее модельный образец на базе микроЭВМ "Электроника БК-0010". На базе МПСУ и алгоритма ее работы создана автоматизированная технология пайки с использованием комплексного критерия качества формирования паяного соединения.

Результаты исследований и конструкторских разработок прошли опробирование и внедрены на Опытном заводе энергетического машиностроения г. Химки Московской области.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на семинаре "САПР и микропроцессорная техника в сварочном производстве" (июль 1991 г., Москва), на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им. Н. Э. Баумана (сентябрь 1991 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы, включающего 123 наименований, и приложения. Общий объем составляет 181 страницу из них 121 машинописного текста, 43 стр. содержат 45 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу возможностей использования различных способов пайки для сборки ИСФ при достижении требуемого качества паяного соединения. На базе анализа литературных данных и теоретических расчетов показано, что с ростом сложности ИСФ, расширением их номенклатуры и повышением требований к качеству изготовления ИСФ область применения способов пайки с локальным ИН постоянно сужается и доля способов пайки при использовании общего нагрева растет. Среди способов пайки с общим нагревом ИСФ наиболее перспективными являются способы печной пайки, а среди них способ индукционной печной пайки. Показано, что данный способ пайки обладает наибольшими возможностями по удовлетворению растущих требований к качеству паяного соединения при сборке однотипных ИСФ и к стабильности качества при пайке разнородных ИСФ.

Установлено, что качество паяного соединения зависит, в большинстве случаев от правильности построения ТЦП и точности его соблюдения в процессе нагрева. Данная точность для большинства ИСФ в настоящее время составляет $5-10^{\circ}\text{C}$ при нагреве до $T_{\text{пайки}}$ и $3-5^{\circ}\text{C}$ при $T_{\text{пайки}}$.

Анализ возможностей достижения требуемой точности соблюдения ТЦП показал, что она достижима за счет совершенствования способов управления нагревом изделия и оборудования управления ИН. Показано, что существующие способы управления и аппаратура не

позволяют достичь требуемой точности соблюдения ТЦП в процессе нагрева. Кроме того на процесс пайки существенное влияние оказывают внешние возмущающие воздействия, природу которых в большинстве случаев трудно установить. Они оказывают существенное влияние на ход процесса нагрева ИСФ и следовательно на качество пайки. Для борьбы с ними необходимо регулировать работу ИН, что значительно усложняет задачи системы управления.

В результате оценки современного состояния индукционной пайки, способов построения ТЦП и управления нагревом в печи установлено, что дальнейшее совершенствование процессов пайки ИСФ связано с построением системы управления нагревом при пайке, обеспечивающей повышение стабильности качества паяных соединений в ИСФ при отсутствии предварительных данных о поведении изделия в процессе нагрева в индукционной печи и наличии возмущающих воздействий на процесс пайки. Это и является основной целью работы.

Вторая глава посвящена исследованию влияния отдельных параметров процесса нагрева ИСФ в индукционной печи на качество паяного соединения и построению функциональной схемы МПСУ нагревом ИСФ.

Повышение точности ТЦП в первую очередь связано с повышением точности оценки состояния ИСФ в любой момент времени. Данную оценку производят на базе анализа показаний датчиков температуры, установленных на поверхности ИСФ. Повышение точности анализа данных показаний связано с фильтрацией сигнала, вырабатываемого термопарой, от электромагнитных помех, вызванных работой индуктора. Для этой цели разработаны аппаратные и программные средства фильтрации. Увеличение данной точности также связано с упрощением и уточнением перевода сигнала термопары в показание температуры, для чего предложена зависимость "напряжение-температура", имеющая семь линейных и один нелинейный участок. Особое внимание уделено борьбе с теплоотводом по термопаре в процессе измерений, искажающим температурное поле в месте установки термопары. Предложен способ контроля процесса пайки, при котором данные искажения усиливаются нанесением вокруг термопары на поверхности ИСФ теплоизолирующего покрытия, что позволяет контролировать датчиком, установленным на поверхности ИСФ температуру точки удаленной от поверхности на заданное расстояние, например в месте закладки припоя. Это позволяет повысить точность контроля.

Учитывая, что на распределение температуры в ИСФ большое влияние оказывает распределение температуры в печи, были проведены исследования зависимости распределения температуры в защитном контейнере, заполненном аргоном, от размеров паяемого изделия. Данные исследования показали, что в случае если размеры ИСФ составляют 40 % от радиуса контейнера и 60 % от его высоты, температура в защитном контейнере распределена равномерно. В случае превышения данных габаритов неравномерность распределения температуры растет с ростом размеров ИСФ. Показано, что большая часть ИСФ не искажает температурного поля в печи.

Установлено, что даже в случае равномерного распределения температуры в печи датчики позволяют определить максимальную температуру в ИСФ ($T_{\max}$), скорость ее изменения ($V_{\max}$) и максимальный перепад температуры ($\Delta T_{\max}$). В то же время такой показатель поля, как градиент температуры ($\text{grad}T$), от которого в большей степени, чем от $\Delta T_{\max}$ зависит качество, не может быть найден по показаниям датчиков температуры, т.к. зависит от формы и размеров ИСФ, которые заранее не известны. Для выхода из данной ситуации предложено для расчетов $\text{grad}T$ использовать формулу:

$$\text{grad} T = C_1 (T_{\text{кон}} - (T_{\max} + C_2 V_{\max})) \quad (1)$$

где: $T_{\text{кон}}$ - температура контейнера, $C_1 = \sqrt{3} \frac{a_2}{a_m}$, $C_2 = \frac{1}{3} a_2$, где a_m, a_2 - температуропроводность материала ИСФ и газа в контейнере.

Анализ показателей температурного поля в ИСФ установил, что в связи с инерционностью нагрева ИСФ в индукционной печи, который практически на 100 % определяется лучистым теплообменом из-за использования защитного контейнера с газом, точность соблюдения ТЦП полностью зависит от уменьшения отклонений $V_{\max}$ и $\Delta T_{\max}$ от допустимых значений, определенных технологией пайки и особенностями паяемого ИСФ.

Среди внешних возмущающих воздействий выявлено два типа наиболее существенно влияющих на качество пайки - это случайное падение мощности ИИ и давления защитного газа в печи из-за местной утечки его из контейнера. С целью снижения числа разнотипных датчиков, используемых для контроля процесса пайки и повышения достоверности данного контроля предложено фиксировать величину данных воздействий по изменению скорости роста $T_{\text{кон}}$ при падении мощности ИИ и изменении скорости роста одного из перепа-

дов температуры в ИСФ при изменении давления защитного газа в печи.

На основе анализа структуры и объема информации о ходе процесса пайки, необходимых алгоритмов ее обработки и принятия управляющего воздействия для ИН предложена функциональная схема МПСУ нагревом при печной индукционной пайке ИСФ на базе микроЭВМ (см. рис. 1.).

Третья глава посвящена построению общей модели нагрева ИСФ в печи и созданию алгоритма ее адаптации к условиям пайки конкретного изделия.

Показано, что данную задачу при неудовлетворенности условий геометрической однозначности теплообмена можно решить лишь за счет идентификации ИСФ на начальном этапе нагрева, когда поведение изделия еще не может оказать влияния на качество пайки. Предложено идентифицировать ИСФ по толщине его стенки, по массивности его отдельных частей и их распределенности в пространстве.

Толщина стенки в изделии оценивалась в зависимости от величины удельной теплоемкости материала ИСФ и температуры достижения $V_{\max}$ своего максимального значения ($\max(V_{\max})$) при $T_{\max 1}$ (см. рис. 2). После достижения данной температуры рост $V_{\max}$, даже при максимальной мощности ИН невозможен из-за изменения характера теплообмена между ИСФ и ИН и между отдельными частями ИСФ. Согласно этой оценке все ИСФ делятся на два типа - теплофизически тонкостенные и теплофизически толстостенные. Для оценки толщины стенки L использовался известный полезный объем контейнера ($S_{\text{кон}}$) и зависимость:

$$L = K \sqrt[3]{S_{\text{кон}}} \quad (2)$$

где K - коэффициент, зависящий от типа ИСФ. Используя величину L определяли критерий Био данного ИСФ:

$$Bi = hL/\lambda \quad (3)$$

где: h - коэффициент поверхностной теплоотдачи данного ИСФ, λ - коэффициент температуропроводности материала ИСФ. Если Bi больше 0,5 ИСФ относили к толстостенным, если Bi менее 0,25 ИСФ считали тонкостенным. Для идентификации ИСФ при 0,25 Bi 0,5 использовали соотношение текущих перепадов температуры в ИСФ при $T_{\max 1}$. Установлено, что данная идентификация ИСФ позволяет построить уточ-

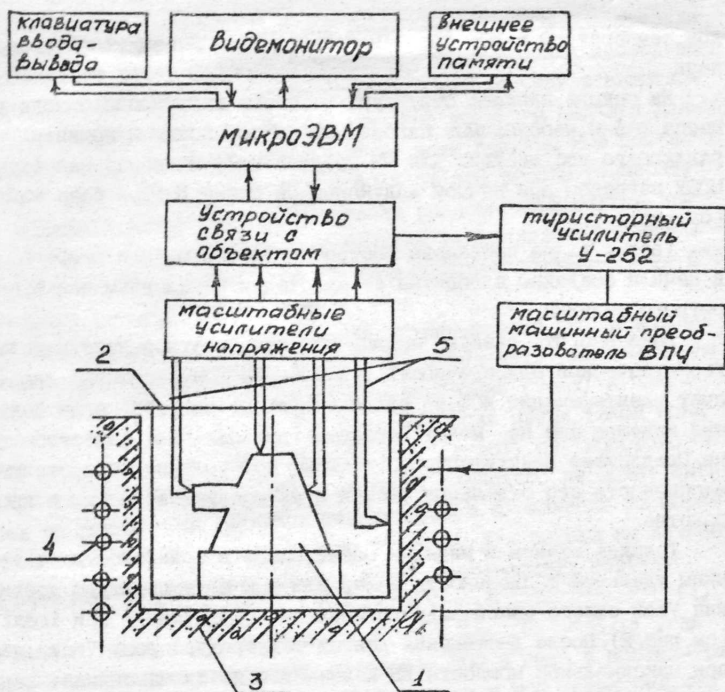


Рис. 1. Функциональная схема МПСУ нагревом при пайке ИСЗ в индукционной печи.

1-паяемое изделие; 2-защитный контейнер; 3-печь;
4-индуктор; 5-термопары.

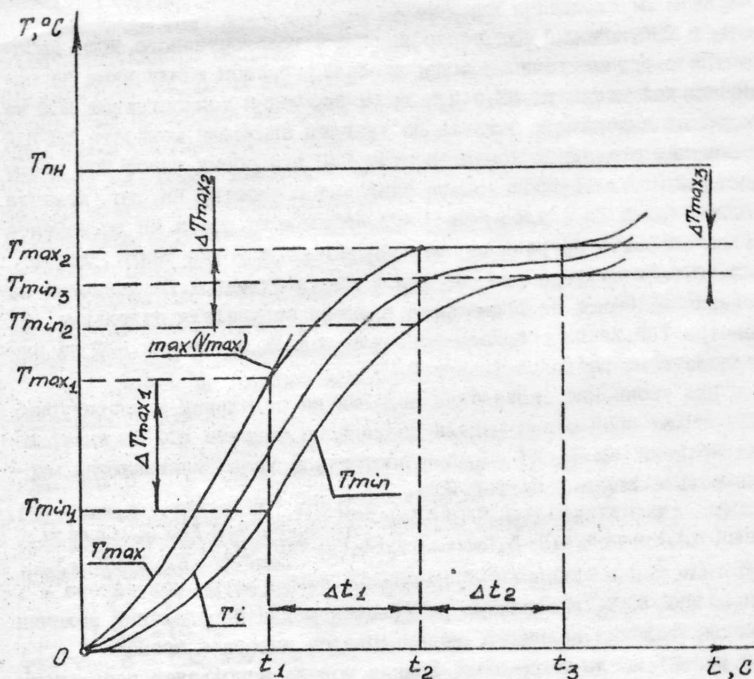


Рис. 2. Идентификация паяемого ИСФ по начальному изменению температуры трех его точек на поверхности.

$T_{пн}$ —температура предварительного нагрева, до которой не требуется управление ИН; T_i —температура i -точки поверхности ИСФ; T_{min} —температура минимально нагретой точки поверхности ИСФ.

ненный ТЦП, который для теплофизически толстостенного ИСФ выбирается с промежуточными выдержками и нагревом между ними на максимальной мощности ИН, а для теплофизически тонкостенных ИСФ не содержит выдержек и основан на плавном снижении мощности ИН. Для уточнения отдельных характеристик ТЦП для обоих типов ИСФ после достижения $T_{\max 1}$ производили снижение мощности ИН до момента когда $V_{\max} = 0$ и далее за счет небольшого роста ИН до момента когда скорость нагрева минимально нагретой точки также достигала 0 (моменты времени t_2 и t_3 соответственно). По динамике изменения $\Delta T_{\max}$ за промежуток времени определяли отдельные параметры ТЦП. Таким образом строили модель поведения ИСФ на интервале температур до $T_{\text{пайки}}$.

Для уточнения поведения изделия на отдельных температурных интервалах предложена модель поэтапного нагрева ИСФ на интервалах времени $\Delta t = t_2 - t_1$ при постоянной $V_{\text{кон}}$, учитывающая массивность отдельных частей ИСФ:

$$T_i = V_{\text{кон}} \Delta t + B_1 V_{\text{кон}} (\exp(-B_2 t_2) - \exp(-B_2 t_1)) / B_2 + B_1 T_{\text{нач. i}} \times (\exp(-B_2 t_2) - \exp(-B_2 t_1)) - B_1 T_{\text{нач. кон}} (\exp(-B_2 t_2) - \exp(-B_2 t_1)) + \frac{B_1}{B_2} \int_{\exp(-B_2 t_1)}^{\exp(-B_2 t_2)} \ln x dx \quad (4)$$

где: $T_{\text{нач. кон}}$ и $T_{\text{нач. i}}$ - начальные температуры контейнера и i точки ИСФ, B_1, B_2 - постоянные коэффициенты. Для определения величин для определения величин, использовался интервал времени $t_2 - t_3$ (см. рис. 2), когда $T_{\text{кон}} = \text{const.}$ Данная модель использует результаты расчетов поведения ИСФ на всем интервале температур нагрева, которые определяют лишь характерные участки в ТЦП.

Как модель общего нагрева ИСФ, определяющая значение $V_{\max}$, так и модель поэтапного нагрева, задающая значение $T_{\text{кон}}$ и следовательно мощность ИН, были построены на базе экспериментальных данных для ограниченного круга ИСФ. Это приводит к тому, что при расчетах по данным моделям ТЦП различных ИСФ точность расчетов будет различной. С целью снижения влияния ошибок расчетов по этим моделям на качество пайки разработана модель поведения ИСФ при малых отклонениях параметров режима пайки от заданных значений. Модель построена на базе результатов двух факторного эксперимента по изучению влияния ошибок оценки $V_{\max}$ - $\varepsilon V_{\max}$ и мощности ИН - $\varepsilon W_{\text{ИН}}$ по моделям общего и поэтапного нагрева на отклонение $\Delta T_{\max}$ от заданного значения $\varepsilon(\Delta T_{\max})$ и имеет вид регрессионной зависимости:

$$\varepsilon(\Delta T_{\max}) = 8,5 + 2,5 \varepsilon V_{\max} + \varepsilon W_{\text{ИН}} \quad (5)$$

Учитывая тот факт, что при построении предложенных моделей общего, поэтапного нагрева и нагрева при малых отклонениях режимов пайки от заданных значений использовался ограниченный объем данных был предложен алгоритм адаптации данных моделей к условиям пайки конкретного ИСФ. Поскольку две первые части модели строятся на базе идентификации паемого ИСФ, адаптировалась только модель для малых отклонений режима пайки, в которой уточнялись лишь отдельные коэффициенты в регрессионной зависимости. Уточнению подлежат лишь коэффициенты при $V_{\max}$, Z_1 и мощности ИН Z_2 . Свободный член регрессионной зависимости показывает точность построения моделей, учитывая сделанные при этом допущения при описании формы и размеров ИСФ и свойств его материала.

Для адаптации первого коэффициента была предложена следующая зависимость для Z_1 :

$$Z_1 = 2,5 - \exp(V_{\max, p} - V_{\max, \delta}) \lg(V_{\max, p} - V_{\max, \delta}) \quad (6)$$

где: $V_{\max, \delta}$ - базовое значение $V_{\max}$ при построении зависимости (5), $V_{\max, p}$ - расчетное значение $V_{\max}$ по предложенной модели для конкретного ИСФ. Для адаптации второго коэффициента Z_2 была предложена зависимость:

$$\begin{cases} Z_2 = (10 \cdot (-3,5 - Z_1 \cdot V_{\max})) / (W_{\text{ин}, \delta} - W_{\text{ин}, p}) & (\Delta W_{\text{ин}} < 10) \\ Z_2 = (\Delta W_{\text{ин}} \cdot (-3,5 - Z_1 \cdot V_{\max})) / (W_{\text{ин}, \delta} - W_{\text{ин}, p}) & (\Delta W_{\text{ин}} \geq 10) \end{cases} \quad (7)$$

где: $W_{\text{ин}, \delta}$ - базовое значение мощности ИН при построении зависимости (5); $W_{\text{ин}, p}$ - расчетное значение мощности ИН по модели для конкретного ИСФ; $\Delta W_{\text{ин}}$ - значение текущего отклонения мощности ИН от расчетного значения.

Данная адаптация позволила повысить точность расчетов нагрева конкретного ИСФ по предложенной модели с 8-10 до 4-5⁰С во всем диапазоне температур нагрева.

Четвертая глава работы посвящена построению МПСУ нагревом ИСФ в индукционной печи и разработке автоматизированной технологии пайки ИСФ.

На основе анализа информации о процессе пайки, алгоритма ее обработки, прогнозирующих моделей расчета поведения ИСФ при нагреве предложено МПСУ нагревом строить на базе микроЭВМ "Электроника БК-0010".

Для обеспечения функционирования микроЭВМ в системе управления нагревом было предложено устройство связи с объектом

(УСО). В задачи УСО входит преобразование аналоговых сигналов, поступающих от термопар, установленных на поверхности ИСФ, через быстродействующие усилители напряжений Ф8024С, в цифровой код выдаваемый в микроЭВМ и цифрового кода, вырабатываемого микроЭВМ, в аналоговый сигнал, управляющий работой тиристорного усилителя У-252 машинного преобразователя ВПЧ-100-2400. В связи с тем, что число датчиков температуры, контролирующих процесс пайки, не превышает 4, для получения микроЭВМ данных о ходе процесса нагрева предложено осуществлять программный опрос информационных каналов, т. к. УСО обеспечивает свободный доступ к ним за счет наличия в его составе коммутатора напряжений. Все основные элементы УСО - аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифрово-аналоговый преобразователь (ЦАП) и коммутатор напряжений построены на микросхемной базе, что значительно повышает надежность и быстродействие УСО. Для питания АЦП, ЦАП и коммутатора напряжений в УСО предусмотрен блок питания, что значительно повышает его надежность и делает УСО самостоятельным элементом МПСУ.

Анализ отдельных элементов МПСУ установил, что данная замкнутая система управления относится к инерционным из-за наличия в ней индукционной печи с паяемым ИСФ. Объем рабочей программы, написанной на языке Фокс и обеспечивающей управление обменом информации в МПСУ, обработку данной информации, построение модели нагрева ИСФ, расчет поведения ИСФ по данной модели, выработку управляющего воздействия, не влияет на инерционность МПСУ. Это обеспечивает возможность отработки случайных возмущающих воздействий на процесс пайки и организацию диалогового режима работы МПСУ с оператором паяльного оборудования, который может вмешиваться в ход управления нагревом. Коэффициент усиления построенной системы управления существенно зависит от алгоритмов управления в программе микроЭВМ, реализацию которых можно вести на базе пропорционального закона управления мощностью ИИ. Созданная МПСУ нагревом рассчитана на специалиста - технолога.

Предлагаемая автоматизированная технология пайки ИСФ в индукционной печи при использовании защитного контейнера основана на частичной замене операций выполняемых вручную человеком при

традиционной технологии пайки на операции выполняемые в автоматическом режиме МПСУ, а также на исключении ряда операций из традиционной технологии и введение новых операций, связанных с использованием МПСУ. К первой группе таких операций относится в первую очередь управление нагревом ИСФ в процессе пайки. Ко второй исключение проведения предварительных экспериментальных нагревов конкретного ИСФ в индукционной печи с целью построения его ТЦП (или уточнения ТЦП), и к третьей введение идентификации ИСФ в процессе пайки, создание банка данных по ТЦП пайки различных ИСФ.

Одним из важных элементов предложенной автоматизированной технологии является разработанный технологический критерий качества пайки, оценивающий формирование паяного соединения в любой момент времени. Данный критерий основан на формализации оценки возможности выполнения заданных ограничений на нагрев ИСФ при Тпайки, которые являются прямыми показателями качества пайки, при удовлетворении текущих требований ТЦП по $V_{\max}$ и $\Delta T_{\max}$, которые являются косвенными показателями качества. С этой целью предложено оценивать отклонение текущего значения $V_{\max}$ от значения определенного по модели нагрева или по предложенной методике и по величине данного отклонения рассчитывать вероятность удовлетворения прямых показателей качества пайки, используя выражение:

$$P(-\Delta V_{\max} \leq V_{\max} \leq +\Delta V_{\max}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\Delta V_{\max}}^{+\Delta V_{\max}} (\exp(-V_{\max}^2 / (2\sigma^2))) dV_{\max} \quad (8)$$

где: σ - текущее среднеквадратичное отклонение реального $V_{\max}$ от расчетного значения, $\pm \Delta V_{\max}$ - допустимое отклонение $V_{\max}$ от 0 при $T_{\max} = T_{\text{пайки}}$. Если величина P более 50 % считают, что процесс пайки идет удовлетворительно, в противном случае требуется внесение корректировок в управление мощностью ИИ. Данный критерий можно использовать только при удовлетворении косвенных показателей качества пайки. Он позволяет сократить время нагрева при пайке, т.к. исключает вероятность неоправданного управления ИИ. Кроме того он легко может быть использован в предложенной МПСУ нагревом при пайке.

Проведенные экспериментальные сравнения результатов пайки при использовании традиционной технологии и ручного управления мощностью ИИ и предложенной автоматизированной с использованием МПСУ показали, что последняя позволяет повысить качество пайки однотипных ИСФ на 25 % и стабильность качества пайки разно-

типных ИСФ на 50 % за счет повышения точности соблюдения заданного ТЦП для ИСФ.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основании анализа литературных данных и результатов экспериментальных исследований установлено, что дальнейшее повышение качества паяных соединений в ИСФ при пайке в индукционной печи с использованием защитного контейнера, заполненного инертным газом, за счет сокращения числа дефектов, вызванных непропаем и вытеканием припоя, связано с повышением равномерности нагрева ИСФ при сокращении времени пайки. Наиболее эффективно и перспективно для данных целей использовать оперативное и прогнозирующее управление мощностью ИН при пайке за счет применения МПСУ нагревом, обеспечивающей повышение точности измерения и анализа температурного поля в ИСФ, выполнение заданных параметров ТЦП, снижение влияния случайных возмущающих воздействий на ход пайки и время пайки, в условиях геометрической неоднозначности характера теплообмена при нагреве.

2. Повышение точности контроля температурного поля в нагреваемом ИСФ по показаниям терморпар, установленных на его поверхности, возможно за счет фильтрации помех, накладываемых на сигнал, вырабатываемый термopарами, точности перевода данного сигнала в температуру контролируемой точки поверхности ИСФ, использования специально разработанных мер компенсации теплоотвода по терморпаре. Данные меры позволяют повысить точность измерения температуры до 3°C во всем диапазоне ее измерения, что выше заданной точности соблюдения ТЦП (5°C).

3. При определении распределения температуры в печи в процессе нагрева ИСФ, установлено, что если габариты ИСФ менее 40 % по радиусу от радиуса защитного контейнера и менее 60 % от высоты контейнера, то температура в печи распределена равномерно и приблизительно равна температуре контейнера. При превышении данных габаритов отклонения температурного поля в печи от температуры контейнера лежат в пределах 5-10 % во всем диапазоне температур нагрева. В данной ситуации вместо перепада температуры в наделии необходимо использовать величину градиента температуры в каждой контролируемой точке в качестве параметра ТЦП.

4. Экспериментально установлено, что контроль случайного падения мощности ИН можно осуществлять по падению скорости нагрева

контейнера в печи. Аналогично контроль случайного падения давления защитного газа в контейнере по изменению скорости роста одного из перепадов температуры в ИСФ. Это позволяет использовать только датчики температуры для контроля процесса пайки.

5. Вычислениями и экспериментом установлено, что общую прогнозирующую модель нагрева ИСФ в печи необходимо разбивать на три относительно самостоятельные части. Первая часть должна строиться на основе идентификации ИСФ по толщине его стенки на базе критерия Био на начальном этапе предварительного нагрева и обеспечивать автоматизированное построение режима пайки для удовлетворения всех параметров ТЦП. При величине критерия Био менее 0,25 ИСФ относят к теплофизически тонкостенным и из ТЦП исключают промежуточные выдержки, если данных критерий более 0,5, то изделие считают теплофизически толстостенным и его ТЦП обязательно содержит промежуточные выдержки. Если данный критерий лежит в диапазоне 0,25-0,5 производят дополнительную идентификацию ИСФ по распределению массы изделия в пространстве и на базе данной идентификации относят ИСФ к одному из ранее рассмотренных типов, а также строят, вне зависимости от типа ИСФ, вторую часть модели, учитывающей поведение ИСФ на отдельных этапах ТЦП, при условии преобладания лучистого теплообмена при нагреве ИСФ. Третья часть модели учитывает возможные отклонения параметров режима пайки от значений, определенных по первым двум частям модели, и имеет вид регрессионной зависимости.

6. Третья часть модели адаптируется к условиям пайки конкретного ИСФ и тем самым повышает точность предсказания нагрева изделия по общей прогнозирующей модели до 3-4°C во всем диапазоне температур пайки. При этом адаптации подлежат только коэффициенты регрессионной зависимости, без изменения ее структуры, с целью снижения влияния изменений формы и размеров ИСФ на управление ИН.

7. Для управления нагревом изделия следует использовать системы управления с большими вычислительными возможностями на базе микроЭВМ. Это позволяет реализовать предложенную общую модель нагрева ИСФ в печи и разрабатывать на ее основе сложные алгоритмы и законы управления мощностью ИН, с учетом влияния случай-

ных возмущающих воздействий на процесс пайки.

8. Созданная МПСУ нагревом позволяет использовать автоматизированную технологию пайки, максимально снижающую участие человека в технологическом процессе. Технология основана на использовании критерия качества пайки, обеспечивающего оценку хода нагрева в любой момент времени.

9. Применение разработанной МПСУ в автоматизированной технологии пайки позволило повысить качество пайки однотипных ИСФ на 25 % и стабильность качества пайки разнотипных ИСФ на 50 %, при среднем сокращении времени пайки на 10 %.

10. Научные и технологические результаты работы использованы на Опытном заводе энергетического машиностроения г. Химки. Применение предложенной системы МПСУ позволило снизить энергозатраты на проведение пайки и управление процессом нагрева, число ремонтных операций по исправлению дефектов пайки.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Гладков Э. А., Малолетков А. В. Автоматизация проектирования технологии пайки с регулируемым циклом нагрева изделия сложной формы // САПР и микропроцессорная техника в сварочном производстве. Материалы научно-техн. семинара. МДНТП - М., 1991. - С. 64-71.

2. Положительное решение по заявке 4782107/08 СССР, МКИ В 23 к 1/00. Способ контроля процесса пайки / Гладков Э. А., Малолетков А. В., Полянский П. В. / СССР/. - 4782107/08; Заявлено 22.11.89.

3. Положительное решение по заявке 4834835/08 СССР, МКИ В 23 к 1/00. Способ автоматического управления нагревом при пайке / Гладков Э. А., Малолетков А. В., Полянский П. В. / СССР/. - 4834835/08; Заявлено 02.01.90.

4. Положительное решение по заявке 4857043/08 СССР, МКИ В 23 к 1/00. Способ автоматического управления нагревом при пайке / Гладков Э. А., Малолетков А. В., Полянский П. В. / СССР/. - 4857043/08; Заявлено 17.05.90.