

## **Отзыв**

официального оппонента д.т.н., профессора В.А. Захаренко

на диссертацию Бочаровой Олеси Андреевны

«Автоматизированная система управления процессом индукционной пайки»

на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами

Диссертационная работа Бочаровой О.А. представленная к  
оппонированию, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка  
использованных источников из 118 наименований, изложена на 132 страницах  
машинописного текста, содержит 85 рисунков, 9 таблиц.

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Индукционная пайка трубопроводов применяется в таких отраслях  
машиностроения, как авиационная, ракетостроение, судостроение и др.,  
обеспечивая высокую надежность соединения. Отличительными  
особенностями индукционной пайки является высокая скорость и локальность  
нагрева, бесконтактное воздействие на спаиваемые детали, а также  
возможности быстродействующего управления режимом нагрева.

Использование индукционной пайки волноводных трактов и  
трубопроводов сталкивается с рядом трудностей, среди которых низкая степень  
повторяемости 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.

Автоматизация процесса управления индукционной пайки позволяет  
обеспечить повторяемость результатов индукционной пайки и повысить  
качество паяных соединений деталей. Разработка системы автоматизации  
управления процессом пайки потребовала проработку вопросов использования  
современных средств измерения и разработку новых алгоритмов управления,

---

моделирования процессов, представленных в работе. Таким образом, **актуальность диссертационной работы** не вызывает сомнений.

**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** на основе литературного обзора рассмотрены реализации устройств индукционной пайки и современное состояние проблем процесса автоматизации индукционной пайки в промышленности. На основании аналитического обзора применения различного оборудования и подходов к автоматизации процесса индукционной пайки выявлены основные параметры, по которым необходимо производить контроль и управление индукционной пайкой. Показана необходимость моделирования процессов индукционного нагрева, сделан обзор различных методов и подходов при моделировании индукционного нагрева. Проведён обзор методов и средств контроля качества паяных соединений, полученных при индукционной пайке.

**Вторая глава** посвящена моделированию процессов, протекающих при индукционном нагреве отдельных структурных элементов волноводного тракта и трубопровода. Дано физическое и математическое описание электротермических процессов, происходящих в системах индукционного нагрева. Приведена математическая модель индукционного нагрева. Представлены результаты моделирования электромагнитных и тепловых процессов в программной среде ELCUT при индукционном нагреве волноводных трактов. Получены результаты моделирования электромагнитных и тепловых процессов в программной среде COMSOL.

**В третьей главе** представлена экспериментальная разработка двухконтурной системы автоматизированного управления процессом индукционной пайки. Данная система основана на пирометрическом контроле температуры изделия. Два контура управления по скорости нагрева элементов и положением изделия относительно индуктора позволяют обеспечить

оптимальность технологического процесса индукционной пайки под требования качества паяных соединений, исследовать режимы нагрева. Разработанная двухконтурная автоматизированная система управления процессом индукционной пайки позволила провести исследования на основе моделирования процессов управления пайкой. На основе среды Matlab разработана функциональная схема модели работы двухконтурной системы управления, разработаны алгоритмы управления двух контуров, а именно контура управления скоростью нагрева и контура управления положением детали относительно индуктора.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований процессов индукционного нагрева элементов волноводной сборки и трубопроводов. Выявлены факторы, влияющие на процессы нагрева, определены технологические параметры индукционного нагрева. Представлены результаты исследований технологических режимов пайки волноводов и трубопроводов в защитных средах. Приведены результаты исследований качества паянных соединений волноводных трактов.

**В заключении** изложены основные выводы и результаты работы.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Цель исследования отражает тематику диссертационной работы. Поставленные и решенные задачи соответствуют цели исследования, а их последовательность и реализация в комплексе определяют актуальность и научность тематики работы.

Результаты, полученные автором, являются новыми научными знаниями, достоверность которых обеспечивается использованием современных средств и методик проведения исследований, согласованностью теории и результатов экспериментальных исследований; корректным использованием основных положений теории электромагнитных и тепловых полей, методов теории автоматического регулирования и управления.

---



Автором проведен анализ современного состояния в области автоматизации процесса индукционной пайки. Проведен обзор основных направлений и подходов при моделировании процессов индукционной пайки. Представлены описания методов контроля качества паяных соединений, полученных при индукционной пайке. Выводы основаны на использовании результатов собственных исследований и литературных источников, состоящих из 118 работ отечественных и зарубежных авторов.

Результаты работы автора подтверждены созданием экспериментальной установки, представляющей собой двухконтурную систему автоматизированного управления процессом индукционной пайки, на которой реализованы разработанные алгоритмы управления, а также проведены экспериментальные исследования процессов, подтверждающие теоретические выкладки исследования.

#### **Научная новизна полученных результатов**

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 вихревых токов в объектах индукционного нагрева, позволяющая более точно рассчитывать и имитировать технологические параметры процесса индукционной пайки для задачи 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 по двум контурам: изменения мощности генератора индукционного нагрева 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 с одновременным позиционированием заготовки, позволяющим максимально приблизить зону нагрева деталей к индуктору.

#### **Теоретическая и практическая значимость**

Предложена математическая модель индукционного нагрева. Получены результаты моделирования электротермических процессов, протекающих при индукционной пайке волноводных трактов и трубопроводов. Модели позволяют проводить исследования в области создания эффективных технологических комплексов и проектировать автоматизированные системы для индукционной пайки.

Результаты работы использованы при разработке двухконтурной системы автоматизированного управления индукционной пайкой. Данная система использовалась в научных исследованиях и при отработке технологии индукционной пайки волноводных трактов различных типоразмеров.

#### **Соответствие содержания диссертации содержанию и качеству опубликованных работ**

Основные результаты диссертационного исследования, опубликованы автором в 21 научной работе. Две из них представлены в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, десять статей в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus. Автором получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ по тематике диссертации. Также результаты исследования изложены в одной монографии.

Основные положения были доложены и обсуждены на шести международных и одной всероссийской конференциях.

Содержание опубликованного материала соответствует направлению научных исследований, изложенному в тексте диссертационной работы.

Аннотация диссертации полностью соответствует основному тексту и опубликованным работам. Уровень апробации результатов работы по объёму приведённых публикаций и выступлений на конференциях весьма высокий.

**Соответствие темы диссертационной работы заявленной научной специальности**

Тема диссертационной работы Бочаровой Олеси Андреевны на тему «Автоматизированная система управления процессом индукционной пайки» соответствует пунктам 1, 3, 4, 6 паспорта специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

**Замечания по работе**

1. Разработанная математическая модель индукционного нагрева в диссертации представляется как двумерная, тогда как тепловые процессы протекают по трём координатам. На основе каких допущений автор не учитывает третью координату?

2. В математической модели индукционного нагрева не учитываются конвективный и лучистый теплообмены, что может существенно влиять на результаты моделирования.

3. В диссертации отсутствует информация о программном обеспечении двухконтурной автоматизированной системы управления процессом индукционной пайки.

4. На рис. 2.12 и 2. 13 текста диссертации отсутствуют заявленные графики по толщине и длине переходника трубопровода.

5. По какому критерию определялось качество паянных соединений (относительно каких технологий пайки или статистики сделан вывод о повышении качества соединений?).

**Указанные замечания, в целом, не снижают ценность полученных результатов и общего положительного впечатления о выполненной работе.** Диссертационная работа Бочаровой О.А. является самостоятельной, оригинальной и имеет значение для дальнейшего развития технологий индукционной пайки, в частности, волноводных трактов и трубопроводов.

---



### **Заключение по работе**

Диссертация Бочаровой Олеси Андреевны «Автоматизированная система управления процессом индукционной пайки», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложена новая научно-обоснованная техническая разработка автоматизированной системы управления процессом индукционной пайки, имеющая значение для развития знаний в области автоматизации и управления технологическими процессами пайки ответственных деталей.

Работа актуальна, результаты работы обладают научной новизной и практической значимостью, результаты и выводы обоснованы и достоверны. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы. Результаты диссертации соответствуют паспорту специальности 2.3.3.

Диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК, предъявляемые к кандидатским диссертациям, а ее автор – Бочарова Олеся Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Заведующий кафедрой «Электроника»  
Омского государственного  
технического университета  
д-р техн. наук, профессор

В.А. Захаренко

Подпись доктора техн. наук, профессора Захаренко В.А. заверяю  
Ученый секретарь Ученого совета  
Омского государственного  
технического университета

А.Ф. Немцова

