

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Тынченко Вадима Сергеевича

«Модели и методы управления процессами создания неразъемных соединений на предприятиях ракетно-космической отрасли», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Актуальность выбранной темы исследования

В последние десятилетия в промышленности все большее применение стали находить различные высокотехнологичные методы формирования неразъемных соединений, среди них такие, как методы индукционной пайки, электронно-лучевой и диффузионной сварки. В частности, метод индукционного нагрева для формирования паяных соединений хорошо себя зарекомендовал при сборке трактов антенно-фидерных устройств в производстве космических аппаратов, индукционную пайку часто применяют для сборки трубопроводов из различных материалов. Электронно-лучевой метод получения сварных соединений высоко технологичен, так как, регулируя мощность и ширину пучка, фокусировку, траекторию движения луча в зоне шва и др. параметры, можно менять глубину и ширину сварочной ванны, тем самым добиваясь требуемых физико-механических свойств соединений в соответствии с условиями эксплуатации конструкций. Качество соединения однородных материалов при диффузионной сварке может быть настолько высоким, что на микрошлифе нельзя обнаружить зоны раздела. При этом существуют проблемы, связанные с эффективностью и качеством проведения технологических процессов создания неразъемных соединений. Применение подобных высокотехнологичных методов формирования неразъемных соединений усложняется наличием ряда факторов, в частности, таких как низкая степень повторяемости неавтоматизированного (ручного) процесса пайки/сварки, а также сложность выбора эффективных технологических режимов для этих процессов.

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

Общая методология и методика исследования

Автором диссертационной работы на основе литературного анализа определены цели и задачи, предмет и объект исследования. Проведен анализ методов и средств управления технологическими процессами создания неразъемных соединений на предприятиях ракетно-космической отрасли и формирование методологии управления в рамках технологического направления Индустрии 4.0. Автором разработаны математические модели технологических процессов индукционной пайки и электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций на основе теории тепловых процессов. Автором сделана многокритериальная постановка задачи оптимального управления технологическими процессами создания неразъемных соединений тонкостенных

конструкций на основе предложенных математических моделей. На основе проведенных исследований были разработаны алгоритмы управления технологическими процессами создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций для одноконтурной и двухконтурной реализаций систем автоматизации индукционной пайки, систем автоматизации электронно-лучевой и диффузионной сварки. Были рассмотрены вопросы практической реализации компьютерного управления технологическими процессами создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций на основе индукционной пайки, электронно-лучевой и диффузионной сварки.

Внутреннее единство структуры работы

Диссертационная работа изложена на 394 страницах машинописного текста, иллюстрируется 246 рисунками, 38 таблицами. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 388 наименований и приложений.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, кратко сформулированы итоги работы по главам диссертации, определены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены технологические процессы, широко применяющиеся на предприятиях ракетно-космической отрасли для создания неразъемных соединений оборудования: электронно-лучевая сварка, индукционная пайка и диффузионная сварка. Показаны место и роль таких процессов при производстве конструкций изделий. Проведен обзор современного состояния модельно-алгоритмического аппарата цифровых двойников рассматриваемых процессов в рамках технологического направления Индустрии 4.0. Показано, что существующие исследования не затрагивают области моделирования и управления «вводом и выводом» луча в процессе электронно-лучевой сварки, а также этапы формирования и коррекции управляющих программ при индукционной пайке волноводных трактов космических аппаратов. Кроме того, утверждается, что готовое оборудование, представленное на рынке, не позволяет проводить автоматизацию этих процессов. В рамках исследования существующих автоматизированных систем для диффузионной сварки показано отсутствие разработок, направленных на управление таким оборудованием при производстве ответственных конструкций из титановых сплавов. В конце главы автором предлагается методология управления технологическими процессами создания неразъемных соединений на предприятиях РКО. В рамках данной методологии предлагается концепция формирования управления, реализуемого автоматизированной системой с использованием цифрового двойника технологического процесса, построенного на базе его математической модели.

Во второй главе автором на основе модели распределения температуры в полубесконечном стержне были разработаны математические модели нагрева как элементов волноводного тракта, так и сборки в целом. Проведенное исследование эффективности предложенного математического аппарата посредством экспериментальных исследований показало высокую степень соответствия модели реальному процессу. Стандартное отклонение разницы температур между моделируемыми и реальными процессами не превышало 2 °С, что является удовлетворительным с точки зрения технологии индукционной пайки. С использованием

системы моделирования SimInTech была реализована модель системы автоматизированного управления индукционной пайкой, и показано применение разработанных моделей для отработки технологического процесса индукционной пайки волноводной сборки труба-фланец из алюминиевого сплава. Для процесса электронно-лучевой сварки был разработан комплекс моделей, позволяющий осуществлять оценку распределения энергии в сварном шве на этапах ввода и вывода электронного луча с учетом геометрических размеров изделия, теплофизических параметров материала, а также технологических параметров процесса сварки. Кроме того, для повышения точности вычислений на основе табличной информации были разработаны регрессионные модели для применяемых теплофизических параметров сплава титана BT-14. В качестве математического аппарата для построения моделей «ввода-вывода» электронного луча использована теория тепловых (сварочных) процессов. Для процесса электронно-лучевой сварки с применением методов машинного обучения была решена задача поддержки принятия технологических решений, формальная постановка которой представляет собой задачу регрессии, где необходимо найти математическую зависимость между набором исходных параметров процесса ЭЛС и результатом процесса при этих параметрах. Были рассмотрены следующие регрессионные модели: гребневая регрессия, ансамбль «Случайный лес» и градиентный бустинг, – которые успешно справились с поставленной задачей. Была получена точность прогнозирования не ниже 89%.

В третьей главе диссертации представлены постановки задач оптимизации управления режимами индукционной пайки и оптимизации этапов ввода и вывода луча при электронно-лучевой сварке. В целях повышения эффективности управления индукционной пайкой тонкостенных конструкций на основе предложенных в главе 2 моделей распределения энергии разработана общая трехкритериальная постановка задачи оптимизации управляющей траектории по мощности, подаваемой на индукционный генератор, и расстоянию между паяемым изделием и плоскостью индуктора. Для дальнейшей реализации в рамках промышленных автоматизированных систем было проведено упрощение такой постановки до одно- и двухкритериальных вариантов, при этом выпадающие критерии были переведены в технологические ограничения. Такое упрощение позволяет не только снизить сложность решения задачи, но и предоставить результаты в допускающем интерпретацию виде: в случае с однокритериальной постановкой – это единственное решение; в случае с двухкритериальной – набор Парето-недоминируемых решений, выбор из которых может осуществляться технологом или быть автоматизирован. Для задачи формирования эффективного управления процессом ЭЛС в главе 3 предложена математическая постановка задачи оптимизации времени и формы ввода электронного луча, позволяющая учитывать распределение энергии поперек сварного шва для снижения термического эффекта в околошовной зоне и, соответственно, снижения вероятности деформаций изделия. Для задачи управления выводом электронного луча разработана постановка задачи оптимизации, позволяющая получать управляющие траектории с учетом остаточного количества тепла в изделии. Для решения разработанных задач многокритериальной оптимизации предлагается применение гибридного подхода, включающего эволюционный алгоритм NSGA-2 и метод локального

поиска L-BFGS-B, что позволит повысить эффективность поиска оптимальных решений. Реализация предложенного подхода в рамках автоматизированных систем потребовало разработки специального алгоритмического обеспечения для управления процессами индукционной пайки, электронно-лучевой и диффузионной сварки.

В четвертой главе автором представлены результаты разработки алгоритмов управления процессами создания неразъемных соединений для различных типов реализации систем автоматизации. Алгоритм управления процессом индукционной пайки по единственному контуру мощности индуктора разработан на основе пропорционального регулятора с целью поддержания требуемой скорости нагрева, а при достижении температуры стабилизации – с целью поддержания этой температуры в течение некоторого времени. По результатам экспериментальных исследований автором доказано, что предложенный подход позволяет производить эффективное управление 20 раз в секунду, при этом в качестве информации, вводимой в контур управления, была выбрана температура с пирометра, направленного на трубу волноводной сборки. Средняя абсолютная ошибка соответствия технологии составила 4,2 °С, а среднее перерегулирование при выходе на этап стабилизации – 8,19 °С. Автором также был разработан алгоритм, позволяющий повысить качество управления индукционной пайкой за счет внедрения второго контура управления по положению изделия относительно плоскости индуктора. Такое управление позволяет за счет перераспределения энергии между фланцем/муфтой и трубой волноводной сборки скомпенсировать разницу их температур на протяжении всего технологического процесса и снизить вероятность появления дефектов. Для процесса ЭЛС разработан алгоритм управления с оптимизацией этапов ввода и вывода электронного луча для повышения качества управления процессом и качества сварного соединения в местах начала сварки и ее окончания. Предложенный подход к управлению процессом ЭЛС был апробирован в ходе натурных испытаний в рамках трех серий экспериментов для двух типоразмеров изделий (диаметров окружности пути прохождения сварного шва) и технологических параметров сварки. Для процесса диффузионной сварки был разработан алгоритм управления, позволяющий обеспечить установленный нормативами процесс нагрева, выдержки и остывания изделия. Предложенный алгоритм управления был апробирован при проведении заводских испытаний, по результатам которых все характеристики процесса удовлетворяли технологическим требованиям.

В пятой главе описываются разработанные в рамках исследования автоматизированные системы управления процессами создания неразъемных соединений. Для автоматизации процесса индукционной пайки спроектированы и разработаны комплексы оборудования в составе установки пайки и стенда управления, позволяющие с высокой степенью повторяемости проводить и успешно завершать технологический процесс в двух конфигурациях: с управлением по единственному контуру нагрева волноводной сборки и с управлением по двум контурам с позиционированием изделия относительно плоскости индуктора для перераспределения энергии между паяемыми элементами волноводной сборки. Для измерения температуры в автоматизированных комплексах применяется метод бесконтактной пирометрии с использованием пирометров

AST 250, а точки контроля температуры выбраны по результатам экспериментальных исследований таким образом, чтобы снизить вероятность появления дефектов в паяемых изделиях. В главе представлены структуры и алгоритмы работы трех вариантов систем управления процессом пайки: системы одноконтурного управления, системы двухконтурного управления и системы управления на основе предварительно сформированных оптимальных траекторий. При пайке изделий по заранее отработанным технологическим процессам все три варианта систем автоматизации показывают высокую эффективность – все технологические требования к процессу были выполнены, а процент брака удалось снизить до 1 – 3 %. Микрошлифы паяных соединений подтверждают полное протекание припоя и отсутствие дефектов. Для автоматизации процесса электронно-лучевой сварки спроектирован и разработан комплекс оборудования в составе электронно-лучевой пушки, источника ускоряющего напряжения на 30 кВ, управляемого электрического привода высокоточного позиционирования для манипулятора, вакуумной камеры с системой вакуумирования, турбомолекулярной откачной системы MT-Turbo 65D/0/8 KF40M MTM, системы дифференциальной откачки воздуха, вакуумного затвора с электромагнитным приводом ISO63, а также стенда управления. Разработано комплексное программное решение, включающее подсистему мониторинга параметров технологического процесса, подсистему управления вводом-выводом электронного луча и подсистему поддержки принятия решений для технолога установки ЭЛС.

По результатам апробации предложенной автоматизированной системы в процессе производственных испытаний на образцах-имитаторах автором было установлено, что применение предложенного подхода позволяет существенно повысить качество сформированных сварных соединений в зоне ввода-вывода, а именно, повысить степень соответствия геометрии сварного шва технологическим требованиям, что подтверждается результатами металлографии. Для автоматизации процесса диффузионной сварки разработана система управления генератором индукционного нагрева, обеспечивающим нагрев и охлаждение изделия в рамках технологического процесса. Контроль температуры осуществляется с помощью термопары типа ТХА, а обработка информации и управление генератором реализуются посредством промышленного контроллера ОВЕН ПЛК-150. Проверка эффективности работы системы проводилась при сварке контрольных партий изделий по двум программам нагрева в индукторе одного типоразмера без его переналадки. Результаты механических испытаний показали высокое качество сформированных сварных соединений – было обеспечено превышение установленных требований на 35 – 40 %.

В заключении приведены основные результаты и выводы по работе.

В приложениях приведены результаты внедрения диссертационных исследований в промышленность, охранно-правовые документы на результаты интеллектуальной деятельности, свидетельства регистрации программных комплексов, разработанных автором.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.

Основные научные выводы и положения подтверждаются теоретическим анализом, результатами экспериментальных исследований и результатами моделирования на ЭВМ. Научные положения аргументированы, описанные физические явления, и полученные результаты исследований не противоречат положениям физики. Выводы подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями, их воспроизводимостью и результатами математической обработки с использованием сертифицированных программ.

Научная новизна полученных результатов.

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

2. Разработаны новые модели технологических процессов создания неразъемных соединений, построенные на основе теории тепловых процессов, отличающиеся от известных учетом геометрических и теплофизических характеристик соединяемых конструкций, позволяющие осуществлять оценку распределения энергии в объеме производимых изделий для повышения качества управления.

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

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

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

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

Значение выводов и рекомендаций для науки и практики

Предложенные математические модели технологических процессов создания неразъемных соединений тонкостенных конструкций, а также разработанные

многокритериальные модели оптимизации управления позволяют проводить исследования в области создания эффективных технологических комплексов и проектировать автоматизированные системы для индукционной пайки и электронно-лучевой сварки ответственных деталей. Разработанные алгоритмы могут быть востребованы в процессе теоретических разработок при переходе к передовым цифровым технологиям в рамках направления Индустрии 4.0, применяемым при создании ответственных деталей. Результаты исследования могут быть использованы для развития подходов к управлению технологическими процессами создания неразъемных соединений ответственных деталей тонкостенных конструкций на предприятиях ракетно-космической отрасли. Разработанное модельно-алгоритмическое обеспечение, реализованное в виде программных систем, позволяет автоматизировать технологические процессы индукционной пайки, электронно-лучевой и диффузионной сварки с высокой степенью повторяемости таких процессов.

Соответствие содержания диссертации содержанию и качеству опубликованных работ

По теме данной работы опубликовано 85 печатных работ, среди которых 25 статей в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК, 7 статей в журналах, входящих в Q1/Q2 Web of Science и/или Scopus, 52 другие публикации в изданиях, входящих в Web of Science и/или Scopus и 1 монография. Получены: 1 патент на изобретение, 20 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Содержание опубликованного материала соответствует направлению научных исследований, изложенному в тексте диссертационной работы.

Соответствие темы диссертации заявленной научной специальности

Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами:

п.3 Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.

п.4 Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами.

п.5 Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами.

п.6 Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами.

п.8 Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников.

п.12 Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и

обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

Замечания по работе:

1. В Главе 2 описываются математические модели и результаты вычисления с их помощью эволюции температурных полей при электронно-лучевом нагреве. На стр. 97 упоминается, что при расчетах учитываются технологические параметры сварки: ток и время сварки, диаметр пучка, фокусное расстояние. Не понятно, каким образом учитывался параметр, связанный с фокусировкой.
2. В разделе Главы 2, посвященном верификации, приводится сравнение результатов расчетов по предложенным математическим моделям оценки температурных полей с результатами численного моделирования в среде Comsol Multiphysics. При этом сама процедура верификации не описана. Приводятся сведения о том, что отклонения не превышают 8% и 10%. При этом не понятно о каких отклонениях речь, об абсолютных или среднеквадратичных? Какие величины и в каких зонах сравнивались? Отсутствует оценка адекватности моделей с помощью общепринятых критериев. Не приведены общепринятые критерии, используемые при верификации (погрешность модели и тд).
3. В Главе 3 на стр. 163-165 приводится описание эволюционного алгоритма многокритериальной оптимизации SPEA2, однако в дальнейшем автор нигде не упоминает о его использовании, заявляя об использовании также описанного в этой главе алгоритма NSGA-2. Таким образом неясно, какое отношение этот алгоритм и его описание имеют к диссертационному исследованию.
4. Автором не рассмотрен вопрос определения параметров эволюционных алгоритмов многокритериальной оптимизации, от настройки которых в значительной степени зависит эффективность работы таких алгоритмов. В случае неудачного подбора параметров такие алгоритмы могут быть ограниченно эффективно.
5. В Главе 4 на стр.174 автором дано пояснение об уставке мощности генератора, при этом в качестве единиц измерения указывается Вольт, что представляется некорректным. Также некорректной представляется используемая автором терминология в ряде подрисуночных надписей при графическом представлении результатов, как то «график процесса...», «графики управления процессом...», «график распределения температуры ...».
6. На рисунке 4.9 есть рассогласование в схеме, где в контуре управления I используется значение « $eV(t)$ – расхождение скорости нагрева фланца/муфты волновода с программой нагрева», далее не упоминаемое в методике управления и поясняющих ее формулах.

Приведенные замечания в целом не снижают ценность полученных результатов и общего положительного впечатления о выполненной диссертационной работе.

Заключение по работе:

Диссертационная работа Тынченко Вадима Сергеевича «Модели и методы управления процессами создания неразъемных соединений на предприятиях аэрокосмической отрасли» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой изложены новые научно-технические и технологические решения в области автоматизации технологических процессов создания неразъемных соединений на предприятиях ракетно-космической отрасли, имеющих значение для развития знаний в области автоматизации технологических процессов пайки и сварки ответственных деталей, внедрение которых обеспечивает повышение производительности труда в научной и производственной деятельности и вносит значительный вклад в развитие страны. Работа обладает актуальностью, 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 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами. Диссертационная работа отвечает требованиям пп. 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Тынченко Вадим Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Профессор кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов»
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
доктор технических наук (05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)), доцент

Трушников Дмитрий Николаевич

« 09 » 10 2023 г.

Адрес: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29.

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
(ФГАОУ ВО «ПНИПУ»)

Тел.: +7 (342) 219-80-67, +7 (342) 212-39-27

E-mail: rector@pstu.ru; trdimitr@yandex.ru

Я, Трушников Дмитрий Николаевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, для дальнейшую обработку.

Подпись Трушников Д.Н.
заверяю

Зам. начальника УК
Н.В. Колчина

