

ОТЗЫВ

официального оппонента Москвичева Владимира Викторовича
на диссертационную работу Курашкина Сергея Олеговича
«Модели и методы для автоматизации процесса электронно-лучевой сварки
тонкостенных деталей», представленной на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами

Актуальность темы. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) относится к технологическим методам, использующих высококонцентрированные источники энергии, обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход элементы конструкций толщиной от 0,1 мм до 400 мм. Данная технология формирования сварных соединений путем регулировки мощности, ширины пучка и фокусировки, траектории движения луча в зоне шва и др. параметров позволяет получать требуемые физико-механические свойства соединений в соответствии с условиями эксплуатации конструкций. При этом моделирование процессов ЭЛС с целью определения необходимых технологических режимов сварки является одной из наиболее важных составляющих прикладных исследований, обеспечивающих сокращение объемов полномасштабных натурных экспериментов при отработке технологических процессов и испытаниях сварных конструкций.

Электронно-лучевая сварка находит расширенное применение при производстве тонкостенных сварных конструкций (толщина которых составляет до 2 мм), широко используемых в аэрокосмической технике, судостроении, приборостроении и промышленном строительстве. Основная проблема заключается в неопределенности оптимальных режимов сварки для тонкостенных изделий в установившемся режиме технологического процесса. Несмотря на достаточное число имеющихся работ в этой области, эффективные решения данного вопроса по оптимизации режимов сварки тонкостенных деталей при ЭЛС отсутствуют. Для исключения возникновения рассредоточенной дефектности сварных соединений тонкостенных конструкций требуется равномерный нагрев зоны стыка свариваемых элементов. Разработка новых методов и моделей для автоматизации процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных деталей с последующей реализацией программного продукта и внедрением на производство предложенного подхода, позволит снизить количество дефектов, возникающих в процессе сварки, обеспечить повторяемость технологического процесса при ЭЛС. Данный подход, реализованный в диссертационной работе Курашкина С.О. определяет её актуальность и практическую значимость.

Цель диссертационной работы состоит в повышении качества сварного соединения в процессе электронно-лучевой сварки тонкостенных изделий за счет определения и назначения требуемых технологических параметров процесса сварки в установившемся режиме, оптимизации скорости сварки и тока луча.

Общая характеристика работы: Диссертационная работа включает введение, три главы, заключение, список литературы из 173 наименований и

приложения. Текст работы изложен на 126 страницах, включая 56 рисунков и 8 таблиц.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, отражена степень разработанности темы, представлены методы исследования, рассмотрены вопросы научной новизны и практической значимости проведенных исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу моделей и методов автоматизированного управления ЭЛС, приводится описание методов моделирования тепловых процессов при ЭЛС.

Рассмотрены методы ЭЛС, применяемые на предприятиях аэрокосмической отрасли для соединения ответственных деталей, в частности, многослойная лучевая сварка для изготовления сферических конструкций. Проведен обзор моделей, описывающих процессы испарения и конденсации, описаны тепловые источники, применяемые при ЭЛС, рассмотрено влияние расфокусировки электронного луча на качество сварного соединения. Показано, что существующие исследования не затрагивают вопросы моделирования зоны сварного соединения в установившемся режиме с учетом геометрических размеров изделия и отражения тепла в процессе сварки. Предлагаемые программные системы не включают в себя адаптивное управление в процессе ЭЛС. Делается вывод о необходимости разработки и программной реализации методик и модели, описывающих динамику теплового процесса в зоне сварного соединения для решения задачи повышения его качества в процессе электронно-лучевой сварки для тонкостенных изделий.

Во второй главе представлены результаты разработки математической модели для расчета распределения температуры на поверхности свариваемых деталей в процессе электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций. Соискателем разработаны: методика оценки глубины провара и ширины сварного шва, метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме. На основе разработанной модели автором предложен критерий оптимальности для нахождения требуемых технологических параметров процесса ЭЛС и представлена блок-схема алгоритма их определения.

Разработанная методика оценки глубины провара и ширины сварного шва при ЭЛС тонкостенных деталей в установившемся режиме позволяет осуществлять оценку концентрации энергии в зоне сварного соединения учитывая геометрические размеры детали, технологические параметры сварки и теплофизические параметры. С использованием системы моделирования MATLAB и пакета Simulink автором реализованы модель и методика для системы автоматизированного управления процессом ЭЛС, позволяющие проводить исследования по оценке влияния технологических параметров сварки на интенсивность нагрева вблизи и непосредственно в зоне сварного шва.

Для процесса ЭЛС соискателем разработан метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме, позволяющий стабилизировать подводимую энергию к зоне сварного

соединения и снизить количество дефектов. Под адаптивным управлением автором понимается управление скоростью сварки или током луча при изменении мощности электронно-лучевой пушки, в случае напыления на катодный узел и снижения тока на катодном узле.

Третья глава посвящена вопросам разработки макета автоматизированной системы управления (АСУ) ЭЛС. Приводятся результаты натурных экспериментов для верификации разработанного макета и режимов, полученных в результате моделирования. Основой АСУ ЭЛС является промышленный компьютер АСР-4000МВ-00СЕW, который содержит в своем составе промышленную плату сбора данных PCI-1710, что позволяет проводить обработку данных в соответствии с разработанными алгоритмами и выдавать сигналы управления. Применение разработанных методик и модели в алгоритмах управления позволяет устранить влияние нестабильности скорости сварки на качество сварного шва путем изменения тока луча, а также компенсировать недостаток энергии в процессе ЭЛС при напылении на катодный узел путем увеличения тока на катодном узле или изменения скорости сварки.

Для апробации предлагаемых режимов проведена сварка образцов-имитаторов из титанового сплава ВТ14. Для подтверждения полученных результатов выполнены работы по сварке электродвигателя с биметаллическим кольцом с проведением металлографического контроля (замером глубины проплавления и ширины сварного шва). Полученные результаты измерений и обработки шлифов свидетельствуют о повышении качества сварного соединения за счет повышения эффективности управления процессом ЭЛС при использовании разработанных методик и модели.

Основные результаты и выводы работы достаточно полно и всесторонне обоснованы, отражают научное содержание и практические положения диссертации.

Библиографический список из 173 наименований определяет научную базу, которая была использована для работы соискателем, и которую можно охарактеризовать, как достаточную.

В **приложении** представлены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, а также акт о внедрении научных и практических результатов.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.

Цель исследования отражает тематику диссертационной работы и достигнута автором. Поставленные и решенные задачи соответствуют цели исследования, а их последовательность и реализация в комплексе определяют актуальность и научную значимость 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 тепловых сварочных процессов, теории математического моделирования, теории автоматического управления, теории вероятностей и

математической статистики, технологий программирования и разработки программного обеспечения.

По результатам проведенных исследований автором создана автоматизированная система управления процессом электронно-лучевой сварки, которая позволяет выполнять сварку тонкостенных деталей при подобранных оптимальных режимах технологического процесса и обеспечить повторяемость процесса и качество сварного соединения при заданных геометрических параметрах шва.

Научная новизна полученных результатов:

1) Разработана новая математическая модель электронно-лучевой сварки для расчета распределения температуры на поверхности свариваемых элементов тонкостенных изделий, основанная на уравнениях подвижных мгновенных источников энергии (точечного и линейного), учитывающая геометрические размеры изделия и технологические параметры процесса сварки, позволяющая обеспечивать высокое качество сварного соединения.

2) Разработана методика оценки глубины провара и ширины сварного шва при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей, отличающаяся тем, что учитывает геометрические размеры и теплофизические параметры детали, а также технологические параметры процесса сварки, позволяющая получать стыковые соединения заданных геометрических размеров.

3) Разработан метод адаптивного управления скоростью сварки и током луча при электронно-лучевой сварке тонкостенных деталей в установившемся режиме, основанный на использовании аппарата теории тепловых процессов, отличающийся применением комплекса четырех источников нагрева, позволяющий стабилизировать подводимую энергию к зоне сварного соединения и снизить уровень дефектности.

Практическая значимость: Основные результаты работы использовались при изготовлении действующих макетов электронно-лучевого оборудования, разработанного при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FEFE-2023-0004 «Адаптивные методы синтеза и управления проектированием компонентов сложных систем», в рамках проекта № 20-48-242917, выполненного при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Краевого фонда науки по теме «Модели и методы управления процессом электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций», также в рамках стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2022-2024 (приказ №38 от 20.01.2022) по теме «Разработка комплексной системы автоматизации электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения». Разработанная автоматизированная система управления электронно-лучевой сваркой рекомендуется для использования на предприятиях ракетно-космической отрасли, применяющих электронно-лучевую сварку, таких как АО «Информационные спутниковые системы им. М. Ф. Решетнева», (г. Железногорск), АО «Красноярский машиностроительный завод», а также на предприятии по

изготовлению электронно-лучевого оборудования ОАО «НИТИ «Прогресс», (г. Ижевск). Подтверждается актом о внедрении научных и практических результатов в АО «Информационные спутниковые системы им. М. Ф. Решетнева».

Соответствие опубликованных работ содержанию диссертации.

По тематике исследований опубликовано 21 печатная работа. Из них 7 публикаций в журналах, входящий в перечень ВАК, 14 работ опубликованы в материалах конференций, индексируемых Web of Science/Scopus. Получено 8 свидетельств о регистрации программ ЭВМ. Содержание опубликованного материала соответствует направлению научных исследований, изложенному в тексте диссертационной работы.

Соответствие темы диссертации заявленной научной специальности

Диссертация соответствует папорту специальности 2.3.3 - «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

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

п.7 Теоретические основы и методы моделирования и управления организационно-технологическими системами и киберфизическими производственными комплексами.

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, АСПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

Замечания по диссертационной работе:

1. Под качеством сварного соединения автор понимает обеспечение требуемых геометрических размеров сварного шва, однако к показателям качества относятся: уровень технологической дефектности; характеристики механических свойств; структурная неоднородность различных зон шва и ряд других. Данное обстоятельство предопределяет необходимость более детального исследования отмеченных факторов.

2. В работе целесообразно было дать прямое сравнение результатов металлографических исследований и моделирования зоны сварного шва, что позволило бы дополнительно обосновать достоверность разработанных моделей и технологических методов.

3. Вопрос формирования технологической дефектности при электронно-лучевой сварке имеет принципиальное значение для обеспечения надежности сварных конструкций, что требует разработки, организации и проведения специального диагностического контроля сварных швов неразрушающими методами. Данные технологии должны быть встроены в общий технологический процесс ЭЛС, что должно стать предметом дальнейших исследований в области

совершенствования ЭЛС. Автором данная постановка не отражена и в работе не рассматривалась.

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

Заключение по работе:

Диссертационная работа Курашкина Сергея Олеговича «Модели и методы для автоматизации процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных деталей», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение научно-технической задачи разработки математической модели для расчета распределения температуры на поверхности свариваемых деталей, глубины и ширины сварного шва в процессе электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций, имеющей важное прикладное значение для развития технологий в области методов автоматизированного управления электронно-лучевой сваркой при производстве изделий оборонно-промышленного комплекса.

По объему и научному уровню полученных результатов диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы.

Диссертационная работа удовлетворяет критериям пп. 9, 10, 11, 13, 14 изложенным в постановлении Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней, а ее автор Курашкин Сергей Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Доктор технических наук
Профессор, заслуженный
деятель науки РФ

Москвичев Владимир Викторович

« 11 » сентября 2023 г.

Официальный оппонент: Москвичев Владимир Викторович

Адрес организации:

660049, г. Красноярск, пр-т Мира, 53,

Красноярский филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий»,

тел. +7 391) 227-29-12,

e-mail: krasn@ict.nsc.ru,

научная специальность – 01.02.06. – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.

Подпись руки Москвичева Владимира Викторовича заверяю:

Ученый секретарь
Красноярского филиала
Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский
Центр информационных и
вычислительных технологий»



Н.А. Чернякова

«12» сентября 2023 г.