

ОТЗЫВ

официального оппонента

**на диссертационную работу Какорина Даниила Дмитриевича
«Автоматизация технологического процесса аддитивного производства
металлических изделий послойной электродуговой наплавкой»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (технические науки)**

Актуальность темы исследований

Развитие современного машиностроения неотъемлемо связано с увеличением номенклатуры производимых деталей, машин и механизмов. Кроме того, при широком разнообразии изделий возрастает потребность в применении эффективных технологий восстановления изношенных поверхностей. Применение традиционных производственных технологий не обеспечивает должной экономической целесообразности при изготовлении единичных и мелкосерийных металлических деталей. Достаточно хорошими в таких условиях являются технологии сварочного производства, однако для их успешной организации необходимо иметь высокую культуру заготовительного и сборочного производства, а также необходимое количество квалифицированных работников производства. Большой интерес представляют родственные сварочным процессам технологии аддитивного производства, основанные на послойном добавлении присадочного материала для формирования требуемой геометрии изделия. При этом важное значение имеет термический цикл послойного наплавления, состоящий из повторяющихся этапов нагрева и охлаждения металла. Характер изменения температуры определяет структуру и качество геометрии наплавленного металла.

Поэтому поставленная в диссертационной работе Какорина Д.Д. проблема повышения эффективности процесса аддитивного производства металлических изделий за счет разработки автоматизированной системы

управления технологическим процессом и программы для моделирования температурного поля, определения оптимального температурно-временного режима и траектории послойного наплавления обеспечивающих стабильное качество внутренней структуры и геометрической формы наплавленного металла, является актуальной научной и практической задачей.

Существующие теоретические разработки не позволяют учесть все особенности послойного электродугового наплавления присадочной проволоки и в большинстве своем не предназначены для применения в автоматизированной системе управления технологическим процессом аддитивного производства.

В работе предложен подход, учитывающий исходные данные о наплавленном изделии, постоянное добавление новых частей конструкции, изменение теплофизических свойств металла в зависимости от температуры, применение принудительного охлаждения металла в ходе межслойной выдержки, зависимости температуры металла от параметров рабочего режима установки и траектории наплавления слоев.

Для разработки математических моделей температурного поля в плоских металлических изделиях автор предложил использовать явную конечно-разностную схему, в соответствии с которой моделируемое изделие представляется в виде двухмерной сетки. Математическая модель реализована в программе, которая применяется в автоматизированной системе управления технологическим процессом и позволяет установить зависимость между технологическим режимом аддитивного производства и температурой металла. Управление осуществляется на основе данных о температуре и геометрии каждого слоя, что позволяет достаточно точно подбирать и корректировать параметры температурно-временного режима, траекторию и последовательность наплавления слоев.

В связи с вышеизложенным диссертационная работа Какорина Д.Д., посвященная разработке моделей, алгоритмов и программ для моделирования и оптимизации параметров аддитивного производства, а

также автоматизированной системы управления процессом, имеет высокий уровень актуальности.

Структура, объем и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 158 страницах, включает 56 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 120 наименований.

Во введении обоснована актуальность выполненного исследования, сформулированы объект и предмет исследования, поставлена цель и задачи работы, рассмотрены преимущества использования аддитивных технологий в машиностроении, перечислены этапы и режимы технологического процесса, произведён анализ существующих подходов к исследованию режимов послойного электродугового наплавления, а также моделированию тепловых процессов при аддитивном производстве металлических изделий. Дана характеристика научной новизны и практической ценности работы, представлены сведения по апробации результатов работы.

В первой главе проведен обзор современных технологий аддитивного производства и обоснованы преимущества послойного электродугового наплавления. Рассмотрен технологический процесс послойного наплавления, используемое оборудование и его параметры. Описано влияние технологического режима на качество наплавленного металла. Проведен анализ способов моделирования, определены проблемные вопросы, решение которых обосновывает актуальность диссертационного исследования.

Во второй главе рассмотрены аналитические и численные методы моделирования процессов наплавления, обоснованы достоинства численной конечно-разностной схемы. Представлена двумерная сетка изделия и описана последовательность выполнения расчета температурного поля с учетом изменения теплофизических свойств металла, конвективно-радиационного теплообмена поверхности изделия с окружающей средой,

различных размеров основания и наплавляемого слоя и необходимости межслойного охлаждения конструкции. Для реализации метода автором разработана программа моделирования температурного поля и оптимизации параметров процесса аддитивного производства. Для повышения эффективности функционирования программы процесс послойного электродугового наплавления рассмотрен с точки зрения объекта управления, определена цель управления, выделены входные и выходные параметры процесса, а также управляющие и возмущающие воздействия.

Третья глава посвящена экспериментальному определению технологических параметров послойного электродугового наплавления. Для определения точности выполняемых программой расчетов проведен эксперимент по определению рабочего режима установки и наплавлению образца с послойной записью температур характерных точек. С учетом экспериментальных исходных данных автором выполнено моделирование температурного поля и проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений температур. Представлен текст программы и внешний вид рабочего экрана. Для устранения выявленного расхождения температур автор добавил в программу модуль идентификации параметров теплообмена, включая весовые коэффициенты теплопроводности и коэффициент принудительного конвективного охлаждения на этапе межслойной выдержки.

Четвертая глава посвящена постановке задачи управления технологическим процессом аддитивного производства. Представлена структура двухконтурной автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства. Приведены ограничения и приоритеты, которые автор рекомендует учитывать в процессе расчета траектории наплавления слоев. Для подтверждения достоверности полученных результатов выполнен расчет оптимальных параметров режима для металлического изделия – башмака дискового тормоза подвижного состава. На основе выполненной апробации автором представлено сравнение

показателей эффективности технологической подготовки производства с учетом экспериментального и программного подбора оптимального режима. Результаты, приведенные в 4-ой главе, подтверждают практическую ценность работы.

Заключение содержит основные выводы и результаты диссертационного исследования.

В приложении приведены акт опытно-промышленных испытаний автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства и программы для моделирования и оптимизации температурно-временного режима послойного наплавления, а также акт внедрения результатов диссертационного исследования в образовательный процесс Тверского государственного технического университета.

Научная новизна работы заключается в следующем.

Разработан метод автоматизированного управления процессом послойного электродугового наплавления и установка для его реализации, состоящая из портального манипулятора с ЧПУ и источника питания электрической дуги.

Разработана математическая модель температурного поля в процессе послойного электродугового наплавления присадочной проволоки, учитывающая поэтапное увеличение высоты конструкции, сложные начальные и граничные условия, зависимость теплофизических свойств металла от его температуры, возможность охлаждения металла на этапе межслойной выдержки.

Разработана структура двухконтурной автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства и программа для моделирования и оптимизации температурно-временного режима, расчета траектории и последовательности наплавления слоев изделия.

Практическая ценность результатов диссертационной работы подтверждается работоспособностью разработанной программы моделирования и оптимизации параметров послойного наплавления, а также успешной апробацией двухконтурной автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства совместно с главными техническими специалистами АО «Завидовский экспериментально механический завод». Результаты диссертационной работы Какорина Д.Д. используются в учебном процессе ФГБОУ ВО ТвГТУ на кафедре «Технология металлов и материаловедение» при проведении лекционных и практических занятий у студентов инженерных специальностей.

Достоверность и обоснованность полученных результатов диссертационной работы Какорина Д.Д. обеспечивается адекватным применением методов анализа автоматизированных систем управления, математической физики, теории теплообмена, математического моделирования, разработки программного обеспечения, численной оптимизации. Положения диссертации и полученные автором результаты прошли апробацию на российских и международных научных и научно-практических конференциях и выставках. Результаты диссертации представлены в 15 научных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых журналах ВАК. Автором также получены 4 патента на изобретение и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Замечания по диссертационной работе

1. Автором не приведено сравнение точности изготавливаемых деталей электродуговой наплавкой и аналогичными способами аддитивного производства.

2. Температура наплавленного металла принимается равной температуре расплавленного металла, при этом не ясно, как учитывалось тепло, передаваемое в зону наплавления электрической дугой.

3. Отсутствует оценка точности расчетов программой для изделий, высота которых превышает экспериментальную.

4. Не приведена оценка вклада радиационного теплообмена поверхности изделия с окружающими телами при расчете температурного распределения.

5. В предложенной системе управления процессом аддитивного производства недостаточно описан механизм реализации работы лазерного 3D сканера и механизм передачи данных с него на персональный компьютер инженерно-технического работника.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы Какорина Даниила Дмитриевича.

Заключение

Диссертационная работа Какорина Д.Д. «Автоматизация технологического процесса аддитивного производства металлических изделий послойной электродуговой наплавкой» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, соответствует паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки). Решенная в работе задача имеет важное значение для создания автоматизированных систем управления технологическим процессом аддитивного производства металлических изделий. Содержание автореферата соответствует диссертационной работе, а разработанные методы, алгоритмы и программы имеют научное и прикладное значение.

Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ, а её автор, Какорин Даниила Дмитриевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата

технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Официальный оппонент:

Заместитель генерального директора по
научно-исследовательской деятельности
АО «Национальный институт авиационных
технологий» (АО НИАТ),
кандидат технических наук



А.В. Коваленко

«02» июня 2025 г.

Коваленко Артем Валерьевич
Почтовый адрес: 117587, г. Москва,
ул. Кировоградская, д. 3
Телефон: +7 (495) 312-11-49
e-mail: avk@niat.ru

Подпись Коваленко А.В. заверяю
Первый заместитель
генерального директора АО НИАТ,
д.т.н., профессор



В.В. Плихунов