

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и цифровому развитию
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)», доктор экономических наук,
профессор Дроговоз Павел Анатольевич



(подпись)

(дата, м.п.)

2025 г.

Отзыв

ведущей организации Федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э.
Баумана (национальный исследовательский университет)»
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 диссертационного исследования

В машиностроительном производстве к настоящему времени сложились следующие особенности:

- перевод значительного объема выпуска наукоемкой продукции на предприятия серийного и мелкосерийного типов производств;
- дефицит квалифицированных трудовых ресурсов, занятых в реальном производстве;
- быстрое моральное старение машиностроительной продукции;
- ограниченное применение штучных заготовок в единичном и

мелкосерийном производстве, традиционно получаемых методами литья и обработкой давлением при значительных и стабильных объемах производства. Это приводит к необходимости применения заготовок из сортового проката с увеличенными напусками, что вызывает увеличение трудоемкости циклов механической обработки.

Таким образом, можно говорить об имеющемся в машиностроении противоречии между необходимостью оперативного выпуска новых наукоемких изделий требуемого качества в необходимом количестве в нужные сроки и удлинением технологического цикла изготовления деталей.

Актуальность настоящего диссертационного исследования, направленного на разрешение указанного противоречия, определяется задачами повышения эффективности машиностроительного производства за счёт интеллектуализации инженерного труда на базе цифровых технологий в промышленности и применения высокопроизводительных заготовительных технологий (в частности, реализуемых с помощью роботов).

Таким образом, становится понятной актуальность проблемы разработки автоматизированной системы и программных средств, позволяющих на основе автоматизации решения проектных задач повысить эффективность технологического процесса аддитивного производства металлических изделий и качество получаемой продукции.

С этой точки зрения, вполне справедливым является предложенный автором подход к повышению эффективности машиностроительного производства путем разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом и программных средств для определения оптимального температурно-временного режима и траектории послойного наплавления, обеспечивающих стабильное качество внутренней структуры и геометрической формы наплавленного металла.

Исходя из вышеизложенного, диссертационное исследование Какорина Даниила Дмитриевича, направленное на выявление новых технологических зависимостей и разработку научно обоснованных методик определения

параметров технологического процесса послойного наплавления элементов детали, обеспечивающего заданные требования к качеству поверхностей исходной заготовки, представляется актуальным и востребованным современным машиностроением.

Актуальность исследования подтверждается также тем, что его направленность на развитие перспективных технологий в автоматизированном проектировании, производственных процессах и системах управления соответствует Национальной программе «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденной протоколом заседания президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам от 4 июня 2019 г. № 7, федеральному проекту «Цифровые технологии».

Целью рассматриваемой диссертационной работы является повышение эффективности процесса аддитивного производства металлических изделий за счет разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом и программы для определения оптимального температурно-временного режима и траектории послойного наплавления, обеспечивающих стабильное качество внутренней структуры и геометрической формы наплавленного металла.

В диссертационной работе были решены следующие научные задачи:

- проведен обзор существующих способов аддитивного производства, методов их моделирования и автоматизации, выделены области применения, основные преимущества и недостатки;

- разработаны: а) способ и установка для автоматизированного управления процессом аддитивного производства металлических изделий на основе электродугового наплавления присадочной проволоки; б) программа для моделирования и автоматизации процесса послойного электродугового наплавления, позволяющая рассчитывать температурное поле в наплавленном металле с учетом изменяющихся размеров и теплофизических

свойств изделия;

- выполнен анализ и разработана структурная схема автоматизированного управления процессом послойного наплавления металла;

- определена точность результатов моделирования и разработан модуль идентификации параметров теплообмена в процессе автоматизированного послойного электродугового наплавления в зависимости от исходных данных процесса наплавления и установленных граничных значений температур;

- разработана структура автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства и произведена практическая апробация разработанной автоматизированной системы управления и программы на примере технологической подготовки процесса аддитивного производства реального металлического изделия.

Анализ структуры и содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 120 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 158 страницах, содержит 56 рисунков и 17 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность исследования, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе проведен обзор основных способов аддитивного производства. Рассмотрены области их применения, достоинства и недостатки. Исследован технологический процесс послойного электродугового наплавления металлических изделий, проанализированы научные подходы к моделированию процессов аддитивного производства.

Вторая глава посвящена методам моделирования температурных полей в металлических изделиях. Обоснованы преимущества численных методов расчета температурного поля в двухмерных пространственных

координатах, позволяющих учесть геометрическую форму наплавляемого изделия, зависимость теплофизических свойств стали от её температуры, конвективно-радиационный теплообмен поверхности наплавленной конструкции с окружающей средой. Разработанная методика расчета позволяет определять изменение температуры наплавляемого изделия как при добавлении новых частей присадочного металла в процессе наплавления слоя, так и при охлаждении всей конструкции на этапе отдыха с учетом принудительной конвекции. Разработана структурная схема процесса наплавления слоя как объекта управления. Выявлены цель управления, входные и выходные переменные, а также возмущающие и управляющие воздействия системы.

В третьей главе произведена корректировка программы на основе сравнительного анализа расчётных и экспериментальных значений температур. Выполнены моделирование температурного поля с исходными данными, соответствующими эксперименту, сравнение экспериментальных и расчетных значений температур и идентификация параметров модели. Результаты моделирования с идентифицированными параметрами теплообмена показали хорошее совпадение расчетных и экспериментальных температур.

В четвертой главе разработана автоматизированная система управления технологическим процессом аддитивного производства. Дана постановка задачи управления, заключающаяся в составлении такой траектории движения сварочной горелки, при которой время, затрачиваемое на наплавление всех элементов изделия, будет минимальным при условии, что температура наплавленного металла соответствует установленным граничным значениям на всех этапах аддитивного производства. Показаны результаты практической апробации разработанной методики проектирования операции аддитивного наплавления.

В заключении представлены выводы, адекватно отражающие результаты диссертационного исследования.

В диссертации отражены все аспекты проведенного исследования, название работы полностью соответствует её направлению и содержанию. Диссертация написана грамотным техническим языком и имеет логичную структуру, отражающую ход мыслей автора.

Автореферат полностью соответствует сути выполненного исследования и отвечает содержанию диссертации.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них: 4 статьи в российских научных журналах из перечня ВАК для специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами и одна по смежной специальности, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 5 статей в сборниках научных трудов, 4 патента.

Методы исследования базируются на теории автоматизированного управления, теории алгоритмов, математической статистике, теории теплообмена, а также на методах численного и физического эксперимента, компьютерного моделирования и численной оптимизации.

Апробация результатов осуществлялась на ряде российских и международных научных, научно-технических и научно-практических конференций. Результаты участия в этих мероприятиях свидетельствуют о том, что основные положения диссертации были представлены соискателем в необходимом объеме.

Теоретическая значимость, научная новизна и практическая ценность результатов исследования

Теоретическая значимость результатов данного исследования заключается, прежде всего, в выявлении новых технологических закономерностей протекания автоматизированного процесса аддитивного наплавления, реализуемых при технологической подготовке производства в системе.

Знание этих закономерностей позволяет сократить трудоемкость

выполнения работ по подготовке производства, обеспечить заданные параметры качества изделия на этапе проектирования операций аддитивной наплавки с использованием промышленных роботов.

Таким образом, **теоретическая значимость** результатов исследования, по нашему мнению, заключается в установлении взаимосвязей между организационно-техническими условиями реализации автоматизированного технологического процесса аддитивной наплавки в производственной системе; параметрами технологической системы, в которой выполняется послойное наплавление металлических изделий, и параметрами качества деталей.

Можно согласиться с автором диссертационного исследования в том, что **научная новизна** результатов работы заключается в следующих аспектах:

- в разработанном новом методе автоматизированного управления процессом послойного электродугового наплавления и установки для его реализации, состоящей из портального манипулятора с ЧПУ и источника питания электрической дуги;
- в предложенной новой математической модели температурного поля в процессе послойного электродугового наплавления присадочной проволоки, учитывающей поэтапное увеличение высоты конструкции, сложные начальные и граничные условия, зависимость теплофизических свойств металла от его температуры, возможность охлаждения металла на этапе межслойной выдержки;
- в разработанных двухконтурной автоматизированной системе управления технологическим процессом аддитивного производства и программе для моделирования и оптимизации температурно-временного режима, расчета траектории и последовательности наплавления слоев изделия.

Указанные положения новизны позволяют говорить о создании научно-обоснованной методики определения параметров технологического процесса

наплавления, включающей расчет температурно-временного режима, траектории и последовательности послойного наплавления в зависимости от текущей температуры и геометрии наплавленного слоя и детали.

Практическая ценность результатов исследования заключается в том, что они способствуют повышению эффективности мелкосерийного и единичного машиностроительного производства за счет возможности получения предлагаемых технологией штучных заготовок, форма которых приближена к форме и размерам детали, и как следствие, сокращения объема механической обработки.

Следует отметить внедрение результатов исследований, подтвержденных соответствующими документами, в практику работы проектных и производственных предприятий, а также в учебный процесс.

Достоверность и обоснованность положений, выводов и результатов диссертации

Достоверность полученных результатов и выводов работы подтверждается корректной постановкой цели и задач исследования. В диссертации использовался современный научный и математический и физический аппарат, а также методы теоретического и экспериментального исследования, основные положения работы согласованы между собой.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, могут быть использованы для изготовления опытных образцов и прототипов при выполнении НИОКР, для изготовления заготовок для изделий мелкосерийного и единичного производства, а также служить в качестве математического, алгоритмического и программного обеспечения при разработке подобных систем автоматизированного управления.

Замечания по диссертационной работе

1. В тексте работы отсутствует конкретная формулировка допущений и ограничений, которые принимает автор. Из текста диссертации неясно, как записываются и учитываются граничные условия для текущего временного слоя и текущего геометрического состояния, нет зависимостей, учитывающих изменения массы изготавливаемого изделия и условий теплообмена.

2. В работе фактически совершается переход от континуальной задачи к дискретной, от стохастического процесса к детерминированному. Однако, отсутствует обоснование допущения, о возможности измерения температуры не по всей длине наплавляемого слоя, а только в средней точке.

3. Отсутствует обоснование выбора в качестве численного метода для расчета метода конечных разностей (глава 2) и его преимуществ для решения рассматриваемой в работе задачи в сравнении с методом конечных элементов и методом расчета по точным очертаниям.

4. В главе 4 отсутствует разъяснение: за счет чего и как удалось сократить затраты на амортизацию оборудования и оплату труда работников на 91,9% (!?).

Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки работы, а носят рекомендательный характер.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Какорина Даниила Дмитриевича **«Автоматизация технологического процесса аддитивного производства металлических изделий послойной электродуговой наплавкой»** выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-квалификационной работой, в которой предложено новое решение актуальной для автоматизированного производства задачи – обеспечения качества изделий машиностроения на стадии автоматизированного проектирования эффективных и производительных автоматизированных

операций производства заготовок деталей аддитивной электродуговой наплавкой.

Диссертационная работа по актуальности, научной новизне и практической значимости полностью отвечает требованиям п.п. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней (ред. от 16.10.2024 г.), а её автор, Какорин Даниил Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Отзыв на диссертационную работу Какорина Д.Д. рассмотрен, обсужден и одобрен на заседании кафедры РК9 «Компьютерные системы автоматизации производства» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», протокол № 04.48-04/10 от 30.05.2025 г.

Заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства»,
д.т.н., профессор



30.05.2025 г.

Сергей Сергеевич Гаврюшин

Доцент кафедры
«Компьютерные системы автоматизации
производства»,
к.т.н.



30.05.2025 г.

Мария Николаевна Королева

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1

Телефон: +7(499) 263-63-91

Факс: +7 (499) 267-48-44

e-mail: bauman@bmstu.ru

<https://bmstu.ru>

