На правах рукописи

**Какорин Даниил Дмитриевич**

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОСЛОЙНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»)

Научный руководитель: Марголис Борис Иосифович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов» ФГБОУ ВО «ТвГТУ»

Официальные оппоненты: Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологий производства двигателей федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования (ФГАОУ ВО) «Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева», г. Самара

Коваленко Артем Валерьевич, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской деятельности акционерного общества «Национальный институт авиационных технологий» (АО НИАТ), г. Москва

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Защита состоится «24» июня 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.410.01 в ФГБОУ ВО «ТвГТУ» по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тверского государственного технического университета и на сайте www.tstu.tver.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 20___ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор С.М. Дзюба

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Автоматизация технологических процессов в машиностроительном производстве всегда являлась одной из наиболее важных научно-технических задач. Значительный вклад в развитие теории автоматизации технологических процессов механической обработки и сборки в машиностроении внесли Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Ковальчук Е.Р., Косов М.Г., Волчкевич Л.И. и др. Однако, вопросы автоматизации операций, не связанных с обработкой резанием и сборкой, в частности, аддитивного производства исследованы недостаточно.

В настоящее время для производства большинства металлических изделий и заготовок в машиностроении используются различные традиционные технологии, включающие литьё металлов, обработку металлических заготовок давлением или резанием. Данные способы хорошо зарекомендовали себя в условиях серийного и массового производства, однако их применение для изготовления единичных деталей и прототипов приводит к существенным материальных затратам и увеличению себестоимости продукции.

Для устранения существующих недостатков традиционных технологий разработаны способы аддитивного производства металлических изделий, основанные на принципе послойного добавления присадочного материала. Наиболее перспективным с точки зрения производительности является способ, основанный на электродуговом наплавлении присадочной проволоки.

Одним из наиболее значимых этапов технологической подготовки процесса аддитивного производственного является подбор температурно-временного режима (ТВР), расчёт траектории и последовательности послойного наплавления, обеспечивающих гарантированное качество сплавления основного и присадочного металла, равномерное распределение внутренних напряжений, минимально возможные деформации и заданные геометрические размеры изделия.

В настоящее время подбор ТВР осуществляется экспериментальным путем и сопровождается значительными затратами трудовых и материальных ресурсов. Увеличить эффективность процесса возможно за счет разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства.

Существенный вклад в исследование режимов аддитивного производства внесли ученые М.А. Крампит, М.А. Кузнецов, В.И. Данилов и Д.А. Чиханов. В их трудах описано влияние режимов электродугового наплавления на геометрические размеры и механические свойства наплавленного металла. Рыльковым Е.Н. и Курушкиным Д.В. разработана конечно-элементная модель тепловых процессов при послойном электродуговом наплавлении для оценки деформаций и напряжений в наплавленном металле. Хаустовым С.В., Харламовым В.О. и Кузьминым С.В. разработано учебное пособие, посвященное численному моделированию тепловых процессов в сварочном производстве. Также в разработку теоретических и практических основ послойного электродугового наплавления металлических изделий свой вклад

внесли ученые Чинахов Д.А., Панченко О.В., Коржик В.Н., Коротеев А.О., Ловшенко Ф.Г., Довбыш В.М., Жаткин С.С., Чемодуров А.Н., Щицын Ю.Д., Сметанников О.Ю., Григоренко В.А. и др.

В данной диссертации, в отличие от вышеуказанных работ, предложен способ автоматизации аддитивного производства металлических изделий на основе электродугового наплавления присадочной проволоки. Для автоматизации операций предложена система двухконтурного автоматизированного управления технологическим процессом, разработана программа для моделирования температурного поля и оптимизации ТВР послойного наплавления с учетом изменяющейся геометрической формы и размеров изделия, добавления новых частей конструкции на этапе наплавления, параметров источника электрической дуги, принудительного охлаждения наплавленного металла на этапе межслойной выдержки, различных условий теплообмена, зависимости теплофизических свойств стали от температуры.

Таким образом, разработка автоматизированной системы и программных средств, позволяющих повысить эффективность технологического процесса аддитивного производства металлических изделий и качество получаемой продукции, является актуальной научной задачей.

**Цель работы** заключается в повышении 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.

Для достижения цели исследования сформулированы и решены следующие **задачи:**

1. Проведен обзор существующих способов аддитивного производства, методов их моделирования и автоматизации, выделены области применения, основные преимущества и недостатки.
2. Разработаны способ и установка для автоматизированного управления процессом аддитивного производства металлических изделий на основе электродугового наплавления присадочной проволоки.
3. Разработана программа для моделирования и автоматизации процесса послойного электродугового наплавления, позволяющая рассчитывать температурное поле в наплавленном металле с учетом изменяющихся размеров и теплофизических свойств изделия.
4. Выполнен анализ и разработана структурная схема автоматизированного управления процессом послойного наплавления металла как объектом управления.
5. 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.

6. Разработана структура автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства с учетом программы моделирования температурного поля, оптимизации температурно-временного режима и расчета траектории послойного наплавления.

7. Произведена практическая апробация разработанной автоматизированной системы управления и программы на примере технологической подготовки процесса аддитивного производства реального металлического изделия.

**Объектом исследования** является автоматизированный технологический процесс аддитивного производства металлических изделий различной геометрической формы и размеров.

**Предметом исследования** является автоматизация технологического процесса послойного электродугового наплавления присадочной проволоки, а также температурное поле и алгоритмы расчета оптимального температурно-временного режима, траектории и последовательности наплавления слоев в процессе аддитивного производства металлических изделий.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применяются методы анализа автоматизированных систем управления, разработки и конструирования автоматизированных установок с ЧПУ, экспериментального исследования параметров наплавленного металла, математической физики, теории теплообмена, математического моделирования, разработки программного обеспечения, численной оптимизации.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

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

2. 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.

3. 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** диссертационного исследования заключается в разработке автоматизированной технологии аддитивного производства металлических изделий с двухконтурной системой управления процессом на основе программы для моделирования температуры наплавляемого металла. Полученная программа позволяет осуществлять расчет температурного поля как в процессе наплавления слоя, так и во время его межслойной выдержки с учетом принудительного воздушного охлаждения, а также определять оптимальные параметры температурно-временного режима и траекторию

послойного наплавления. Методы расчета реализованы в среде математического программирования MatLab. Для подтверждения работоспособности автоматизированной системы управления отработан этап технологической подготовки аддитивного производства и проведено экспериментальное наплавление металлического образца с записью температуры каждого наплавленного слоя. Результаты измерений подтвердили хорошее совпадение расчетных значений температур металла с экспериментальными. Разработанная система управления и программа применяются в лаборатории кафедры ТМиМ ТвГТУ для изготовления опытных образцов, единичных изделий, прототипов при выполнении НИОКР по различным направлениям. Научные результаты работы используются при проведении учебных занятий по дисциплинам «Технология конструкционных материалов», «Материаловедение», «Теория сварочных процессов» и «Оборудование сварочного производства» для студентов различных направлений и специальностей.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Двухконтурная автоматизированная система управления технологическим процессом аддитивного производства металлических изделий послойной электродуговой наплавкой.
2. Математическая модель температурного поля в металлических изделиях, учитывающая добавление новых частей металла, сложные граничные условия, зависимость теплофизических свойств стали от температуры, принудительное охлаждение наплавленного металла на этапе межслойной выдержки, необходимость идентификации параметров теплообмена.
3. Методика определения параметров технологического процесса наплавления, включающая расчет температурно-временного режима, траектории и последовательности послойного наплавления в зависимости от текущей температуры и геометрии наплавленного слоя и детали.

**Соответствие паспорту специальности.** Научная работа соответствует паспорту научной специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» в пунктах 1 и 4.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов определяется корректностью используемого при описании полей температур в металле дифференциального уравнения теплопроводности в двухмерных пространственных координатах с неравномерным начальным температурным распределением и несимметричными граничными условиями конвективно-радиационного теплообмена. Результаты расчета температур по предложенным в работе моделям хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Для обоснования практической значимости исследования разработан технологический процесс аддитивного производства башмака дискового тормоза. В результате технологической подготовки производства получен ТВР, последовательность и траектория наплавления слоев, обеспечивающие заданную температуру и геометрию изделия. Наплавка образца и оценка его качества были выполнены в лаборатории кафедры ТМиМ ТвГТУ.

**Апробация результатов.** Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XI Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» (Курск, 2021 г.), Всероссийской молодежной конференции «Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки» (Саратов, 2022 г.), XI и XIII Специализированной выставке «Молодой изобретатель-рационализатор (Тверь, 2020 и 2022 г.), XX Специализированной выставке «Изобретатель и рационализатор» (Тверь, 2023 г.), Всероссийском конкурсе «Инженер года» (Москва, 2023 г.), XXVI и XXVII Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед 2023» и «Архимед 2024» (Москва, 2023 и 2024 г.), а также в ходе защиты инновационных проектов в рамках гранта «УМНИК 2023» и акселерационной программы «Техностарт» (Тверь, 2023 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 публикации в ведущих журналах из перечня изданий ВАК, отнесенных к категориям К-1 и К-2 по научной специальности 2.3.3, получено 4 патента на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**В первой главе** «Технологии аддитивного производства металлических изделий и методы их моделирования» проведен обзор современных способов аддитивного производства. Рассмотрены области их применения, преимущества и недостатки. Установлено, что технология электродугового наплавления присадочной проволоки (рис. 1) отличается большей производительностью и имеет высокий потенциал промышленной реализации.

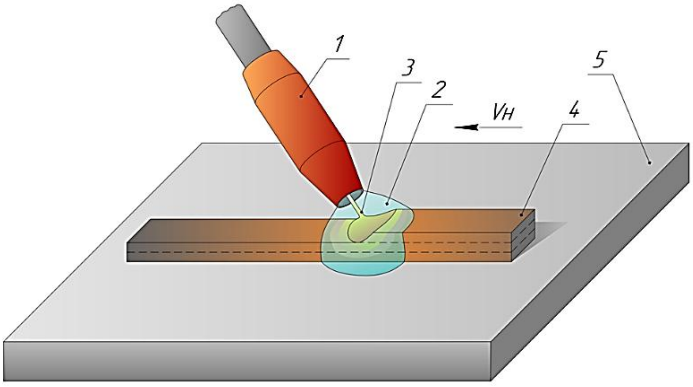


Рис. 1. Технология электродугового наплавления присадочной проволоки:
1 – горелка; 2 – газовая атмосфера; 3 – присадочная проволока;
4 – наплавленный металл; 5 – металлическое основание

Рассмотрен технологический процесс послойного электродугового наплавления металлических изделий. Отдельное внимание уделено выбору режима наплавления, его влиянию на внутреннюю структуру и геометрическую форму наплавленного металла. Дано описание установки для автоматизированной 3D печати металлических изделий, включая технические характеристики аппарата для электродуговой наплавки Fronius TPSi CMT и портального манипулятора с ЧПУ (рис. 2).

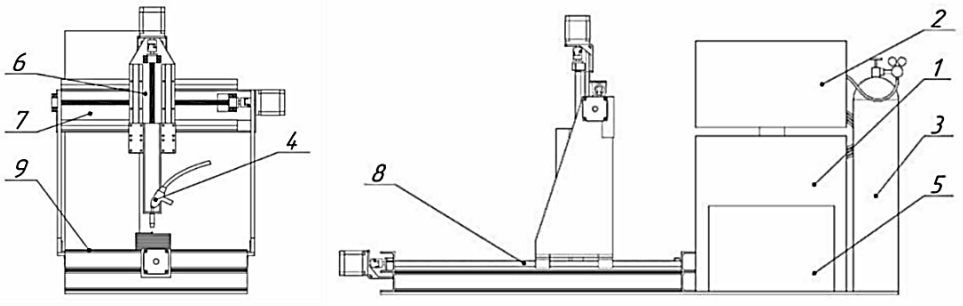


Рис. 2. Установка для 3D печати: 1 – источник тока; 2 – блок управления источником тока; 3 – защитный газ; 4 – сварочная горелка; 5 – ПК; 6, 7, 8 – координаты X, Y, Z; 9 – рабочий стол

Проанализированы современные подходы к моделированию процессов аддитивного производства и определен ряд недостатков:

1. Большинство существующих методов моделирования разработано с применением специализированных программ, не предназначенных для использования в системах автоматизированного управления.
2. Применение готовых программных продуктов для моделирования процессов аддитивного производства приводит к значительных материальным затратам на приобретение лицензионного ПО и обучения работников.
3. Отсутствие методов моделирования температурных полей в металлических изделиях при их аддитивном производстве, учитывающих изменяющиеся параметры режима электродугового наплавления, геометрические размеры и теплофизические свойства наплавленного металла.
4. Значительная часть работ направлена на исследование технологий аддитивного производства, основанных на лазерных источниках тепловой энергии в совокупности с порошковым присадочным материалом.

Таким образом, поставленная цель диссертационной работы, заключающаяся в повышении эффективности процесса аддитивного производства металлических изделий за счет разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом и программы для моделирования температурного поля, является актуальной научной задачей.

Во **второй главе** «Автоматизация процесса послойного электродугового наплавления металла» рассмотрены методы 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 и

конвективно-радиационный теплообмен поверхности наплавленной конструкции с окружающей средой.

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности используется явная конечно-разностная схема. Точки изделия образуют сетку в вертикальном и горизонтальном направлениях с шагом $\Delta L = 0{,}001$ м, основание и наплавляемый слой разбиваются на заданное число частей $N_1$, $N_2$, $N_3$ (рис. 3).

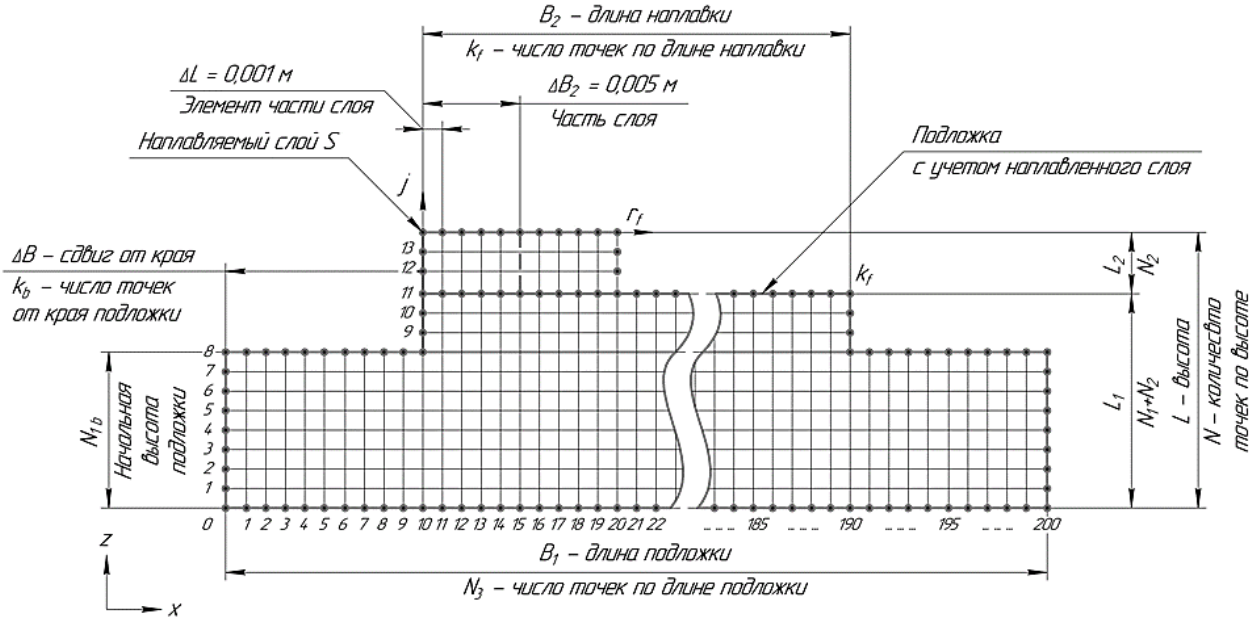


Рис. 3. Двухмерная сетка наплавляемой конструкции

Для повышения быстродействия расчета температурного поля в изделии вводятся коэффициенты: $GT = \Delta\tau \cdot a/(\Delta L)^2$, $GT_2 = 2GT$ теплопроводности для внутренних и граничных точек изделия; $GC = GT_2 \cdot a \cdot \Delta L)/\lambda$, $GC_2 = GT_2 \cdot a_2 \cdot \Delta L/\lambda$ естественной и вынужденной конвекции; $GR_1 = GT_2 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot \Delta L/\lambda$, $GR_2 = GT_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot \Delta L/\lambda$ радиационного теплопереноса для граничных точек нижней и верхней поверхностей. Сначала рассчитываются температуры по высоте конструкции для внутренних точек

$$T_{i+1}(j,r) = T_i(j,r) + GT \cdot (T_i(j-1,r) - 2T_i(j,r) + T_i(j+1,r)), \quad (1)$$

для нижней границы

$$T_{i+1}(0,r) = T_i(0,r) + GT_2 \cdot (T_i(1,r) - T_i(0,r)) + GC \cdot (T_c - T_i(0,r)) + \\ + GR_1 \cdot (T_k - (T_i(0,r) + K)^4) \quad (2)$$

и верхней границы наплавленного слоя

$$T_{i+1}(N,r) = T_i(N,r) + GT_2 \cdot (T_i(N-1,r) - T_i(N,r)) + GC \cdot (T_c - T_i(N,r)) + \\ + GR_2 \cdot (T_k - (T_i(N,r) + K)^4). \quad (3)$$

Затем определяется температурное распределение в оставшихся точках основания по высоте. На следующем шаге определяется температурное распределение по длине исходного основания. Для внутренних точек

$$T_{i+1}(j,r) = T_{i+1}(j,r) + GT \cdot (T_i(j,r-1) - 2 \cdot T_i(j,r) + T_i(j,r+1)), \quad (4)$$

для левой границы

$$T_{i+1}(j,0) = T_{i+1}(j,0) + GT_2 \cdot (T_i(j,1) - T_i(j,0)) + GC \cdot (T_c - T_i(j,0)) + \\ + GR_1 \cdot (T_k - (T_i(j,0) + K)^4) \quad (5)$$

и правой границы

$$T_{i+1}(j,N_3)=T_{i+1}(j,N_3)+GT_2\cdot(T_i(j,N_3-1)-T_i(j,N_3))+ \\ +GC\cdot(T_c-T_i(j,N_3))+GR_1\cdot(T_k-(T_i(j,N_3)+K)^4). \quad (6)$$

Далее находятся температуры по длине наплавленного слоя, ставшего основанием. Последним шагом рассчитывается температурное распределение по длине наплавляемого слоя с учетом добавления новых частей металла.

Следующим этапом послойного наплавления является межслойная выдержка наплавленного металла с целью снижения его температуры и предотвращения образования дефектов геометрии изделия.

Для учета зависимости теплофизических свойств стали от температуры программой осуществляется корректировка коэффициентов теплопроводности $\lambda$ и теплоемкости $C$ по средней температуре конструкции.

Приведенная 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.

С учетом полученной модели определена структура программы для моделирования процесса послойного наплавления, включающая модули:

1. Ввода исходных данных о наплавляемом изделии и начальном режиме послойного наплавления ($L$, $L_1$, $L_2$, $\Delta L$, $B_1$, $B_2$, $\Delta B$, $d_{пр}$, $v_н$, $\tau$, $\tau_в$, $\alpha$, $\alpha_2$).
2. Расчета теплофизических свойств металла ($\lambda$, $\alpha$, $C$) в зависимости от его температуры.
3. Определения граничных значений температуры металла $T_{гр}$.
4. Расчета полей температур в наплавляемом изделии $T$.
5. Идентификации параметров теплообмена ($w_1$, $w_2$, $\alpha_2$), обеспечивающих минимальное отклонение расчетных и экспериментальных значений температур

$$\left|T_p(j^*,r^*,i^*)-T_э(j^*,r^*,i^*)\right|\le 0{,}1^\circ C, \quad (7)$$

где $j^*$ и $r^*$ – индексы характерной точки измерения температуры металла по высоте и длине изделия; $i^*$ – конечный момент времени наплавления слоя.

6. Определения оптимального ТВР. Температурными параметрами режима являются сила тока $I$, напряжение электрической дуги $U$ и скорость движения рабочего органа $v_н$. Временными параметрами являются длительность наплавления слоя $\tau_н$, время межслойного выдержки $\tau_в$ и общее время послойного наплавления $\tau$.

Корректировка параметров режима послойного наплавления производится на основании соответствия расчетной температуры металла $T$ граничным значениям температур $T_{гр}$. Критерий подбора оптимального ТВР процесса послойного наплавления металла сформулирован в следующем виде:

$$\sum_{k=1}^{m}\left|T_p(j^*,r^*,i_{f_k})-T_{гр}(j^*,r^*,i_{f_k})\right|\to\min, \quad (8)$$

где $i_{f_k}$ – временная точка окончания выдержки после наплавления слоя.

Приведенный критерий показывает необходимость обеспечения минимального отклонения расчетных температур от их граничных значений.

Для организации автоматизированного управления аддитивным производством разработана структурная схема процесса наплавления слоя как объекта управления (рис. 4).

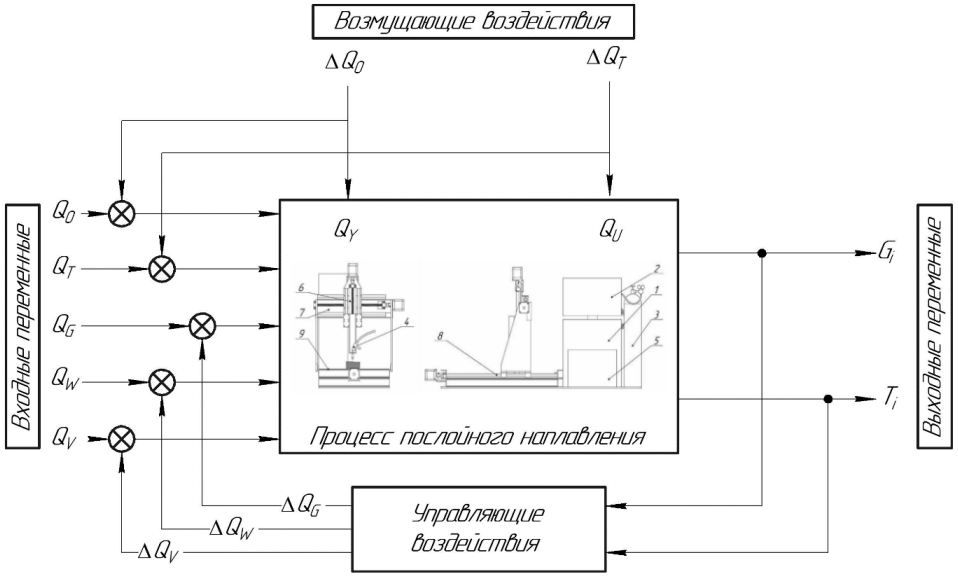


Рис. 4. Схема технологического процесса аддитивного производства как объекта управления

Определены цель управления, входные и выходные переменные, а также возмущающие и управляющие воздействия системы. Для эффективного управления процессом предложено использовать два выходных параметра – температуру $T_i$ и геометрию наплавленного слоя $G_i$. Индексы при управляющих переменных *V*, *W* и *G* относятся к скорости движения рабочего органа, скорости вращения вентилятора принудительного охлаждения, траектории и последовательности наплавления слоев. Индексы при возмущающих воздействиях *O* и *T* характеризуют изменение начальной температуры окружающей среды и основания и теплофизических характеристик наплавляемого металла.

В **третьей главе** «Экспериментальное определение технологических параметров послойного электродугового наплавления» произведена корректировка программы на основе сравнительного анализа расчётных и экспериментальных значений температур.

Послойное наплавление экспериментального образца длиной $B_2$ = 70 мм и высотой $L$ = 12 мм проводилось с записью температуры металла во время охлаждения. Наплавляемый материал – сварочная проволока марки 08Г2С Ø 1,2 мм, основание – металлическая пластина толщиной $L_1$ = 6 мм, длиной $B_1$ = 125 мм. Начальная температура $T_0$ = 20 ºС. Значения температур металла в конце наплавления *1* и межслойной выдержки *2* представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментального наплавления

| № | t, сек | Номер и температура наплавленного слоя, ºС | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| *1* | 0 | 263,1 | 275,0 | 282,3 | 287,1 | 295,0 | 298,1 |
| *2* | 120 | 51,1 | 61,9 | 65,1 | 67,3 | 72,6 | 72,8 |

Далее производилось моделирование температурного поля с исходными данными, соответствующими эксперименту. Моделирование температурного поля на этапах наплавления и межслойной выдержки выполняется функциями *TempSurfacing* и *TempRest*. Для учета зависимости теплофизических свойств стали от температуры предусмотрена функция *TempDepend*.

В диалоговом окне программы отображаются введенные геометрические размеры и теплофизические свойства изделия, а также представляются результаты моделирования в числовом и графическом виде для каждого наплавленного слоя (рис. 5).

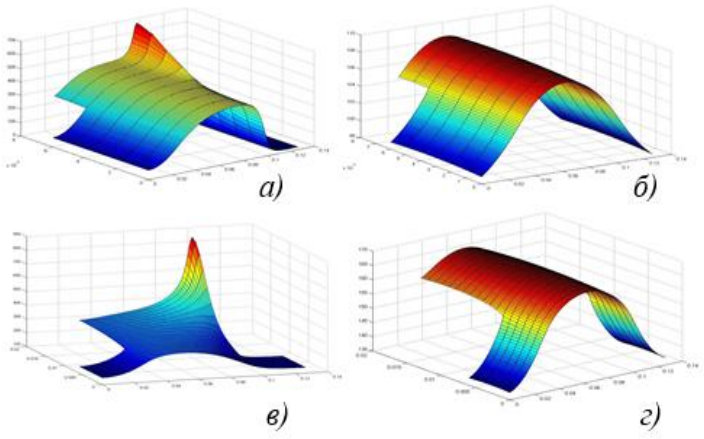


Рис. 5. Температурное поле для 1-го (а, б) и 6-го (в, г) слоев:
*а)* и *в)* конец этапа наплавления; *б)* и *г)* конец этапа отдыха

На основе полученных результатов выполнено сравнение экспериментальных и расчетных значений температур, в ходе которого установлено, что моделируемые значения температур, в зависимости от рассматриваемого этапа, превышают экспериментальные показатели на 15-50%. Наибольшее отклонение (141 ºС) наблюдается в конце наплавления первого слоя, что связано с большей интенсивностью распределения тепла по толщине массивного металлического основания.

Для устранения выявленного расхождения температур в программу добавлены функции *Iden1* идентификации весовых коэффициентов теплопроводности $w_1$ и $w_2$, определяющих формирование температуры в граничной точке, и *Iden2* для определения коэффициента вынужденной конвекции $\alpha_2$ на этапе отдыха.

Идентификация параметров осуществляется стандартным методом Matlab *fminbnd*, сочетающим методы золотого сечения и параболической интерполяции. Весовые коэффициенты идентифицируются с точностью *TolX=0,001* до достижения хорошего совпадения расчетных и экспериментальных значений температур. Для этапа отдыха идентифицируются значения коэффициентов конвективного теплообмена $\alpha_2$ с точностью *TolX=1*.

Желаемые значения температур в конце наплавления слоя *Tmelt* и после технологической выдержки *Trest* записываются в файл Excel и загружаются в программу. Результаты идентификации представляются в диалоговом окне программы (рис. 6).

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| w1 | 0.8544 | 0.7536 | 0.6358 | 0.5178 | 0.4047 | 0.3552 |
| alfa2 | 174.9490 | 189.5000 | 219.4920 | 245.8229 | 256.4851 | 277.7172 |
| Tmelt | 263 | 275 | 282 | 287 | 295 | 298 |
| Tmelt_cal | 262.9633 | 275.0379 | 282.0242 | 287.0375 | 295.0003 | 298.0283 |
| Trest | 51 | 62 | 65 | 67 | 72 | 72 |
| Trest_cal | 50.9986 | 62.0204 | 65.0437 | 66.9966 | 71.9687 | 71.9893 |

Рис. 6. Окно программы с результатами идентификации параметров

Результаты моделирования с идентифицированными параметрами теплообмена показали хорошее совпадение расчетных и экспериментальных температур с точностью до 0,1 ºС. Таким образом, применение идентификации позволило учесть массивность металлического основания и получить адекватное распределение температур в наплавляемой конструкции.

В **четвертой главе** «Автоматизация технологического процесса аддитивного производства» приведена структура автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства.

Для постановки задачи автоматизированного управления рассмотрена конструкция изделия $F$, содержащего элементы $a_1$-$a_4$. Каждый наплавляемый элемент разбит на определенное количество слоев $n_{ij}$. Каждый слой имеет точки его начала $M^1_{ij}$ и конца $M^2_{ij}$ с координатами $x^1_{ij}, x^2_{ij}, y^1_{ij}, y^2_{ij}, z^{1\tau}_{ij}, z^{2\tau}_{ij}$. Расстояние между точками окончания $M^2_{1_j}$ слоя $n_{1_j}$ к точке начала $M^1_{2_j}$ слоя $n_{2_j}$ в совокупности со скоростью холостого перемещения рабочего органа $V_{xx}$ определяет время перехода от одного наплавляемого элемента к другому. Длина наплавляемого слоя $l_{i_j}$ отнесенная к скорости послойного наплавления $V_{i_j}$ определяет время наплавления слоя.

Таким образом, задача автоматизированного управления процессом аддитивного производства заключается 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.

Структурная схема двухконтурной автоматизированной системы управления (рис. 8) включает подсистемы моделирования и идентификации параметров теплообмена $I$, моделирования и оптимизации ТВР $M$, выработки управляющего воздействия $U$, исполнительного устройства $Y$, устройств измерения температуры $T$ и контроля геометрии $L$ наплавленного слоя, подсистемы компенсации отклонения траектории $P$.

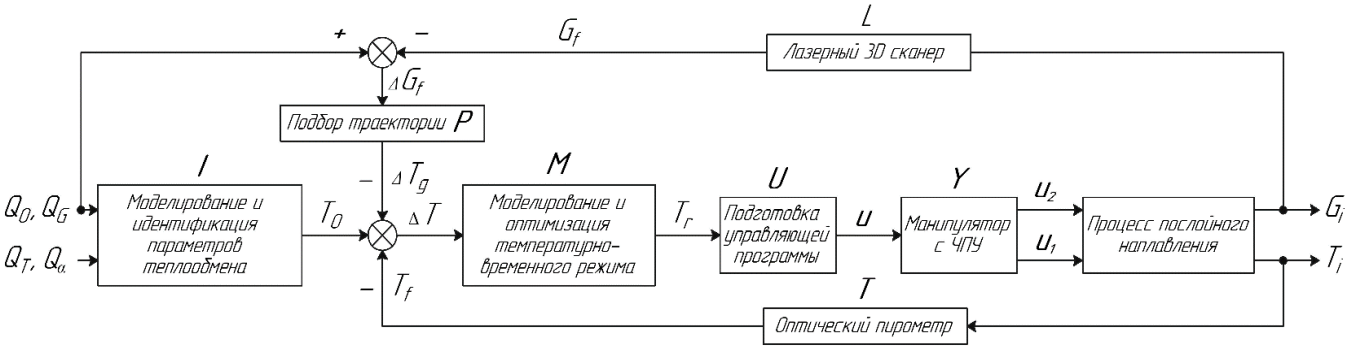


Рис. 7. Схема двухконтурной АСУТП аддитивного производства

Выходными параметрами системы являются значения температур наплавленного металла $T_i$ и геометрии наплавленного слоя $G_i$. Контроль выходных параметров осуществляется на этапе межслойной выдержки. Для измерения температуры металла используется оптический пирометр, контроль геометрии формируемого слоя осуществляется с помощью лазерного 3D сканера, считывающего рельеф поверхности.

Подсистема *M* предназначена для выработки оптимальных параметров ТВР, которые в дальнейшем используются подсистемой *U* для подготовки кода управляющей программы. Код программы представляет набор данных, описывающих траекторию наплавления изделия на основе координат точек начала и окончания слоев.

Для достижения требуемого качества наплавляемого изделия и повышения эффективности послойного наплавления предложены ограничения по температуре наплавленного металла $T_{ij} \leq T_{1гр}$, времени наплавления слоя $\tau_{ij} \rightarrow min$, температуре основания и соседних элементов конструкции $T_o, T_{(i+1)j} \leq T_{2гр}$ и приоритету наплавляемого элемента $n_{ij} \rightarrow a_i(P_i \uparrow)$ которые необходимо учитывать при разработке управляющей программы. Для обеспечения вариантности при разработке траектории используются приоритеты $P_1$ – $P_4$ учитывающие температуру соседних элементов конструкции, время наплавления слоя и время, затрачиваемое на движение холостого хода рабочего органа Соблюдение перечисленных ограничений в процессе разработки траектории и последовательности послойного наплавления обеспечивает гарантированное сплавление основного и присадочного металла, стабильное формирование геометрии слоя и структуры металла.

Полученный код управляющей программы передаётся исполнительному устройству – портальному манипулятору *Y* для выполнения операции послойного наплавления. После наплавления каждого слоя осуществляется контроль его температуры и геометрии. В случае обнаружения отклонений от установленных значений производится перерасчет параметров ТВР, траектории или последовательности наплавления оставшихся слоев.

Основой расчетных операций в автоматизированной системе управления технологическим процессом аддитивного производства является программа моделирования температурного поля и подбора оптимального ТВР аддитивного производства (рис. 8), функционирующая по следующим сценариям:

1. Моделирование температурного поля без идентификации параметров теплообмена (*iden = 0)*. В данном случае исходные данные о наплавляемом изделии соответствуют данным эксперимента, а расчет осуществляется с известными значениями весовых коэффициентов $w_1$, $w_2$ и коэффициента вынужденной конвекции $\alpha_2$.

2. Моделирование температурного поля с идентификацией параметров теплообмена (*iden = 1)*. Применяется при обновлении исходных данных о наплавляемом изделии. Количество наплавленных слоев определяется исходя из требуемой высоты конструкции.

3. Моделирование температурного поля с установившимися значениями весовых коэффициентов $w_1 = 0{,}3$, $w_2 = 0{,}7$ и коэффициента вынужденной конвекции $\alpha_2 = 300$ Вт/(м$^2$·К) для седьмого и последующих слоев. Применяется для случаев, когда высота изделия превышает значение, используемое для практической отработки программы $N>6$.

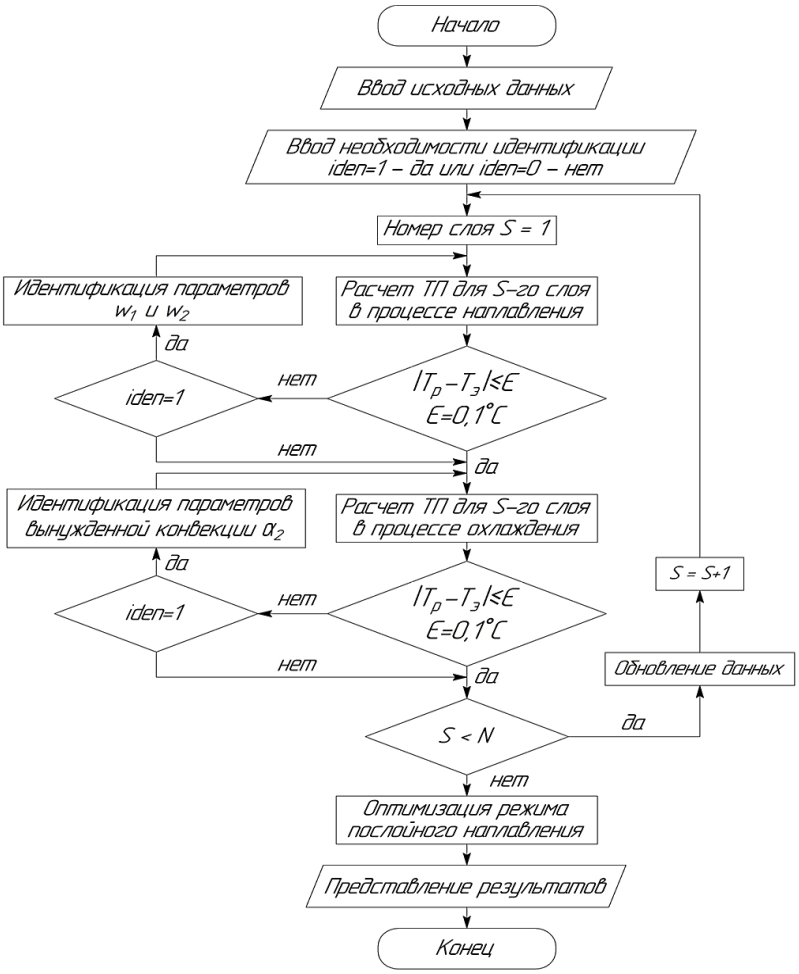


Рис. 8. Схема работы программы моделирования температурного поля в процессе послойного электродугового наплавления

Для эффективного использования программы и автоматизированной системы управления процессом аддитивного производства рассмотрена структура технологического процесса. Установлено, что наибольшую трудоемкость составляет этап технологической подготовки производства, в который входит разработка траектории движения портального манипулятора и экспериментальное определение ТВР послойного наплавления. Применение разработанной программы позволяет увеличить скорость технологической подготовки производства, сократить затраты времени, основных и вспомогательных материалов, а также уменьшить расходы на амортизацию оборудования и оплату труда работников.

Практическая апробация автоматизированной системы и программы моделирования температурного поля проведена на примере оптимизации этапа технологической подготовки производства башмака дискового тормоза подвижного состава. Конструкция изделия в виде 3D модели и полученная с учетом перечисленных приоритетов схема наплавления представлены на рис. 9.

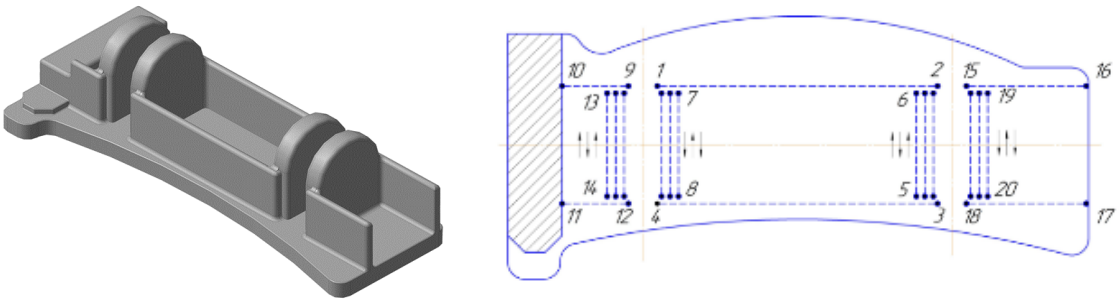


Рис. 9. 3D модель и схема наплавления башмака дискового тормоза

Результаты моделирования температурного слоя с учетом идентифицированных параметров теплообмена показали превышение расчетными значениями температур граничных значений на некоторых этапах послойного наплавления (рис. 10).

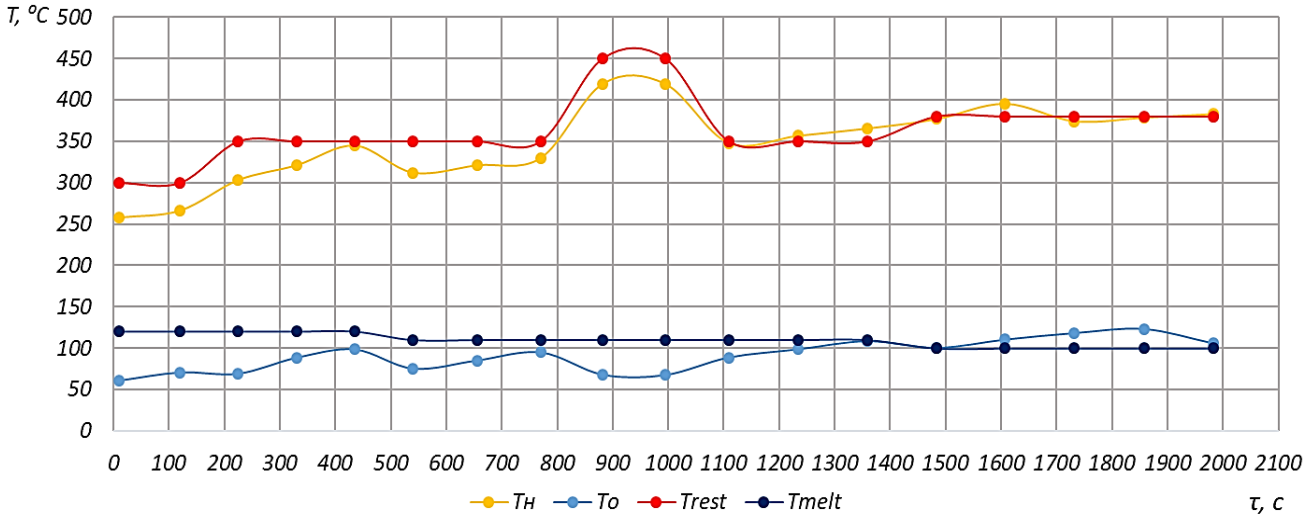


Рис. 10. Результаты моделирования температурного поля без оптимизации ТВР: $T_н$ – температура металла в конце наплавления слоя; $T_o$ – температура металла в конце выдержки; $T_{rest}$ и $T_{melt}$ – граничные значения температур

Для достижения требуемых температур процесса послойного наплавления выполнен расчет температурного поля с подбором времени межслойной выдержки, при котором обеспечивается соответствие расчетной температуры металла установленным граничным значениям (рис. 11).

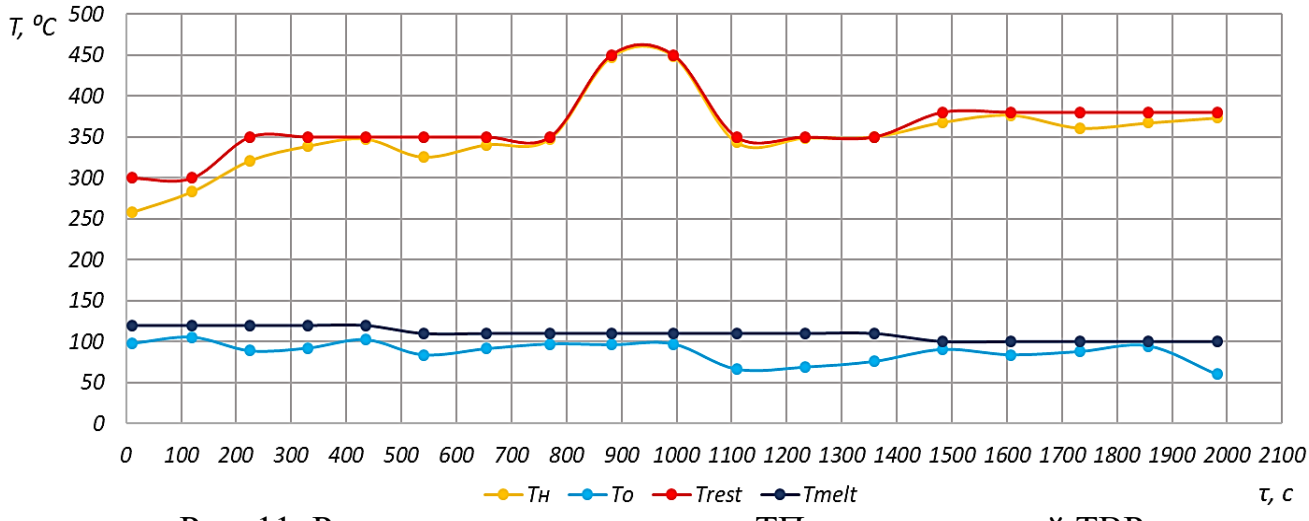


Рис. 11. Результаты моделирования ТП с оптимизацией ТВР

Проверка ТВР выполнялась путем практической реализации технологии аддитивного производства на примере прототипа башмака дискового тормоза.

Для оценки эффективности использования разработанной автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства и программы моделирования процесса послойного наплавления выполнен сравнительный анализ затрат времени и материальных ресурсов при экспериментальной и программной оптимизации ТВР. Сопоставление основных показателей эффективности приведено в таблице 2.

Таблица 2. Показатели эффективности программной оптимизации температурно-временного режима аддитивного производства

| № | Показатель | Экспериментальная оптимизация | Программная оптимизация |
|---|---|---|---|
| 1 | Время послойного наплавления, ч | 0,6 | 0 |
| 2 | Время оптимизации ТВР, ч | >18 | 9,26 |
| 3 | Расход основного металла, кг/руб. | 5,53/769,78 | 0 |
| 4 | Расход защитного газа, л/руб. | 140/1500 | 0 |
| 5 | Амортизация оборудования, руб. | 1000 | 80,4 |

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что разработанная автоматизированная система управления технологическим процессом аддитивного производства позволяет повысить эффективность технологической подготовки производства и сократить её трудоемкость более чем в 2 раза без затрат основных и вспомогательных материалов. Использование программы моделирования позволяет сократить затраты на амортизацию оборудования на 91,9% и оплату труда работников на 71,4%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен обзор известных технологий аддитивного производства, методов их моделирования и автоматизации, выделены области применения, основные преимущества и недостатки.
2. Разработаны способ и установка для автоматизированного управления процессом аддитивного производства металлических изделий на основе электродугового наплавления присадочной проволоки.
3. Разработана программа для моделирования и автоматизации процесса послойного наплавления, позволяющая рассчитывать температурное поле в наплавляемом изделии с учетом поэтапного увеличения высоты конструкции, сложных начальных и граничных условий процесса наплавления, охлаждения металла в процессе межслойной выдержки и возможности изменения начальной точки наплавляемого слоя.
4. Выполнен анализ и разработана структурная схема автоматизированного управления процессом послойного наплавления металла как объектом управления.
5. Определена точность результатов моделирования и разработан модуль идентификации параметров теплообмена в процессе автоматизированного послойного электродугового наплавления, учитывающий различные коэффициенты теплопроводности присадочного металла и

основания, а также интенсивность принудительного охлаждения конструкции на этапе межслойной выдержки.

6. Разработана структура двухконтурной автоматизированной системы управления технологическим процессом с учетом программы для моделирования температурного поля на всех этапах послойного наплавления, оптимизации температурно-временного режима, расчета траектории и последовательности наплавления слоев с учетом изменяющихся температуры и геометрии наплавленного слоя.

7. Проведена апробация разработанной автоматизированной системы управления и программы моделирования и оптимизации температурно-временного режима послойного наплавления на примере технологической подготовки процесса аддитивного производства башмака дискового тормоза.

8. Произведен сравнительный анализ эффективности экспериментальной и программной оптимизации технологического процесса аддитивного производства, в ходе которого установлено, что внедрение перечисленных результатов на производстве позволяет до 4 раз сократить трудоемкость этапа технологической подготовки, исключить расход основного и присадочного металла, уменьшить затраты на амортизацию оборудования и на 70% сократить расходы на оплату труда.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, по специальности:**

1. Какорин, Д.Д. Способ аддитивного производства металлических изделий / Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев, Б.И. Марголис // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т.21. №4. С. 75-80.

2. Какорин, Д.Д. Оптимизация режимов послойного наплавления для аддитивного производства металлических изделий / Д.Д. Какорин, Б.И. Марголис, А.Ю. Лаврентьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №4. С. 550-554.

3. Какорин, Д.Д. Программная оптимизация температурно-временного режима аддитивного производства металлических изделий / Д.Д. Какорин, Б.И. Марголис, А.Ю. Лаврентьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №10. С. 426-430.

4. Какорин, Д.Д. Моделирование температурных полей при аддитивном производстве металлических изделий / Д.Д. Какорин, Б.И. Марголис // Программные продукты и системы. 2025. Т. 38. №1. С. 561-566.

**Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, по смежным специальностям:**

5. Какорин Д.Д. Высокопроизводительный способ изготовления биметаллического дискового ножа / А.Ю. Лаврентьев, Д.Д. Какорин, Д.А. Барчуков // Глобальная энергия. 2023. Т.29. №3. С. 100-110.

**Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

6. Программа для моделирования температурного поля при аддитивном производстве металлических изделий / Б.И. Марголис, Д.Д. Какорин, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 29.05.2024, №2024662504.

**Патенты:**

7. Патент №2781510 РФ, МПК B33Y 10/00. Способ аддитивного производства металлических изделий, Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев. №2022100700; заявл. 12.01.2022; опубл. 12.10.2022.

8. Патент №2791122 РФ, МПК B61H 7/02. Способ изготовления башмака дискового тормоза подвижного состава, Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев. №2022128159; заявл. 28.10.2022; опубл. 02.03.2023.

9. Патент №2807572 РФ, МПК B33Y 10/00. Способ аддитивного производства металлических изделий с автоматической регулировкой режимов послойной электродуговой наплавки, Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев. №2023108380; заявл. 03.04.2023; опубл. 16.11.2023.

10. Патент №2831634 РФ, МПК B23K 9/04, B33Y 10/00. Способ аддитивного производства металлических изделий, Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев, Б.И. Марголис. №2024105786; заявл. 06.03.2024; опубл. 11.12.2024.

**Прочие статьи, доклады и тезисы докладов на конференциях:**

11. Какорин, Д.Д. Способы послойного синтеза металлических изделий/ Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев // Вестник Тверского государственного технического университета. Технические науки. 2021. Т.11. №3. С. 24-33.

12. Какорин, Д.Д. Защита направляющих и ходовых винтов установок для аддитивного производства деталей / А.Ю. Лаврентьев, Д.Д. Какорин, А.М. Дожделев // Современные материалы, техника и технологии. 2021. №6(39). С. 85-92.

13. Какорин, Д.Д. Материалы для износостойкой наплавки / Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2021. №14. С. 67-75.

14. Какорин, Д.Д. Выбор способа очистки поверхности наплавленного металла в процессе аддитивного производства металлических изделий / А.Ю. Лаврентьев, Д.Д. Какорин, А.М. Дожделев // Современные материалы, техника и технологии. 2023. №3(48). С. 35-40.

15. Какорин, Д.Д. Обзор способов монтажа электропроводки на производственном оборудовании для аддитивного производства / А.Ю. Лаврентьев, Д.Д. Какорин, А.М. Дожделев // Современные материалы, техника и технологии. 2023. №3(48). С. 40-45.