

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Марголис Борис Иосифович

Тверь – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И МЕТОДЫ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	14
1.1. Обзор современных технологий аддитивного производства металлических изделий.....	14
1.2. Технологический процесс послойного электродугового наплавления металлических изделий.....	22
1.3. Современные подходы к моделированию процессов аддитивного производства	31
Выводы.....	37
ГЛАВА 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОСЛОЙНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА	38
2.1. Использование аналитических методов для моделирования температурного поля при послойном электродуговом наплавлении.....	42
2.2. Численные методы моделирования температурного поля при послойном электродуговом наплавлении металлических изделий.....	45
2.3. Учет изменения теплофизических характеристик стали в зависимости от температуры	55
2.4. Моделирование температурного поля при сложных условиях послойного электродугового наплавления	57
2.5 Программа для моделирования и оптимизации процесса аддитивного производства.....	61
2.6 Процесс послойного наплавления металла как объект управления ...	69
Выводы	72
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОСЛОЙНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕНИЯ.....	74

3.1. Экспериментальное определение температуры металла в процессе послойного электродугового наплавления	74
3.2. Моделирование температурного поля в процессе послойного электродугового наплавления	81
3.3. Корректировка программы расчета температурного поля при послойном электродуговом наплавлении	89
3.4. Учет массивности наплавляемого изделия при идентификации параметров теплообмена.....	93
Выводы	99
ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА	100
4.1. Постановка задачи управления технологическим процессом аддитивного производства	100
4.2. Структура автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства	103
4.3. Структура программы моделирования и оптимизации процесса послойного наплавления металла	110
4.4. Применение программы для автоматизации технологической подготовки аддитивного производства	113
4.5. Автоматизация технологической подготовки аддитивного производства на примере башмака дискового тормоза	116
4.6. Оценка эффективности автоматизации технологической подготовки процесса аддитивного производства	127
Выводы	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	137
ПРИЛОЖЕНИЕ А	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	158

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной промышленности невозможно представить без внедрения новых высокопроизводительных и экономичных технологий, позволяющих автоматизировать технологический процесс производства, повысить стабильность качества продукции и снизить затраты на изготовление деталей различной геометрической формы и назначения.

Металлы являются наиболее распространенным материалом в машиностроении и применяются в различных его областях, например, в авиа-, автомобиле-, станко- и приборостроении, производстве оборудования для легкой и пищевой промышленности, судостроении, производстве нефтегазоперерабатывающего оборудования.

Используемые в промышленности традиционные технологии производства металлических изделий, включающие литье и обработку металлов давлением, сопровождаются высокими затратами на подготовительные работы, которые могут составлять до 80% в себестоимости изготавливаемой продукции. Это делает нерациональным их применение при штучном и мелкосерийном производстве, а также при создании моделей и прототипов. Технологии механической обработки заготовок основаны на поэтапном удалении слоев материала для достижения заданной формы и размеров изделия, что приводит к чрезмерному перерасходу металла и делает процесс производства низкоэффективным, особенно при изготовлении корпусных и крупногабаритных изделий [1].

Перечисленные недостатки традиционных способов производства металлических изделий положили начало развитию аддитивных технологий, основанных на принципе послойного добавления исходного материала для построения заданного изделия [2].

Послойное изготовление позволяет увеличить эффективность производства единичных и мелкосерийных изделий, оптимизировать длительность производственного процесса, уменьшить расход дорогостоящих

материалов и производить изделия сложной конфигурации, различной геометрической формы и размеров.

На сегодняшний день одним из наиболее перспективных направлений аддитивного производства, с точки зрения промышленного применения, является технология послойного электродугового наплавления проволочного присадочного металла [3].

Процесс аддитивного производства металлических изделий с применением технологии электродугового наплавления заключается в последовательном расплавлении и кристаллизации проволочного присадочного материала на заранее подготовленной металлической подложке-основании [4]. При этом процесс послойного наплавления осуществляется на режимах, установленных в процессе практической оптимизации процесса аддитивного производства. По завершению процесса послойного построения проводится контроль качества наплавленного металла, окончательная термическая, и механическая обработка детали.

Основными параметрами режима послойного электродугового наплавления являются сила тока I , напряжение дуги U и скорость движения сварочной горелки (скорость наплавки) v_n [5]. Сочетание перечисленных параметров режима должно обеспечивать гарантированное качество сплавления присадочного металла с основанием, равномерное распределение внутренних напряжений, минимальные деформации и требуемые механические свойства наплавленного изделия.

При недостаточной силе тока I не достигается требуемая глубина проплавления металла основания и затрудняется сплавление присадочного материала с основанием. Высокие значения I приводят к росту тепловложения в наплаваемый материал, что негативно сказывается на качестве структуры и геометрических размерах наплаваемого слоя.

Низкие значения напряжения U приводят к уменьшению ширины наплавленного валика и нарушению процесса переноса присадочного металла в электрической дуге. Высокое напряжение U увеличивает область

воздействия электрической дуги на поверхности основания, снижает глубину проплавления металла и увеличивает ширину наплавляемого слоя.

Недостаточная скорость наплавления v_n приводит к увеличению количества расплавленного металла и затрудняет формирование правильной геометрии слоя. При увеличенной скорости наплавления снижается глубина проплавления основания и нарушается сплошность формируемого слоя металла, снижаются механические свойства изделия [6].

Для определения оптимального режима послойного электродугового наплавления необходимо учитывать следующие особенности технологического процесса: зависимость структуры и свойств наплавленного металла от его температуры, влияние химического состава присадочного материала на структурные превращения и свойства наплавленного металла, особенности циклического воздействия температуры при послойном наплавлении металла, необходимость расчетов термического цикла процесса наплавления и оптимизации режима аддитивного производства.

Процесс послойного наплавления металлического изделия включает следующие стадии: наплавление первого слоя с гарантированным сплавлением присадочного металла с основанием; послойное наплавление металла до установления стабильного термического цикла и выравнивания температуры в наплавленном металле; послойное наплавление оставшейся части изделия до полного формирования заданной формы и размеров; наплавление дополнительного слоя металла, обеспечивающего термическую обработку последних слоев металла [7].

Существенный вклад в исследование режимов послойного электродугового наплавления, а также в изучение механических и трибологических свойств наплавленного металла внесли такие ученые как Крампит М.А., Кузнецов М.А., Данилов В.И. и Чиханов Д.А. [8-17].

Рыльковым Е.Н., Курушкиным Д.В. и другими учеными в системе Ansys разработана конечно-элементная модель тепловых процессов при послойном электродуговом наплавлении для оценки деформаций и напряженного

состояния стали [18]. Рассмотрены основы численного моделирования тепловых процессов при сварке сталей Хаустовым С.В., Харламовым В.О., Кузьминым С.В. [19]. 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., Martina F., Khodabakhshi F., Williams S.W., Guo N., Xiong J., Ding D., Karunakaran K. P., Panas M., Jhavar S., Ramkumar P. и др [20-31].

Несмотря на существующий вклад ученых в исследование процессов послойного электродугового наплавления все еще остается ряд не решенных актуальных технических задач. Прежде всего, это необходимость разработки структуры автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства, позволяющей производить моделирование температурного поля в наплавленном изделии, определять оптимальный температурно-временной режим, а также траекторию и последовательность послойного наплавления в зависимости от текущей температуры и геометрических размеров наплавленного слоя. Для решения данной задачи необходимо разработать математическую модель процесса послойного наплавления, позволяющую определить температуру наплавленного металла и металла основания в зависимости от установленного режима, геометрической формы и размеров изделия, выбранной марки стали. Разработка модели температурного поля позволит рассчитать оптимальный температурно-временной режим аддитивного производства на основании граничных значений температур выбранной марки стали.

Оптимизация температурно-ременного режима аддитивного производства основана на результатах моделирования температурного поля возникающего в процессе наплавления. Для уточнения результатов полученной модели проведен анализ термического цикла на всех этапах послойного построения и определены закономерности его изменения в

зависимости от химического состава сплава, геометрической формы изделия, параметров источника тока и установки для 3D печати [32, 33].

Для моделирования температурных полей в металлических изделиях необходимо решить дифференциальное уравнение теплопроводности для плоского тела. Большое значение для точности моделирования температурного распределения играет корректный учет начальных и граничных условий наплавления. Чаще всего начальные условия процесса аддитивного производства имеют неравномерный характер, а граничные условия соответствуют несимметричному конвективному теплообмену поверхности изделия с окружающей средой и кондуктивному распределению температуры между соседними слоями металла. В работах упомянутых ранее авторов не учитывается несимметричность условий теплообмена, изменение параметров теплопроводности и температуропроводности в зависимости от температуры металла, а также необходимость разделения процесса послойного наплавления на соответствующие стадии [34]. Еще одним недостатком известных методик является то, что значения параметров теплообмена обычно принимаются на основе справочных или технических данных. В данной работе для проверки адекватности расчетов и обеспечения минимального расхождения расчетных и экспериментальных температур, а также корректного определения режимов послойного наплавления предложено осуществлять идентификацию параметров теплообмена.

При разработке моделей расчета температур в металлических изделиях был выбран метод конечных элементов решения дифференциального уравнения теплопроводности в двухмерных пространственных координатах. Для реализации предложенного метода использовалась среда математического программирования MatLab, имеющая набор процедур для решения задач оптимизации функции нескольких переменных с ограничениями. Помимо этого, MatLab позволяет разработать графический интерфейс пользователя, который визуализирует результаты вычислений.

Для расчета температурного поля в данной работе используется переход к двумерной сетке по длине и высоте наплавленного слоя. Производится разбиение металлического изделия на несколько расчетных участков с учетом особенности распределения температуры в начальный, промежуточные и конечный моменты времени аддитивного производства. Предложенный метод расчета имеет существенные отличия и преимущества по сравнению с описанными выше аналогами.

Цель диссертационной 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 поставленной цели исследования необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести обзор существующих способов аддитивного производства, методов их моделирования и автоматизации, выделить области применения, основные преимущества и недостатки.
2. Разработать способ и установку для автоматизированного управления процессом аддитивного производства металлических изделий на основе электродугового наплавления присадочной проволоки.
3. Разработать программу для моделирования и автоматизации процесса послойного электродугового наплавления позволяющую рассчитать температурное поле в наплавленном металле с учетом изменяющихся размеров и теплофизических свойств изделия.
4. Выполнить анализ и разработать структурную схему автоматизированного управления процессом послойного наплавления металла как объектом управления.

5. Определить точность результатов моделирования и разработать модуль идентификации параметров теплообмена в процессе автоматизированного послойного электродугового наплавления в зависимости от исходных данных процесса наплавления и установленных граничных значений температур.

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

7. Провести практическую апробацию 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 заключается 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 наплавленного металла. Полученная программа позволяет осуществлять расчет температурного поля как в процессе наплавления слоя, так и во время его межслойной выдержки с учетом изменения теплофизических свойств стали в зависимости от температуры, а также определять оптимальные параметры температурно-временного режима и траекторию послойного наплавления. Методы расчета реализованы в среде математического программирования MatLab. Для подтверждения работоспособности предложенной автоматизированной системы управления отработан этап технологической подготовки аддитивного производства, определены оптимальные параметры процесса и выполнено экспериментальное наплавление металлического образца с пирометрическим измерением температуры поверхности каждого наплавленного слоя в период межслойной выдержки. Результаты измерений подтверждают совпадение расчетных значений температур металла с экспериментальными, их отклонение не превышает 0,1 °С.

Результаты работы применяются в лаборатории кафедры ТМиМ ТвГТУ для расчета температурно-временного режима и траектории послойного электродугового наплавления на этапе технологической подготовки производства, а также для автоматизированного управления процессом аддитивного производства при изготовлении опытных образцов, единичных изделий и прототипов при выполнении НИОКР по различным производственным направлениям. Разработанная установка используется в процессе проведения учебных занятий по дисциплинам «Технологии конструкционных материалов» и «Технологии сварочного производства» в рамках подготовки студентов бакалавриата и магистратуры различных направлений и специальностей.

Достоверность и обоснованность полученных в результате диссертационного исследования результатов определяется экспериментальным подтверждением корректности используемого при описании температурных полей дифференциального уравнения теплопроводности в двухмерных пространственных координатах с неравномерным начальным температурным распределением и несимметричными граничными условиями конвективного теплообмена.

Для практической реализации предложенной автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства и программы для моделирования и оптимизации температурно-временного режима послойного электродугового наплавления проведено послойное изготовление конкретного металлического изделия – башмака дискового тормоза подвижного состава. Результаты практической отработки технологии на установленных температурно-временном режиме и траектории послойного наплавления показали достижение требуемого качества и геометрических размеров наплавленного металла. Наплавка образца, подготовка шлифов и последующий макро- и микроанализ структуры металла были выполнены в лаборатории сварки кафедры ТМиМ ТвГТУ.

Апробация результатов. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, региональных научных и научно-технических конференциях и выставках: XI Международная научно-практическая конференция «Современные материалы, техника и технология» (Курск, 2021 г.); Всероссийская молодежная конференция «Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки» (Саратов, 2022 г.); XI Специализированная выставка «Молодой изобретатель-рационализатор» (Тверь, 2020 г.); XIII Специализированная выставка «Молодой изобретатель-рационализатор» (Тверь, 2022 г.); XX Специализированная выставка «Изобретатель и рационализатор» (Тверь, 2023 г.); Всероссийский конкурс «Инженер года» по версии «Инженерное искусство молодых» в номинации «Сварка» (Москва, 2023 г.); XXVI Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед 2023» (Москва, 2023 г.); Акселерационная программа «Техностарт» (Тверь, 2023 г.); XXVII Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед 2024» (Москва, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 публикации в ведущих журналах из перечня изданий ВАК, отнесенным к категориям К-1 и К-2 по научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, 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 приложений. Работа изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 17 таблиц.

1. ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И МЕТОДЫ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. Обзор современных технологий аддитивного производства металлических изделий

Постоянное увеличение количества выпускаемых в машиностроении металлических изделий различной геометрической формы и размеров, привело к существенной модернизации традиционных технологий, а также разработке новых способов производства металлических деталей, в том числе с помощью аддитивных технологий.

Аддитивные технологии применяются не только как самостоятельный производственный процесс изготовления экспериментальных образцов, прототипов, единичных и мелкосерийных изделий, но и находят широкое распространение при решении задач восстановления и ремонта изношенных деталей машин и механизмов.

На сегодняшний день все технологии аддитивного производства отличаются по типу используемого присадочного материала, источнику тепловой энергии, способу защиты расплавленного металла, степени автоматизации, режимам работы и многим другим факторам [35-38].

По типу присадочного материала, используемого в процессе послойного построения, различают способы наплавления проволочного и порошкового присадочного материала (рис. 1.1).

Порошковые материалы представляют собой сыпучие смеси с размерами частиц до 1 мм и подразделяются на нанодисперсные с частицы размером менее 0,001 мкм, ультрадисперсные, имеющие размер частиц 0,01-0,1 мкм, высокодисперсные – от 0,1 до 10 мкм, а также мелкие, средние и крупные с размером частиц 10-50, 50-300 и 300-1000 мкм соответственно. Главной характеристикой всех порошковых материалов является средний диаметр частиц D_{cp} , обозначающий, какое количество частиц имеет диаметр, равный номинальному технологическому показателю [39].



Рис. 1.1. Типы присадочного материала: а) порошковый материал;
б) проволочный материал

Средний диаметр частиц определяет скорость аддитивного производства, качество геометрии и размеры наплавляемых изделий, плотность наплавленной структуры. Для достижения высокой плотности структуры наплавленного металла необходимо выполнять предварительную сепарацию порошка, что значительно повышает расход дорогостоящего присадочного материала. Также недостатками использования порошкового материала в аддитивном производстве является низкая скорость послойного построения, обусловленная малыми размерами частиц порошка, и высокая вероятность возникновения дефектов в структуре наплавленного металла.

Проволочные присадочные материалы представляют собой тонкую проволоку диаметром сплошного или оболочкового типа [40, 41]. Основной характеристикой присадочной проволоки является ее диаметр d_{np} , определяющий размер капли расплавленного металла и ширину наплавляемого слоя. Например, для проволоки диаметром 1 мм ширина наплавляемого слоя равна 3-4 мм. Еще одним преимуществом использования проволочного материала является возможность его подачи с постоянной скоростью и непрерывное формирование сварочной ванны, которая, перемещаясь за источником тепловой энергии кристаллизуется и образует сплошной слой наплавленного металла.

Проволока оболочкового типа представляет собой непрерывную полую металлическую трубку, наполненную порошковым флюсом или различными легирующими элементами, предназначенными для защиты расплавленного металла от взаимодействия с атмосферой, стабилизации процесса наплавления, улучшения механических свойств и корректировки состава наплавленного металла при наплавлении легированных сталей. Применение присадочной проволоки позволяет увеличить производительность послойного наплавления, улучшить качество наплавляемого металла и расширить область применения аддитивного производства.

В зависимости от типа используемого источника тепловой энергии в процессе аддитивного производства различают способы электродугового, электронно-лучевого и лазерного наплавления металла [42, 43].

При лазерном наплавлении в качестве источника энергии используется лазерный луч высокой мощности и порошковый или проволоочный присадочный материал.

Существует технология селективного лазерного спекания (Selective Laser Sintering – SLS), которая реализуется по принципу формирования слоя порошкового присадочного материала с последующим спеканием лазерным лучом (рис. 1.2) [44, 45]. Особенностью SLS технологии является предварительный подогрев всего слоя, что облегчает спекание порошкового материала, повышает качество структуры изделия и снижает напряжения, возникающие в результате локального термического воздействия. Однако предварительный подогрев порошкового материала увеличивает время производства и негативно сказывается на эффективности аддитивного производства.

Еще одной технологией аддитивного производства, использующей лазерный луч, является селективное лазерное плавление порошкового материала (Selective Laser Melting – SLM) [46-48]. Данный процесс аналогичен лазерному спеканию SLS и отличается плавлением порошкового материала без его предварительного подогрева. Исключить из технологического

процесса предварительный подогрев позволяет использование лазера более высокой мощности с уменьшенным диаметром фокусированного пятна и нанесение более тонкого слоя порошка.

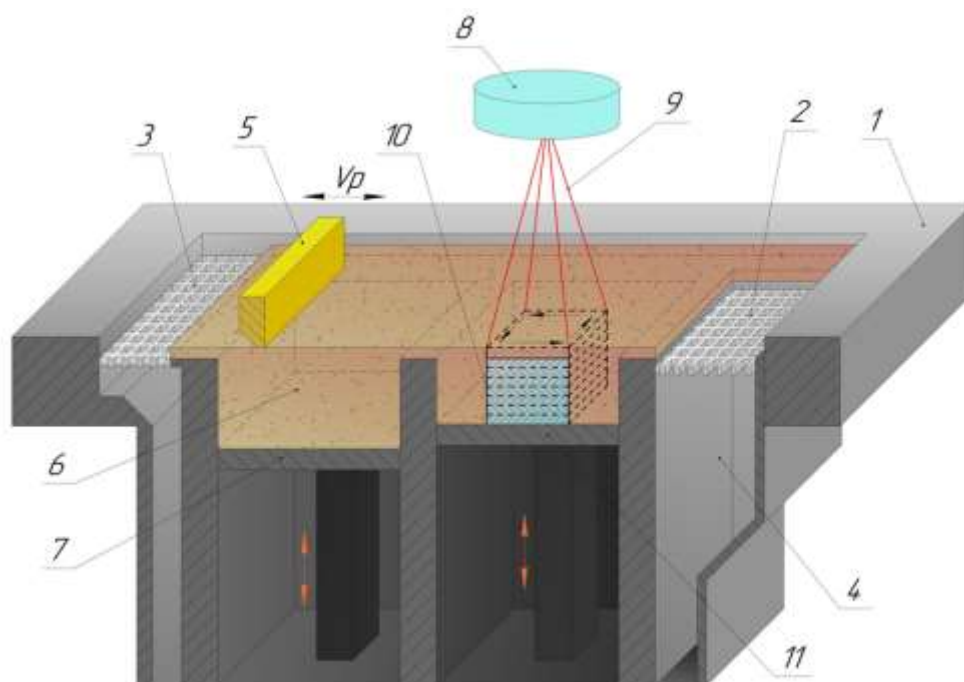


Рис. 1.2. Технология селективного лазерного спекания SLS:

- 1 – стол; 2,3 – ячейки для просеивания порошка; 4 – бункер; 5 – рейка;
6 – порошковый материал; 7 – платформа подачи материала;
8 – фокусирующая линза; 9 – сканирующий луч;
10 – наплавленный металл; 11 – рабочая платформа

Изделия, наплавленные по SLM технологии, характеризуются анизотропией свойств, высокой прочностью и низкой пластичностью, из-за большого количества остаточных напряжений. При этом высокая прочность изделий обеспечивается мелкозернистой структурой материала, образующейся вследствие высоких скоростей охлаждения, которые приводят к росту числа центров кристаллизации и уменьшению размеров кристаллов металла. С уменьшением размеров зерна образуется разветвленная сеть границ зерен, которая препятствует перемещению дислокаций и повышает прочностные характеристики наплавленного металла.

Помимо этого, для аддитивного производства металлических изделий используют технологию прямого нанесения порошкового материала (Direct

Metal Deposition – DMD), в которой лазерный луч сканирует рабочую плоскость, расплавляя и спекая порошковый материал, который совместно с инертным газом подается форсунками непосредственно на обрабатываемую головку (рис. 1.3) [49, 50].

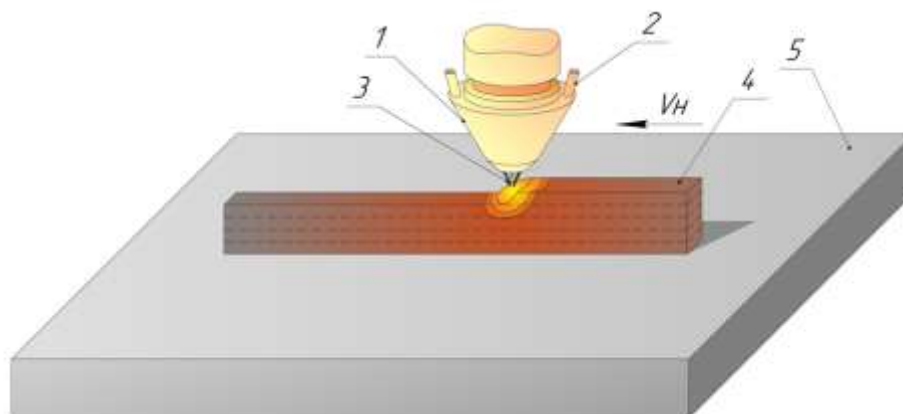


Рис. 1.3. Технология прямого нанесения порошка DMD:

1 – обрабатывающая головка; 2 – канал подачи порошка;

3 – рабочая зона плавления порошка; 4 – наплавленный металл;

5 – металлическое основание

Технология DMD позволяет получать геометрически сложные изделия, отличается высокой стоимостью оборудования и сложностью его наладки. Похожий процесс подачи присадочного материала реализован в технологии лазерного сплавления порошков (Laser Engineered Net Shaping – LENS), где лазерный луч расплавляет металлический порошок, который подается коаксиально через лазерную головку [51-53]. Порошок распределяется по лазерной головке под действием силы тяжести или перемещается инертным газом. Лазерный луч создает некоторый объем расплава на металлическом основании и, перемещаясь, образует наплавленный слой материала. Данный метод применяется для изготовления некрупных металлических изделий, к которым предъявляются не высокие требования по качеству поверхности и точности изготовления.

При способе электронно-лучевой наплавки используется как порошковый, так и проволочный присадочный материал, который расплавляется электронным лучом.

Технология электронно-лучевого спекания порошковых материалов (Electron Beam Melting – EBM) заключается в разравнивании порошка, поступающего из бункера, по рабочей зоне и его оплавлении электронным лучом по заданной траектории [54, 55]. После спекания первого слоя остатки порошкового материала удаляют из рабочей зоны и опускают плоскость рабочего стола на величину, равную толщине наплавленного слоя. Данный процесс повторяется до тех пор, пока наплавленное изделие не будет соответствовать заданным размерам. Технология EBM позволяет наплавливать изделия с высокой плотностью структуры и увеличивать скорость производства в 3-4 раза по сравнению с технологиями лазерного спекания. Недостатками данной технологии являются использование дорогостоящих присадочных и расходных материалов, необходимость работы большого количества вспомогательного оборудования: системы подготовки порошка, его очистки и удаления из рабочей зоны, системы подогрева рабочей зоны, устройства откачки воздуха, вакуумной камеры и др.

Кроме этого известна технология электронно-лучевого оплавления проволочного присадочного материала (Electron Beam Additive Manufacturing – EBAM) (рис. 1.4) [56, 57]. Использование присадочной проволоки позволяет увеличить скорость аддитивного производства, упростить и удешевить производственный процесс изготовления средних и крупных изделий. Недостатком применения технологии EBAM является низкое качество поверхности наплавленного металла и необходимость в проведении последующей механической обработки.

Наиболее перспективным, с точки зрения производительности, является послойное электродуговое наплавление присадочной проволоки. Для этого способа различают электродуговое наплавление плавящимся электродом в среде защитных газов (Gas Metal Arc Welding, GMAW), электродуговое наплавление вольфрамовым, неплавящимся электродом в среде защитных газов (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) и наплавление с применением плазменной дуги (Plasma Arc Welding, PAW) [58-61].

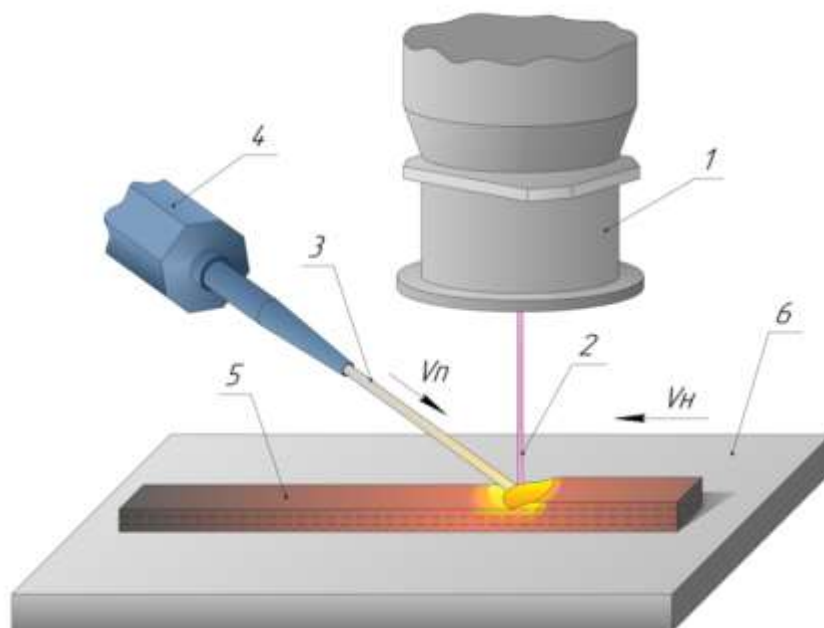


Рис. 1.4. Технология электронно-лучевого оплавления присадочной проволоки ЕВАМ: 1 – источник; 2 – электронный луч; 3 – присадочная проволока; 4 – механизм подачи проволоки; 5 – наплавленный металл; 6 – металлическое основание

Технология GMAW осуществляется путем непрерывной подачи присадочной проволоки и защитного газа в зону сварки, при этом электрический дуговой разряд образуется между торцевой поверхностью присадочной проволоки и основанием (рис. 1.5).

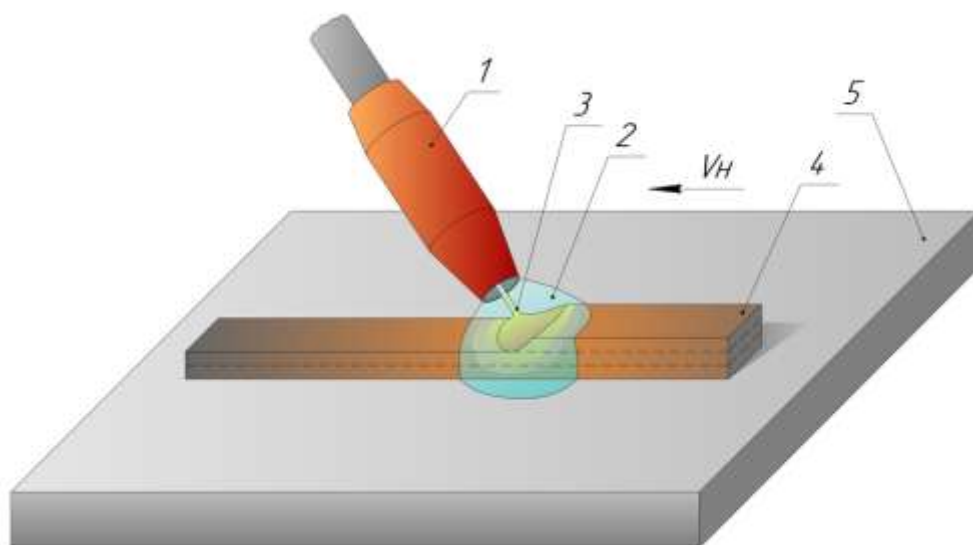


Рис. 1.5. Технология электродугового наплавления присадочной проволоки GMAW: 1 – горелка; 2 – защитная газовая атмосфера; 3 – присадочная проволока; 4 – наплавленный металл; 5 – металлическое основание

Данная технология отличается высокой стабильностью процесса и возможностью изменения характера переноса расплавленного металла в дуге от капельного (состоящего из отдельных капель диаметром до 1 мм) до струйного (состоящего из мелких капель, следующих непрерывно друг за другом), что позволяет свести к минимуму разбрызгивание присадочного материала, обеспечить качественное сплавление при минимальном короблении детали [62]. Недостатком технологии является низкая, по сравнению с лазерным и электронно-лучевым наплавлением, точность, приводящая к необходимости выполнения последующей механической обработки изделия.

Технология GTAW отличается от GMAW тем, что электрическая дуга горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и металлическим основанием, а присадочная проволока подводится в зону сварки отдельным механизмом подачи. Данная технология отличается достаточно высоким качеством поверхности и отсутствием дефектов во внутренней структуре наплавленного металла. Однако, по сравнению с GMAW технологией, использование неплавящегося электрода снижает скорость послойного наплавления и усложняет процесс автоматизации производства, за счет необходимости дополнительного управления механизмом подачи проволоки.

Технология плазменного послойного наплавления PAW отличается от перечисленных выше технологий тем, что для плавления присадочного материала используется косвенная электрическая дуга, которая образуется между неплавящимся вольфрамовым электродом и медным наконечником (рис. 1.6). При этом проходя через сопло горелки инертный газ повышает плотность тепловой энергии, увеличивает перенос тепла в материал и скорость наплавления. Недостатком технологии PAW является высокая стоимость оборудования, ограниченная область применения и низкая эффективность автоматизации производственного процесса.

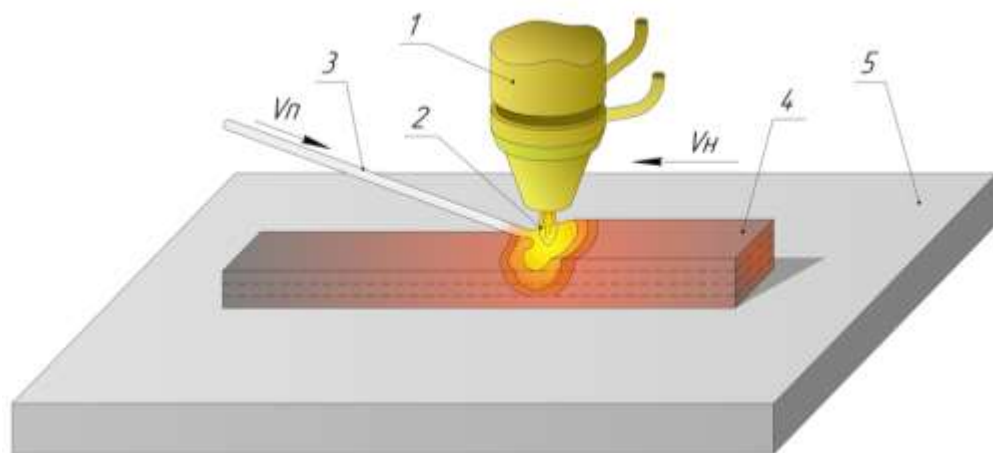


Рис. 1.6. Технология плазменного послойного наплавления PAW:

1 – плазматрон; 2 – пламенная дуга; 3 – присадочная проволока;

4 – наплавленный металл; 5 – металлическое основание

Проанализировав перечисленные способы аддитивного производства металлических изделий, можно сделать вывод, что технология послойного электродугового наплавления присадочной проволоки (GMAW или WAAM технология) является наиболее перспективной для практической реализации и имеет высокий потенциал автоматизации.

1.2. Технологический процесс послойного электродугового наплавления металлических изделий

Основным конкурентом для технологии аддитивного производства металлических изделий методом электродугового наплавления является родственный процесс изготовления сварных конструкций. Сварочное производство находит широкое распространение для изготовления стальных деталей различной геометрической формы и размеров. Применение сварочных технологий позволяет увеличить скорость производства единичных и мелкосерийных изделий, а также значительно сократить расход присадочного материала по сравнению с послойным наплавлением металла. Однако для организации производственного процесса сварки металлических изделий требуются значительные затраты ручного труда квалифицированных и аттестованных специалистов, что усложняет процедуру технологической

подготовки производства и значительно увеличивает трудоемкость производственного процесса.

Использование аддитивных технологий позволяет до 80% сократить участие ручного труда работников за счет внедрения систем автоматизированного управления технологическим процессом без потери качества и увеличения трудоемкости последующей механической обработки. Для эффективной организации аддитивного производства методом электродугового наплавления необходимо рассмотреть этапы технологического процесса и определить области для использования средств автоматизации (рис. 1.7).

Первой стадией технологического процесса послойного электродугового наплавления является подготовка чертежа и разработка 3D модели изделия [63]. На данной стадии прорабатывается технологичность конструкции изделия в соответствии с особенностями аддитивного производства, указываются технологические размеры и допуски, рассчитывается необходимое количество присадочного материала и разрабатывается задание на последующую механическую обработку.

Далее осуществляется технологическая подготовка производства, включающая расчет параметров технологического процесса и режима наплавления, подготовку рабочего чертежа детали, операционных эскизов и 3D модели изделия. Режимы рассчитываются технологом на основе свойств наплавляемой марки стали и должны обеспечивать высокое качество внутренней и внешней структуры наплавленного металла в сочетании с приемлемым уровнем производительности процесса аддитивного производства. На этом же этапе подбирается марка присадочной проволоки и металлического основания в зависимости от заданных физико-механических свойств изделия. Дополнительно к технологической документации разрабатывается код управляющей программы, на основе полученной 3D модели изделия.

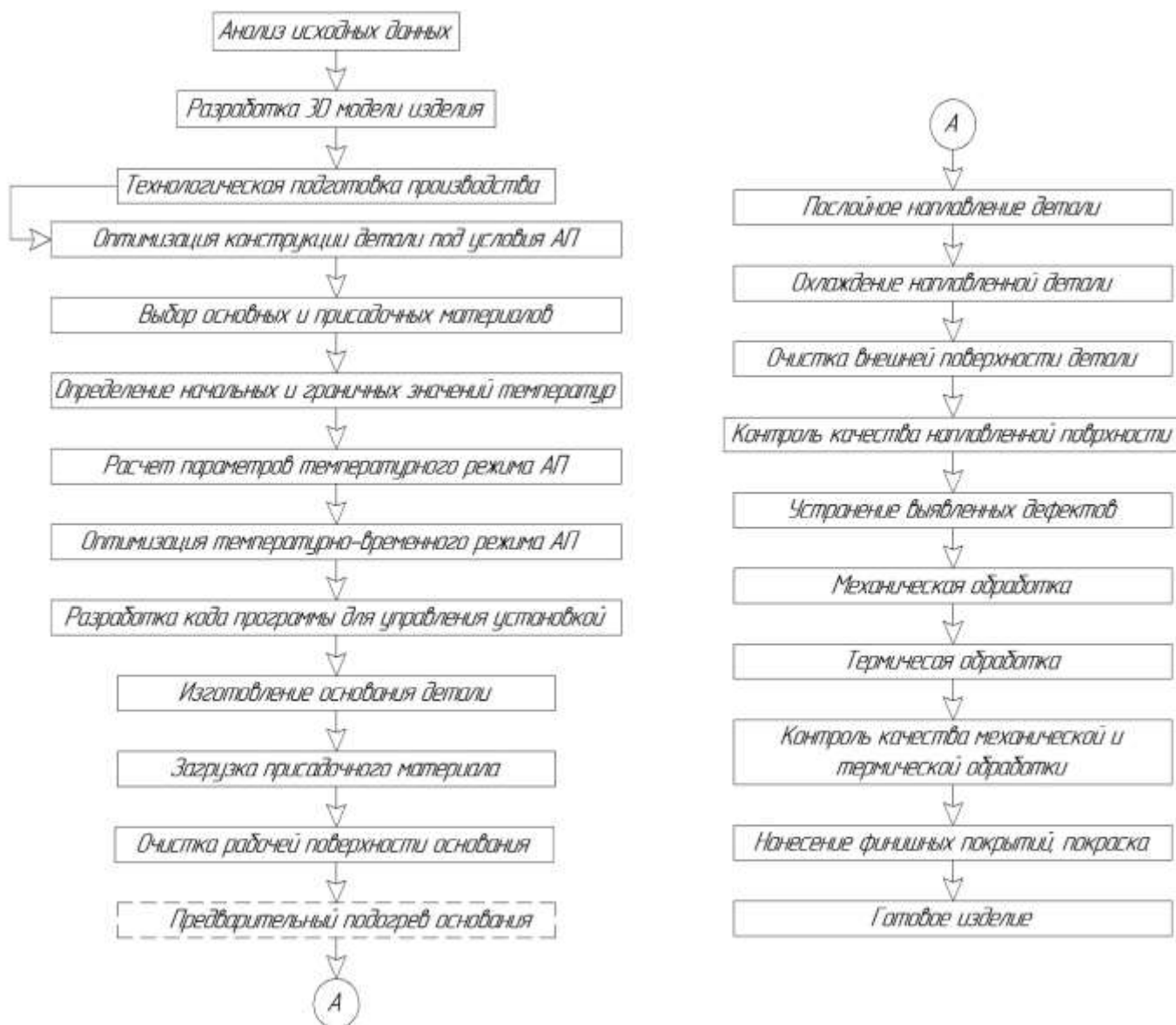


Рис. 1.7. Схема технологического процесса послойного
электродугового наплавления

Перечисленные выше технологические операции выполняются инженером-технологом один раз для каждой новой детали и могут быть скорректированы по результатам изготовления опытного образца.

Следующим этапом подготавливается присадочный материал, выбирается проволока необходимой марки и диаметра и устанавливается в оборудование для послойного наплавления. Данный этап осуществляется оператором установки для 3D печати.

Затем металлическое основание подвергается очистке от загрязнений путем механической обработки и термической обработке, заключающейся в равномерном нагреве до температуры 200-300 °С [64].

Данные операции необходимы для гарантированного образования межатомных и межмолекулярных связей между наплавленным присадочным металлом и металлом основания. Подготовка основания изделия позволяет уменьшить расход присадочного материала на 30-40% и сократить время производства изделия на 10-20% за счет эффективного использования проволоки и сокращения времени послойного наплавления.

Далее производится послойное наплавление металла, включающее: наплавление первого слоя присадочного материала; наплавление последующих слоев металла до стабилизации температуры и установления оптимального термического цикла (2-5 слоев); послойное наплавление оставшегося объема металла до формирования заданной геометрии детали; наплавление дополнительного слоя металла с целью достижения требуемой структуры и свойств металла по всему объему изделия (1-2 слоя).

Для обеспечения высокого качества наплавленного металла необходимо корректировать параметры режима послойного наплавления в зависимости от температуры наплавленного металла на этапе межслойной выдержки.

После послойного наплавления изделие остывает на спокойном воздухе до температуры окружающей среды. Далее изделие подвергается визуальному контролю и отправляется на участок термической обработки с целью устранения остаточных напряжений и выравнивания зерна металла по всему объему изделия.

Для снижения трудоемкости контрольных операций перед изготовлением партии изделий производится наплавление опытного образца, на котором отрабатываются технологические режимы, исследуются его физико-механические свойства, а также проводится макро- и микроанализ структуры наплавленного металла.

Качество термической обработки изделий контролируется путем измерения твердости поверхностных слоев металла как минимум в 5-ти критических зонах [65].

Завершающей операцией процесса аддитивного производства металлических изделий является их механическая обработка с целью снятия припусков, удаления последних наплавленных слоев и достижения требуемой шероховатости поверхности.

В процессе послойного наплавления в изделия возникают значительные температурные градиенты, которые приводят к снижению механических свойств стали, увеличению остаточных напряжений, короблению изделий и даже их разрушению. Поэтому необходимым условием аддитивного производства является подбор оптимального температурно-временного режима, а также контроль температуры и геометрии наплаваемого слоя в процессе послойного наплавления.

Температурный режим наплавления характеризуется параметрами источника электрической энергии, включающими: силу тока I от 40 до 250 А, напряжение дуги U от 17 до 23 В и скорость движения сварочной горелки (скоростью наплавления) v_n от 24 до 36 м/час. Изменение параметров режима послойного наплавления позволяет уменьшить или увеличить количество тепловой энергии, передаваемой в металл через электрическую дугу в зависимости от температуры наплавленного металла [66, 67].

При значениях силы тока менее 40 А не обеспечивается необходимая глубина проплавления и затрудняется сплавление присадочного материала с основанием. Увеличение силы тока более 250 А приводит к чрезмерному тепловложению в наплаваемый материал, что негативно сказывается на качестве структуры наплавленного металла и геометрии изделия.

Напряжение менее 10 В приводит к уменьшению ширины наплаваемого слоя и не позволяет сформировать необходимую толщину стенки изделия. Напряжение более 21 В приводит к снижению глубины проплавления основания и чрезмерному увеличению ширины наплаваемого

слоя, что является экономически не рациональным с точки зрения трудоемкости последующей механической обработки и расхода дорогостоящего присадочного материала.

Установленное значение скорости движения сварочной горелки позволяет формировать равномерную геометрию наплавляемого слоя. Так, при скорости наплавления ниже 24 м/час и постоянной силе тока увеличивается количество расплавленного присадочного материала на единицу площади поверхности основания, что приводит к увеличению ширины стенки наплавляемого изделия, частым замыканиям электрода на поверхность основания, нестабильному горению дуги и низкому качеству напыляемого металла. Высокая скорость наплавления (более 36 м/час) приводит к уменьшению глубины проплавления и образованию разрывов по длине наплавленного слоя.

Параметры режима наплавления представлены в таблице 1.1 и устанавливаются в зависимости от максимальной толщины стенки наплавляемого изделия в следующем порядке: на основе размера стенки изделия подбирается диаметр присадочной проволоки d_{np} , обеспечивающий ширину наплавленного слоя на 10-15% превышающую номинальные параметры; под выбранный диаметр проволоки устанавливается оптимальный диапазон тока I и напряжения дуги U ; скорость движения горелки v_n устанавливается исходя из выбранной силы тока.

Таблица 1.1. Режимы послойного электродугового наплавления

Диаметр и марка наплавочной проволоки	I , А	U , В	Расход защитного газа, л/мин	Ширина валика, мм	v_n , м/час	Удельный расход эл. энергии, (кВт·ч)/кг
Ø0,8 СВ08Г2С	40-150	17-21	6-8	4	24-28	3-4
Ø1,0 СВ08Г2С	80-180	18-22	7-10	5	28-32	5-6
Ø1,2 СВ08Г2С	110-250	19-23	8-12	6	32-36	7-8

В настоящее время для подбора оптимального режима выполняется серия экспериментов, заключающихся в наплавлении образцов на различных значениях силы тока I и определении такого значения времени межслойной

выдержки τ_6 , при котором достигается требуемая температура изделия перед наплавлением каждого нового слоя. Процедура оптимизации режима осуществляется вручную для каждой новой детали и требует значительных временных и материальных затрат.

В качестве источника тока используется промышленный аппарат для электродуговой сварки в среде защитных газов Fronius [68, 69], технические характеристики которого представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Характеристики источников питания Fronius

№	Характеристика	Fronius TPSi CMT		
		320	400	500
1	Напряжение электросети, В	3x400		
2	Сетевой плавкий предохранитель	35 А		
3	Допустимое отклонение напряжения	±15%		
4	Частота сети, Гц	50/60		
7	Диапазон сварочного тока, А	3-320	3-400	3-500
8	Сварочный ток при 10 мин/40 °С, А			
	40%	320	400	500
	60%	260	360	430
	100%	240	320	360
9	Выходное напряжение, В	14,2-30	14,2-34	14,2-39
10	Напряжение ХХ, В	73	73	71
11	Класс защиты	IP 23		
12	Тип охлаждения	Принудительное		
13	Габариты Д/Ш/В, мм	706/300/510		
14	Масса, кг	35		
15	Макс. давление защитного газа, бар	7		

Отличительной особенностью данного источника является наличие встроенной функции «холодного» переноса металла в дуге (Cold Metal Transfer – CMT), которая позволяет осуществлять послойное наплавление в импульсном режиме с минимальной передачей тепловой энергии [70].

CMT процесс реализуется следующим образом:

- подача присадочной проволоки;
- касание проволокой ванны расплавленного металла, формирование электрической дуги, нагрев основания и присадочной проволоки, обрыв дуги и снижение силы тока;

- плавление присадочной проволоки, формирование капли расплавленного металла;
- резкое (рывковое) движение присадочной проволоки в направлении, обратном направлению подачи, и отрыв капли.

Система подачи присадочной проволоки Fronius разделена на два устройства с цифровым управлением. Первое располагается на горелке и предназначено для управления возвратно-поступательными колебаниями проволоки, а второе, является основным, и осуществляет главное движение подачи проволоки с заданной скоростью. Для интеграции в роботизированные сварочные комплексы система подачи источника тока снабжена специальным буфером, позволяющим непрерывно подавать сварочную проволоку на длинном плече без приложения дополнительных усилий. Типовая компоновка источника сварочного тока Fronius TPSi 500 CMT с роботизированной установкой представлена на рис. 1.8 [71, 72].

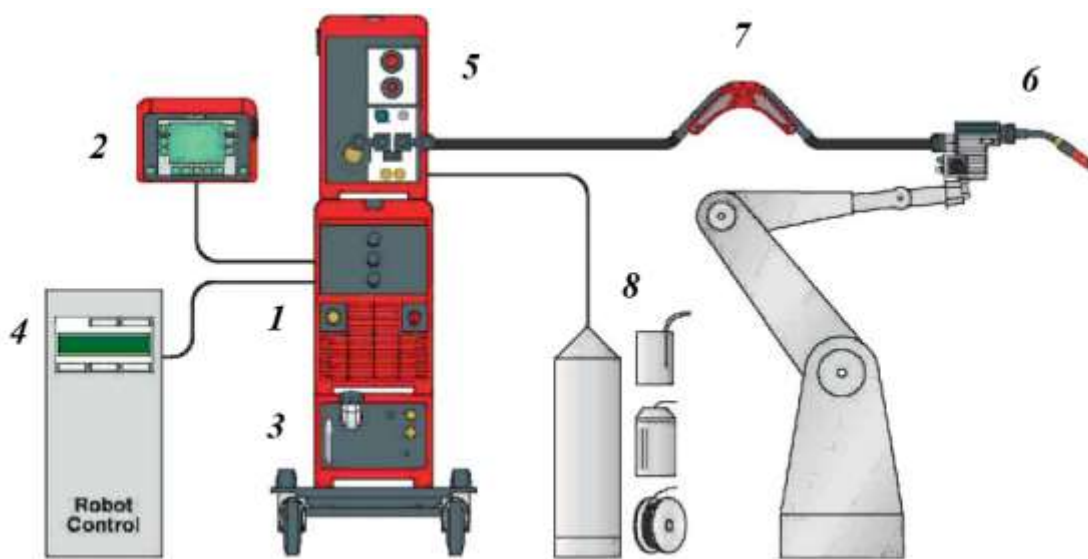


Рис. 1.8. Схема установки роботизированной сварки Fronius:

- 1 – источник питания сварочной дуги TPSi;
- 2 – блок дистанционного управления RCU 5000i;
- 3 – блок охлаждения FK 4000 R; 4 – роботизированное управление;
- 5 – устройство подачи проволоки VR 7000 CMT; 6 – горелка Robacta Drive CMT; 7 – буфер для проволоки; 8 – бухта проволоки [72]

Для удаленного управления процессом послойного наплавления применяется блок дистанционного управления RCU 5000i, снабженный полнотекстовым дисплеем и функцией Q-Master, предназначенной для отслеживания режимов наплавления.

Источник тока Fronius TSPi CMT снабжен устройством подачи проволоки VR 7000 CMT с цифровым управлением, которое обеспечивает плавную подачу проволоки при использовании различного типа сварочных горелок. Охлаждение роботизированной сварочной горелки обеспечивается с помощью блока водяного охлаждения FK 4000 R.

Для возможности получения дополнительной емкости под присадочную проволоку устройство снабжено буфером подачи проволоки, что является необходимым условием при аддитивном производстве крупногабаритных изделий. Буфер для проволоки разъединяет два привода для подачи проволоки друг от друга и обеспечивает тем самым дополнительную емкость. Монтируется буфер подачи проволоки на компенсаторе или на руке робота.

Управление траекторией и скоростью перемещения сварочной горелки и организация рабочей зоны осуществляется с помощью портального манипулятора (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Установка для 3D печати металлических деталей

Экспериментальный образец установки создан в лаборатории кафедры Технологии металлов и материаловедения ТвГТУ. Данная установка имеет возможность перемещения рабочего органа по трем координатам (X, Y, Z) и пространство рабочей зоны 1000x500x400 мм. Обладая приведенными выше характеристиками, порталная установка позволяет производить послойное наплавление металлических изделий сложной конфигурации шириной до 400 мм и высотой до 300 мм.

В результате анализа технологического процесса послойного электродугового наплавления присадочной проволоки можно сделать вывод, что применяемое технологическое оборудование имеет достаточно высокий уровень и возможности для организации автоматического управления процессом. Однако, процедура выбора оптимального режима послойного наплавления выполняется в ручном режиме и требует значительных затрат времени и дорогостоящих присадочных материалов [73]. Для повышения эффективности технологической подготовки аддитивного производства необходимо разработать автоматизированную систему управления процессом и программное обеспечение для оптимизации температурно-временного режима на основе математического моделирования температурного поля в наплавленном металле.

1.3. Современные подходы к моделированию процессов аддитивного производства

В связи с активным развитием технологий аддитивного производства на сегодняшний день известно множество подходов к моделированию процессов послойного построения металлических изделий, предназначенных для решения различного рода научных и технологических задач, и отличающихся методами построения математических моделей, используемым программным обеспечением.

Например, авторами Щербаковым А.В., Родякиной Р.В., Сливой А.П. и др. учеными Национального исследовательского университета «МЭИ» разработаны элементы математической модели процесса аддитивного

производства с применением электронно-лучевого источника тепловой энергии. В ходе данного исследования была предложена методика численного моделирования задачи для тепломассопереноса в жидкой ванне расплавленного металла со свободной поверхностью. Для описания процесса переноса тепла в наплавляемом металле использовалась уравнение нестационарной теплопроводности с движущимися во времени краевыми условиями, описывающими процесс подачи проволочного присадочного материала [74]:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q_v - \frac{\partial \psi_m(T)}{\partial t} L_m \rho(T). \quad (1.1)$$

Данная задача решалась методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы метода дробных шагов, а процесс наплавления моделировался путем добавления в каждый момент времени в область действия электронного луча элемента высотой 1 мм, шириной 2,5 мм и длиной 0,125 мм. Для построения модели тепломассопереноса использовалась замкнутая система уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости.

Применяемые в данном исследовании методы построения модели тепломассопереноса в жидкой среде отличаются достаточно высокой сложностью описания и трудоемкостью расчета, а также не могут в полной мере описать теплообмен в наплавленном металле и металле основания. Использование уравнения нестационарной теплопроводности (метод Стефана) применяется только для расчета распределения тепла вдоль направления движения источника тепловой энергии и не позволяет описать распределение тепла во всем объеме металла, что необходимо для детального построения температурного поля и контроля структурных изменений во всех участках наплавляемого изделия.

Большой вклад в исследование влияния параметров процесса послойного наплавления проволочного материала на формирование остаточных деформаций, а также в моделирование термомеханического

поведения изделий в процессе аддитивного производства внесли ученые Пермского национального исследовательского политехнического университета Сметанников О.Ю., Трушников Д.Н. и др. [75].

В работах данных авторов реализован алгоритм расчета нестационарных температурных полей и напряжённо-деформированного состояния наплавляемого металла в процессе послойного электродугового наплавления проволочного присадочного материала на основе программного пакета ANSYS. Для решения поставленной краевой задачи авторами применялась технология «умерщвления» и последующего «оживления» части материала, возникающего в процессе послойной наплавки. Определение полей температур производится на основе следующего дифференциального уравнения теплопроводности [76]:

$$\rho(x)c(x,T)\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(x,T)\operatorname{grad}(T)), x \in V_k. \quad (1.2)$$

Такой подход требует формирования множества условий, описывающих конвективный и радиационный перенос тепла по закону Стефана-Больцмана, а также условий равновесия, граничных условий при перемещениях и напряжениях. Недостатками данного подхода являются низкая эффективность учета лучистого переноса тепла вследствие пренебрежимо малых размеров ванны расплавленного металла и неограниченного пространства вокруг источника тепловой энергии.

Выбранные параметры технологического процесса, которые по мнению автора оказывают наибольшее влияние на изменение термического цикла и остаточных напряжений в изделии, включающие время выдержки между наплавляемыми слоями, траекторию движения горелки и температуру окружающей среды, не могут использоваться для детального представления механизма распределения тепла в наплавленном металле и не подходят для организации автоматизированного управления процессом аддитивного производства, так как не учитывают основные характеристики источника тепловой энергии (сила тока и напряжение дуги).

Исследователями Холоповым А.А., Мианджи З. и Бинковым И.И. Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана предложен метод автоматизированного регулирования ванны расплавленного металла в зависимости от мощности источника тепловой энергии на основе экспериментального и численного исследования теплообмена при выращивании тонкостенных деталей методом коаксиального лазерного плавления [77].

Используемое авторами дифференциальное уравнение теплопроводности учитывает теплопроводность металла между наплавленными слоями и основанием, конвективный теплообмен, а также лучистый отвод тепла в атмосферу. В отличие от рассмотренных выше работ данный подход позволяет регулировать мощность источника тепла и изменять термический цикл послойного наплавления. Недостатком данного подхода является его ограниченное применение, связанное с технологическими различиями между лазерным и электродуговым наплавлением металла.

Еще один метод численного моделирования процесса аддитивного производства на основе лазерного спекания металлических порошков разработан в ИПЛИТ РАН учеными Панченко В.Я., Васильцовым В.В., Низьевым В.Г. и др. Предложенная модель учитывает потери тепловой энергии за счет теплопроводности металла и радиационного охлаждения. Введение эффективного коэффициента теплопроводности в зоне расплавленного металла позволяет учесть гидродинамический перенос тепловой энергии [78]. Однако полученные результаты предназначены лишь для определения теоретических рекомендаций по параметрам лазерного изучения при послойном наплавлении и не позволяют осуществлять оптимизацию режима аддитивного производства по параметрам источника электрической дуги.

Кузнецов М.А., Крампит М.А., Крюков А.В. и другие ученые предложили имитационную модель электродугового послойного выращивания валика на основе программного комплекса CONSOL

Multiphysics. Основной задачей модели является получение оптимальных параметров режима электродугового наплавления в зависимости от заданных характеристик слоя. В качестве присадочного материала использовалась сварочная проволока марки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. По результатам исследования было установлено, что рассчитанные значения расходятся с экспериментальными данными не более чем на 1-3% [79].

Недостатком предложенной модели является отсутствие возможности проводить оптимизацию режимов послойного наплавления не только в зависимости от геометрии наплавляемого слоя, но и с учетом изменения температуры наплавляемого металла и металла основания.

Авторами Киричек А.В., Федонина С.О., Баринов С.В. Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых проведено экспериментальное исследование характера распределения тепловых потоков в процессе послойного наплавления деталей оболочкового типа. Разработка модели распределения температуры и визуализация процесса аддитивного производства детали способом электродугового наплавления осуществлялась методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Оценка адекватности разработанной модели проводилось в ходе изготовления экспериментального образца, состоящего из 18 слоев металла. В результате эксперимента установлено, что стабилизация температуры наступает после наплавления 5-6 слоев [80].

Представленная модель является хорошим инструментом для исследования температурного поля в наплавляемом металле и металле основания, однако требует существенных доработок и совершенствования для внедрения в реальный производственный процесс. Кроме того, для моделирования тепловых процессов в металле используется специализированное программное обеспечение, требующее дополнительных затрат на приобретение лицензии и обучение работников предприятий.

Проведенный анализ работ других авторов в области моделирования и автоматизации технологического процесса аддитивного производства показал

высокую востребованность и актуальность выбранной темы диссертационного исследования.

Необходимость разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства на основе программы для моделирования температурного поля в изделии, расчета оптимальных параметров температурно-временного режима и траектории послойного наплавления вызвана наличием следующих нерешенных задач в рассмотренных выше работах:

1. Разработанные авторами модели, как правило, реализованы с использованием специализированных программных средств, не предназначенных для использования в системе управления технологическим процессом.

2. Практически все работы по моделированию процессов аддитивного производства основаны на готовых программных решениях, что значительно ограничивает их применение при изготовлении единичной и мелкосерийной продукции в связи с высокими затратами на приобретение лицензионного программного продукта и обучение работе с ним работников производства.

3. Большинство методик направлены на расчет температурных полей в изделии без учета характеристик источника тепловой энергии и изменения параметров режима послойного наплавления.

4. При исследовании процессов аддитивного производства авторы отдают предпочтение способам лазерного послойного построения, которые обладают низкой производительностью и применяются, как правило, только в научных целях или при производстве уникальных металлических изделий.

В данной работе разработана модель температурного поля при послойном электродуговом наплавлении проволочного присадочного материала, учитывающая геометрические параметры наплаваемого изделия, технические характеристики источника тепловой энергии, теплофизические свойства и граничные значения температур в зависимости от марки

наплавляемого металла. Реализующая ее программа входит в верхний уровень автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства и позволяет определить оптимальный температурно-временной режим и траекторию послойного наплавления на основе расчета полей температур в изделии и идентификации параметров теплообмена.

Выводы

В первой главе диссертации приведен анализ современных технологий аддитивного производства, описаны особенности различных процессов, приведены их преимущества и недостатки. Установлено, что наиболее перспективной с точки зрения производительности является технология электродугового наплавления присадочной проволоки.

Подробно рассмотрен технологический процесс послойного электродугового наплавления присадочной проволоки. Выделены его основные стадии с подробным описанием выполняемых работ и используемого оборудования. Описан потенциал автоматизации процесса послойного наплавления.

Рассмотрены известные методы расчета температурных полей в наплавляемом металле при аддитивном производстве металлических изделий, приведены их особенности, позволяющие учесть опыт других исследователей в области автоматизации процессов аддитивного производства, подтверждающие актуальность разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства на основе программы для оптимизации температурно-временного режима и траектории послойного наплавления.

На основе проведенного обзора существующих способов моделирования и автоматизации различных технологий аддитивного производства можно сделать вывод, что 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, определения оптимального температурно-временного режима и траектории послойного наплавления, обеспечивающих стабильное качество внутренней структуры и геометрической формы наплавленного металла, является актуальной научной задачей.

2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОСЛОЙНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА

Автоматизация управления процессом послойного электродугового наплавления присадочной проволоки непосредственно связана с температурой наплавленного металла. Начальные и текущие значения температур наплавленного слоя определяют будущую структуру, геометрические размеры и физико-механические свойства изготавливаемой детали. Поэтому для решения задачи управления необходимо построить модель расчета температурного поля в изделии на всех этапах его аддитивного производства.

Металлы относятся к непрозрачным материалам, перенос тепловой энергии у которых осуществляется с помощью трех механизмов теплообмена: теплопроводности, конвекции и радиации.

Теплопроводностью осуществляется передача тепла из более нагретых участков объекта к менее нагретым за счет межатомного взаимодействия. При этом, чем больше разница температур между соседними участками, тем более интенсивен процесс теплопередачи [81, 82]. Количество теплоты dQ , протекающей за счет теплопроводности через изотермический участок поверхности, пропорционально градиенту температуры dT/dx , площади участка dF и времени dt может быть определено следующим образом:

$$dQ = \lambda \left(-\frac{dT}{dx} \right) dF dt. \quad (2.1)$$

В стационарных условиях и однородной среде с одномерным температурным полем (рис. 2.1) тепловой поток определяется по формуле:

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} = \lambda \frac{\Delta T}{L}, \quad (2.2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·град).

Коэффициент теплопроводности характеризует способность металла проводить тепло и численно равен количеству тепла, которое протекает в единицу времени через единицу поверхности по направлению нормали к этой поверхности при градиенте температур в 1 К на 0,01 м.

Коэффициент теплопроводности является главной теплофизической характеристикой всех металлов и зависит от химического состава сплава, его структуры и текущей температуры [83].

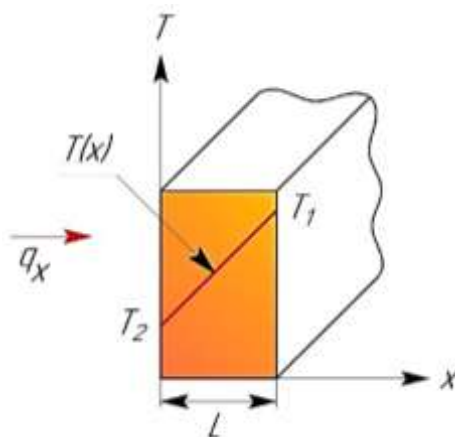


Рис. 2.1. Механизм теплопроводности в стационарных условиях с одномерным температурным полем

Конвективный механизм теплообмена заключается в передаче тепла с поверхности металла в окружающую среду [84]. Чаще всего, электродуговая сварка и послойное наплавление проводятся на открытом воздухе, а применяемые защитные газы или их смеси не препятствуют конвективному теплообмену с окружающей средой. При изготовлении деталей с повышенными требованиями к качеству структуры наплавленного металла могут применяться вакуумные камеры, для дополнительной защиты наплавленного металла и зоны термического влияния. В данном случае эффективность конвективного теплообмена значительно снижается.

Приближенно конвективный тепловой поток с единицы поверхности в единицу времени при наплывании на открытом воздухе может быть определен по закону Ньютона-Рихмана:

$$dQ_c = \alpha \cdot (T_s - T_0) \cdot dF, \quad (2.3)$$

где α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(см²·град); T_s – температура поверхности твердого тела; T_0 – температура среды.

Коэффициент конвективной теплопроводности изменяется в зависимости от свойств окружающей среды и скорости движения ее частиц относительно поверхности твердого тела, от физических свойств поверхности, которая отдает тепло, ее формы и положения в пространстве, а также градиента температур $T_s - T_0$ [85].

Радиационный или лучистый теплообмен осуществляется за счет электромагнитных колебаний, частота которых находится в основном в инфракрасной области с диапазоном длин волн от 0,6 мкм до 0,8 мм. Излучаемая вследствие радиационного теплообмена энергия может поглощаться окружающими телами, отражаться их поверхностью или проходить сквозь тело. Поглощаемая часть радиационной энергии превращается в тепловую, а отражаемая и прошедшая через тело энергия попадает на другие окружающие тела. Таким образом, осуществляется распределение энергии излучения между окружающими телами.

Излучение реального тела пропорционально четвертой степени его абсолютной температуры и определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_e^4, \quad (2.4)$$

где ε – степень черноты; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), постоянная Стефана-Больцмана; T_e – температура излучающей поверхности, К.

Закон Стефана-Больцмана устанавливает зависимость плотности потока излучения от температуры. При этом поверхность может не только излучать, но и поглощать излученную другим телом энергию. Величина поглощенной энергии определяется величиной коэффициента поглощения.

Исследуемая технология послойного электродугового наплавления металла реализуется на открытом пространстве, в котором отсутствуют предметы способные в значительной мере поглощать радиационное излучение. Исключением является сварочная горелка, через которую осуществляется подача присадочной проволоки и защитного газа, однако ее размеры недостаточны, чтобы оказывать влияние на распределение тепла в металле. Кроме того, в процессе наплавления площадь окружающих поверхностей (стены помещения, технологическое оборудование) значительно больше площади наплавляемого металла, поэтому в соответствии с алгеброй угловых коэффициентов излучения радиационным тепловым потоком между такими телами в этом случае можно пренебречь.

Для решения задачи теплопроводности в сварочных процессах могут использоваться аналитические, численные и экспериментальные методы [86]. Аналитические и численные методы применяются для решения задач теплопроводности в твердых телах сложной формы. Среди аналитических методов различают точные и приближенные. Использование точных методов позволяет выразить решение дифференциальных уравнений через элементарные функции, а приближенные методы позволяют получать решение в виде предела некоторой последовательности, члены которой выражаются через элементарные функции [87]. С помощью численных методов определяется множество приближенных значений требуемого решения задачи в некоторых точках рассматриваемой области решения. Численные методы используются для решения сложных дифференциальных уравнений со всеми типами граничных условий. Решения численных методов возможны только при известных граничных условиях, включающих начальное распределение температур в твердом теле и условия на его поверхности, которые могут быть заданы тепловым потоком, коэффициентом теплоотдачи или температурой поверхности [88]. Экспериментальные методы применяются в тех случаях, когда получить результат с помощью

перечисленных выше методов невозможно, например, при определении теплофизических свойств материала.

2.1. Использование аналитических методов для моделирования температурного поля при послойном электродуговом наплавлении

Сущность аналитических методов моделирования температурного поля в изделиях заключается в решении дифференциального уравнения теплопроводности при заданных форме изделия (например, плоская или цилиндрическая) и краевых (начальных или граничных) условиях [89]. В зависимости от этих условий используются различные аналитические методы решения задач теплопроводности: метод источников, операционные методы и метод разделения переменных. Метод источников отличается наглядностью и простотой учета характеристик сварочных источников тепла. Его суть состоит в том, что любой процесс распределения теплоты в твердом теле можно представить, как сумму процессов выравнивания температуры от некоторого множества элементарных источников теплоты, распределенных в пространстве и времени.

Аналитические методы позволяют получить общее уравнение процесса при множестве числовых значений геометрических размеров изделия, тепловых характеристиках режимов аддитивного производства и физических свойств стали. Решение можно получить в виде простого уравнения замкнутого вида, выраженного через известные функции от времени, положения в пространстве и постоянных параметров процесса [90-92].

В процессе моделирования температурного поля при послойном наплавлении металла важную роль играет учет геометрической формы изделия [93]. В настоящее время наибольшее распространение имеют аналитические модели температурных полей для плоских изделий, а тела цилиндрической формы приводятся к плоской форме за счет введения эффективного или характерного размера. Например, при нагреве тонкостенного цилиндра, у которого толщина стенки значительно меньше его радиуса, можно считать, что теплота в нем будет распределяться по тем же

законам, что и в плоском изделии. А при нагреве сплошного или толстостенного цилиндра необходимо проводить построение системы источников, аналогичных точечным, линейным и плоским источникам в полу бесконечном теле или пластине. В таком случае будут рассмотрены только поверхностные источники в цилиндрической системе координат. Однако, необходимо учитывать, что при упрощении или разделении задачи снижается точность расчетов и не учитывается реальная геометрия изделий цилиндрической формы.

Преимуществом использования аналитических методов является то, что решение задачи получается в форме, которая позволяет рассчитать температурное распределение в любой точке изделия и в любой момент времени.

В качестве примера рассмотрен процесс наплавления стенки изделия шириной D_2 . Для моделирования температурного поля в плоском изделии необходимо решить двухмерную задачу теплопроводности. Предположим, что изделие имеет следующие геометрические размеры (рис. 2.2): B_2 – длина наплавляемого слоя; B_1 – длина основания изделия; L – общая высота детали; L_1 – высота основания; L_2 – высота наплавляемого слоя; T_m – температура плавления металла, 1500 °С; T_c – температура окружающей среды, 20 °С. В начальный момент наплавления изделие находится в среде с температурой окружающего воздуха T_c . В процессе наплавления на основание изделия точно подается электрический дуговой разряд, под действием которого образуется ванна расплавленного металла с температурой T_m , состоящая из расплавленной присадочной проволоки и металла основания. По мере плавления присадочного материала источник тепловой энергии перемещается по длине наплавляемого слоя.

Между остывающим наплавленным металлом и металлом основания происходит кондуктивный теплообмен за счет молекулярной теплопроводности стали и несимметричный конвективный теплообмен между поверхностями наплавляемого изделия и окружающим воздухом по закону

Ньютона с коэффициентами теплоотдачи α_i на различных участках поверхности изделия.

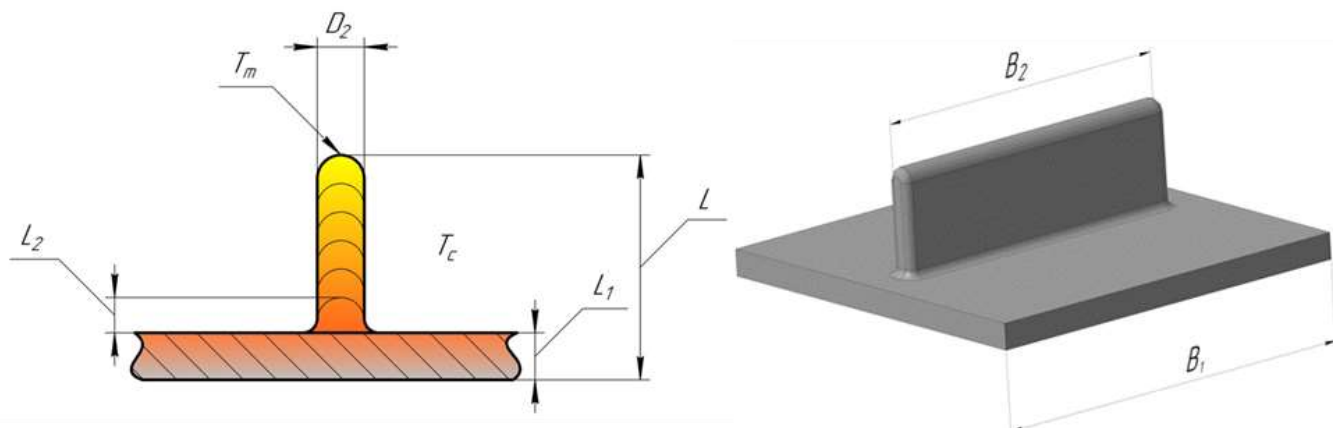


Рис. 2.2. Характеристики наплавленной стенки изделия

Дифференциальное уравнение теплопроводности для плоского тела в двухмерных пространственных координатах без внутренних источников теплоты может быть записано следующим образом

$$\frac{\partial T(x,z,\tau)}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left[\frac{\partial^2 T(x,z,\tau)}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T(x,z,\tau)}{\partial x^2} \right], \quad (2.5)$$

где x – координата по длине наплаваемого слоя B ; z – координата по высоте наплаваемой детали L .

Основными недостатками аналитических методов решения задач теплопроводности является то, что их применение возможно лишь для процессов, которые описываются линейными дифференциальными уравнениями при линейных граничных условиях, то есть теплофизические свойства стали, включающие температуропроводность, теплопроводность, плотность теплового потока на поверхности тела и коэффициент поверхностной теплоотдачи не должны зависеть от изменения температуры наплавленного металла. Более сложные граничные условия, а, главное, неравномерно увеличивающиеся геометрические размеры исследуемой конструкции не позволяют применить аналитические методы для решения задачи теплопроводности при послойном электродуговом наплавлении.

Для учета сложной геометрической формы наплаваемого изделия и изменения теплофизических свойств стали от её температуры решение задачи

теплопроводности может быть получено только с помощью численных методов, среди которых наибольшее распространение получили метод конечных разностей и метод конечных элементов.

2.2. Численные методы моделирования температурного поля при послойном электродуговом наплавлении металлических изделий

Подход к решению задачи теплопроводности с помощью численных методов заключается в разделении временного промежутка послойного наплавления на отдельные этапы и замене в дифференциальном уравнении теплопроводности градиентов по координате конструкции на малые величины толщины [94-96].

Наиболее удобным методом решения дифференциального уравнения теплопроводности является метод конечных разностей [97, 98], заключающийся в замене искомой непрерывной функции T совокупностью ее значений, определенных на установленном множестве точек заданной области. Точки называются узлами, а множество соединенных между собой узлов образуют сетку. Расчет методом конечных разностей для процесса наплавления удобно производить по явной численной схеме, когда распределение температуры металла в любой момент времени T_{i+1} рассчитывается по температуре в предыдущий момент времени T_i .

Для решения задачи методом конечных разностей частные производные в дифференциальном уравнении теплопроводности (2.5) по времени 1-го порядка и по координатам 2-го порядка необходимо заменить на их численные аналоги.

Для этого точки наплавляемого изделия представляются в виде двухмерной сетки. Производится разбиение металлического основания (подложки) и наплавляемого слоя в вертикальном (по оси z) и горизонтальном (по оси x) направлениях на равные части с шагом $\Delta L = 0,001$ м. Число слоев по высоте N и по длине N_z наплавляемой конструкции выбирается из оптимального соотношения между точностью и временем вычислений.

Для сходимости явной численной схемы расчета необходимо, чтобы шаг по времени $\Delta\tau$ не превышал предельно допустимого значения:

$$\Delta\tau_{max} = \frac{\Delta L^2}{2a}. \quad (2.6)$$

Так, для $\Delta L = 0,001$ м и $a = 8,17 \cdot 10^{-6}$ м²/с из (2.6) получается значение $\Delta\tau_{max} = 0,06$ с, в программе для этих данных с учетом запаса рекомендуется принять значение $\Delta\tau = 0,02$ с. Исходными данными, связывающими режимы послойного наплавления с получаемым в программе распределением температур, являются время наплавления одного слоя металла τ_m и продолжительность наплавления одной части слоя τ_p . Для удобства расчетов длина части слоя ΔB принимается равной 0,005 м, что соответствует размерам капли наплавленного металла. Таким образом, наплаваемый за один проход сварочной горелки слой длиной B будет разбит на заданное количество частей

$$i_m = \frac{B}{\Delta B}. \quad (2.7)$$

Количество расчетов i_p , которое необходимо выполнить программе для определения температурного распределения в одной части слоя ΔB может быть определено по формуле:

$$i_p = \frac{\tau_p}{\Delta\tau}. \quad (2.8)$$

Число частей, на которое разбиваются основание и наплаваемый слой, зависит от геометрических характеристик изготавливаемой детали и рассчитывается по следующим формулам:

$$N_1 = \frac{L_1}{\Delta L}; N_2 = \frac{L_2}{\Delta L}; N_3 = \frac{B}{\Delta L}. \quad (2.9)$$

Общее число частей по высоте одного наплавленного слоя металла определяется суммированием частей основания N_1 и наплавленного слоя N_2

$$N = N_1 + N_2, \quad (2.10)$$

тогда количество расчетных точек по высоте одного слоя

$$n = N + 1. \quad (2.11)$$

Геометрическая конфигурация и размеры изделия в виде двухмерной сетки представлена на рис. 2.3.

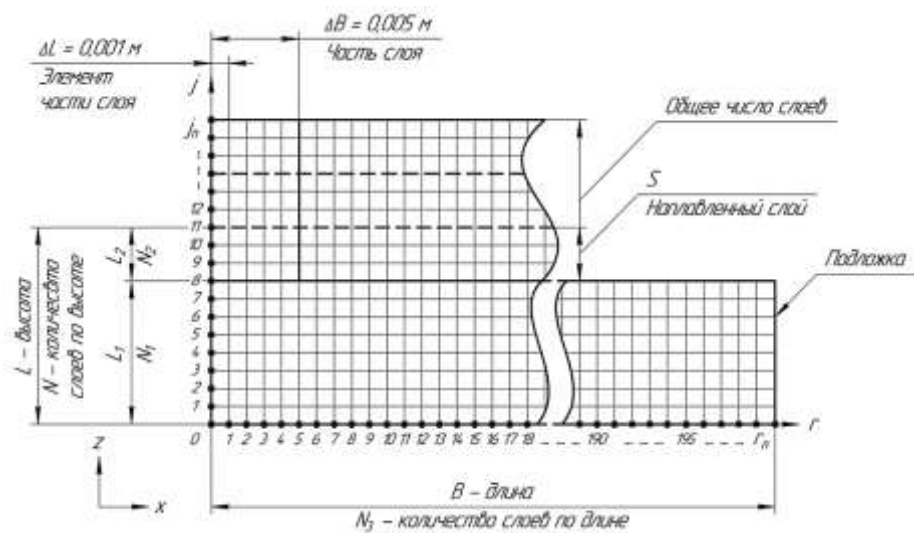


Рис. 2.3. Двухмерная сетка наплавляемой конструкции

Численным аналогом частной производной первого порядка температуры по времени $\frac{\partial T(x,z,\tau)}{\partial \tau}$ является величина

$$\frac{T_{i+1}(j,r) - T_i(j,r)}{\Delta \tau}, \quad (2.12)$$

где i – номер временной точки расчета ($i = 0, 1, 2, 3, \dots, i_f$); r – номер точки по длине наплавляемого слоя, $r = \overline{0, N_3}$; j – номер точки по высоте наплавляемого слоя, $j = \overline{0, N}$, $\Delta \tau$ – шаг по времени.

Механизм теплообмена в наплавляемом изделии изменяется в зависимости от координаты расчетной точки. Например, во внутренних точках, которые контактируют только с окружающим их металлом, передача тепла будет осуществляться за счет кондуктивного теплообмена между соседними точками по высоте L и длине B изделия. Для точек, которые находятся на поверхности изделия (внешние точки), будет осуществляться кондуктивный теплообмен с соседними точками и конвективный теплообмен с окружающей средой с температурой $T_c = 20^\circ \text{C}$.

Тогда численными аналогами частной производной второго порядка температуры по длине изделия $\frac{\partial^2 T(x,z,\tau)}{\partial x^2}$ для внутренних точек изделия является величина

$$\frac{T_i(j,r-1) - 2T_i(j,r) + T_i(j,r+1)}{\Delta L^2}, \quad (2.13)$$

а для внешних точек по длине изделия (левая и правая граница):

$$\frac{T_i(j,1)-T_i(j,0)}{\Delta L^2}; \quad (2.14)$$

$$\frac{T_i(j,N_3-1)-T_i(j,N_3)}{\Delta L^2}. \quad (2.15)$$

Численными аналогами частной производной второго порядка температуры по высоте изделия $\frac{\partial^2 T(x,z,\tau)}{\partial z^2}$ для внутренних точек является величина

$$\frac{T_i(j-1,r)-2T_i(j,r)+T_i(j+1,r)}{\Delta L^2}, \quad (2.16)$$

для внешних точек по высоте изделия с внутренней поверхности подложки

$$\frac{T_i(1,r)-T_i(0,r)}{\Delta L^2}, \quad (2.17)$$

и для внешней поверхности подложки и наплавленного металла

$$\frac{T_i(N-1,r)-T_i(N,r)}{\Delta L^2}. \quad (2.18)$$

Используя полученные выше численные аналоги частных производных, можно составить ряд уравнений теплопроводности, описывающих вертикальное и горизонтальное распределение температур в наплавленном изделии.

Чтобы сократить количество производимых программой операций и упростить процесс определения температурного поля проведено преобразование расчетных формул, заключающееся в выделении коэффициентов, содержащих постоянные в ходе данного этапа расчета величины (теплофизические характеристики, шаг расчета и толщины слоя).

Для этого удобно выделить следующие коэффициенты при расчете изменения температуры за счет конвективного и радиационного теплообмена:

– для внутренних точек изделия

$$GT = \frac{\Delta \tau \cdot a}{\Delta L^2}; \quad (2.19)$$

– для граничных точек изделия

$$GT_2 = 2 \cdot GT; \quad (2.20)$$

– для граничных точек изделия с учетом естественной конвекции

$$GC = GT_2 \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta L}{\lambda}; \quad (2.21)$$

– для граничных точек с учетом вынужденной конвекции

$$GC_2 = GT_2 \cdot \frac{\alpha_2 \cdot \Delta L}{\lambda}; \quad (2.22)$$

– для граничных точек верхней поверхности наплавленной конструкции с учетом радиационного теплопереноса:

$$GR_1 = GT_2 \cdot \frac{\varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot \Delta L}{\lambda}; \quad (2.23)$$

– для граничных точек нижней поверхности основания с учетом радиационного переноса тепла:

$$GR_2 = GT_2 \cdot \frac{\varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot \Delta L}{\lambda}, \quad (2.24)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К) – постоянная Стефана-Больцмана; ε_1 – степень черноты для нижней и боковых поверхностей подложки; ε_2 – степень черноты для наплавленной конструкции и верхней поверхности подложки, α_2 – коэффициент вынужденного конвективного теплообмена.

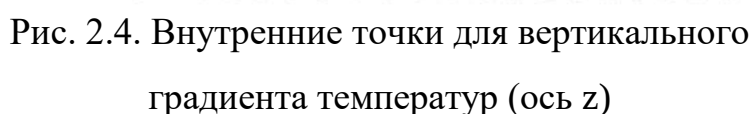
В соответствии с вышеизложенным алгоритм расчета температурного поля в наплавленном изделии будет выглядеть следующим образом. Сначала находятся изменения температур внутренних точек по высоте конструкции с учетом наплавленной части за счет теплопроводности (рис. 2.4)

$$T_{i+1}(j, r) = T_i(j, r) + \Delta \tau \cdot a \left[\frac{T_i(j-1, r) - 2T_i(j, r) + T_i(j+1, r)}{\Delta L^2} \right]. \quad (2.25)$$

С учетом введения упрощающего коэффициента (2.19) уравнение (2.25) будет иметь следующий вид:

$$T_{i+1}(j, r) = T_i(j, r) + GT \cdot (T_i(j-1, r) - 2T_i(j, r) + T_i(j+1, r)), \quad (2.26)$$

где $i = \overline{0, i_f}$, $i_f = \frac{\tau_m}{\Delta \tau}$ – количество временных точек расчета; $r = \overline{0, r_f - 1}$, где r_f – количество точек по длине наплавления; $j = \overline{1, N - 1}$ для всего изделия.



– для нижней поверхности подложки

$$T_{i+1}(0, r) = T_i(0, r) + GT_2 \cdot (T_i(1, r) - T_i(0, r)) + GC \cdot (T_c - T_i(0, r)), \quad (2.28)$$

– для верхней поверхности изделия

$$T_{i+1}(j, r) = T_i(j, r) + GT_2 \cdot (T_i(j-1, r) - T_i(j, r)) + GC \cdot (T_c - T_i(j, r)), \quad (2.30)$$

Затем находятся изменения температур только по высоте подложки без учета наплавленных частей: для внутренних точек подложки – по формуле (2.26) при $r = \overline{r_f, N_3}$, $j = \overline{1, N_1 - 1}$; для верхней поверхности подложки – из (2.30) при $j = N_1$. На этом заканчивается расчет изменения температур конструкции за счет градиентов теплопроводности и конвекции в вертикальном направлении.

– для правой границы

$$T_{i+1}(j, N_3) = T_{i+1}(j, N_3) + GT_2 \cdot (T_i(j, N_3 - 1) - T_i(j, N_3)) + GC \cdot (T_c - T_i(j, N_3)), \quad (2.33)$$

где $i = \overline{0, i_f}$; $j = \overline{0, N_1}$.

Необходимо учесть, что в момент начала процесса послойного наплавления между подложкой и присадочным материалом возникает электрический разряд, под действием которого расплавляется присадочная проволока и контактирующая с ней область поверхности металлического основания. Данный процесс сопровождается образованием капли расплавленного металла и её последующем переносом на поверхность металлического основания. После контакта капли с поверхностью подложки образуется область, состоящая из металла с температурой $T_m = 1500$ °С и называемая сварочной ванной. По мере перемещения горелки по длине изделия сварочная ванна также перемещается за источником тока, а сформировавшийся ранее слой материала постепенно охлаждается, создавая заданную геометрию изделия.

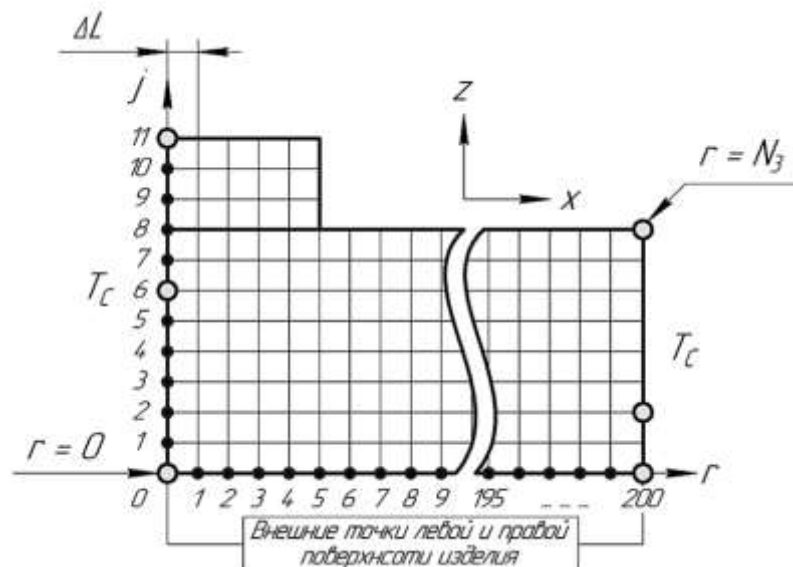


Рис. 2.7. Внешние точки для горизонтального градиента температур

Для дальнейшего расчета распределения температур в изделии необходимо учесть подачу правее уже наплавленных на подложку частей $r = \overline{0, r_f - 1}$ новой части металла с температурой $T_m = 1500$ °С. При расчете

изменений температур наплавки учитываются градиенты теплопроводности в горизонтальном направлении по длине наплавляемого слоя.

Сначала рассчитывается изменение температуры крайней левой точки наплавленной части металла

$$T_{i+1}(j, 0) = T_{i+1}(j, 0) + GT_2 \cdot (T_i(j, 1) - T_i(j, 0)) + GC \cdot (T_c - T_i(j, 0)), \quad (2.34)$$

где $j = \overline{N_1 + 1, N}$.

Затем при наличии в наплавке внутренних точек ($r_f > 2$) находим изменение их температур

$$T_{i+1}(j, r) = T_{i+1}(j, r) + GT \cdot (T_i(j, r - 1) - 2T_i(j, r) + T_i(j, r + 1)), \quad (2.35)$$

где $j = \overline{N_1 + 1, N}$; $r = \overline{1, r_f - 2}$.

При наличии правой граничной точки ($r_f > 1$) находится изменение ее температуры по формуле

$$T_{i+1}(j, r_f) = T_{i+1}(j, r_f) + GT_2 \cdot (T_i(j, r_f - 1) - T_i(j, r_f)) + GC \cdot (T_c - T_i(j, r_f)). \quad (2.36)$$

Для расчета температурного поля в конструкции при переходе к наплавке последующего наплавляемого слоя в формулах (2.25)-(2.36) корректировка количества слоев осуществляется следующим образом: для подложки $N_1 = N_1 + N_2$; для всей конструкции $N = N + N_2$.

Приведенные выше формулы позволяют определить температурное поле в изделии на различных этапах процесса послойного электродугового наплавления с учетом теплопроводности и конвективного теплообмена поверхностей изделия с окружающей средой.

После окончания наплавления сформированное изделие остывает за счет естественного или искусственного конвективного теплообмена поверхности изделия с окружающей средой. При вынужденной конвекции для верхней поверхности изделия используется коэффициент (2.22).

Формулы для расчета этапа отдыха (при отсутствии наплавления новых слоев металла, см. рис. 2.8) выглядят следующим образом.

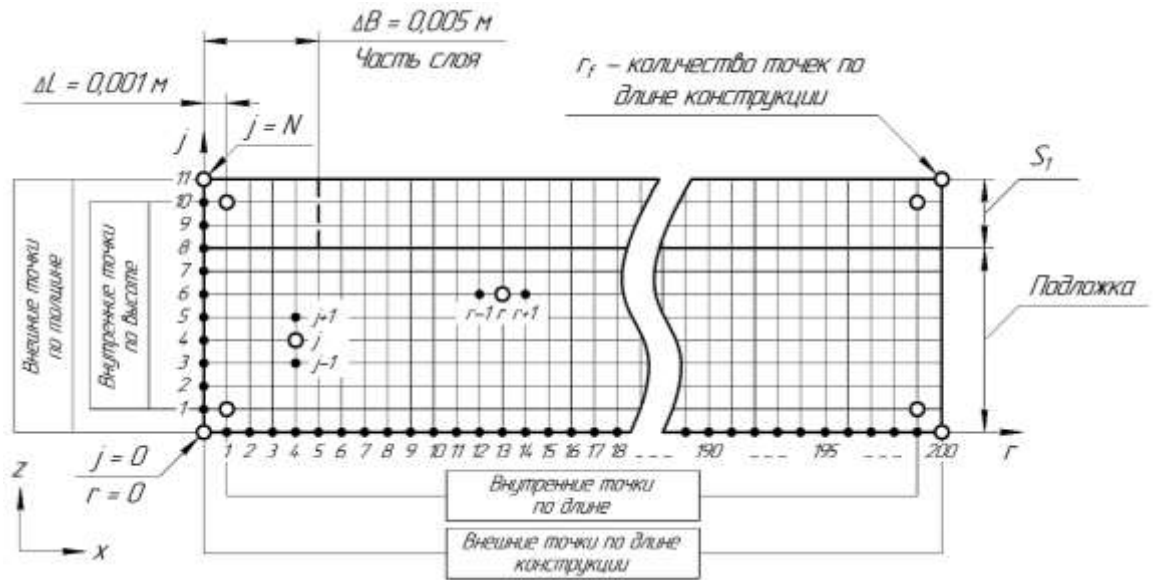


Рис. 2.8. Сетка конструкции остывающего изделия,
состоящего из подложки и одного наплавленного слоя

Сначала находятся изменения температур в вертикальном направлении ($i = \overline{0, l_f}; r = \overline{0, N_3}$) для внутренних точек $j = \overline{1, N - 1}$

$$T_{i+1}(j, r) = T_i(j, r) + GT \cdot (T_i(j - 1, r) - 2T_i(j, r) + T_i(j + 1, r)), \quad (2.37)$$

для нижней поверхности подложки

$$T_{i+1}(0, r) = T_i(0, r) + GT_2 \cdot (T_i(1, r) - T_i(0, r)) + GC \cdot (T_c - T_i(0, r)), \quad (2.38)$$

для верхней поверхности изделия

$$T_{i+1}(N, r) = T_i(N, r) + GT_2 \cdot (T_i(N - 1, r) - T_i(N, r)) + GC_2 \cdot (T_c - T_i(N, r)). \quad (2.39)$$

Затем находится изменение температур конструкции в горизонтальном направлении ($i = \overline{0, l_f}; j = \overline{0, N}$) для внутренних точек $r = \overline{1, N_3 - 1}$

$$T_{i+1}(j, r) = T_{i+1}(j, r) + GT \cdot (T_i(j, r - 1) - 2T_i(j, r) + T_i(j, r + 1)), \quad (2.40)$$

для левой границы

$$T_{i+1}(j, 0) = T_{i+1}(j, 0) + GT_2 \cdot (T_i(j, 1) - T_i(j, 0)) + GC_2 \cdot (T_c - T_i(j, 0)), \quad (2.41)$$

и для правой границы

$$T_{i+1}(j, N_3) = T_{i+1}(j, N_3) + GT_2 \cdot (T_i(j, N_3 - 1) - T_i(j, N_3)) +$$

$$+ GC \cdot (T_c - T_i(j, N_3)). \quad (2.42)$$

Расчет по формулам (2.37)-(2.42) позволяет определять изменение температурного поля при охлаждении металла за установленный промежуток времени на этапе отдыха. При отсутствии вынужденного обдува наплавленной части изделия коэффициент GC_2 принимается равным GC .

2.3. Учет изменения теплофизических характеристик стали в зависимости от температуры

Особенностью любых, в том числе металлических материалов, является зависимость коэффициентов температуропроводности α , теплопроводности λ и теплоемкости C от температуры (табл. 2.1).

Для учета данной зависимости в программу расчета температурного поля в металлических изделиях необходимо добавить модуль, корректирующий коэффициенты α и λ на основании температур в конце наплавления каждого слоя металла.

Таблица 2.1. Теплофизические свойства (Сталь 08)

Температура, °C	Температуропроводность α , м ² /с·10 ⁶	Теплопроводность λ , Вт/(м·град)
50-100	15,28	86-56
100-150	14,44	56-53
150-200	13,33	
200-250	12,50	53-48
250-300	11,67	
300-350	11,11	48-45
350-400	10,00	
400-450	9,17	45-41
450-500	8,06	
500-550	7,22	41-37
550-600	6,39	
600-650	5,83	37-34
650-700	5,00	
700-750	3,61	34-30
750-800	3,89	
800-850	4,17	30-27
850-900	4,44	
900-950	5,28	27-28
950-1000	5,56	
1000-1050	5,56	
<1050	5,83	28 (30, 32)

Принцип корректировки коэффициентов заключается в определении усредненной температуры изготавливаемой конструкции в конце каждого слоя как отношения суммы температур всех точек изделия к их количеству

$$\bar{T} = \frac{\sum T_{j,r}}{j \cdot r}, \quad (2.43)$$

где j и r – число точек по длине и высоте изделия.

При этом, если

$$\bar{T} \leq T_n, \quad (2.44)$$

где T_n – нижняя граница температуры изменения свойств металла ($T_n = 20$ °С), в соответствии с справочными данными коэффициент теплопроводности будет равен

$$\lambda = \lambda_n = 85 \text{ (Вт/м} \cdot \text{К)} \quad (2.45)$$

и коэффициент теплоемкости металла

$$C = C_n = 455 \text{ (Дж/кг} \cdot \text{К)}. \quad (2.46)$$

Если

$$\bar{T} \geq T_b, \quad (2.47)$$

где T_b – верхняя граница температуры изменения свойств металла ($T_b = 1200$ °С). В соответствии с справочными данными коэффициенты теплопроводности и теплоемкости металла будут равны:

$$\lambda = \lambda_b = 29 \text{ (Вт/м} \cdot \text{К)}; \quad (2.48)$$

$$C = C_b = 700 \text{ (Дж/кг} \cdot \text{К)}. \quad (2.49)$$

Для остальных значений температур металла коэффициенты теплопроводности и теплоемкости будут определяться с помощью линейной аппроксимации по формулам:

$$\lambda = \lambda_n + (\bar{T} - T_n) \cdot \left(\frac{\lambda_b - \lambda_n}{T_b - T_n} \right); \quad (2.50)$$

$$C = C_n + (\bar{T} - T_n) \cdot \left(\frac{C_b - C_n}{T_b - T_n} \right). \quad (2.51)$$

Далее по полученным значениям коэффициентов проводится корректировка коэффициента температуропроводности

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C}, \quad (2.52)$$

где ρ – плотность стали, равная 7800 кг/м³.

На основе коэффициента теплопроводности осуществляется расчет максимально допустимого шага по времени

$$\Delta \tau_{max} = \frac{\Delta L^2}{2 \cdot \alpha}. \quad (2.53)$$

Корректировка коэффициентов теплопроводности в зависимости от температуры металла позволяет увеличить точность расчета температурного поля в изделии, а также производить контроль максимального шага по времени наплавления $\Delta\tau$.

2.4. Моделирование температурного поля при сложных условиях послойного электродугового наплавления

В реальных производственных условиях часто размеры металлической подложки и ее начальная температура могут отличаться от аналогичных характеристик наплавляемого слоя. Также невозможно определить точное значение температуры в точке контакта наплавляемого металла с подложкой N_1 . Поэтому в программу расчета температурного поля вводятся весовые коэффициенты w_1 и w_2 соответственно для предпоследней точки подложки $N_1 - 1$ и второй точки наплавленной части слоя $N_1 + 1$, а также выполняется корректировка расчетных формул с учетом бóльших размеров подложки по сравнению с наплавкой по длине. Это позволяет учесть возможное различие коэффициентов теплопроводности при наплавлении металла с температурой $T_m = 1500^\circ\text{C}$ на основание с температурой $T < T_m$.

Достижение равенства градиентов теплопроводности в граничной точке между подложкой и наплавкой описывается выражением

$$-\lambda_1 \cdot \frac{\Delta T_1}{\Delta r} = -\lambda_2 \frac{\Delta T_2}{\Delta r}. \quad (2.54)$$

В вышеуказанных обозначениях из (2.54) получаем

$$-\lambda_1 \left(\frac{T_1(N_1-1, r_f) - T_1(N_1, r_f)}{\Delta L} \right) = -\lambda_2 \left(\frac{T_m - T_1(N_1, r_f)}{\Delta L} \right), \quad (2.55)$$

тогда температура граничной точки равна

$$\begin{aligned} T_1(N_1, r_f) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot T_1(N_1 - 1, r_f) + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot T_m = \\ &= w_1 \cdot T_1(N_1 - 1, r_f) + w_2 \cdot T_m. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Для случая, когда подложка и наплавка изготовлены из одного металла, $\lambda_1 = \lambda_2$, а весовые коэффициенты равны

$$w_1 = w_2 = \frac{1}{2}. \quad (2.57)$$

Приведенный выше расчет температурного градиента граничной точки (2.54)-(2.57) осуществляется для каждой новой части наплавляемого слоя ΔB_2 , при этом соотношение весовых коэффициентов (2.54) может изменяться в зависимости от используемых основных и присадочных материалов, а также от применения в технологическом процессе аддитивного производства теплоотводящих пластин, выполненных из материалов, имеющих коэффициент теплопроводности значительно больший, чем у стали. Например, коэффициент теплопроводности меди при комнатной температуре как минимум в 5 раз превышает коэффициент теплопроводности стали при той же температуре.

Для послойного наплавления на открытом воздухе величина объектов, окружающих зону наплавления, значительно превышает геометрические размеры горячей зоны наплавляемой конструкции, поэтому радиационный теплообмен в данном случае имеет низкую эффективность и не учитывается при расчете изменения температур в изделии.

Однако, существуют металлы, которые вступают в активное взаимодействие с окружающим их кислородом, вследствие чего нарушается стабильность процесса послойного наплавления и ухудшается качество наплавленного металла. В таких случаях, для обеспечения заданного уровня качества изготавливаемых деталей, возникает необходимость применения послойного наплавления в вакууме или защитной газовой атмосфере, которая достигается за счет применения ограничивающей рабочую зону камеры. В данном случае соотношение геометрических размеров наплавляемой конструкции и окружающих ее объектов (стенок камеры) принимает значение, при котором эффективность лучистого переноса тепловой энергии имеет весомое значение. Поэтому для учета радиационного переноса тепловой энергии необходимо применить коэффициенты радиационного градиента для нижней и боковых поверхностей подложки (2.23)-(2.24).

Для учета разницы между геометрическими размерами основания и наплавляемой конструкции ($r_f \neq N_3$) необходимо внести изменения в расчет

температурного поля и представить наплавляемую конструкцию в виде двухмерной сетки со сдвигом наплавляемого слоя от края подложки на заданное расстояние ΔB (рис. 2.9).

Сначала определяется изменение температуры по высоте конструкции для наплавленного слоя $r = \overline{k_b, r_f + k_b - 1}$, где k_b – число точек от края подложки ($i = \overline{0, i_f}$):

– для внутренних точек изделия ($j = \overline{1, N - 1}$)

$$T_{i+1}(j, r) = T_i(j, r) + GT \cdot (T_i(j - 1, r) - 2 \cdot T_i(j, r) + T_i(j + 1, r)); \quad (2.58)$$

– для нижней границы

$$T_{i+1}(0, r) = T_i(0, r) + GT_2 \cdot (T_i(1, r) - T_i(0, r)) + GC \cdot (T_c - T_i(0, r)) + \\ + GR_1 \cdot (T_k - (T_i(0, r) + K)^4), \quad (2.59)$$

где $T_k = (T_c + K)^4$ – 4-я степень температуры окружающей среды в Кельвинах; $K = 273,15$ К – добавка при переводе в градусы Кельвина.

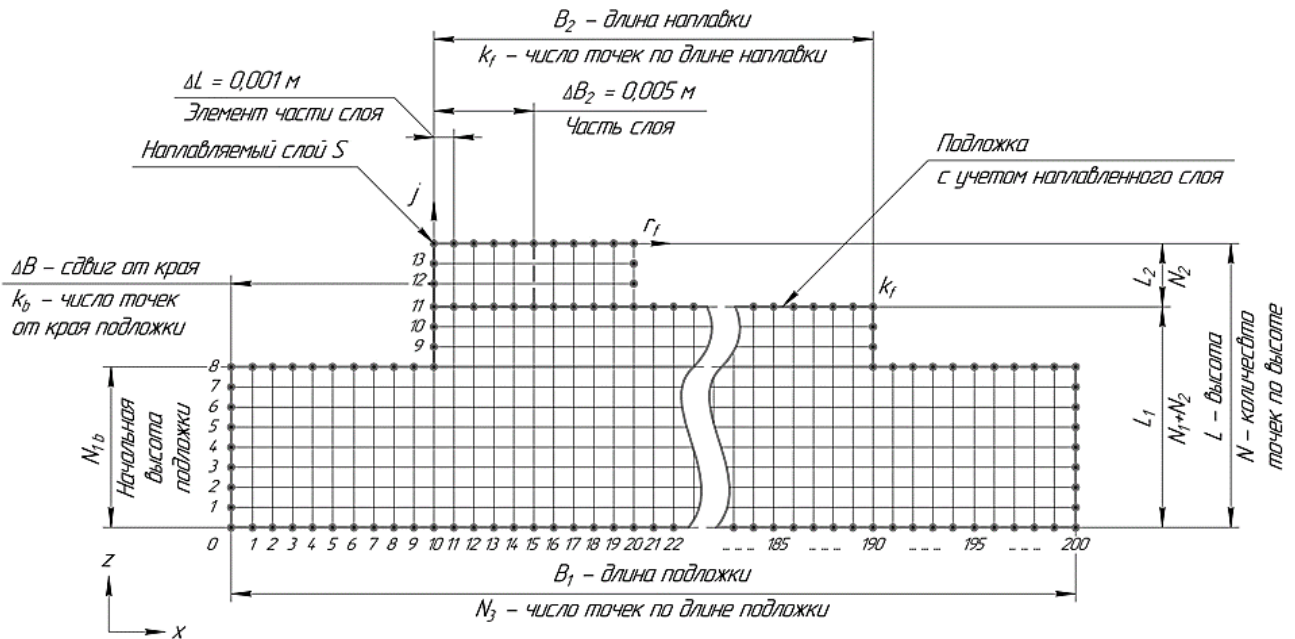


Рис. 2.9. Сетка конструкции изделия с учетом сдвига начала наплавленного слоя от края основания

Для верхней границы наплавленного слоя

$$T_{i+1}(N, r) = T_i(N, r) + GT_2 \cdot (T_i(N - 1, r) - T_i(N, r)) + GC \cdot (T_c - T_i(N, r)) + \\ + GR_2 \cdot (T_k - (T_i(N, r) + K)^4). \quad (2.60)$$

Затем определяется температурное распределение в оставшихся точках подложки по высоте при $r = \overline{0, N_3}$, где $r < k_b$ и $r > k_b + r_f$. Для внутренних точек по высоте $j = \overline{1, N_h - 1}$ используем формулу (2.58), где $N_h = N_{1b}$ – для первого наплавленного слоя, $N_h = N_{1b} + N_2 \cdot (S-1)$ – при наплавлении более одного слоя. Данный расчет позволяет учесть то, что каждый предыдущий наплавленный слой становится основанием для последующих наплавляемых слоев. Для нижней границы подложки расчет производится по формуле (2.59), а для верхней границы подложки – по (2.60) при $N = N_h$.

Далее определяется температурное распределение только по длине исходной подложки при $j = \overline{0, N_{1b}}$ для внутренних точек $r = \overline{1, N_3 - 1}$

$T_{i+1}(j, r) = T_{i+1}(j, r) + GT \cdot (T_i(j, r - 1) - 2 \cdot T_i(j, r) + T_i(j, r + 1))$, (2.61)
для левой границы

$$T_{i+1}(j, 0) = T_{i+1}(j, 0) + GT_2 \cdot (T_i(j, 1) - T_i(j, 0)) + GC \cdot (T_c - T_i(j, 0)) + GR_1 \cdot (T_k - (T_i(j, 0) + K)^4) \quad (2.62)$$

и для правой границы

$$T_{i+1}(j, N_3) = T_{i+1}(j, N_3) + GT_2 \cdot (T_i(j, N_3 - 1) - T_i(j, N_3)) + GC \cdot (T_c - T_i(j, N_3)) + GR_1 \cdot (T_k - (T_i(j, N_3) + K)^4). \quad (2.63)$$

Находится распределение температур только по длине наплавленного слоя, ставшего подложкой $j = \overline{0, N_h}$, для внутренних точек по формуле (2.61), где $r = \overline{k_b + 1, k_f - 1}$. Для левой границы

$$T_{i+1}(j, k_b) = T_{i+1}(j, k_b) + GT_2 \cdot (T_i(j, k_b + 1) - T_i(j, k_b)) + GC \cdot (T_c - T_i(j, k_b)) + GR_2 \cdot (T_k - (T_i(j, k_b) + K)^4) \quad (2.64)$$

и для правой границы слоя

$$T_{i+1}(j, k_f) = T_{i+1}(j, k_f) + GT_2 \cdot (T_i(j, k_f - 1) - T_i(j, k_f)) + GC \cdot (T_c - T_i(j, k_f)) + GR_2 \cdot (T_k - (T_i(j, k_f) + K)^4). \quad (2.65)$$

Далее определяется температурное распределение по длине наплавляемого слоя с номером $r_f > 1$ с учетом наплавления новой части металла $j = \overline{N_1 + 1, N}$ для левой границы по формуле (2.64), по формуле (2.61)

для внутренних точек $r = \overline{k_b + 1, k_b + r_f - 2}$, для правой границы $r_r = k_b + r_f - 1$ по формуле

$$T_{i+1}(j, r_r) = T_{i+1}(j, r_r) + GT_2 \cdot (T_i(j, r_r - 1) - T_i(j, r_r)) + GC \cdot (T_c - T_i(j, r_r)) + GR_2 \cdot (T_k - (T_i(j, r_r) + K)^4). \quad (2.66)$$

Обозначим время наплавления слоя через τ_f , тогда промежуток времени до наплавления новой части слоя составит $\tau_m = (\tau_f \cdot \Delta L)/B_2$. Количество точек по времени до наплавления новой части слоя составит $i_m = \tau_m/\Delta\tau$.

Для определения температуры в зоне контакта подложки и наплаваемого металла в момент наплавления новой части слоя (i кратно i_m) правая граница наплавки сдвигается вправо на одну точку $r_r = r_r + 1$ и производится взвешивание температур соседних точек по формуле

$$T_{i+1}(N_1, r_r) = w_1 \cdot T_{i+1}(N_1 - 1, r_r) + w_2 \cdot T_m. \quad (2.67)$$

Для новых точек наплавленного металла ($j = \overline{N_1 + 1, N}$)

$$T_{i+1}(j, r_r) = T_m. \quad (2.68)$$

Приведенное дополнение расчетных формул позволяет определять температурное распределение в изделиях сложной геометрической формы, а также учесть радиационный переноса тепла при наличии конструкций, ограничивающих рабочую зону послойного наплавления.

2.5. Программа для моделирования и оптимизации процесса аддитивного производства

Приведенные в разделе 1.3 недостатки существующих подходов к моделированию процессов аддитивного производства обуславливают необходимость разработки собственного программного обеспечения для расчета температурного распределения в металлических изделиях и оптимизации режима аддитивного производства.

Предложенная методика расчета температурного поля в наплаваемом изделии позволяет разработать программу для оптимизации температурно-временного режима и траектории наплавления слоев с учетом всех этапов послойного наплавления, изменения теплофизических свойств стали в

зависимости от температуры, добавления новых частей металла в процессе наплавления и принудительного охлаждения стационарной конструкции на этапе межслойной выдержки.

Для простоты реализации программы в условиях большого количества исходной информации необходимо разбить ее на модули. Принцип модульного построения является удобным и распространенным приемом при анализе систем различной сложности и, позволяет произвести декомпозицию системы на отдельные элементы с учетом их связей и взаимодействия.

Для процесса послойного наплавления можно выделить следующие модули разрабатываемой программы.

Модуль А – Ввод исходных данных о наплавляемой детали и режиме послойного наплавления.

Первый модуль программы предназначен для ввода данных о наплавляемом изделии: общая высота детали L , высота основания L_1 , высота одного слоя L_2 , шаг сетки расчета ΔL , длина основания B_1 , длина слоя B_2 , глубина основания D_1 , глубина слоя D_2 , отступ от края основания по длине ΔB и глубине ΔD . Ширина наплавляемого слоя D_2 подбирается с учетом припуска на последующую механическую обработку поверхности наплавленного металла. На основании номинальной ширины наплавляемого слоя D_2 подбирается диаметр присадочной проволоки d_{np} . Если изделие имеет различную толщину стенок, диаметр присадочной проволоки подбирается из условия обеспечения номинальной толщины слоя, относящегося к наибольшей стенке. Введенные параметры позволяют провести построение сетки изделия в зависимости от толщины стенок, направления выращивания и геометрии детали.

Вводятся скорость послойного наплавления v_n и определяется время наплавления слоя τ и траектория движения сварочной горелки. Дополнительно устанавливается время межслойной выдержки $\tau_в$ и коэффициенты естественной α и вынужденной конвекции α_2 учитывающей принудительное охлаждение металла во время выдержки.

Модуль В – Определение теплофизических свойств наплавленного металла в зависимости от его температуры.

Данный модуль предназначен для обновления теплофизических свойств стали в зависимости от текущей температуры металла. На начальном этапе в программу вносят номинальные значения коэффициентов теплопроводности λ , температуропроводности α и теплоемкости C соответствующие нормальной температуре окружающей среды T_0 20-25 °С. Дополнительно устанавливают значения весовых коэффициентов w_1 и w_2 , определяющие баланс температур в точке контакта расплава с основанием, а также коэффициенты радиационного теплообмена для верхней E_1 и нижней E_2 поверхностей наплавленной детали.

Для моделирования температурного поля в металлических изделиях необходимо учитывать значения вышеуказанных теплофизических свойств металла при любой температуре. Большая часть указанных параметров определяется на основе справочных или табличных данных. Коэффициенты тепло- и температуропроводности (λ , α) подбираются для каждой марки стали по справочнику и изменяются в процессе нагрева или охлаждения стали (таблица 2.1) [99, 100]. Плотность стали ρ является справочной характеристикой и составляет 7800 кг/м³ независимо от ее марки и температуры. Значение удельной теплоемкости стали C определено ГОСТом и составляет для нормальных условий 460 Дж/(кг·К).

Модуль С – Определение граничных значений температуры металла.

На данном этапе устанавливаются граничные значения температур металла T_n и T_e для каждого наплавленного слоя в зависимости от марки стали и температуры ее критических точек A_{c1} , A_{c3} , A_{r1} , A_{r3} , M_n [101]. На основе заданных значений температур определяется интервал выдержки между наплавленными слоями для достижения требуемой структуры и заданных механических свойств. Далее строится оптимальный график термического цикла послойного наплавления металла. Схематичное изображение графика термического цикла послойного наплавления приведено на рис. 2.10.

В результате циклического нагрева и охлаждения в металле происходят межфазные превращения с соответствующими изменениями кубической решетки, структуры и свойств стали. Температура расплавленного металла сварочной ванны в процессе наплавления составляет порядка 1500-1700 °С и зависит от выбранных параметров режима послойного наплавления и области воздействия электрической дуги. Дуга состоит из столба плазмы с температурой от 5000 °С на катодной области до 7000 °С на анодной области, горение электрической дуги сопровождается ярким свечением и интенсивным ультрафиолетовым излучением, что затрудняет экспериментальное измерение температуры металла в зоне сварочной ванны. Поэтому температура расплава принимается на основе справочных данных для выбранной марки стали и условий послойного наплавления.

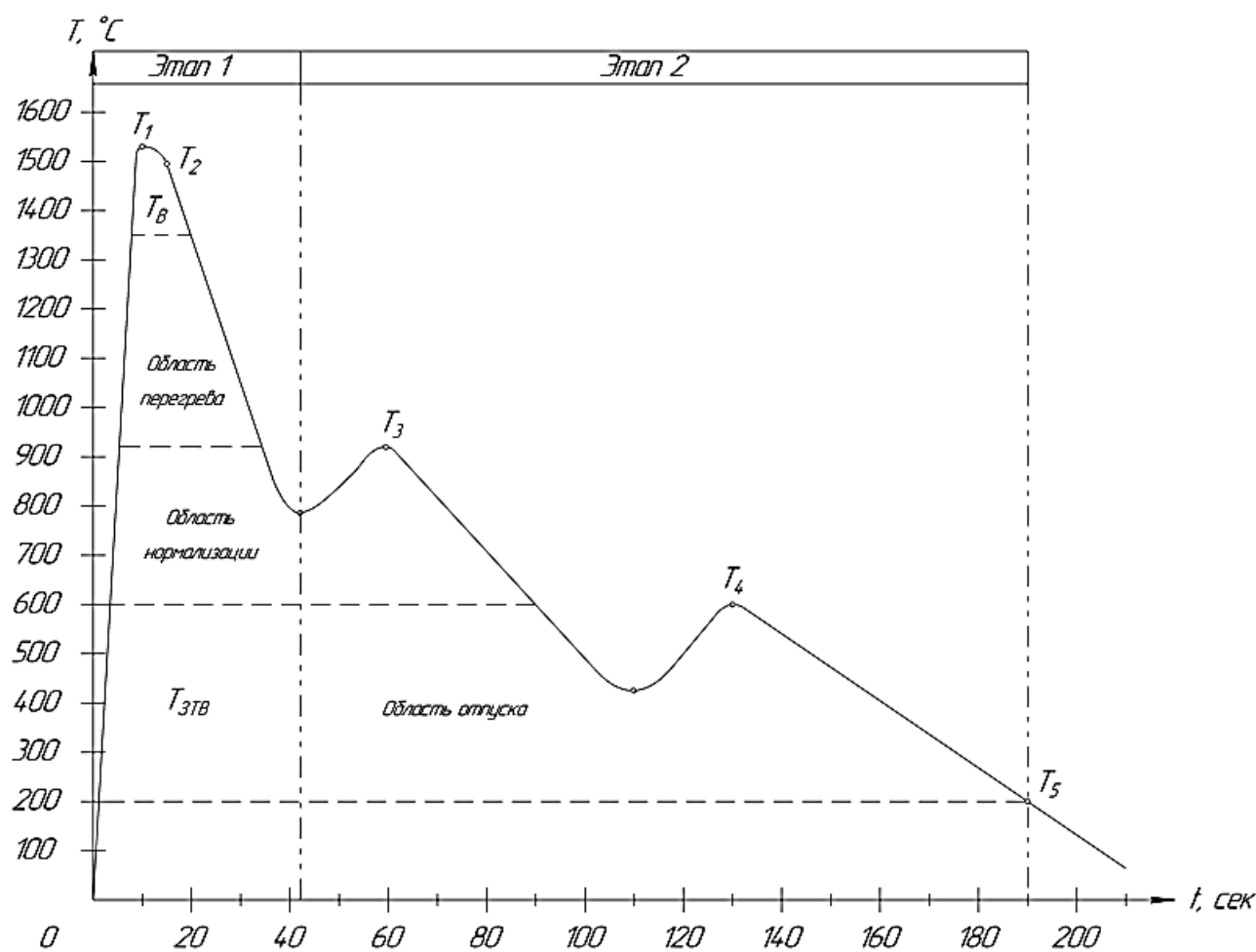


Рис. 2.10. График термического цикла послойного наплавления

Критические точки стали (рис. 2.10) определяют температуру фазовых переходов. Точка T_1 называется температурой ликвидуса и определяет границу перехода стали в жидкую фазу, то есть образование сварочной ванны. Продолжительность нахождения металла в жидкой фазе и начало процесса кристаллизации расплава характеризуется температурой солидуса T_2 .

Температуры в точках T_1 и T_2 определяются на основе химического состава сплава по следующим формулам:

$$T_1 = 1537 - 88C - 8Si - 5Mn - 25S - 30P - 1,5Cr - 4Ni - 5Cu, \quad (2.69)$$

$$T_2 = 1536 - 415,5C - 12,3Si - 6,8Mn - 183,9S - 124,5P - 1,4Cr - 4,3Ni - 4,1Cu. \quad (2.70)$$

где $C, Si, Mn, S, P, Cr, Ni, Cu$ – процентные содержания углерода, кремния, марганца, серы, фосфора, хрома, никеля и меди соответственно.

Для первого этапа послойного наплавления различают зону нагрева стали до максимальной температуры T_1 , зону пребывания металла в расплавленном состоянии T_1 - T_2 , а также скорость охлаждения металла по мере удаления источника тепловой энергии. Интервал температур T_1 - T_2 характеризует размеры ванны расплавленного металла и геометрические размеры наплаваемого слоя. Угол наклона кривой охлаждения стали (правее точки T_2) характеризует скорость охлаждения наплавленного металла и определяет структуру кристаллизующегося расплава.

Далее описан повторный нагрев и охлаждение стали вследствие наплавления последующих слоев. Соответственно точка T_3 характеризует максимальную температуру повторного нагрева металла при наплавлении второго слоя, T_4 – третьего слоя, T_5 – четвертого и последующих слоев. Значения температуры в данных точках не должны затрагивать область перегрева металла и соответствовать заданной последовательности процесса термической обработки.

Граничные значения температур разделяют зону термического влияния три участка – перегрева, нормализации с частичной перекристаллизацией и отпуска. Граничные значения температуры на участке перегрева металла T_3

находятся на 100-200 °С выше критической точки A_{c3} и определяются по формуле:

$$T_3 = A_{c3} + 100 \sim 200^{\circ}\text{C}. \quad (2.71)$$

Продолжительность пребывания металла на участке перегрева приводит к увеличению зерна и снижению механических свойств, поэтому рекомендуется сократить продолжительность данного участка.

Участок нормализации металла начинается от температуры в точке T_4 , которая определяется по формуле:

$$T_4 = A_{c3} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}. \quad (2.72)$$

На участке нормализации происходит выравнивание структуры металла, нормализуется размер зерна и частично устраняются внутренние напряжения, образующиеся в процессе циклического нагрева и охлаждения, достигаются заданные механические свойства стали. Участок нормализации является наиболее предпочтительной областью, поэтому рекомендуется обеспечить прохождение каждого наплавленного слоя через данный участок.

Дальнейшее охлаждение металла происходит на участке температуры отпуска T_5 и T_6 , значение которых находится в диапазоне от 500 до 200 °С для большинства свариваемых марок сталей. В области отпуска осуществляется релаксация остаточных напряжений и выравнивание дефектов структуры наплавленного металла. Для полноценного выравнивания структуры наплавленного металла при разработке технологической документации процесса аддитивного производства предусматривают наплавление дополнительных слоев металла.

Модуль D – Расчет полей температур в изделии.

Данный модуль предназначен для расчета температурного распределения в металле на основе кондуктивного и конвективного теплообмена в процессе послойного наплавления. На основе модулей А-С формируется набор данных по которым создается модель температурного поля. Подробно процесс моделирования температуры наплавленного металла рассмотрен в третьей главе диссертации.

Точность проведенных расчетов и модели температурного поля проверяется в ходе эксперимента, который заключается в послойном наплавлении образца на оптимизированных параметрах режима. Осуществляется контроль температуры металла в период межслойной выдержки. Полученные в результате измерений значения температур сравниваются с значениями, полученными в ходе численного моделирования. В случае значительного расхождения экспериментальных и теоретических значений температур производится корректировка модели до установления допустимой погрешности не превышающей 10-20 °С.

Полученные в результате эксперимента образцы используются для последующего макро- и микроскопического анализа с целью исследования внутренней структуры металла, оценки качества сплавления и наличия внутренних дефектов в наплавленном металле.

Модуль Е – Идентификация параметров теплообмена.

Для учета второстепенных факторов, влияющих на температурное распределение в наплавленном металле, в программе предусмотрена возможность идентификации текущих параметров теплообмена. Идентификация заключается в нахождении таких значений весов температур в зоне контакта капли присадочного металла с основанием и подбора коэффициента искусственного конвективного теплообмена, при которых будет достигнуто минимальное отклонение рассчитанных значений температур поверхностных точек изделия с их экспериментальными аналогами.

В приведенной модели расчета температуры наплавленного металла произведено разделение основания и каждого наплавленного слоя на отдельные слои по двум координатам, соответствующим длине B и высоте L изделия. Удобно толщины этих слоев в обоих направлениях взять одинаковыми и обозначить ΔL . Так, в разработанной программе принято $\Delta L = 1$ мм. Количество расчетных точек в рассматриваемом изделии по высоте (подложка и наплавленные слои) определяется, как

$$n = N_1 + 1 + m \cdot N_2. \quad (2.73)$$

Полученные точки образуют общую сетку изделия. Для всех полученных точек производится расчет температуры металла по времени процесса наплавления. Далее подбираются коэффициенты весов и конвективного теплообмена, обеспечивающие минимальное отклонение моделируемых значений температуры от экспериментальных в характерной точке изделия:

$$|T_p(j^*, r^*, i^*) - T_э(j^*, r^*, i^*)| \leq 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.74)$$

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

Модуль F – Определение оптимального режима послойного наплавления.

Последний модуль системы, отражает практическую цель работы – выработка рекомендаций по оптимизации температурно-временного режима послойного наплавления. Параметрами температуры являются: сила тока I , напряжение U и скорость наплавления v_n . В качестве временных характеристик используют время наплавления одного слоя τ_n , время межслойной выдержки $\tau_с$ и общее время послойного наплавления τ . Оптимизированный режим наплавления должен обеспечивать соответствие температуры наплавленного металла оптимальному графику термического цикла, заданные механические свойства стали, а также геометрические параметры изделия.

Корректировка режима осуществляется на основе данных об температуре наплавленного металла в период межслойной выдержки. Например, увеличение температуры наплавленного металла выше граничного значения $T_с$ говорит об необходимости уменьшить силу тока и снизить тем самым область температурного влияния электрической дуги. При значениях температур, превышающих нижнюю границу этапа отдыха T_n производят увеличение времени межслойной выдержки до достижения заданной температуры металла. При значениях температуры ниже T_n время межслойной

выдержки сокращается. Таким образом, на этапе моделирования температурного поля разрабатывается оптимальный температурно-временной режим послойного наплавления.

Характер распределения температуры в металле зависит от множества факторов и может быть описан следующим выражением:

$$T = f(Q_g, Q_t, Q_0, Q_m, T_i(j, r), i = \overline{0, \infty}). \quad (2.75)$$

где $Q_g (L, L_1, L_2, \Delta L, B_1, B_2, \Delta B, D_1, D_2, \Delta D)$ – геометрические размеры наплавляемой детали; $Q_t (\alpha, \lambda, \rho, C, w_1, w_2, E_1, E_2)$ – теплофизические свойства стали; $Q_0 (T_{окр}, T_0, T_v, T_n, A_{c1}, A_{c3}, A_{r1}, A_{r3}, M_n)$ – начальные и граничные значения температур; $Q_m (d_{пр}, I, U, v_n, \tau_n, \tau_v, \tau)$ – режим послойного наплавления; $T_i(j, r), i = \overline{0, \infty}$ – поле температур.

С учетом вышесказанного критерий оптимизации режимов можно сформулировать в следующем виде:

$$\sum_{k=1}^m |T_p(j^*, r^*, i_{fk}) - T_{гр}(j^*, r^*, i_{fk})| \rightarrow \min, \quad (2.76)$$

где i_{fk} – временная точка окончания процесса выдержки после наплавления слоя металла.

Приведенное условие показывает необходимость обеспечения минимального отклонения расчетных значений температур T_p от установленных граничных значений температур наплавленного металла $T_{гр}$.

2.6. Процесс послойного наплавления металла как объект управления

Для автоматизированного управления процессом послойного наплавления металла необходимо определить цель управления, входные и выходные параметры процесса, а также параметры, характеризующие возмущающее и управляющее воздействия системы.

Как подчеркнуто в разделе 1.2, наибольшее влияние на внутреннюю структуру, геометрию, эксплуатационные и физико-механические свойства изделий, изготовленных по технологии аддитивного производства, оказывает термический цикл послойного наплавления, который представляет собой

набор температур в контролируемой зоне на всех этапах наплавления. Поэтому целью управления процессом наплавления слоя является обеспечение заданного значения температуры наплавляемого металла в зависимости от параметров установки для послойного наплавления, геометрических размеров изделия, траектории наплавления и требуемого качества геометрии наплавленного слоя при оптимальном режиме аддитивного производства.

С точки зрения объекта управления процесс послойного наплавления металлических изделий включает установку для 3D печати, осуществляющую перемещение рабочего органа, и источник тока, определяющий режим и количество тепловой энергии, передаваемой в зону наплавления.

С учетом структуры технологического процесса (рис. 2.11) входными параметрами объекта управления являются:

- геометрические размеры наплавляемого слоя Q_G ;
- начальная температура окружающей среды и основания, а также граничные значения температур наплавленного металла Q_O ;
- теплофизические свойства металлического основания и присадочной проволоки Q_T ;
- значения скорости вращения вентилятора принудительного охлаждения наплавленного металла Q_W для изменения коэффициента искусственного конвективного теплообмена с окружающей средой α_2 ;
- параметры режима наплавления Q_V , включающие скорость движения рабочего органа v_n , силу тока I и напряжение дуги U .

Перечисленные параметры режима послойного наплавления определяются на основании технического задания, включающего геометрические размеры и форму изделия.

К выходным переменным объекта управления относятся:

- значение температуры металла в конце наплавления слоя T_i ;
- параметры геометрии наплавленного слоя G_i .

Переменными состояниями процесса послойного наплавления являются:

- технологические характеристики портального манипулятора для перемещения рабочего органа Q_Y ;

- код управляющей программы Q_U ;

Возмущающие воздействия объекта управления включают:

- изменение начальной температуры окружающей среды или металлического основания ΔQ_O ;

- изменение теплофизических характеристик наплавленного металла в результате внешнего воздействия ΔQ_T .

Управляющими воздействиями процесса послойного наплавления являются:

- изменение скорости движения рабочего органа ΔQ_V ;
- изменение скорости вращения вентилятора ΔQ_W для принудительного охлаждения металла на этапе межслойной выдержки;
- изменение траектории и последовательности наплавления слоев ΔQ_G на основе текущей геометрии наплавленной конструкции.

Структурная схема процесса наплавления слоя металла как объекта управления с учетом перечисленных воздействий представлена на рис 2.11.

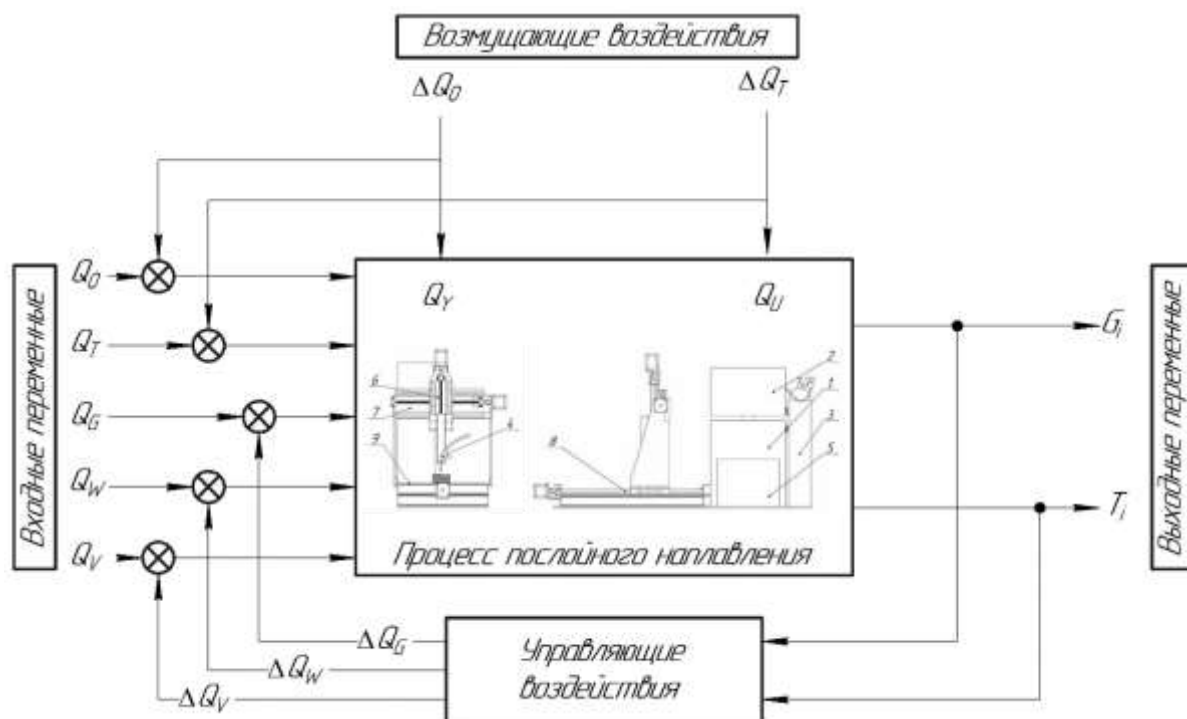


Рис. 2.11. Процесс наплавления слоя как объект управления

Для осуществления эффективного управления процессом послойного наплавления лучше всего изменять параметр скорости перемещения рабочего органа портального манипулятора v_n , оказывающий влияние на время наплавления слоя t_n и межслойной выдержки t_6 , а также параметр скорости вращения вентилятора для принудительного охлаждения металла w_6 , влияющий на коэффициент принудительного воздушного охлаждения наплавленной конструкции в процессе межслойной выдержки α_2 . Регулировка перечисленных параметров должна обеспечивать оптимальный температурно-временной режим аддитивного производства при минимальном отклонении температуры и геометрии наплавленного металла от заданных граничных значений на всех этапах производства.

Выводы

Во второй главе диссертации подробно описаны механизмы теплообмена в стали и определено, что для составления уравнений теплопроводности и моделирования температурного поля в процессе послойного наплавления на открытом воздухе наибольшее влияние имеет внутренний теплообмен и конвективный перенос тепла с внешних поверхностей конструкции.

Рассмотрены различные методы решения задач теплопроводности, описаны их преимущества и недостатки. Подробно рассмотрен способ аналитического расчета температурного поля в плоских изделиях, приведены исходные данные, необходимые для решения задачи теплопроводности и составлено дифференциальное уравнение теплопроводности для плоского тела в двухмерных пространственных координатах без внутренних источников теплоты.

Перечислены методы численного моделирования температурного поля в металлических изделиях и описан процесс решения задачи теплопроводности методом конечных разностей, приведено преобразование дифференциального уравнения теплопроводности с заменой частных производных на их численные аналоги.

Представлена двухмерная сетка наплавляемой конструкции и приведены формулы для расчета механизма теплообмена внешних и внутренних точек по высоте и длине изделия. Приведен расчет распределения температур, учитывающий особенности технологического процесса аддитивного производства, которые заключаются в постепенном увеличении геометрических размеров конструкции за счет подачи новых частей металла с температурой 1500°C. Выполнено упрощение расчетных формул, заключающееся в выделении коэффициентов, содержащих постоянные в ходе данного этапа расчета величины.

Для учета зависимости изменения теплофизических свойств металла от его температуры составлен модуль, позволяющий корректировать коэффициенты тепло- и температуропроводности в конце каждого наплавленного слоя металла и осуществлять изменение максимального шага расчета по времени наплавления.

Также рассмотрен процесс межслойного отдыха изделия и приведен расчет температур в изделии при отсутствии новых наплавленных частей металла.

Дополнительно приведен порядок расчета температурного распределения для конструкций, у которых начало наплавляемого слоя имеет сдвиг от края подложки. Введен модуль, позволяющий учитывать различную теплопроводность наплавляемого металла и металла основания при использовании теплоотводящих пластин для регулирования термического цикла послойного наплавления, а также приведен порядок расчета температурного поля с учетом радиационного переноса тепловой энергии для послойного электродугового наплавления в защитной камере с вакуумной или газовой атмосферой.

Определена структура и модули программы для моделирования процесса послойного электродугового наплавления металлических изделий и определения оптимального температурно-временного режима аддитивного производства. Поставлена задача оптимизации режима послойного

наплавления в зависимости от температуры наплавляемого металла, а также описан характер распределения температуры в металле и изменение его структуры в зависимости от химического состава наплавляемого металла, размеров наплавляемого изделия и режимов послойного наплавления.

Предложена схема автоматизированного управления процессом наплавления слоев металла с выработкой управляющего воздействия посредством изменения параметров скорости движения рабочего органа ΔQ_v , скорости вращения вентилятора принудительного охлаждения металла ΔQ_w , а также траектории и последовательности наплавления слоев ΔQ_G .

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОСЛОЙНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

Для сопоставления результатов моделирования температурного поля с реальными значениями температур необходимо выполнить сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений, установить отличие между ними и при необходимости произвести корректировку программы путем идентификации параметров температурного распределения.

3.1. Экспериментальное определение температуры металла в процессе послойного электродугового наплавления

Для определения реальной температуры наплавленного металла выполнено электродуговое наплавление экспериментального образца с записью температуры каждого слоя на этапе выдержки (рис. 3.1).

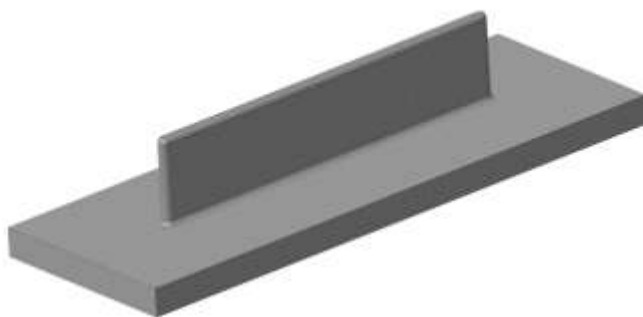


Рис. 3.1. Модель экспериментального образца

Реализация эксперимента осуществлялась в лаборатории кафедры «Технология металлов и материаловедения» ТвГТУ на установке для 3D печати металлических деталей (рис. 3.2). Конструкция установки, принцип работы и применяемое наплавочное оборудование, описано в разделе 1.2 диссертации.

Чтобы обеспечить качественное воспроизведение эксперимента и добиться повторяемости полученных результатов, были выделены основные параметры режима послойного наплавления и определено их влияние на качество структуры и геометрию наплавленного металла.



Рис. 3.2. Установка для послойного электродугового наплавления

Основу установки составляет трехосевой порталный манипулятор (рис. 3.3), предназначенный для перемещения рабочего органа (сварочной горелки) по заданной траектории с необходимой точностью и скоростью v_n . Перемещение манипулятора осуществляется с помощью числового программного управления. Траектория движения, скорость v_n и время технологической выдержки τ_v между наплавленными слоями задаются посредством G-кода, который создается на основе 3D модели образца и загружается в программу для ЧПУ. Дополнительно в программу управления установкой входит функция включения сварочной горелки в момент начала наплавления и ее отключения в период технологической выдержки, а также

функция управления вентилятором для принудительного воздушного охлаждения детали в процессе межслойной выдержки.

Для перемещения рабочего органа по координатам X , Y , Z используются шаговые электродвигатели, питание которых производится от блока управления, и механизм привода, состоящий из муфт, ходовых винтов, опорных шайб и направляющих рельсового типа. Контроль расположения рабочего органа осуществляется с помощью механических конечных выключателей замкнутого типа, расположенных на концах каждой оси. Использование конечных выключателей позволяет задавать базовое расположение манипулятора и осуществлять аварийное отключение установки в случае приближения к крайнему положению по одной из координат. Для принудительного отключения манипулятора используется кнопка экстренного останова E-stop.

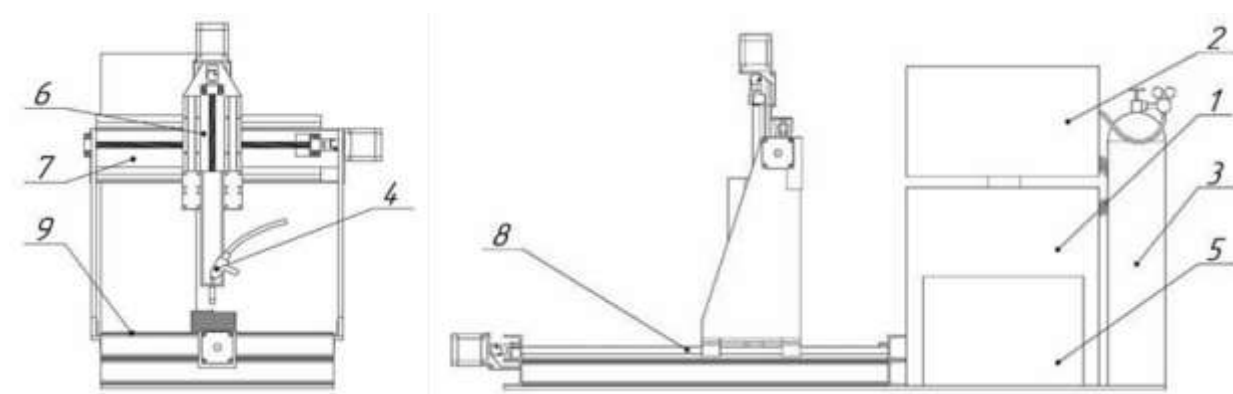


Рис. 3.3. Трехосевой порталный манипулятор: 1 – источник тока;
2 – блок управления источником тока и подачи наплавочной проволоки;
3 – баллон с защитным газом; 4 – рабочий орган (сварочная горелка);
5 – модуль управления манипулятором; 6, 7, 8 – координаты X , Y , Z ;
9 – рабочий стол

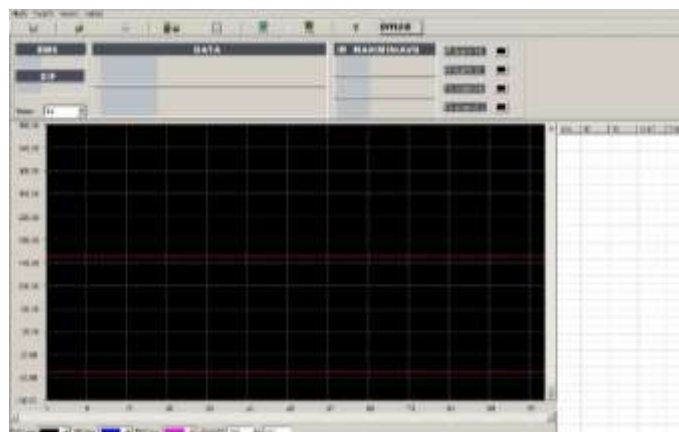
Управление манипулятором осуществляется через персональный компьютер с помощью универсального программного обеспечения Match3, в котором имеется возможность производить точную настройку скорости перемещения V_n и ускорения рабочего органа (рис. 3.4, а). Встроенная функция

корректировки точности перемещения позволяет установить минимальное отклонение программного расстояния от реально пройденного.

Включение сварочной горелки и соответственно начало процесса наплавления металла реализовано с помощью функции включения шпинделя в Match3. Это позволяет автоматизировать процесс аддитивного производства и повысить точность геометрии наплавляемых деталей. Для контроля за процессом наплавления в установку внедрено пирометрическое устройство, с помощью которого определяется значение температуры металла T во время межслойной выдержки и осуществляется запись термограммы на ПК с шагом по времени 1 с (рис. 3.4, б).



а)



б)

Рис. 3.4. Модуль управления порталным манипулятором:

- а) – программа управления порталным манипулятором;
- б) программа для вывода данных о температуре наплавленного металла

Для принудительного снижения температуры наплавленного металла во время межслойной выдержки применяется промышленный электро-вентилятор, управление которым производится через ПК на основании данных о температуре наплавленного слоя. Включение вентилятора осуществляется автоматически при достижении верхнего граничного значения температуры и продолжается до достижения температуры равной или меньшей нижнего граничного значения [102].

Принудительное охлаждение позволяет регулировать термический цикл процесса послойного электродугового наплавления, уравновесить

межслойный градиент температур, уменьшить коробления и температурные деформации в наплавленной конструкции, а также оказывает положительное влияние на структуру наплавленного металла.

Основным параметром портального манипулятора, влияющим на режим послойного наплавления, является скорость перемещения сварочной горелки v_n (м/мин) вдоль осей X и Y. Данный параметр определяет качество геометрии наплаваемого слоя и характер температурного распределения в процессе наплавления. К дополнительным параметрам установки относятся время межслойной выдержки τ_s и температура начала наплавления нового слоя T_n .

Параметрами режима аддитивного производства в свою очередь являются диаметр проволоки d_{np} , скорость подачи проволоки v_{np} , сила тока I и напряжение дуги U .

Чтобы установить взаимосвязь между параметрами портального манипулятора и режимом послойного наплавления, а также определить их влияние на температурное распределение в наплавленном изделии, был выполнен эксперимент, заключающийся в наплавлении нескольких слоев металла на различных параметрах режима при неизменном значении скорости движения рабочего органа v_n равной 0,6 м/мин. Выбранное значение скорости является оптимальным с точки зрения производительности и эффективности процесса аддитивного производства.

Источник сварочного тока выполнен с функцией синергетического управления параметрами режима наплавления, что характеризуется взаимозависимым изменением параметров вольтамперной характеристики электрической дуги (силы тока I и напряжения U) и скорости подачи присадочной проволоки v_{np} . В связи с этим в качестве основного параметра, характеризующего тепловложение в наплаваемый металл, была выбрана сила тока I . Минимально допустимое оборудованием значение тока для проволоки диаметром 1,2 мм составило 70 А.

Отработка режимов проводилась путем наплавления образцов длиной 70 мм на металлическое основание толщиной 6 мм и длиной 125 мм

с поэтапным увеличением силы тока I с шагом 30 А [103]. Начальная температура каждого наплавленного слоя составила $T_n = 20$ °С.

В ходе эксперимента получен образец, состоящий из 6-ти слоев металла, наплавленных на различной силе тока. Дальнейшее исследование образца с помощью визуально-измерительного контроля на предмет соответствия высоты, ширины и прямолинейности наплавленного слоя, позволило установить зависимость геометрических характеристик наплавленного металла от установленных параметров режима (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Результаты эксперимента по отработке режимов наплавления:

а) вид сверху; б) вид сбоку

Результаты эксперимента по определению оптимального режима электродугового наплавления представлены в таблице 3.1.

Анализ представленных в таблице 3.1 данных показал, что оптимальный режим послойного наплавления для проволоки 1,2 мм и скорости наплавления $v_n = 0,6$ м/мин достигается при силе тока $I = 170$ А и напряжении $U = 18,4$ В.

Следующим этапом эксперимента является определение температуры металла в процессе послойного наплавления на полученных оптимальных параметрах режима.

В качестве образца для реализации процесса послойного наплавления детали была выбрана деталь типа стенка высотой $L = 12$ мм и длиной $B_2 = 70$ мм. Наплавляемый материал сталь 08Г2С, подложка – металлическая

пластина толщиной $L_1 = 6$ мм, длиной $B_1 = 125$ мм. Начальная температура металлического основания принимается равной температуре окружающего воздуха $T_c = 20$ °С, температура наплавления нового слоя $T_n = 50-70$ °С.

Таблица 3.1. Результаты оптимизации режимов

№ образца	I , А	U , В	v_n , мм/мин	Толщина слоя, мм	Высота слоя, мм	Отклонение геометрии, мм
1	70	15,7	600	2,7	1,3	2
2	90	15,9		3,0	1,4	1,8
3	110	16,3		2,9	1,5	1,5
4	130	17,0		3,0	1,7	1,2
5	150	17,7		3,1	1,8	1,0
6	170	18,4		4,0	2,0	0,5

По данным таблицы 3.1 номинальная высота первого наплавленного слоя L_2 при выбранном режиме составляет 2 мм. Таким образом, для формирования стенки высотой 12 мм необходимо наплавить 6 слоев металла.

Время наплавления одного слоя составило 7 секунд, время выдержки перед наплавлением нового слоя $\tau_e = 120$ секунд. Продолжительность процесса изготовления одного образца составила

$$t = S \cdot 7 + S \cdot 120 = 762 \text{ с} = 12,7 \text{ мин.}$$

Наплавление образца осуществлялось с промежуточным охлаждением каждого слоя металла до температуры T_n . Во время межслойной выдержки проводилась запись температуры наплавленного металла T по центру внешней поверхности слоя. Результаты приведены на рис. 3.6 и в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Результаты экспериментального наплавления

№	t , сек	Номер и температура наплавленного слоя, °С					
		1	2	3	4	5	6
1	0	263,1	275,0	282,3	287,1	295,0	298,1
2	10	150,4	176,5	181,1	186,2	192,1	196,3
3	20	117,8	142,6	145,9	150,1	152,3	154,1
4	30	103,8	122,3	126,3	128,9	131,1	135,2
5	40	93,6	111,3	114,1	116,4	119,0	122,5
6	50	83,0	100,4	103,1	108,0	112,5	114,4
7	60	74,4	94,0	95,5	105,1	106,2	108,2
8	70	68,4	84,3	90,5	96,4	98,4	100,0
9	80	63,7	77,9	81,3	88,8	92,8	94,1

Продолжение таблицы 3.2

10	90	59,7	73,1	76,0	82,1	87,1	87,6
11	100	56,6	68,9	72,0	75,8	80,0	81,1
12	110	53,8	65,6	68,1	72,1	74,2	74,9
13	120	51,1	61,9	65,1	67,3	72,6	72,8

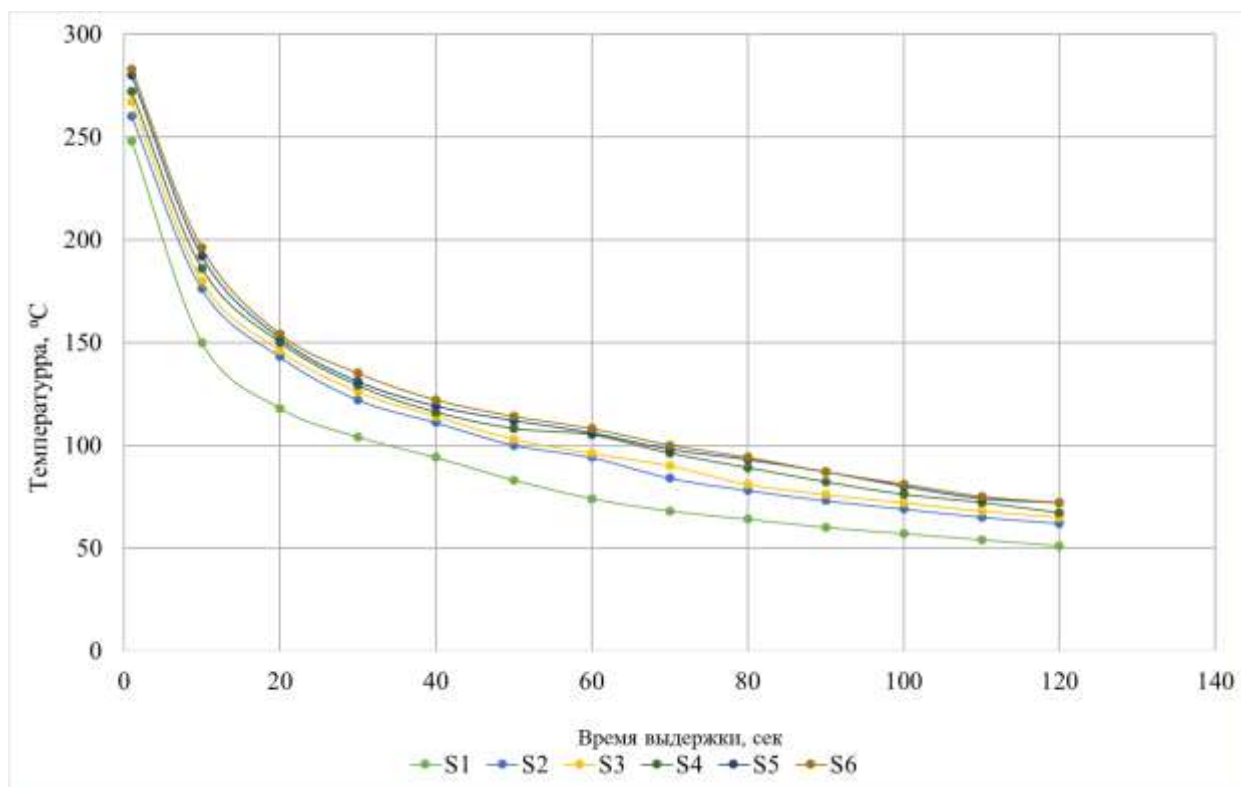


Рис. 3.6. Изменение температуры наплавленных слоев

В ходе экспериментов определен оптимальный режим послойного электродугового наплавления металла для присадочной проволоки диаметром $d_{np} = 1,2$ мм и изготовлен образец с измерением температуры металла во время межслойной выдержки. Полученные значения температуры наплавленного металла необходимы для определения точности расчета по математической модели, представленной в главе 2, и ее корректировки путем идентификации параметров конвективного теплообмена.

3.2. Моделирование температурного поля в процессе послойного электродугового наплавления

Особенностями процесса послойного наплавления металлических изделий являются увеличение высоты конструкции и изменение температуры металла в зависимости от траектории движения источника тепловой энергии.

Начальная температура металлического основания задается равной температуре окружающей среды или значению температуры предварительного подогрева. Производится наплавление первого слоя металла на режиме с увеличенным тепловложением для обеспечения гарантированного сплавления наплавленного металла с металлом основания.

Далее наплавленную конструкцию охлаждают до температуры верхней поверхности слоя равной 50-70 °С. Процесс охлаждения необходим для избежания оплавления нижележащего слоя металла и возникновения дефектов геометрии наплавляемой конструкции. Следующим этапом является послойное наплавление оставшихся слоев металла на оптимальных параметрах режима в последовательности: наплавка – технологическая выдержка – наплавка следующего слоя.

Для проверки работоспособности описанной в главе 2 математической модели и оценки её результатов необходимо произвести моделирование температурного поля в процессе аддитивного производства металлической стенки при следующих исходных данных: длина слоя $B_2 = 70$ мм; длина основания $B_1 = 126$ мм; расстояние от края основания до начала наплаваемого слоя $\Delta B = 28$ мм; толщина основания $L_1 = 6$ мм; толщина наплавленного слоя $L_2 = 2$ мм; шаг по толщине конструкции $\Delta L = 1$ мм; шаг расчета по времени $\Delta t = 0,01$ с; постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К); степень черноты $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$; плотность стали $\rho = 7800$ кг/м³; температура окружающей среды $T_0 = 20$ °С; нижнее $T_b = 20$ °С и верхнее $T_t = 1200$ °С значения температур стали 08Г2С для расчета свойств по формулам (2.44)-(2.53).

Моделирование температуры в процессе наплавления металла осуществляется функцией $kf = TempSurfacing (sl, rest, conv)$, в которую в качестве глобальных переменных передаются количество наплаваемых слоев $slices$, температура расплавленного металла T_m , температура окружающего воздуха T_c , число слоев по толщине подложки N_1 , число слоев по толщине наплаваемого слоя N_2 , общее число слоев N и точек n по толщине

конструкции, количество частей в наплавляемом слое $parts$, число расчетов для одной наплавляемой части i_{fin1} , число слоев по длине конструкции k_{fin} , число расчетов для одного элемента наплавляемой части (ΔL) i_{fin2} , температурное распределение в конце наплавления части слоя T_1 , коэффициент при градиенте теплопроводности GT , удвоенный коэффициент теплопроводности для граничных точек GT_2 , коэффициент при конвективном градиенте GC , число точек от края подложки до начала наплавляемого слоя k_{beg} , число точек до конца наплавляемого слоя k_{fin1} и начальное число слоев подложки N_{1_beg} .

Также в функцию *TempSurfacing* в качестве исходных данных передаются значения весов температуры подложки w_1 и расплавленного металла w_2 для граничных точек по высоте конструкции, коэффициенты при радиационном градиенте для нижней GR_1 и верхней GR_2 поверхностей металлического основания, коэффициент Kel для перевода температуры из градусов Цельсия в градусы Кельвина, температуры среды под T_{c1} и над T_{c2} наплавляемой конструкцией, толщины всех наплавляемых слоев $N2_mas$. Текст функции *TempSurfacing* представлен на рис. 3.7 и 3.8.

```
function kf=TempSurfacing(sl, rest, conv);
global slices Tm Tc N1 N2 N n parts ifin1 kfin ifin2 T1 GT GT2 GC kbeg kfin1 N1_beg
global w1 w2 GR1 GR2 Kel Tc1 Tc2 N2_mas sl_inc
if (sl>1) && (sl_inc==true)
    N1=N1+N2_mas(sl-1); N=N+N2; n=n+N2; sl_inc=false; end; % наращиваем число слоев
    rfin=2; % наплавленный слой имеет толщину dL (2 точки)
    for r=1:rfin
        T1(N1+2:n,kbeg+r,1)=Tm; T1(N1+1,kbeg+r,1)=w1*T1(N1,kbeg+r,1)+w2*Tm; end;
    irem=0; % оставшееся число шагов при нецелом делении ifin1 на ifin2
    for k=1:parts % по количеству частей наплавляемого слоя
        T(:,,1)=T1(:,,k);
        for i=1:ifin1 % по времени
            for r=1+kbeg:rfin+kbeg % по длине образовавшейся наплавки
                T(1,r,i+1)=T(1,r,i)+GT2*(T(2,r,i)-T(1,r,i))+GC*(Tc-T(1,r,i))+GR1*(Tc1-
                (T(1,r,i)+Kel)^4);
                for j=2:N % по толщине
                    T(j,r,i+1)=T(j,r,i)+GT*(T(j-1,r,i)-2*T(j,r,i)+T(j+1,r,i)); end;
                T(n,r,i+1)=T(n,r,i)+GT2*(T(N,r,i)-T(n,r,i))+GC*(Tc-T(n,r,i))+GR2*(Tc2-
                (T(n,r,i)+Kel)^4); end;
            end
        end
    end
end
```

Рис. 3.7. Функция *TempSurfacing* для моделирования температурного поля (часть 1)

```

for r=1:kfin+1 % только по длине подложки
    if (r<kbeg+1) || (r>rfin+kbeg)
        T(1,r,i+1)=T(1,r,i)+GT2*(T(2,r,i)-T(1,r,i))+GC*(Tc-T(1,r,i))+GR1*(Tc1-
        (T(1,r,i)+Kel)^4);
        if (r<kbeg+1) || (r>kfin+1) Nh=N1_beg; else Nh=N1; end;
        for j=2:Nh % по толщине подложки
            T(j,r,i+1)=T(j,r,i)+GT*(T(j-1,r,i)-2*T(j,r,i)+T(j+1,r,i)); end;
            T(Nh+1,r,i+1)=T(Nh+1,r,i)+GT2*(T(Nh,r,i)-T(Nh+1,r,i))+GC*(Tc- T(Nh+1,r,i))+
            GR2*(T(Nh+1,r,i)+Kel)^4); end; end;
        for j=1:N1+1 % по толщине подложки
            if (kbeg==0) || ((kbeg>0) && (j<=N1_beg+1))
                T(j,1,i+1)=T(j,1,i)+GT2*(T(j,2,i)-T(j,1,i))+GC*(Tc-T(j,1,i))+GR1*(Tc1-
                (T(j,1,i)+Kel)^4);
                for r=2:kfin
                    T(j,r,i+1)=T(j,r,i)+GT*(T(j,r-1,i)-2*T(j,r,i)+T(j,r+1,i)); end;
                    T(j,kfin+1,i+1)=T(j,kfin+1,i)+GT2*(T(j,kfin,i)-T(j,kfin+1,i))+GC*(Tc-
                    T(j,kfin+1,i))+GR1*(Tc1-(T(j,kfin+1,i)+Kel)^4);
                else
                    T(j,1+kbeg,i+1)=T(j,1+kbeg,i)+GT2*(T(j,2+kbeg,i)-T(j,1+kbeg,i))+GC*(Tc-
                    T(j,1+kbeg,i))+GR2*(Tc2-(T(j,1+kbeg,i)+Kel)^4);
                    for r=2+kbeg:kfin1
                        T(j,r,i+1)=T(j,r,i)+GT*(T(j,r-1,i)-2*T(j,r,i)+T(j,r+1,i)); end;
                        T(j,kfin1+1,i+1)=T(j,kfin1+1,i)+GT2*(T(j,kfin1,i)-T(j,kfin1+1,i))+GC*(Tc-
                        T(j,kfin1+1,i))+GR2*(Tc2-(T(j,kfin1+1,i)+Kel)^4); end; end;
                if rfin>1 % больше одного куска наплавляемой части
                    for j=N1+2:n % по толщине наплавки
                        T(j,1+kbeg,i+1)=T(j,1+kbeg,i)+GT2*(T(j,2+kbeg,i)-T(j,1+kbeg,i))+GC*(Tc-
                        T(j,1+kbeg,i))+GR2*(Tc2-(T(j,1+kbeg,i)+Kel)^4);
                        for r=kbeg+2:kbeg+rfin-1
                            T(j,r,i+1)=T(j,r,i)+GT*(T(j,r-1,i)-2*T(j,r,i)+T(j,r+1,i)); end;
                            T(j,rfin+kbeg,i+1)=T(j,rfin+kbeg,i)+GT2*(T(j,rfin+kbeg-1,i)-T(j,rfin+kbeg,i))+
                            conv*GC*(Tc-T(j,rfin+kbeg,i))+GR2*(Tc2-(T(j,rfin+kbeg,i)+Kel)^4); end; end;
                        if mod(i+irem,ifin2)==0 % новый кусок наплавляемой части
                            if ((k==parts) && (i==ifin1)) rfin=rfin+1; % наплавка уже закончена
                            else rfin=rfin+1; T(N1+2:n,rfin+kbeg,i+1)=Tm;
                            T(N1+1,rfin+kbeg,i+1)=w1*T(N1,rfin+kbeg,i+1)+w2*Tm;
                            T(N1+2:n,rfin+kbeg-1,i+1)=w1*T(N1+2:n,rfin+kbeg-1,i+1)+w2*Tm;
                            T(N1+1,rfin+kbeg-1,i+1)=w1*T(N1,rfin+kbeg-1,i+1)+w2*T(N1+2,rfin+kbeg-1,i+1);
                        end; end; end; % по времени
                    T1(:,k+1)=T(:,k+1); irem=k*ifin1-(rfin-2)*ifin2; end;
                kf=k+1; % финишная точка по времени
            end
        end
    end
end

```

Рис. 3.8. Функция *TempSurfacing* для моделирования

температурного поля (часть 2)

Моделирование температурного распределения на этапе выдержки производится с помощью функции $kf = \text{TempRest}(sl, conv)$, в которую передаются параметры $slices$, T_c , N_2 , N , n , $parts$, i_{fin1} , k_{fin} , T_1 , GT , GT_2 , GC , $kbeg$, k_{fin1} , N_{1_beg} . Функция *TempRest* позволяет учесть охлаждение наплавленной

конструкции во время технологического перехода к наплавке нового слоя металла (рис. 3.9, 3.10).

```
function kf=TempRest(sl,conv);
global slices Tc N2 N n parts ifin1 kfin T1 GT GT2 GC kbeg kfin1 N1_beg
global GR1 GR2 Kel Tc1 Tc2 GC2
% global dL lam a alfa dtau
for k=1:parts % по количеству частей наплавляемого слоя
    T(:, :, 1)=T1(:, :, k);
    for i=1:ifin1 % по времени
        for r=1:kfin+1 % цикл по длине конструкции - расчет градиентов по толщине
            T(1,r,i+1)=T(1,r,i)+GT2*(T(2,r,i)-T(1,r,i))+GC*(Tc-T(1,r,i))+GR1*(Tc1-
            (T(1,r,i)+Kel)^4);
            if (r<kbeg+1) || (r>kfin1+1) Nh=N1_beg; % длина подложки > длины наплавки
            else Nh=N; end;
            for j=2:Nh % по толщине
                T(j,r,i+1)=T(j,r,i)+GT*(T(j-1,r,i)-2*T(j,r,i)+T(j+1,r,i)); end;
                T(Nh+1,r,i+1)=T(Nh+1,r,i)+GT2*(T(Nh,r,i)-T(Nh+1,r,i))+GC2*(Tc-
                T(Nh+1,r,i))+GR2*(Tc2-
                (T(Nh+1,r,i)+Kel)^4); end;
            for j=1:n % цикл по толщине конструкции - расчет градиентов по длине
                if (kbeg==0) || ((kbeg>0) && (j<=N1_beg+1))
                    T(j,1,i+1)=T(j,1,i)+GT2*(T(j,2,i)-T(j,1,i))+conv*GC*(Tc-T(j,1,i))+GR1*(Tc1-
                    (T(j,1,i)+Kel)^4);
                    for r=2:kfin % по длине
                        T(j,r,i+1)=T(j,r,i)+GT*(T(j,r-1,i)-2*T(j,r,i)+T(j,r+1,i)); end;
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
kf=k+1; % финишная точка по времени
```

Рис. 3.9. Функция *TempRest* для моделирования температурного поля в период межслойной выдержки (часть 1)

```
T(j,kfin+1,i+1)=T(j,kfin+1,i)+GT2*(T(j,kfin,i)-T(j,kfin+1,i))+conv*GC*(Tc-
T(j,kfin+1,i))+GR1*(Tc1-(T(j,kfin+1,i)+Kel)^4);
else
    T(j,1+kbeg,i+1)=T(j,1+kbeg,i)+GT2*(T(j,2+kbeg,i)-
    T(j,1+kbeg,i))+conv*GC2*(Tc-
    T(j,1+kbeg,i))+GR2*(Tc2-(T(j,1+kbeg,i)+Kel)^4);
    for r=2+kbeg:kfin1
        T(j,r,i+1)=T(j,r,i)+GT*(T(j,r-1,i)-2*T(j,r,i)+T(j,r+1,i)); end;
        T(j,kfin1+1,i+1)=T(j,kfin1+1,i)+GT2*(T(j,kfin1,i)-T(j,kfin1+1,i))+conv*GC*(Tc-
        T(j,kfin1+1,i))+GR2*(Tc2-(T(j,kfin1+1,i)+Kel)^4); end; end;
    end; % по времени
    T1(:, :, k+1)=T(:, :, i+1); end;
    if (slices>1) && (sl<slices) % к новому наплавляемому слою
        T1(:, :, 1)=T1(:, :, k+1);
        T1(n+1:n+N2, :, :) = 0;
    end;
end;
kf=k+1; % финишная точка по времени
```

Рис. 3.10. Функция *TempRest* для моделирования температурного поля в период межслойной выдержки (часть 2)

Для учета зависимости теплофизических свойств металла от его температуры в программе используется функция *TempDepend* (*mas*, *ro*). Основными параметрами функции являются нижнее T_b и верхнее T_t граничные значения температуры для расчета свойств металла, значения теплопроводности lam_1 и lam_2 , а также значения теплоемкости C_1 и C_2 при нижней и верхней граничной температуры соответственно. Шаг расчета по толщине конструкции dL используется для определения максимально допустимого временного шага расчета *dtau_max*. Текст функции *TempDepend* для расчета свойств наплавленного металла приведен на рис. 3.11.

```
function [lam,a,dtau_max]=TempDepend(mas,ro);
global dL Tb Tt lam1 lam2 C1 C2
mas1=nonzeros(mas);
sm=sum(mas1)/length(mas1); % средняя температура
if (sm<=Tb)
    lam=lam1;
    C=C1;
elseif (sm>=Tt)
    lam=lam2;
    C=C2;
else
    lam=lam1+(sm-Tb)*(lam2-lam1)/(Tt-Tb);
    C=C1+(sm-Tb)*(C2-C1)/(Tt-Tb);
end;
a=lam/(ro*C);
dtau_max=dL^2/(2*a);
```

Рис. 3.11. Функция *TempDepend* для учета изменения теплофизических свойств наплавленного металла

Исходные данных об наплавляемом изделии загружаются из документа в формате Excel в окно программы (рис. 3.12) и производится моделирование температурного поля для всех этапов послойного наплавления.

The screenshot shows a software interface with various input fields and buttons. The fields are organized into rows and columns. The first row contains a 'Чтение' (Read) button, followed by fields for dL,м (0.001), L2,м (0.002), dB,м (0.028), w1 (0.5), Es1 (0.8). The second row contains fields for L1,м (0.006), B2,м (0.07), B1,м (0.126), w2 (0.5), Es2 (0.8). The third row contains a 'Слоев наплавления' (Layers of welding) field with value 6, a 'Расчет' (Calculate) button, a 'Время наплавления, с' (Welding time, s) field with value 7, a 'Время отдыха, с' (Rest time, s) field with value 120, an 'alfa, Вт/(м²*К)' field with value 12, and an 'alfa2, Вт/(м²*К)' field with value 110.

Рис. 3.12. Внешний вид экрана при работе программы

Интервал времени межслойной выдержки устанавливается аналогичным экспериментальному $\tau_6 = 120$ с. Веса w_1 и w_2 принимаются равными 0,5, коэффициенты конвективного теплообмена во время наплавления металла $\alpha = 12$ Вт/(м²·К) и во время технологической выдержки $\alpha_2 = 110$ Вт/(м²·К). Результаты расчета выводятся в табличном и графическом виде в форме двумерного графика температурного поля и его цветовой проекции на геометрическую плоскость по размерам изделия для всех этапов процесса послойного наплавления металла (рис. 3.13, 3.14).

Для приведенных выше экспериментальных данных произведено моделирование температурного поля в конструкции с помощью функции *TempSurfacing* [104]. Результаты представлены в табл. 3.3 и на рис. 3.15.

Таблица 3.3. Экспериментальные и расчетные значения температуры процесса аддитивного производства

t, сек	Номер и температура наплавленного слоя, °C											
	1		2		3		4		5		6	
	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р
0	263,1	404,1	275,0	399,5	282,3	380,6	287,1	365,9	295,0	357,4	298,1	353,5
120	51,1	108,3	61,9	138,8	65,1	152,3	67,3	159,5	72,6	163,8	72,8	166,7

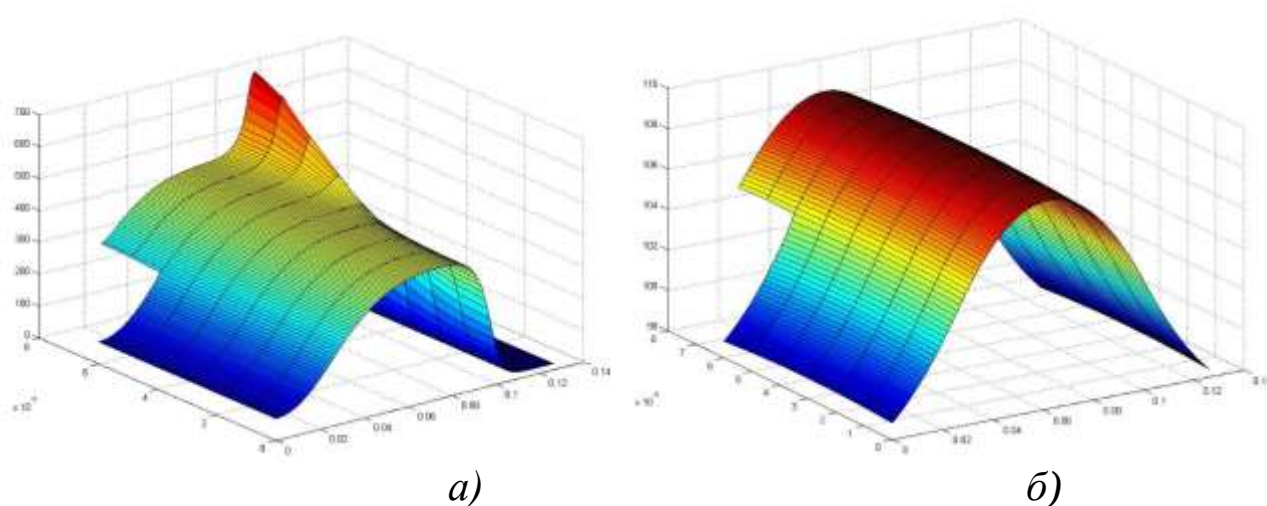


Рис. 3.13. Температурное поле при наплавлении 1-го слоя:
а) в конце процесса наплавления; б) в конце этапа отдыха

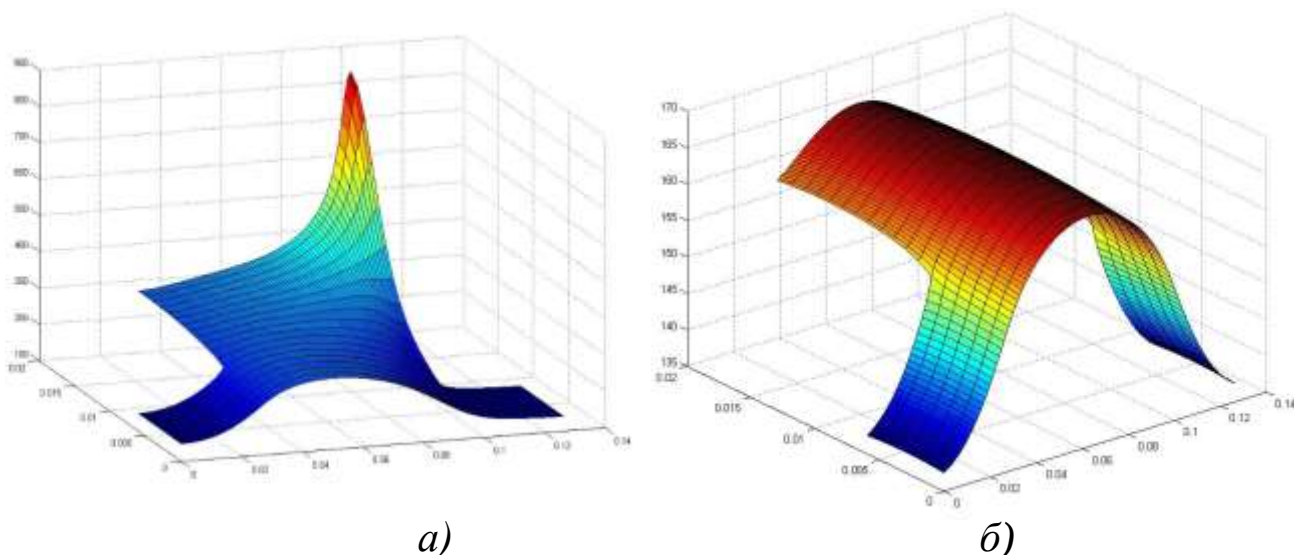


Рис. 3.14. Температурное поле при наплавлении 6-го слоя:

а) в конце процесса наплавления; б) в конце этапа отдыха

Анализ экспериментальных и расчетных значений температур показал отличие как по величине, так и по характеру их распределения в процессе послойного электродугового наплавления металла.

Моделируемые значения температур превышают расчетные показатели на 15-50%. Наибольшее отклонение $\Delta T = 141\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается в конце наплавления первого слоя, минимальное – на последнем наплавленном слое и составляет $55,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом отличается и характер изменения температуры по времени послойного наплавления. Расчетные значения температуры показывают падение температуры наплавленного металла с $404,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $353,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а экспериментальные значения характеризуются увеличением температуры металла с $263,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $298,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при наплавлении последующих слоев.

Расчетная температура металла после этапа технологической выдержки также отличается от экспериментальных значений, превышая их на $57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ для первого и на $93,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ для последнего наплавленного слоя. Динамика изменения экспериментальных и расчетных значений температуры в конце этапа выдержки напротив имеет одинаковый характер, заключающийся в

последовательном увеличении температуры наплавленного металла с 51,1 °С до 72,8 °С для эксперимента и с 108,3 °С до 166,7 °С для модели.

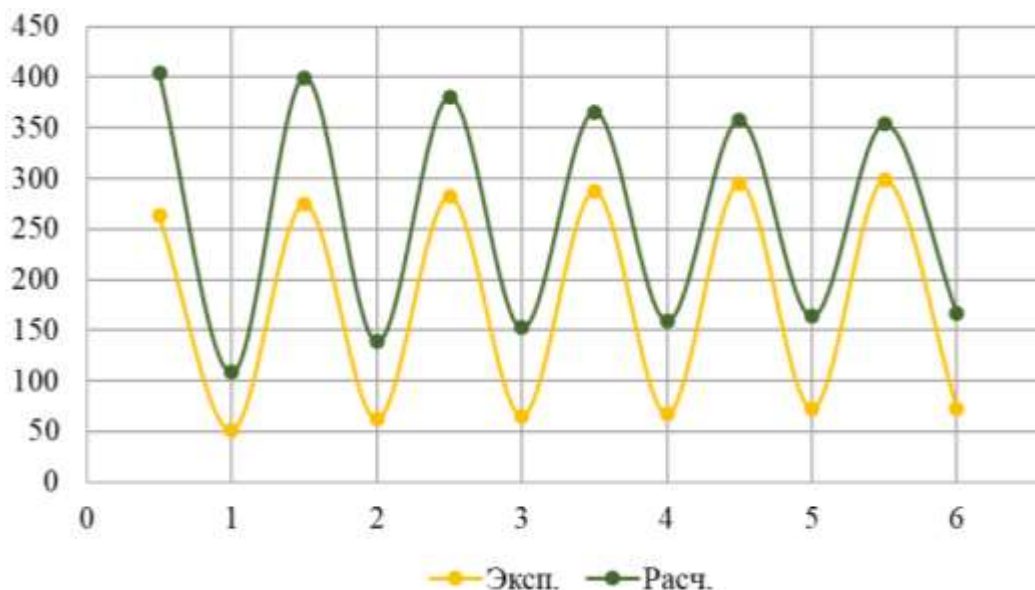


Рис. 3.15. Графики изменения экспериментальной и расчетной температуры металла

Одинаковый характер изменения температуры металла в период межслойной выдержки достигается за счет функции *TempDepend*, предназначенной для корректировки теплопроводности λ и теплоемкости C стали в зависимости от её температуры. Однако различия в показателях температур, полученных в результате работы функций *TempSurfacing* и *TempRest*, показали необходимость углублённого изучения механизма распределения тепла, а также идентификации параметров теплообмена в процессе послойного электродугового наплавления металла.

3.3. Корректировка программы расчета температурного поля при послойном электродуговом наплавлении

Анализ результатов, полученных в результате экспериментального и расчетного определения температуры при послойном наплавлении, показал, что наибольшее расхождение по значениям и динамике наблюдается между температурами в конце этапа наплавления каждого слоя металла. Большие значения расчетных температур связаны с отсутствием возможности моделирования программой температурного поля в трехмерных

пространственных координатах, учитывающих не только высоту L и длину B , но и толщину конструкции D . Учет третьей пространственной координаты по толщине изделия в функции *TempSurfacing* усложняет разработку модели и отладку программы, ухудшает ее быстродействие и многократно увеличивает количество вычислительных операций при текущем шаге расчета $\Delta\tau = 0,01$ с.

Отсутствие учета третьей координаты приводит к неточному описанию распространения тепла в массивном теле при охлаждении металла. Для устранения этого недостатка введены весовые коэффициенты, характеризующие влияние температуры металла основания w_1 и металла сварочной ванны w_2 на формирование температуры в граничной точке. Снижение расчетной температуры наплавленного слоя достигается путем увеличения веса основания w_1 при определении температуры на границе между основным и наплавленным металлом. Это позволит уменьшить значение температуры металла в граничной точке, увеличить интенсивность внутреннего теплообмена и изменить характер распределения температуры в наплавленном металле.

Высокие значения температуры металла по завершению этапа межслойной выдержки вызваны большими значениями расчетных температур в конце наплавления и неточным описанием интенсивности конвективного теплообмена. Для устранения приведенного недостатка необходимо определить вынужденный коэффициент конвективного теплообмена α_2 для этапа технологической выдержки [105].

Для расчета весов температур основания w_1 и наплаваемого металла w_2 в программу добавлен модуль идентификации весовых коэффициентов $y=Iden1 (par)$, а также модуль $y=Iden2 (par)$ для определения оптимальных значений коэффициента искусственного конвективного теплообмена α_2 . Основными передаваемыми данными для модулей идентификации являются: *slices*, T_m , T_c , N_1 , N_2 , N , n , *parts*, i_{fin1} , k_{fin} , i_{fin2} , T_1 , GT , GT_2 , GC , k_{beg} , k_{fin1} , N_{1_beg} , w_1 , w_2 , GR_1 , GR_2 , Kel , Tc_1 , Tc_2 , N_{2_mas} , а также номер слоя sl , межслойный отдых *rest*, конвекция с торцов конструкции *conv*, номер точки идентифицируемой

температуры $Niden$, значение идентифицируемой температуры T_iden , температурное распределение в конце наплавления части слоя $T1_beg$, добавление слоев sl_inc . Тексты функций идентификации $y=Iden1(par)$ и $y=Iden2(par)$ приведены на рис. 3.16 и 3.17 соответственно.

```
function y=Iden1(par)
global slices Tm Tc N1 N2 N n parts ifin1 kfin ifin2 T1 GT GT2 GC kbeg kfin1 N1_beg
global w1 w2 GR1 GR2 Kel Tc1 Tc2 N2_mas sl rest conv Niden T_iden T1_beg sl_inc
w1=par(1); w2=1-w1; T1=T1_beg;
kf=TempSurfacing1(sl,rest,conv);
y=abs(T1(n,Niden,kf)-T_iden);
```

Рис. 3.16. Текст функции $Iden1$ для расчета разницы температур при идентификации весовых коэффициентов w_1, w_2

```
function y=Iden2(par)
global slices Tm Tc N1 N2 N n parts ifin1 kfin ifin2 T1 GT GT2 GC kbeg kfin1 N1_beg
global w1 w2 GR1 GR2 Kel Tc1 Tc2 GC2 N2_mas sl conv Niden T_iden dL lam T1_beg
alfa2=par(1); alfa=alfa2; GC=GT2*alfa*dL/lam;
GC2=GT2*alfa2*dL/lam; % пересчитываем коэф. при конвективном градиенте
T1=T1_beg; kf=TempRest(sl,conv);
y=abs(T1(n,Niden,kf)-T_iden);
```

Рис. 3.17. Текст функции $Iden2$ для расчета разницы температур при идентификации коэффициентов конвективного теплообмена α_2

Идентификация параметров осуществляется стандартным методом Matlab *fminbnd*, сочетающим методы золотого сечения и параболической интерполяции [106-108]. За 10-12 шагов метод сходится к значениям параметров, обеспечивающих отклонение расчетных значений температур от экспериментальных данных на величину $TolFun=0,5$. Для этапа наплавления идентифицируются веса подложки w_1 в диапазоне от 0 до 1 с точностью $TolX=0,001$. Значения весовых коэффициентов находятся из выражения $w_2 = 1 - w_1$. Для этапа отдыха идентифицируются значения коэффициентов конвективного теплообмена α_2 с точностью $TolX=1$. Исходные данные по требуемым температурам в конце наплавления слоя $Tmelt$ и после технологической выдержки $Trest$ записываются в файл Excel. Данные из файла загружаются в программу, где осуществляется идентификация параметров теплообмена на этапах наплавления слоев и межслойной выдержки (рис. 3.18).

Идентификация						
	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. 3.18. Окно программы с результатами идентификации параметров

Рассчитанное для идентифицированных параметров весов w_1 , w_2 и коэффициентов теплообмена α_2 температурное поле представлено в графическом виде на рис. 3.19 и 3.20.

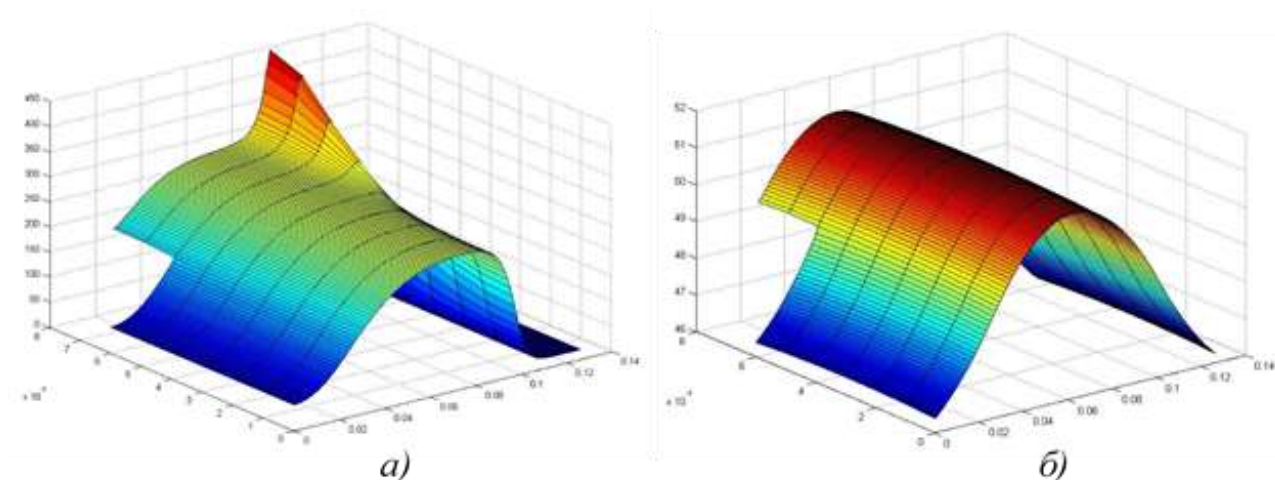


Рис. 3.19. Температурное поле с учетом идентифицированных параметров для 1-го слоя: а) в конце процесса наплавления; б) в конце этапа отдыха

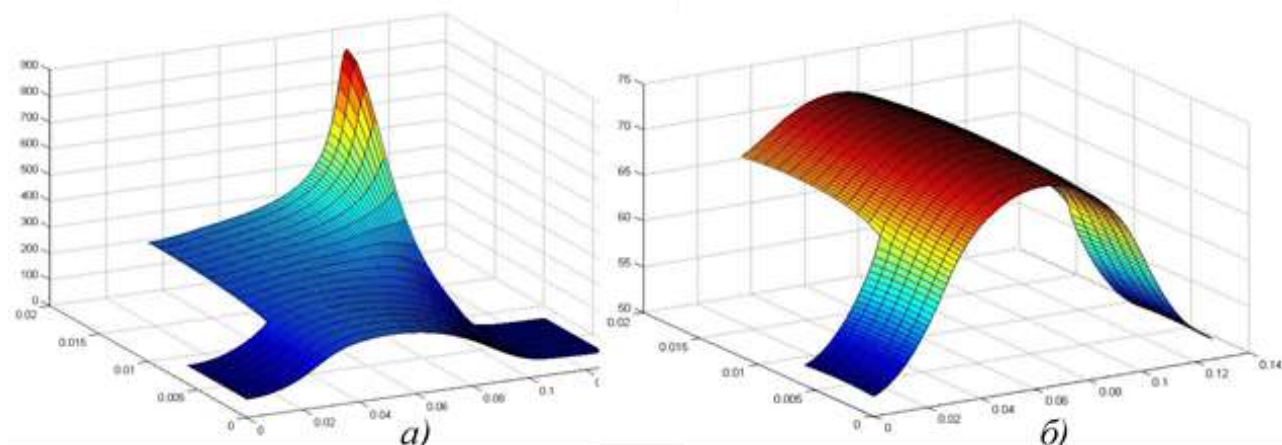


Рис. 3.20. Температурное поле с учетом идентифицированных параметров для 6-го слоя: а) в конце процесса наплавления; б) в конце этапа отдыха

Результаты идентификации весов и коэффициентов конвективного теплообмена показали хорошую сходимость требуемых значений температуры к моделируемым с отклонением менее 0,1 °С. Применение модулей идентификации *Iden1* и *Iden2* при моделировании температурного поля позволило учесть особенности технологического процесса послойного наплавления металла и получить реальную картину температурного поля.

3.4. Учет массивности наплаваемого изделия при идентификации параметров теплообмена

Полученные в ходе идентификации значения параметров теплообмена показали, что для компенсации большого разрыва экспериментальных и расчетных значений температуры металла (до 54% на первом слое) необходимо увеличить коэффициент веса подложки w_1 более чем на 60%. При наплавлении последующих слоев наблюдается линейное изменение коэффициентов w_1 , w_2 с пересечением номинального значения (рис. 3.21).

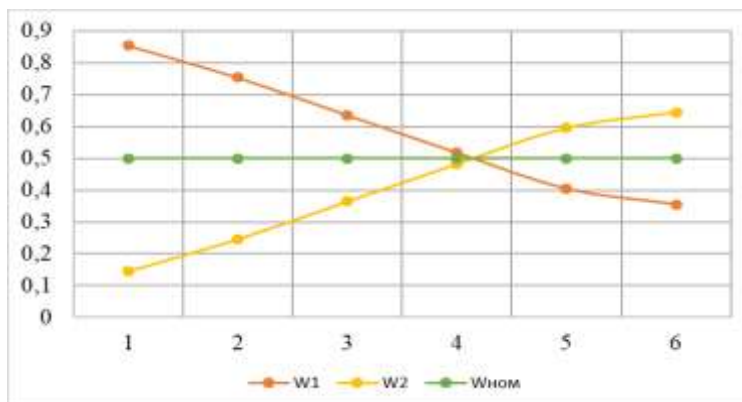


Рис. 3.21. Изменение весовых коэффициентов по наплаваемым слоям

Идентифицированные коэффициенты конвективной теплопроводности α_2 более чем в 2 раза превышают номинальные значения и увеличиваются по мере нагрева металлического основания, что говорит о необходимости учета увеличенной теплоотдачи от внешних точек конструкции (рис. 3.22).

Компенсировать отсутствие третьей координаты по ширине основания и уменьшить отклонение идентифицированных параметров w_1 , w_2 и α_2 от заданных номинальных значений возможно путем искусственного увеличения геометрических размеров конструкции.

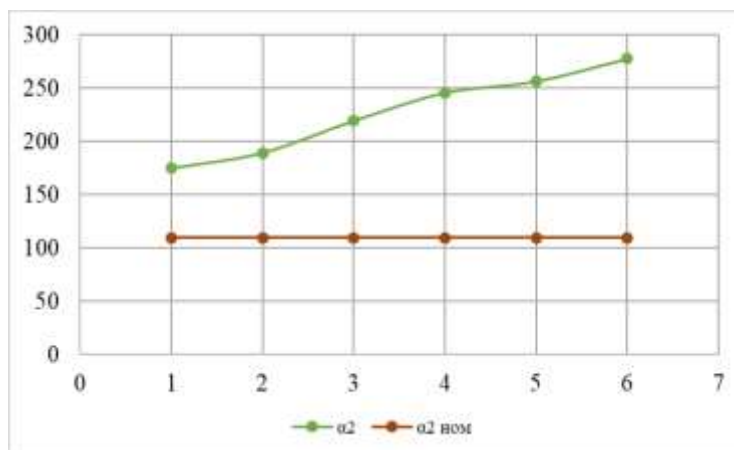


Рис. 3.22. Изменение коэффициента конвективной теплоотдачи по наплавленным слоям

Добавление новых точек по высоте конструкции позволит уравновесить значения коэффициентов теплообмена и увеличить интенсивность распределения тепла в наплавляемой конструкции. Удобнее изменить высоту основания, для этого произведем моделирование температурного поля для конструкции с толщиной основания L_1 равной 10, 12 и 18 мм. Численные результаты расчета приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Результаты моделирования температурного поля в конструкции с различной толщиной основания

№ слоя	Температура металла		Теплофизические параметры		
	T_{melt}	T_{rest}	w_1	w_2	α_2
Толщина основания $L_1 = 6$ мм					
1	404	108	0,85	0,15	175
2	399	139	0,75	0,25	189
3	380	152	0,64	0,36	219
4	366	159	0,52	0,48	246
5	357	164	0,4	0,6	256
6	353	167	0,3	0,7	278
Толщина основания $L_1 = 10$ мм					
1	281	99	0,57	0,43	260
2	320	134	0,51	0,49	257
Толщина основания $L_1 = 10$ мм					
3	335	150	0,44	0,56	276
4	342	159	0,38	0,62	289
5	345	164	0,31	0,69	285
6	348	167	0,305	0,695	298

Продолжение таблицы 3.4

Толщина основания $L_1 = 12$ мм					
1	250	94	0,45	0,55	295
2	299	130	0,43	0,57	283
3	322	148	0,39	0,61	295
4	335	157	0,35	0,65	303
5	342	163	0,3	0,7	293
6	346	166	0,3	0,7	305
Толщина основания $L_1 = 18$ мм					
1	214	80	0,24	0,76	358
2	269	114	0,32	0,68	325
3	301	135	0,33	0,67	328
4	321	148	0,31	0,69	327
5	332	155	0,28	0,72	306
6	339	160	0,29	0,71	318

На основе проведенных расчетов можно отметить, что увеличение толщины основания и образование новых холодных точек в наплавляемой конструкции привело к положительному увеличению интенсивности распределения тепла, позволило значительно уменьшить температуру металла в конце этапа наплавления и обеспечить более плавное температурное распределение по этапам послойного наплавления.

Результаты моделирования процесса наплавления на основание толщиной 10 мм показали, что температура металла в конце этапа наплавления уменьшается на 30%, уменьшается разброс идентифицированных параметров весов w_1 , w_2 , сокращается максимальное отклонение от номинального значения $w_{ном}$ до 0,195. Минимальное отклонение коэффициентов, равное 0,01, наблюдается при наплавлении второго слоя. Коэффициент теплообмена α_2 , по сравнению с наплавлением на основание толщиной 6 мм, увеличивается с 175 до 260 Вт/(м²·К) для первого слоя и с 278 до 298 Вт/(м²·К) для шестого слоя, что говорит об учете теплоотводящей способности поверхности массивной конструкции.

Для процесса наплавления на основание толщиной 12 мм отклонение расчетной температуры металла от экспериментальных значений составило 5%. Параметры идентификации получили более равномерное распределение

по времени наплавления, максимальное отклонение весовых коэффициентов от номинальных значений составило 0,2 (40% от $w_{ном}$). При этом график изменения коэффициента w_1 находится ниже номинального значения, а максимально приближенное значение достигается на первом наплавленном слое и составляет $w_1 = 0,45$. Коэффициенты конвективного теплообмена α_2 увеличиваются до 305 Вт/(м²·К).

При наплавлении слоя на основание 18 мм отклонение расчётной температуры от номинального значения составило 18,6% в меньшую сторону, что негативно сказалось на равномерности изменения весовых коэффициентов. Максимальное отклонение от номинального значения для w_1 составило 0,26 (52% от $w_{ном}$). Значения коэффициента конвективного теплообмена также увеличилось до 358 Вт/(м²·К). Графики изменения теплофизических параметров в зависимости от толщины основания приведены на рис. 3.23 и 3.24.

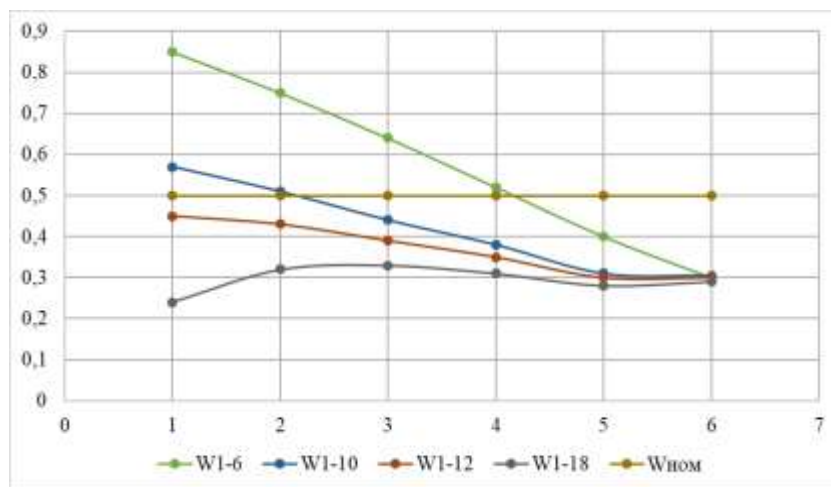


Рис. 3.23. Изменение весовых коэффициентов w_1 , w_2 по наплавляемым слоям

На основании приведенных данных можно сделать вывод, что искусственное увеличение толщины основания положительно сказывается на изменении теплофизических характеристик наплавляемого металла. При этом минимальное отклонение расчетных и экспериментальных значений температур обеспечивается при увеличении толщины основания конструкции до 12 мм. Кроме того, при двукратном увеличении основания достигается минимальное отклонение значений весовых коэффициентов и их наиболее

равномерное распределение по этапам послойного наплавления. Коэффициенты вынужденного конвективного теплообмена увеличиваются по мере увеличения геометрических размеров изделия.

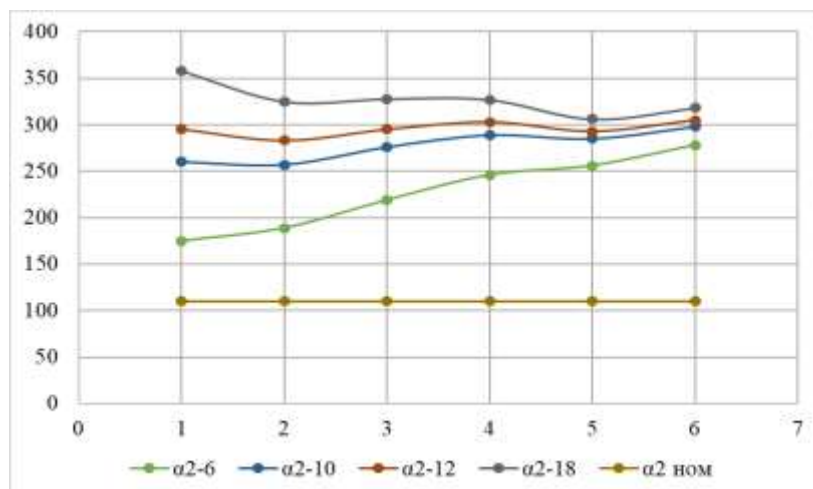


Рис. 3.24. Изменение коэффициента конвективной теплоотдачи α_2 по наплаваемым слоям

Дополнительно следует отметить уравнивание весовых коэффициентов на 5-м и 6-м наплавленных слоях, что позволяет судить об частичном выравнивании режима послойного наплавления и установлении значений весового коэффициента w_1 и коэффициента конвективного теплообмена α_2 для последующих слоев металла.

Для подтверждения установленного режима проведено моделирование температурного поля для наплаваемой стенки высотой $L = 20$ мм с искусственной толщиной основания $L_1 = 12$ мм. Результаты моделирования температур при фиксированных значениях коэффициентов веса $w_1 = 0,3$ и конвективного теплообмена $\alpha_2 = 300$ Вт/(м²·К) представлены в таблице 3.5.

Приведенные результаты показали хорошую сходимость желаемых и моделируемых значений температур с максимальным отклонением в 3 °С, что подтверждает уравнивание температурного режима при послойном наплавлении металла и позволят рассчитывать температурное поле для металлических деталей высотой более 12 мм без затрат времени на идентификацию параметров теплообмена. Результаты моделирования температурного поля приведены на рис. 3.25 и 3.26.

Таблица 3.5. Результаты моделирования для 10 слоев металла

№ слоя	T_{Σ}	T_{melt}	T_{rest}	w_1	w_2	α_2
1	263	261,98	50,9	0,45	0,55	295
2	275	274,66	61,86	0,43	0,57	283
3	282	281,83	65,05	0,39	0,61	295
4	287	286,49	66,93	0,35	0,35	303
5	295	294,27	71,88	0,3	0,7	293
6	298	297,46	71,99	0,3	0,7	305
7	300	296,98	73,58	0,3	0,7	300
8	300	298,27	74,66	0,3	0,7	300
9	300	299,25	74,84	0,3	0,7	300
10	300	300,03	75,01	0,3	0,7	300

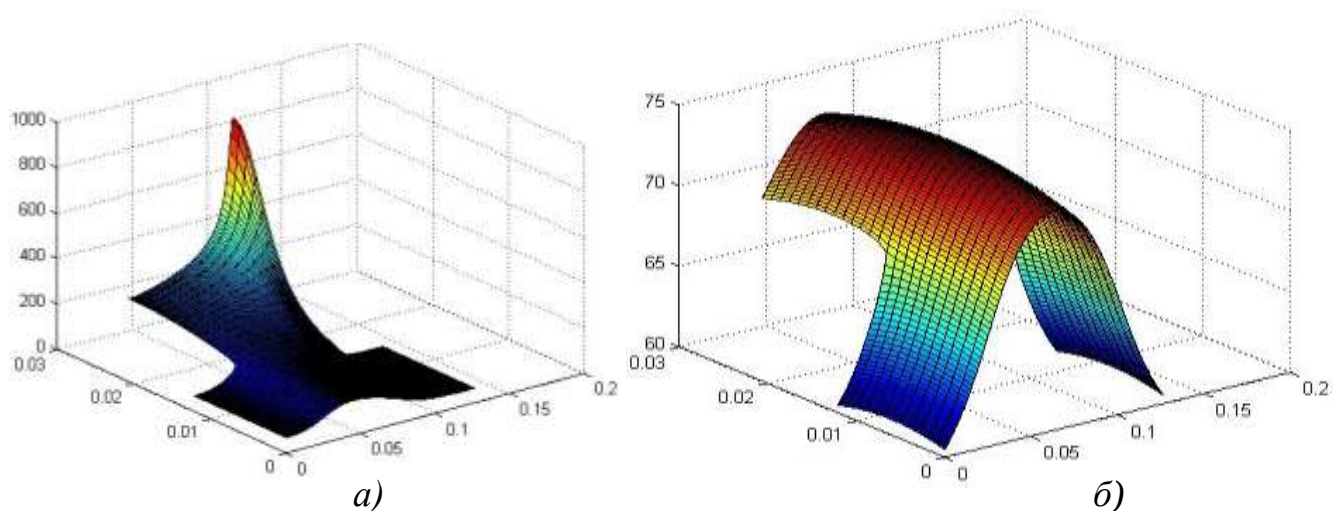


Рис. 3.25. Температурное поле в конструкции высотой 20 мм для 7-го слоя:

а) в конце процесса наплавления; б) в конце этапа отдыха

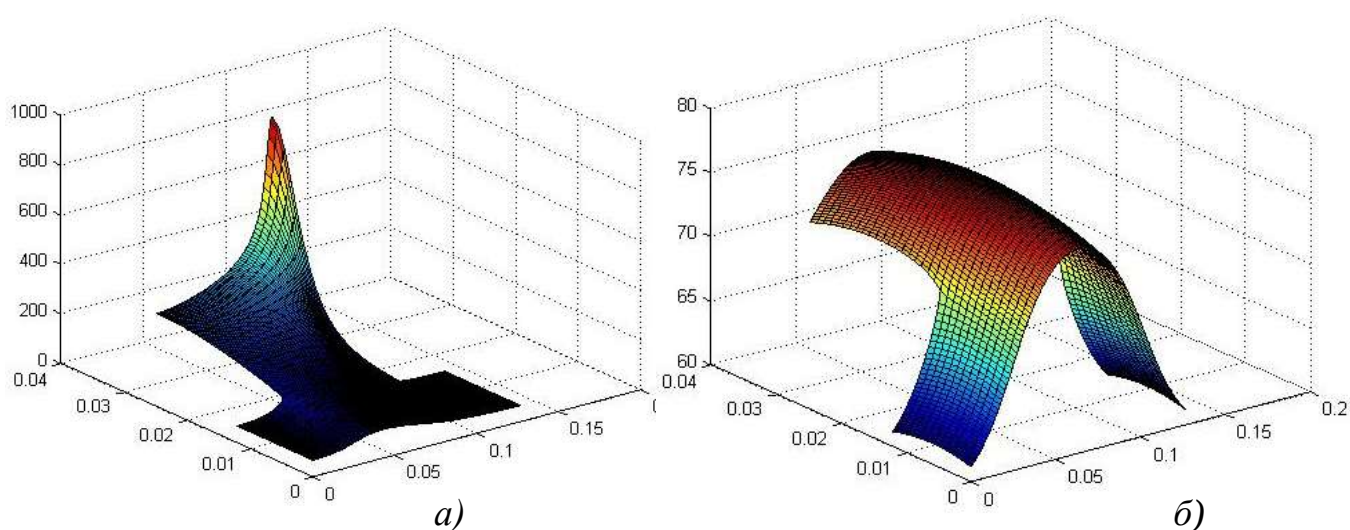


Рис. 3.26. Температурное поле в конструкции высотой 20 мм для 7-го слоя:

а) в конце процесса наплавления; б) в конце этапа отдыха

Выводы

В третьей главе диссертации описана методика экспериментального определения температуры металла в процессе послойного электродугового наплавления, рассмотрена конструкция и механизм управления установкой для 3D печати, определены основные параметры режима послойного наплавления, их взаимосвязь и роль в технологическом процессе.

Выполнена оптимизация технологического режима послойного наплавления для проволоки диаметром 1,2 мм, исследовано качество наплавленного образца и установлена зависимость геометрических характеристик наплавленной детали от установленных параметров режима.

На основе оптимального режима проведена послойная электродуговая наплавка экспериментального образца простой геометрической формы с записью температуры каждого наплавленного слоя на протяжении всего этапа межслойной выдержки.

Представлен текст программы и функций для расчета температурного поля в двухмерных пространственных координатах по длине и высоте конструкции для этапов наплавления и межслойной выдержки. Приведена функция учета зависимости теплофизических свойств стали от её текущей температуры.

На основании исходных данных, используемых при экспериментальном определении температуры, проведено моделирование температурного поля для всех этапов послойного наплавления по результатам которого выполнен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений температур показавший недостаточную точность работы программы.

Для устранения выявленных недостатков проведена корректировка программы путем внедрения модулей идентификации параметров теплообмена, включающих коэффициенты веса температур в зоне контакта расплава с основанием и коэффициент вынужденной конвекции.

Результаты расчета с учетом идентифицированных параметров показали хорошую сходимость экспериментальных и расчетных значений температур, с отклонением менее 0,1 °С.

Дополнительно разработаны рекомендации по корректировке исходных данных для повышения точности вычислительных операций и эффективности идентификации параметров теплообмена. В результате получена программа, позволяющая рассчитать температурное поле в двухмерных пространственных координатах для изделий различных размеров с учетом всех особенностей послойного электродугового наплавления.

4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Разработанная программа позволяет с достаточной точностью производить моделирование температурного поля в процессе аддитивного производства металлических изделий. Результаты моделирования используются в автоматизированной системе управления технологическим процессом для определения оптимального режима послойного наплавления на этапе подготовки производства, а также для сокращения временных и материальных затрат в ходе послойного наплавления. В 4-й главе приведено подробное описание структуры автоматизированной системы и используемого программного обеспечения, представлены результаты практического применения системы управления для наплавления металлического изделия и выполнена оценка эффективности внедрения средств автоматизации в процесс аддитивного производства.

4.1. Постановка задачи управления технологическим процессом аддитивного производства

В технологическом процессе аддитивного производства металлических изделий следует разделять параметры портального манипулятора (включая скорость движения рабочего органа) и параметры геометрии наплавленного изделия, определяющие траекторию и последовательность перемещения

рабочего органа на основе заданных координат начальных и конечных точек всех элементов конструкции.

Для постановки задачи автоматизированного управления технологическим процессом аддитивного производства рассмотрим пример изделия F , представленного на рис. 4.1.

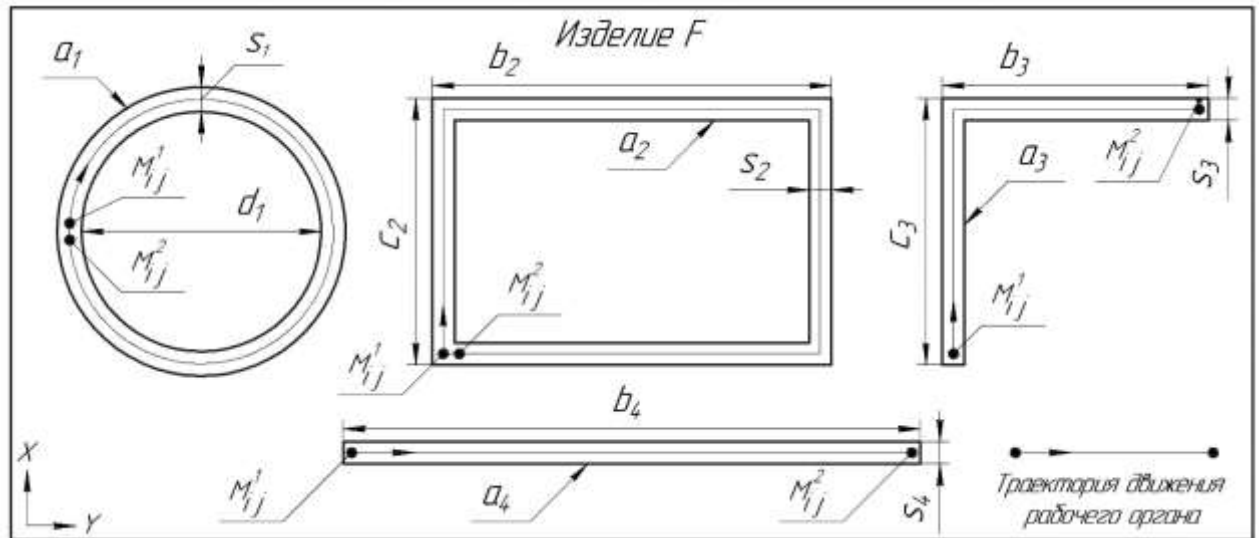


Рис. 4.1. Схема изделия F и составляющие его элементы a_1 - a_4

Конструкция изделия F состоит из определенного количества элементов $k = 4$ различной геометрической формы и размеров. Элемент a_1 представляет замкнутую окружность заданного диаметра d_1 с толщиной стенки s_1 , элемент a_2 имеет форму прямоугольника с толщиной стенки s_2 , длиной b_2 и шириной c_2 , элемент a_3 представлен в виде прямого угла с геометрическими размерами s_3 , b_3 , c_3 , элемент a_4 – прямолинейная стенка длиной b_4 и толщиной s_4 .

Совокупность элементов образует конструкцию всего изделия:

$$\sum_{i=1}^k a_i \in F. \quad (4.1)$$

В рамках плоскости XY каждый элемент конструкции может быть описан элементарными функциями (линия, прямоугольник, круг, эллипс и т.д.) или задан дискретными координатами (рис. 4.1).

В плоскости XZ или YZ (в поперечном направлении) профиль элемента близок к прямоугольному и состоит из последовательно наплаваемых слоев (рис 4.2). Каждый элемент a_i наплавается за несколько слоев n_{ij} , где i – номер наплаваемого элемента, j – номер наплаваемого слоя i -го элемента.

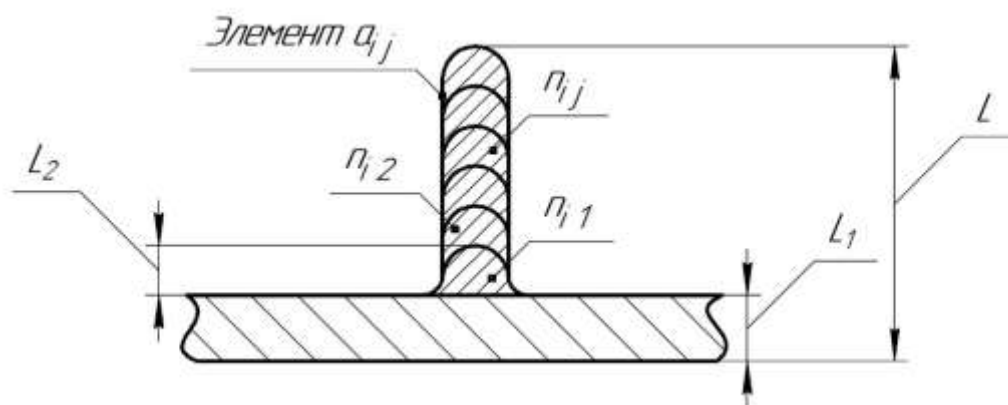


Рис. 4.2. Профиль поперечного сечения элемента a_i :

L – высота элемента; L_1 – толщина основания; L_2 – толщина слоя n_{ij}

Каждый слой n_{ij} имеет точки начала его выполнения M_{ij}^1 и окончания M_{ij}^2 , координаты которых задаются технологом по рабочему чертежу детали.

Точки M_{ij}^1 и M_{ij}^2 имеют 3 координаты: $x_{ij}^1, x_{ij}^2, y_{ij}^1, y_{ij}^2, z_{ij}^{1\tau}, z_{ij}^{2\tau}$. Параметр высоты $z_{ij}^{2\tau}$ означает окончание наплавления элемента a_i и задается исходя из выбранного диаметра присадочной проволоки d_{np} .

Расстояние перехода между точками окончания M_{1j}^2 слоя n_{1j} элемента a_1 к точке начала M_{2j}^1 слоя n_{2j} по элементу a_2 изделия F в определенный момент времени t определяется по формуле:

$$l_{1-2}^{\tau} = \sqrt{(x_{ij}^1 - x_{ij}^2)^2 + (y_{ij}^1 - y_{ij}^2)^2 + (z_{ij}^{1\tau} - z_{ij}^{2\tau})^2}. \quad (4.2)$$

Индекс τ обозначает конкретный момент времени, так как координата z изменяется по мере добавления новых слоев металла. Если слой выполняется по одному и тому же элементу, то индекс элемента не меняется.

Тогда время перехода от элемента a_1 к элементу a_2 изделия F составит:

$$t_{1-2}^{\tau} = l_{1-2}^{\tau} / V_{xx}, \quad (4.3)$$

где V_{xx} – скорость холостого перемещения рабочего органа без наплавления присадочного металла, принимается в диапазоне 600-800 мм/мин.

Объем наплавленного материала W_{ij}^τ за единицу времени на текущий момент времени τ при наплавке слоя n_{ij} , зависит от скорости перемещения наплавочного электрода V_{ij}^τ :

$$W_{ij}^\tau = f_1(V_{ij}^\tau). \quad (4.4)$$

Температура T_{ij}^τ разогрева элемента a_i в текущий момент времени τ зависит от скорости перемещения наплавочного электрода V_{ij}^τ при наплавке слоя n_{ij} , то есть

$$T_{ij}^\tau = f_2(V_{ij}^\tau). \quad (4.5)$$

Данная функциональная зависимость определяется моделью, представленной в главе 2.

Время окончания выполнения наплавочного слоя n_{ij} определяется по формуле:

$$\tau_{ij}^k = \tau_{ij}^o + l_{ij}/V_{ij}^\tau, \quad (4.6)$$

где τ_{ij}^o – время начала выполнения слоя n_{ij} ; l_{ij} – длина j -го слоя элемента a_i .

На основании изложенных подходов по определению параметров температурно-временного режима (глава 3), траектории и последовательности наплавления слоев по формулам (4.1)-(4.6) для дискретного технологического процесса аддитивного производства разработана двухконтурная автоматизированная система управления по параметрам температуры и геометрии изделия.

4.2. Структура автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства

Структурная схема автоматизированной системы управления изображена на рис. 4.3. Входными параметрами приведенной двухконтурной системы являются:

- Q_G , геометрические размеры всех элементов a_i , составляющих наплавленное изделие, количество наплавленных слоев n_{ij} по каждому

элементу a_i , а также координаты точек начала M_{ij}^1 и окончания M_{ij}^2 слоя по для всех наплаваемых элементов;

- набор параметров температуры Q_0 , включающий начальную температуру окружающей среды, металлического основания и граничные температуры наплаваемого металла;
- теплофизические свойства наплаваемого металла Q_T ;
- значения коэффициентов искусственного конвективного и радиационного теплообмена с окружающей средой, весовых коэффициентов теплопроводности основного и присадочного металла Q_α .

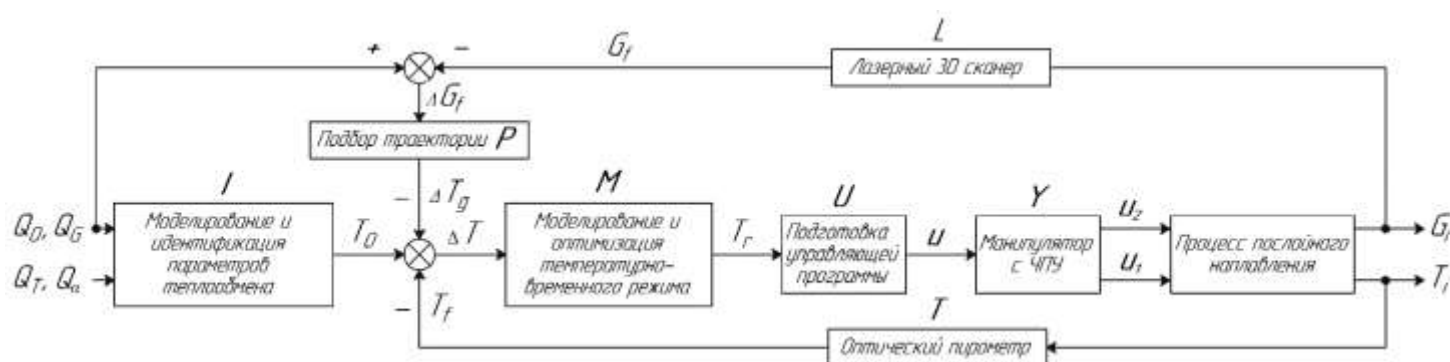


Рис. 4.3. Схема двухконтурной автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства

Приведенная система включает подсистемы идентификации I параметров теплообмена на основе введенных исходных данных (Q_G, Q_0, Q_T, Q_α), моделирования и оптимизации температурно-временного режима M , выработки управляющего воздействия U , исполнительного устройства Y – портального манипулятора с ЧПУ, устройства T измерения температуры характерной точки наплавленного металла T_i на этапе межслойной выдержки, устройства контроля геометрии наплавленных элементов L и подсистемы компенсации отклонения траектории P .

Выходными параметрами автоматизированной системы управления являются значения температур наплавленного металла T_i и геометрия наплавленного слоя G_i .

В связи с высокой температурой электрической дуги (более 3500 °С) на этапе наплавления в рабочей зоне установки возникает интенсивное ультрафиолетовое излучение, засвечивающее контролируемую поверхность наплавленного слоя. Поэтому запись термического цикла возможно осуществлять только на этапе межслойной выдержки. Величина отклонения расчетных и фактических значений температур используется для принятия решения об управлении процессом.

Контроль геометрии формируемого слоя осуществляется за счет лазерного 3D сканера, считывающего рельеф поверхности изделия на этапе межслойной выдержки. Измеренные координаты точек слоя n_{ij} сравниваются с установленными значениями, характеризующими корректное формирование наплавляемого элемента.

Подсистема идентификации параметров теплообмена I позволяет определить необходимые для моделирования и оптимизации коэффициенты веса температур w_1 и w_2 , а также вынужденной конвекции для этапа межслойной выдержки α_2 , обеспечивающие соответствие текущей температуры наплавленного металла граничным значениям. Идентификация осуществляется для всех новых изделий, а также при изменении геометрических размеров наплавляемой конструкции.

Полученные параметры теплообмена и исходные значения режима послойного наплавления используются подсистемой моделирования и оптимизации температурно-временного режима послойного наплавления M . На данном этапе вырабатываются оптимальные параметры послойного наплавления и межслойной выдержки, которые совместно с расчетными значениями температур T_r используются для подготовки управляющей программы U .

Подсистема подготовки управляющей программы включает персональный компьютер и программное обеспечение для разработки кода управления установкой, описывающего траекторию и последовательность наплавления слоев на заданном режиме работы установки.

Для подготовки кода управляющей программы подсистема U использует исходные координаты начала и окончания слоев по трем пространственным координатам $x_{ij}^1, x_{ij}^2, y_{ij}^1, y_{ij}^2, z_{ij}^{1\tau}, z_{ij}^{2\tau}$. Для определения конечной высоты j -го слоя используются координаты высоты следующего слоя $j+1$. В процессе разработки последовательности наплавления элементов конструкции необходимо учитывать ряд ограничений.

Ограничение №1. Температура поверхности наплаваемого слоя T_{ij} не должна превышать допустимые граничные значения температур:

$$T_{ij} \leq T_{1гр}. \quad (4.7)$$

Соблюдение данного ограничения обеспечивает стабильное формирование слоя без образования дефектов геометрии наплаваемого элемента конструкции.

Ограничение №2. Время τ_{ij} наплавления слоя должно стремиться к минимуму при условии, что

$$|\tau_{ij} = \tau_{ij}^H + \tau_{ij}^B| \rightarrow \min \quad (4.8)$$

где τ_{ij}^H – время, затрачиваемое на наплавление слоя, с; τ_{ij}^B – время, затрачиваемое на охлаждение слоя на этапе межслойной выдержки, с.

Данное условие позволяет выстроить оптимальную последовательность наплавления элементов конструкции с минимальными затратами времени. Чем больше расстояние между элементами, тем меньшее температурное влияние они оказывают друг на друга, соответственно для достижения допустимой температуры наплаваемого слоя потребуется меньшее время выдержки.

Ограничение №3. Температура основания T_0 и соседних элементов $T_{(i+1)_j}$ не должна превышать допустимые значения:

$$T_0, T_{(i+1)_j} \leq T_{2гр}. \quad (4.9)$$

Соблюдение ограничения №3 позволяет достигнуть желаемой структуры изделия без локального увеличения размеров зерна и снижения

механических свойств в результате циклического влияния температуры наплавленного элемента.

Ограничение №4. Построение последовательности наплавления слоев n_{ji} с учетом приоритетов элементов конструкции a_i :

$$n_{ij} \rightarrow a_i (P_i \uparrow), \quad (4.10)$$

где P_i – приоритет наплавленного элемента.

Для формирования вариантности при разработке последовательности наплавления предложено использовать несколько приоритетов.

Приоритет P_1 – наплаваемый слой должен оказывать минимальное температурное влияние на другие элементы конструкции. Различают два сценария наплавления:

- с последовательным наплавлением элементов a_i по замкнутому контуру;
- с симметричным наплавлением элементов a_i от центра основания к крайним по длине элементам конструкции.

Приоритет P_2 используется для уточнения последовательности, полученной по приоритету P_1 . В конструкции выделяют наиболее массивные элементы, требующие больших затрат рабочего времени. Последовательность наплавления начинается от большего элемента к меньшему.

Приоритет P_3 учитывает необходимость наплавления всех слоев n_{ij} одного элемента a_i . Переход к следующему элементу a_{i+1} осуществляется только после полного наплавления предыдущего a_i . При разработке траектории наплавления по P_3 учитывают целесообразность завершения наплавления i -го элемента и уменьшение температурного влияния на него в процессе наплавления последующих элементов конструкции.

Приоритет P_4 определяет последовательность перехода к наплавлению последующих слоев при условии обеспечения минимальных затрат времени на движения холостого хода. Согласно его формулировке, рабочее движение

сварочной горелки приоритетнее её холостого перемещения из точки начала одного слоя i -го элемента к точке начала следующего элемента $i+1$.

Приоритеты P_3 и P_4 являются второстепенными и применяются только для случаев, когда невозможно выполнение приоритетов P_1 и P_2 . Наплавление одного элемента в полном объеме (приоритет P_3) приводит к локальному увеличению температуры конструкции и требует более интенсивного охлаждения металла в ходе межслойной выдержки, что негативно сказывается на эффективности процесса. Как показали результаты экспериментальной отработки технологии послойного наплавления, применение приоритета P_4 не оказывает значительного влияния на производительность, поскольку время межслойной выдержки τ_6 , в среднем составляет 100-120 с и значительно превышает затраты времени на совершение холостого хода рабочего органа при минимальной скорости его перемещений 600 мм/мин.

Соблюдение перечисленных ограничений в процессе разработки последовательности послойного наплавления обеспечивает гарантированное сплавление основного и присадочного металла, стабильное формирование геометрии слоя и структуры металла. Кроме того, ограничение (4.8) позволяет повысить эффективность процесса аддитивного производства за счет подбора последовательности наплавления с минимальными затратами времени на охлаждение конструкции.

Результаты подготовки управляющей программы и передаются исполнительному устройству – портальному манипулятору Y , который преобразует команды компьютера в физическое перемещение рабочего органа u_1 , необходимое для реализации основной функции объекта управления – послойного наплавления металлического изделия. Кроме манипулятора подсистема реализации управляющего воздействия Y включает локальные системы управления параметрами источника тока u_2 , которые позволяют корректировать количество энергии, подаваемой в зону плавления, и контролировать скорость подачи присадочной проволоки.

Основной исследуемой характеристикой объекта управления является температура наплавленного слоя T_{ij} , которая зависит от установленного режима аддитивного производства и интенсивности конвективного теплообмена на этапе охлаждения металла. Значение температуры фиксируется с помощью оптического пирометра и выводится на персональный компьютер численным виде, где определяется её отклонение от расчетных значений и принимается решение о корректировке процесса.

Для реализации двухконтурного управления в разработанной схеме предусмотрена подсистема измерения параметров геометрии наплавленного слоя G_i , определяющая отклонение геометрии элемента от его номинальных параметров. Оценка поверхности наплавленного элемента осуществляется лазерным сканером L .

Автоматизированная система управления процессом послойного электродугового наплавления металлических изделий работает следующим образом. На основании введенных исходных данных осуществляется идентификация параметров теплообмена и моделирование температурного поля в наплавляемом изделии. По полученным данным рассчитывается оптимальный температурно-временной режим аддитивного производства, обеспечивающий достижение заданных граничных значений температур, и осуществляется расчет управляющей программы. Реализация управляющего кода выполняется порталным манипулятором с помощью локальных систем управления температурным режимом, траекторией и скоростью движения сварочной горелки.

После наплавления слоя осуществляется запись его температуры с выводом значений в цифровом формате на рабочий компьютер оператора установки, обработка и сопоставление измеренных и расчетных значений температур. В случае, если температура металла T_{ij} не превышает граничные значения, то дальнейшее наплавление осуществляется в соответствии с параметрами, установленными в результате предварительной оптимизации.

Если температура наплавленного металла в конце наплавления слоя превышает граничные значения, то производится перерасчет оптимальных температурно-временных параметров режима, включающих скорость наплавления v_n , время межслойной выдержки t_6 и скорость вращения вентилятора принудительного охлаждения w_6 . С учетом обновленных параметров режима вырабатывается код управляющей программы и передается исполнительному устройству.

После измерения температуры металла производится сканирование лазерным лучом поверхности наплавленной конструкции. Если сканер фиксирует несоответствие геометрии слоя его исходным характеристикам или траектории наплавления, осуществляется выработка компенсационного воздействия, заключающееся в построении новой траектории наплавления. В результате расчета подбирается траектория движения сварочной горелки, обеспечивающая достижение температурой металла установленных ограничений при минимальных затратах времени на межслойное охлаждение конструкции. После расчета компенсатор выдает новые параметры наплавления ΔT_g , на основании которых осуществляется повторная оптимизация температурно-временного режима и выработка управляющей программы.

Предложенная схема автоматизированной двухконтурной системы управления процессом послойного наплавления позволяет сократить трудоемкость операции технологической подготовки производства, повысить эффективность операции послойного наплавления за счет автоматизации расчета и реализации управляющего воздействия на основе данных по температуре и геометрии наплавленного слоя.

4.3. Структура программы моделирования и оптимизации процесса послойного наплавления металла

Основной расчетной процедурой в автоматизированной системе управления процессом послойного наплавления является программа моделирования температурного поля и оптимизации температурно-

временного режима аддитивного производства. Главная функция программы содержит все исходные данные, необходимые для расчета температурного поля, воспроизведения графического интерфейса, вызова вспомогательных функций и представления результатов моделирования [109].

После запуска программы пользователю предоставляется рабочее окно, в которое заносятся геометрические размеры наплавляемой детали, параметры теплопроводности для выбранной марки стали и параметры режима послойного наплавления. Исходные данные могут быть добавлены вручную или прочитаны из файла в формате Excel с помощью вызова диалогового окна. Далее производится расчет температурного поля в процессе наплавления слоя с помощью функции *TempSurfacing* и в период межслойной выдержки с помощью функции *TempRest*.

Перед наплавлением каждого нового слоя программа выполняет функцию *TempDepend*, предназначенную для обновления параметров теплоемкости C и теплопроводности λ в зависимости от текущей температуры наплавленного металла. Перечисленные операции повторяются до тех пор, пока не будет рассчитано температурное поле для всей наплавляемой конструкции. Схема работы программы приведена на рис. 4.4.

Если результаты моделирования не соответствуют реальным значениям температур, например, при изменении условий охлаждения металла или замене источника тепловой энергии, в рабочем окне программы есть возможность активировать расчет с идентификацией теплофизических параметров. В этом случае к работе стандартных функций программы добавляются функции по идентификации весовых коэффициентов в зоне контакта расплава с основанием *Iden1* и коэффициента вынужденной конвекции в период межслойной выдержки *Iden2*.

Структура программы позволяет произвести последовательный расчет температурного поля с учетом послойного добавления материала, межслойного охлаждения наплавленной конструкции и изменяющихся параметров источника тепловой энергии.

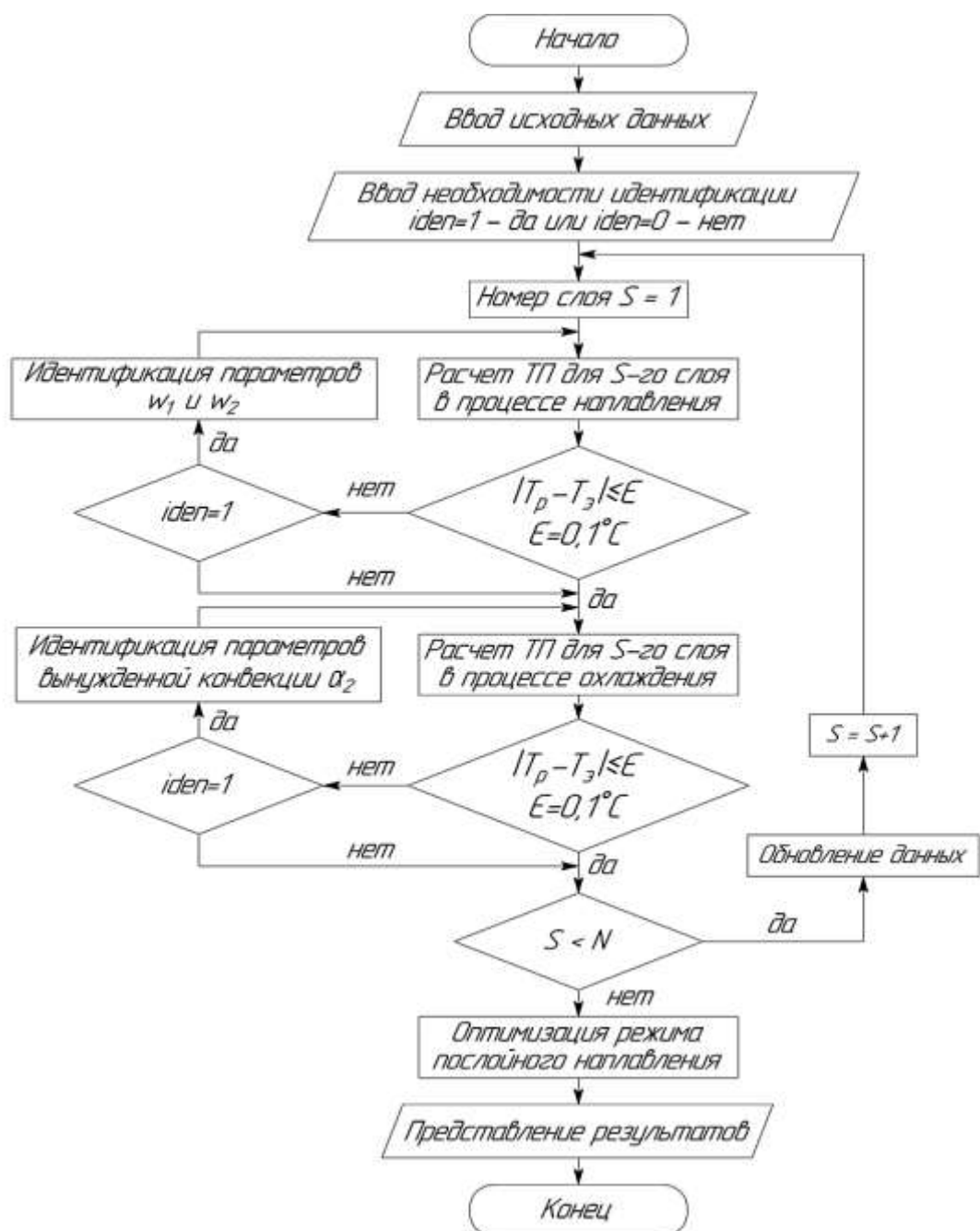


Рис. 4.4. Схема работы программы моделирования температурного поля в процессе послойного наплавления

Работа программы может осуществляться по трем сценариям:

1. Моделирование температурного поля с идентифицированными значениями весовых коэффициентов температур w_1 , w_2 , и коэффициента вынужденной конвекции α_2 , полученными на этапе технологической подготовки производственного процесса. В данном случае отсутствует необходимость текущего изменения параметров теплообмена ($iden = 0$), что позволяет сократить время оптимизации температурно-ременного режима.

Рекомендуемое количество наплавленных слоев для одного элемента составляет $N \leq 6$.

2. Моделирование температурного поля при измененных геометрии слоя или последовательности наплавления элементов в результате воздействия текущих или планируемых возмущений. Обязательно производится моделирование с идентификацией параметров теплообмена ($iden = 1$) после каждого этапа послойного наплавления. Количество наплавленных слоев N определяется исходя из требуемой высоты детали.

3. Моделирование температурного поля в изделии большей высоты $N > 6$ при использовании тех же исходных данных, что и в процессе практической отработки программы. В данном случае используются установившиеся значения весовых коэффициентов $w_1 = 0,3$, $w_2 = 0,7$ и коэффициента вынужденной конвекции $\alpha_2 = 300 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ для седьмого и последующих слоев. Общее число слоев зависит от высоты наплавленной детали. Идентификация параметров теплообмена не производится, время расчета сокращается.

Разработанная программа позволяет моделировать температурное поле и подбирать оптимальный температурно-временной режим послойного наплавления для металлических изделий различной геометрической формы с учетом необходимости выполнения процедуры идентификации параметров теплообмена в зависимости от исходных данных о наплавленном изделии и внешних возмущений технологического процесса.

4.4. Применение программы для автоматизации технологической подготовки аддитивного производства

Для эффективного использования программы моделирования температурного поля в автоматизированной системе управления процессом аддитивного производства необходимо рассмотреть основные этапы послойного наплавления и выполняемые на них задачи. Этап послойного наплавления металла автоматизирован за счет применения числового программного управления рабочим органом. За оператором установки

закреплены вспомогательные функции, включающие подготовку металлического основания, настройку параметров режима наплавления и извлечение детали после её наплавления и охлаждения.

С точки зрения управления наибольшую трудоемкость составляет этап технологической подготовки производства, в который входит разработка траектории движения портального манипулятора и определение оптимального температурно-временного режима послойного наплавления.

Выбор оптимального с точки зрения достижения заданной геометрии слоя и температуры металла режима послойного наплавления производится путем выполнения серии экспериментов по определению зависимости температуры металла от параметров установки для электродугового наплавления. Временными характеристиками процесса являются время наплавления слоя τ_n , интервал межслойной выдержки τ_e и общее время послойного наплавления τ .

Температурные параметры или параметры установки для 3D печати определяются расчетным методом или выбираются по значениям, полученным экспериментальным путем.

Оптимизация температурно-временного режима заключается в подборе такого сочетания параметров источника тока и движения рабочего органа, при которых достигается желаемое качество внутренней структуры металла и стабильное формирование наплавленного слоя. Для сокращения времени, затрачиваемого на выполнение серии экспериментов, и уменьшения материальных затрат, включающих присадочную проволоку, защитный газ, электроэнергию, затраты на амортизацию оборудования и др. предложено использовать разработанную программу как средство оптимизации температурно-временного режима послойного наплавления.

В соответствии с схемой технологического процесса аддитивного производства (рис. 4.5) разработанная программа логично встраивается в модуль «Технологическая подготовка производства» и позволяет сократить

трудоемкость оптимизации температурно-временного режима и повысить эффективность процесса послойного наплавления.

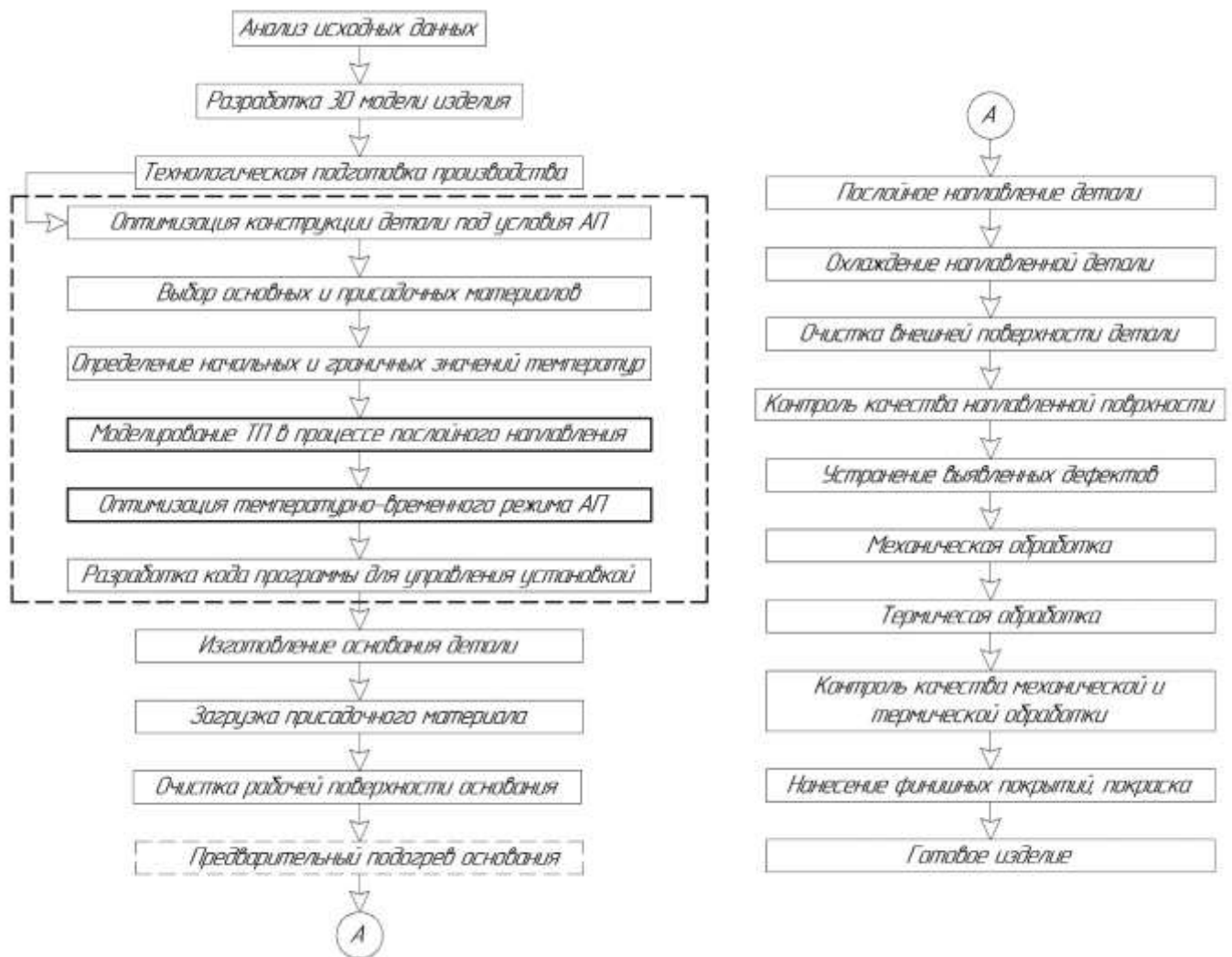


Рис. 4.5. Схема технологического процесса с внедренной программой моделирования температурного поля

Эффект от использования разработанной программы в автоматизированной системе управления технологическим процессом заключается в сокращении времени, затрачиваемого на подготовку производства, на 60-70%, снижении трудоемкости расчета последовательности наплавления и уменьшении расхода основных и вспомогательных материалов до 90%.

Для проверки прогнозируемого эффекта от применения автоматизированной системы выполнена оптимизация этапа технологической подготовки производства на примере реального металлического изделия.

Управление системой и реализация программы может быть организовано как на рабочем компьютере инженера-технолога, так и вынесено на отдельное рабочее место, что позволит одновременно моделировать температурное поле и выполнять операции по технологической подготовке производства.

4.5. Автоматизация технологической подготовки аддитивного производства на примере башмака дискового тормоза

Практическая реализация автоматизированной системы управления процессом послойного наплавления и программы моделирования температурного поля и оптимизации температурно-временного режима выполнена на примере конкретного металлического изделия – башмака дискового тормоза вагона подвижного железнодорожного состава.

Представленное изделие относится к деталям корпусного типа и предназначено для фиксации тормозной накладкой и передачи усилия от рычага исполнительного механизма к тормозному диску.

В зависимости от исполнения дисковый тормоз вагона может размещаться на внешней стороне колесной пары, на оси колесной пары или на самом колесе [110]. От расположения изменяется система рычагов и механизмов, приводящих в действие тормозную систему, а также геометрическая форма тормозной накладки [111, 112]. В примере рассмотрена система с размещением дискового тормоза на оси колесной пары (рис. 4.6, а).

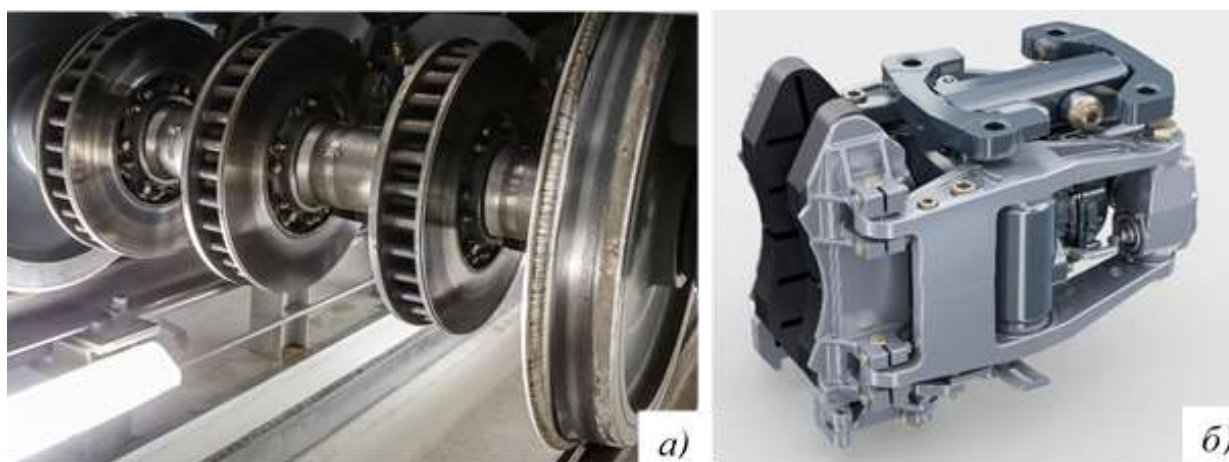


Рис. 4.6. Конструкция дискового тормоза:

а) на оси колесной пары; б) клещевой механизм Кнорр Бремзе [112].

В настоящее время башмак дискового тормоза изготавливается по традиционной технологии литья металла из стали марки 20-25Л и представляет собой конструкцию, состоящую из массивного основания, имеющего с одной стороны ровную плоскость с пазом для фиксации тормозной накладки, а с другой стороны выступающие проушины для крепления башмака с рычагом тормозного механизма и несколько пересекающихся ребер жесткости предотвращающих его разрушение в результате циклических ударных и вибрационных нагрузок. Внешний вид литого башмака дискового тормоза представлен на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Литой башмак дискового тормоза

Для организации аддитивного производства башмака дискового тормоза проведена подготовка его конструкции с учетом особенностей послойного электродугового наплавления, а именно:

- толщина стенок, выполняющих роль ребер жесткости и не требующих последующую механическую обработку, принимается равной номинальной толщине наплавленного слоя (4 мм для присадочной проволоки диаметром 1,2 мм);
- короткие стенки, длиной до 40 мм, распределяются равномерно по длине изделия с учетом нагрузок, возникающих при его эксплуатации;
- конструктивные элементы имеющие литейные уклоны выполняются с прямыми стенками, параллельными основанию;

- осевые отверстия диаметром до 20 мм не наплавляются и изготавливаются путём последующей механической обработки;
- конструктивные элементы, имеющие радиусные поверхности, наплавляются с учетом придания окончательной формы путем последующей механической обработки;
- шпоночные пазы, канавки, отверстия под крепежные элементы не изготавливаются в процессе послойного наплавления;
- ответственные поверхности наплавляются с припуском ± 1 мм на последующую механическую обработку;
- элементы толщиной более 4 мм выполняются путем наплавления нескольких слоев металла с частичным перекрытием предыдущего слоя.

Конструкция изделия с учетом вышеперечисленных требований представлена в виде 3D модели наплавленного башмака дискового тормоза на рис. 4.8 [113].

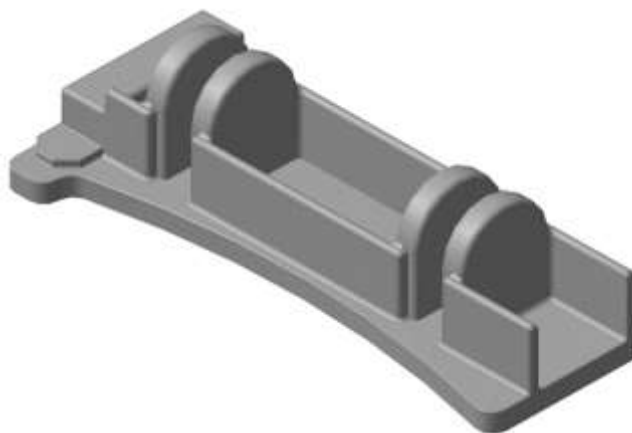


Рис. 4.8. 3D модель наплавленного изделия

В данной конструкции башмака выделяют следующие элементы:

- параллельные стенки длиной 100 мм и высотой 40 мм;
- короткие стенки длиной 40 мм и высотой 40 мм;
- короткие стенки длиной 20 мм и высотой 40 мм;
- проушины крепления оси рычага, длиной 50 мм и высотой 76 мм;
- фиксирующая планка длиной 80 мм и высотой 28 мм (изготавливается из металлической заготовки и присоединяется с основанием путем образования сварного соединения).

Наплавление элементов, имеющих толщину более 4 мм, осуществляется наложением нескольких параллельных слоев металла. Первоначальная последовательность наложения слоев определяется с учетом приоритетов Р1-Р4. Схема послойного наплавления башмака дискового тормоза представлена на рис. 4.9.

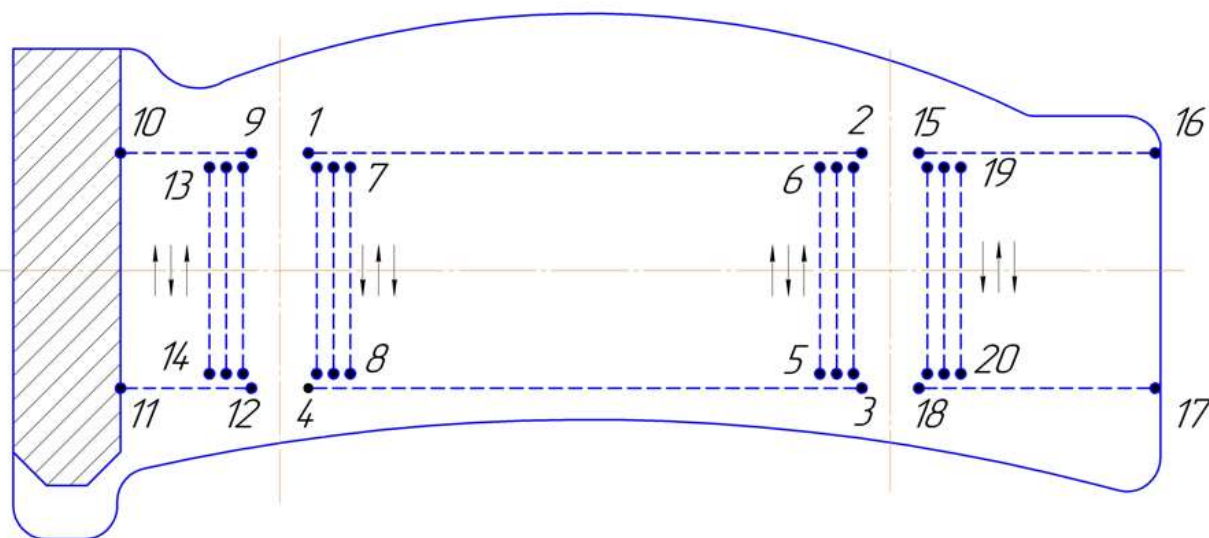


Рис. 4.9. Последовательность наплавления детали

Для расчета температурных параметров режима послойного наплавления, разработки кода программы ЧПУ, моделирования температурного поля и оптимизации температурно-временного режима аддитивного производства геометрические размеры отдельных элементов, составляющих конструкцию наплавляемой детали, сведены в таблицу 4.1.

Для обеспечения требуемой толщины конструктивных элементов D_2 использовалась присадочная проволока 08Г2С диаметром 1,2 мм, обеспечивающая стабильное формирование слоя толщиной от 4 до 5 мм. Температуры критических точек стали присадочной проволоки представлены в таблице 4.2 [114].

Требуемые механические и эксплуатационные свойства стали 08Г2С достигаются после её нормализации, которая заключается в нагреве напавленной конструкции до температур выше точки A_{c3} на 50-80 °С, выдержки в течении 3-4 часов и охлаждении на спокойном воздухе [115].

При такой термической обработке в структуре стали происходит выравнивание размера зёрен по всему объему изделия с частичной релаксацией внутренних напряжений [116].

Таблица 4.1. Геометрические размеры наплавляемых элементов

№	Название/ номера точек	Геометрические размеры, мм							
		B_1	B_2	ΔB	L_1	L_2	S	L	D_2
1	Ребро жесткости А 1 – 2 3 – 4	300	100	144 56	6	2	20	40	4
2	Ребро жесткости Б 15 – 16 17 – 18	300	40	260 0	6	2	20	40	4
3	Ребро жесткости В 9 – 10 11 – 12	300	20	172 108	6	2	20	40	4
4	Проушина 5 – 6 7 – 8 13 – 14 19 – 20	125	50	38	6	2	38	76	4

Таблица 4.2. Температуры критических точек стали 08Г2С

Критическая точка	$T, ^\circ\text{C}$
A_{C1} – нижняя граничная точка при нагреве стали	725
A_{C3} (A_{Cm}) – верхняя граничная точка при нагреве стали	860
A_{r1} – нижняя граничная точка при охлаждении	625
A_{r3} (A_{rm}) – верхняя граничная точка при охлаждении	780

При послойном наплавлении металла тепловое воздействие имеет точечный характер, что приводит к установлению достаточной высокой скорости охлаждения, до 2-3 °C/сек, возникающей в результате интенсивного кондуктивного теплообмена между горячим участком металла и основным металлом, а также конвективного теплообмена поверхности наплавленного слоя с окружающим воздухом с температурой 20-25 °C. Время нахождения металла в диапазоне температур 910-940 °C, соответствующем участку нормализации, составляет не более 2-3 секунд. В связи с этим структура наплавленного металла неоднородна и состоит из различных участков, включающих: участок неполного расплавления, участок перегрева, участки

нормализации, неполной перекристаллизации и рекристаллизации. Область распространения данных участков во многом определяет механические и эксплуатационные свойства наплавленного металла. Поэтому основной задачей автоматизированного управления является обеспечение оптимального термического цикла послойного наплавления на всех этапах производства.

Наиболее негативное влияние на структуру металла оказывает распространенность участков перегрева и неполного расплавления, проявляющихся при нагреве металла выше 1100 °С. Участки нормализации и частичной перекристаллизации характеризуются температурами в диапазоне 720-1050 °С и отличаются измельчением зерна и высокими прочностными свойствами. При значениях температур ниже 720 °С происходит рекристаллизация стали, которая сопровождается частичным укрупнением зерна [117, 118].

Кроме механических и эксплуатационных свойств граничные значения температур определяются еще и качеством геометрии наплавленного металла. В ходе проведенных экспериментов было установлено, что минимальная волнистость наплавленной конструкции и высокие показатели прироста по высоте наплавленного слоя (порядка 1,8-2 мм) достигается при температуре его поверхности, не превышающей 450-500 °С, что обеспечивается охлаждением металла в период межслойной выдержки до температур ниже 100-120 °С [119].

На основе приведенных данных о температуре металла установлены граничные значения термического цикла послойного наплавления, включающие значение температуры в конце наплавления и слоя T_m и в конце этапа межслойной выдержки T_r . Начальный интервал межслойной выдержки, принимается равным $\tau_6 = 100$ с, коэффициенты конвективного теплообмена в процессе наплавления $\alpha = 12$ Вт/(м²·К) и в период межслойной выдержки с учетом принудительного охлаждения $\alpha_2 = 300$ Вт/(м²·К). Параметры веса

температур w_1 и w_2 в зоне контакта, времени наплавления слоя, степени черноты ε_1 и ε_2 , и другие исходные данные приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Исходные данные для всех элементов конструкции

№	Номера точек	Исходные данные								
		w_1	w_2	$t_s, \text{с}$	ε_1	ε_2	T_{rest}	T_{melt}	$\tau_\theta, \text{с}$	$\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
1-й слой										
1	1 – 2	0,45	0,55	10	0,8	0,8	300	120	100	300
2	3 – 4	0,45	0,55	10				120	100	
3	5 – 6	0,4	0,6	5				120	100	
4	7 – 8	0,4	0,6	5				110	110	
5	9 – 10	0,35	0,65	2				110	110	
6	11 – 12	0,35	0,65	2				110	110	
7	13 – 14	0,3	0,7	5				110	120	
8	15 – 16	0,3	0,7	4				100	120	
9	17 – 18	0,3	0,7	4				100	120	
10	19 – 20	0,3	0,7	5				100	240	
2-й слой										
11	1 – 2	0,3	0,7	10	0,8	0,8	300	100	120	300
...	...			...					...	
20	19 – 20			5					360	
20-й слой										
211	1 – 2	0,3	0,7	10	0,8	0,8	300	100	160	300
...	...			...					...	
220	19 – 20			5					920	
21-й слой										
221	5 – 6	0,3	0,7	5	0,8	0,8	300	100	180	300
222	7 – 8			5					160	
223	13 – 14			5					160	
224	19 – 20			5					920	

На основании приведенных в таблице 4.3 исходных данных выполнено моделирование температурного поля без идентификации параметров теплообмена. Полученные значения температур в конце этапа наплавления слоя и после межслойной выдержки сведены в таблицу 4.4. Результаты моделирования температурного поля 1-го слоя в конце этапа наплавления для всех элементов конструкции представлены на рис. 4.10.

Таблица 4.4. Результаты моделирования температурного поля

Номера точек	Расчетные температуры, °C		Граничные значения, °C		Прогнозируемое время выдержки, с
	<i>Trest_cal</i>	<i>Tmelt_cal</i>	<i>Trest</i>	<i>Tmelt</i>	τ_6
1-й слой					
1 – 2	257,7	60,6	300	120	100
3 – 4	266,2	70,6		120	100
5 – 6	303,1	69,1	350	120	100
	321,0	88,5		120	100
	344,8	98,5		120	100
7 – 8	312,0	75,2		110	110
	320,9	85,1		110	110
	329,8	95		110	110
9 – 10	419,7	67,8	450	110	110
11 – 12	419,5	67,4	450	110	110
13 – 14	347,8	88,8	350	110	120
	356,6	98,7		110	120
13 – 14	365,4	108,6		110	120
15 – 16	376,7	100,5	380	100	120
17 – 18	395,3	110,6		100	120
19 – 20	374,1	118,5		100	120
	378,5	123,4		100	120
	382,9	105,9		100	240
20-й слой					
1 – 2	339,4	99,1	350	100	160
3 – 4	341,1	101,2	350	100	160
5 – 6	364,5	97,6	380	100	160
	369,7	103,6			160
	378,5	113,5			160
7 – 8	378,5	113,5			160
	387,2	123,4			160
	396,0	133,4			160
9 – 10	494,6	128,3	480	100	160
11 – 12	508,4	146,4	480	100	170
13 – 14	400,4	136,6	380	100	170
	404,7	141,6			170
	409,1	146,6			170
15 – 16	403,5	118,5	400	100	170
17 – 18	404,0	109,0	400	100	170

Продолжение таблицы 4.4

19 – 20	378,5	110,3	380	100	180
	382,9	115,3			180
	391,6	125,2			920
21-й слой					
5 – 6	361,0	93,4	380	100	180
	369,7	103,3			180
	378,5	113,5			180
7 – 8	365,4	98,6	380	100	180
	374,1	108,6			180
	382,9	118,5			180
13 – 14	387,2	123,4	380	100	190
	396,9	134,3			190
	406,5	145,3			190
19 – 20	396,0	133,4	380	100	200
	404,7	143,4			200
	413,5	153,2			920

На основе полученных результатов моделирования температурного поля можно сделать вывод, что расчетные значения температур наплавленного металла частично не соответствует установленным граничным значениям при теоретически установленных значениях времени межслойной выдержки. Это связано с тем, что моделирование температурного поля проводилось для изделий, имеющих различные геометрические размеры, отличающиеся от размеров образца, который использовался в процессе практической апробации программы.

Далее осуществляется операция подготовки производственного процесса, заключающаяся в программной оптимизации времени межслойной выдержки. Результаты оптимизации температурно-временного режима аддитивного производства путем послойного электродугового наплавления присадочной проволоки приведены в таблице 4.5.

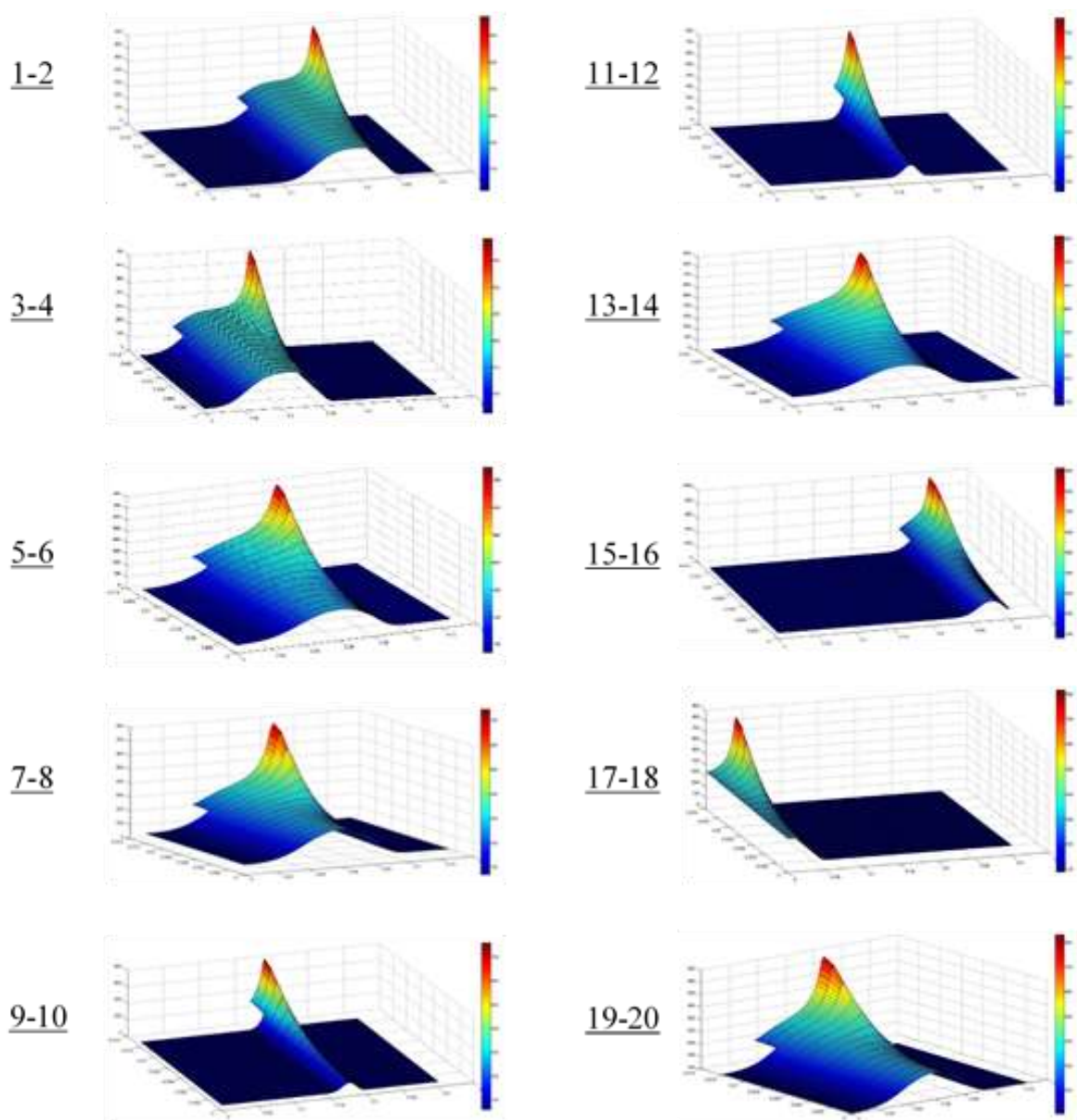


Рис. 4.10. Температурное поле первого слоя в конце наплавления по всем элементам конструкции

Таблица 4.5. Результаты оптимизации температурно-временного режима аддитивного производства

Номера точек	Расчетные температуры, °C		Граничные значения, °C		Оптимальное время выдержки, с
	T_{rest_cal}	T_{melt_cal}	T_{rest}	T_{melt}	$\tau_{в\ opti}$
1-й слой					
1 – 2	257,7	97,7	300	120	60
3 – 4	283,1	105,4	300	120	80
5 – 6	320,9	88,9	350	120	100
	338,7	92,1			150
	347,6	102,4			160

Продолжение таблицы 4.5

7 – 8	325,4	83,9		110	130
	340,5	91,4			180
	347,6	97,2			200
9 – 10	447,7	96,2	450	110	120
11 – 12	448,7	97,2	450	110	120
13 – 14	343,5	66,4	350	110	200
	348,7	69,0			270
	350,0	75,9			200
15 – 16	367,7	90,5	380	100	120
17 – 18	376,6	84,0		100	220
19 – 20	360,9	87,9		100	200
	367,1	94,8			200
	373,2	60,0			560
20-й слой					
1 – 2	323,2	68,3	350	100	220
3 – 4	327,2	71,3	350	100	240
5 – 6	352,2	77,9	380	100	200
	359,2	85,9			200
	366,2	93,8			200
7 – 8	361,0	87,9			200
	368,0	95,8			200
	375,0	99,9			250
9 – 10	462,3	91,7	480	100	200
11 – 12	460,4	89,7	480	100	200
13 – 14	361,0	87,9	380	100	200
	368,0	95,8			200
	374,1	99,5			240
15 – 16	367,7	75,5	400	100	200
17 – 18	378,7	76,5	400	100	200
19 – 20	355,7	81,9	380	100	200
	361,8	88,9			200
	367,9	70,0			720
21-й слой					
5 – 6	352,2	77,9	380	100	200
	359,2	85,9			200
	366,2	93,8			200
7 – 8	357,5	83,9	380	100	200
	364,5	87,5			260
	367,1	90,4			260

Продолжение таблицы 4.5

13 – 14	369,7	93,0	380	100	260
	372,4	94,5			320
	373,2	99,9			220
19 – 20	361,0	84,5	380	100	240
	364,5	91,8			200
	369,7	97,8			200

Выполнение программной оптимизации температурно-временного режима позволило установить значения времени межслойной выдержки, необходимые для обеспечения требуемой геометрии, внутренней структуры и свойств наплавленного металла. Проверка полученных программой параметров температурно-временного режима была реализована за счет аддитивного производства прототипа башмака дискового тормоза.

Дальнейшее управление технологическим процессом осуществляется автоматизированной системой путем изменения последовательности наплавления слоев и температурных параметров режима установки в соответствии с схемой автоматизированной системы (рис. 4.3). Оценка экономического эффекта от внедрения разработанной системы приведена в разделе 4.6.

4.6. Оценка эффективности автоматизации технологической подготовки процесса аддитивного производства

Для подтверждения практической ценности разработанной системы управления и программного обеспечения проведена оценка изменения производственных затрат при практической (экспериментальной) и программной отработке технологического процесса.

Основными материальными затратами в процессе аддитивного производства являются сырье и производственные материалы, комплектующие для станков, оборудование и энергетические ресурсы.

Экспериментальное время наплавления одного слоя определяется расчетным путем с учетом скорости движения сварочной горелки v_n . Интервал

межслойной выдержки τ_6 подбирается экспериментально на основании опытных данных [120].

Скорость наплавления v_n рассчитывается по выбранной силе тока ($I = 150$ А для проволоки диаметром 1,2 мм) и площади поперечного сечения слоя $F_B = 0,08$ см² по следующей формуле:

$$v_n = \frac{\alpha_n \cdot I}{100 \cdot F_B \cdot \rho}, \quad (4.11)$$

где α_n – коэффициент наплавления проволоки, принимаемый на основании справочных данных 11,7 г/(А·ч); ρ – плотность стали для выбранной марки присадочной проволоки составляет 7,8 г/см³.

Тогда скорость наплавления:

$$v_n = \frac{11,7 \cdot 150}{100 \cdot 0,08 \cdot 7,8} = 28,125 \text{ м/ч} = 468,75 \text{ мм/мин}$$

С учетом увеличения температуры металлического основания по мере прибавления новых слоев скорость наплавления увеличена до 600 мм/мин.

Продолжительность наплавления одного слоя τ_n определяется на основании полученного значения скорости по формуле:

$$\tau_n = \frac{B_2}{v_n} \quad (4.12)$$

где B_2 – длина одного слоя или элемента конструкции сложной геометрической формы, мм. Поскольку деталь для практической отработки технологии состоит из нескольких конструктивных элементов, то процесс наплавления одного слоя детали заключается в последовательном наплавлении всех элементов. Время, затрачиваемое на наплавление каждого конструктивного элемента, и общее время изготовления детали приведены в таблице 4.6.

Кроме этапа наплавления металла процесс послойного построения включает этап межслойной выдержки, который определяется экспериментальным путем с учетом данных, полученных в ходе многочисленных экспериментов по определению оптимальной с точки зрения качества геометрии слоя начальной температуры металлического основания.

Процесс экспериментальной оптимизации времени межслойной выдержки требует значительных материальных и временных затрат, кроме того, для наплавления одного опытного образца необходимо задействовать двух работников предприятия: оператора установки для 3D печати и инженера-технолога для записи температурно-временных характеристик.

Таблица 4.6. Время наплавления по элементам конструкции

Номера точек	Число слоев	v_n , мм/мин	B_2 , мм	τ_n , с
1 – 2	1	600	100	10
3 – 4	1		100	10
5 – 6	3		50	5
7 – 8	3		50	5
9 – 10	1		20	2
11 – 12	1		20	2
13 – 14	3		50	5
15 – 16	1		40	4
17 – 18	1		40	4
19 – 20	3		50	5
Общее время наплавления, с				52

Начальный интервал межслойной выдержки равен 80 сек. После операции наплавления осуществляют непрерывный контроль температуры металла до достижения установленных граничных значений T_{melt} . Полученные значения температур подвергаются анализу и заносятся в журнал наблюдений. При наплавлении следующего конструктивного элемента наибольшее значение имеет температура поверхности слоя в конце наплавления. В случае несоответствия температуры граничному значению T_{rest} производят повторное наплавление образца с увеличением исходного времени межслойной выдержки на 20 секунд. Расчет длительности оптимизации температурно-временного режима производился для случаев, когда начальное время межслойной выдержки достаточно для достижения установленных граничных значений и с учетом подбора оптимального интервала между наплавленными слоями от 80 до 240 с (таблица 4.7).

Таблица 4.7. Затраты времени оптимизацию времени межслойного выдержки

Номера точек	Число слоев	v_H , мм/мин	τ_r , с	$\tau_{m\ min}$, с	$\tau_{m\ max}$, с
1 – 2	1	600	10	80	1520
3 – 4	1		10	170	3050
5 – 6	3		5	260	4580
7 – 8	3		5	345	6105
9 – 10	1		2	430	7630
11 – 12	1		2	512	9152
13 – 14	3		5	594	10674
15 – 16	1		4	679	12199
17 – 18	1		4	736	13723
19 – 20	3		5	820	15247
Общее время, с			52	825	15252

Время, затрачиваемое на наплавление одного слоя, изменяется от 14 до 254 мин в зависимости от количества выполненных экспериментов. Промежуточное охлаждение слоя до температуры 60-70 °С составляет 5-10 минут. В это время записываются полученные параметры наплавления. Общее время изготовления образца составит более 18 часов.

К производственным затратам при практической оптимизации температурно-временного режима относятся расход присадочной проволоки, основного металла и защитного газа.

Расход присадочной проволоки определяется расчетным методом:

$$Q_{\text{пр}} = F_B \cdot B_2 \cdot n \cdot \rho, \quad (4.13)$$

где B_2 – длина наплавляемого слоя, мм; n – количество слоев, равное 20 для всех элементов и 38 для проушин; ρ – плотность стали, выбираем из справочных данных 7,85 г/см³.

Расходы присадочного металла на наплавление всех конструктивных элементов приведены в таблице 4.8.

Минимальный расход присадочного материала для оптимизации температурно-временного режима составит 1,83 кг. Прогнозируемые затраты присадочного металла с учетом повторяемости экспериментов составят 2 кг. Затраты металла основания составят 3,53 кг. Минимальный общий расход

металла равен 5,53 кг. Расход защитного газа в процессе наплавления при скорости его подачи 6 л/мин составит 140 л.

Таблица 4.8. Расходы присадочного металла в процессе оптимизации

Номера точек	Число слоев по ширине	Число слоев по высоте	B_2 , мм	Q_{np} , гр	
1 – 2	1	20	100	6,24	124,8
3 – 4	1	20	100	6,24	124,8
5 – 6	3	38	50	9,42	358,0
7 – 8	3	38	50	9,42	358,0
9 – 10	1	20	20	1,26	25,2
11 – 12	1	20	20	1,26	25,2
13 – 14	3	38	50	9,42	358,0
15 – 16	1	20	40	2,51	50,2
17 – 18	1	20	40	2,51	50,2
19 – 20	3	38	50	9,42	358,0
Общие затраты металла (1 слой/все слои)				57,72	1832,4

Затраты на комплектующие для станков и оборудование включены в амортизацию установки. Комплектная стоимость установки, включая порталный манипулятор и источник электрического тока, составляет 3 млн. руб. Срок полезного использования оборудования равен 38 месяцев. Тогда ежемесячная амортизация равна 62500 рублей. Из расчета времени оптимизации температурно-временного режима амортизация оборудования на наплавление одного экспериментального образца составит 1000 руб.

Далее необходимо оценить затраты на моделирование температурного распределения и подбор оптимального температурно-временного режима процесса аддитивного производства металлического изделия. На основе приведенного в разделе 4.5 примера использования разработанной программы были определены затраты времени на выполнение необходимых расчетов.

К ним относятся:

- затраты времени на подготовку исходных данных о наплавляемом изделии, 10 минут рабочего времени инженера-технолога;
- на загрузку программы, обновление интерфейса и ввод исходных данных требуется 5 мин.;

- среднее время расчета температурного поля для одного слоя составляет 0,3 мин.;
- продолжительность оптимизации температурно-временного режима послойного наплавления одного слоя составляет 1,2 мин;
- на выгрузку результатов моделирования температурного поля требуется 1 мин. рабочего времени технолога.

На основании приведенных параметров можно оценить продолжительность операции моделирования и оптимизации температурно-временного режима послойного наплавления башмака дискового тормоза. Время оптимизации одного слоя с моделированием температурного поля всех элементов конструкции составляет 15 мин. Общее время операции моделирования температурно-временного режима для всего изделия составит 556 мин (9,26 часа).

Для ввода исходных данных, промежуточного контроля работы программы и выгрузки результатов моделирования необходимо задействовать одного работника.

На основании проведенных расчетов, можно сделать вывод, что внедрение разработанной автоматизированной системы управления в технологический процесс аддитивного производства оказывает положительный эффект на себестоимость конечной продукции. Соотношение основных показателей эффективности, включающих время послойного наплавления, время оптимизация ТВР, расходы основных и вспомогательных материалов на оптимизацию ТВР, расходы на амортизацию оборудования приведены в таблице 4.9.

**Таблица 4.9. Оценка эффективности автоматизированного управления
процессом аддитивного производства**

№	Показатель	Практическая 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

Применение программной оптимизации режима аддитивного производства позволяет сократить трудоемкость операции технологической подготовки производства более чем в 2 раза без затрат основных и вспомогательных материалов, уменьшить на 91,9% затраты на амортизацию оборудования и оплату труда работников.

Выводы

В четвертой главе диссертации выполнена постановка задачи автоматизированного управления технологическим процессом аддитивного производства. Рассмотрена конструкция изделия и её основные элементы с разбиением на наплавливаемые слои. Приведена последовательность расчета траектории наплавления элементов конструкции с учетом температуры наплавленного металла.

Описана схема автоматизированной системы управления процессом послойного наплавления, выделены основные элементы и их назначение. Представлена последовательность работы системы, выходные параметры, текущие возмущения и устройства для их измерения и контроля. Описан механизм работы системы при различных вариантах отклонения температуры наплавленного металла от расчетных значений температур.

Приведена схема работы программы моделирования температурного поля в процессе аддитивного производства металлических изделий с учетом послойного добавления материала, выполнения операций межслойного

охлаждения наплавленного слоя и зависимости теплофизических параметров металла от его текущей температуры.

Описана роль и функции программы в технологическом процессе аддитивного производства. В связи с определённой последовательностью технологического процесса послойного наплавления наибольшая эффективность оптимизации достигается при использовании разработанной программы на этапе технологической подготовки производства, что позволяет заменить этапы практической отработки технологии и экспериментальной оптимизации температурно-временного режима послойного наплавления.

Апробация полученных результатов исследования была проведена на примере разработки технологического процесса аддитивного производства башмака дискового тормоза вагона подвижного железнодорожного состава. Результаты выполненных расчетов показали, что применение разработанной автоматизированной системы управления и программных средств положительно сказывается на показателях производительности технологии и позволяет существенно сократить затраты на технологическую подготовку.

Для подтверждения практической ценности выполненной работы проведена оценка производственных затрат при экспериментальной и программной оптимизации технологического процесса. К материальным затратам отнесены расходы основных и вспомогательных материалов и амортизация оборудования.

В результате проведенного анализа установлено, что внедрение разработанной системы управления в технологический процесс аддитивного производства оказывает положительный эффект на себестоимость конечной продукции, в 4 раза снижая трудоемкость поиска оптимального режима и сокращая на 91,9% затраты на амортизацию оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная и практическая задача повышения эффективности процесса аддитивного производства металлических изделий за счет разработки двухконтурной автоматизированной системы управления технологическим процессом и программы для моделирования температурного распределения в процессе послойного наплавления, оптимизации температурно-временного режима и расчета траектории послойного наплавления изделия, обеспечивающих стабильное качество структуры и геометрической формы наплавленного металла. Представленные в работе структура системы управления процессом послойного, а также методы моделирования температурного поля и оптимизации режима аддитивного производства позволили достигнуть следующих результатов:

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 рассчитать 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Довбыш, В.М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В.М. Довбыш, П.В. Забеднов, М.А. Зленко // Библиотечка литейщика. – 2014. – №9. – С. 14-71.
2. Осколков, А.А. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников, Е.Л. Кротова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20. – №3. – С. 90-104.
3. Жаткин, С.С. Применение электродуговой наплавки для создания трехмерных объектов из стали / К.В. Никитин, В.Б. Деев, С.С. Панкратов, Д.А. Дунаев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – №6. – С. 443-450.
4. Курбонов, А.М. Технология электродугового послойного выращивания металлических изделий / А.М. Курбонов // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Сборник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи, Юрга, 07-09 апреля 2022 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 20-22.
5. Ронжин, Д.А. Влияние технологических параметров на структуру металла изделий, полученных методом прямого лазерного выращивания из титанового порошка ВТ6 / Д.А. Ронжин, А.Г. Григорьянц, А.А. Холопов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – №9(750). – С. 30-42.
6. Гуденко, А.В. Методика определения режимов послойной электронно-лучевой наплавки проволоки для аддитивных технологий / А.В. Гуденко, В.К. Драгунов, А.П. Слива // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2017. – №5. – С. 8-14.
7. Трушников, Д.Н. Использование СМТ-наплавки для аддитивного формирования заготовок из высоколегированной стали. Часть 1 /

Д.Н. Трушников, М.Ю. Симонов, Ю.Д. Щицын [и др.] // *Металлург.* – 2023. – №2. – С. 38-45.

8. Кузнецов, М.А. Исследование влияние режимов электродугового послойного выращивания на геометрические параметры слоя / М.А. Кузнецов, М.А. Крампит, А.Г. Крампит, А.А. Зеленковский // *Сварка в России – 2019: современное состояние и перспективы: тезисы докладов Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Б.Е. Патона, Томск, 03-07 сентября 2019 года / Институт физики прочности и материаловедения СО РАН.* – Томск: Общество с ограниченной ответственностью «СТТ», 2019. – С. 172-173.

9. Кузнецов, М.А. Механические и трибологические свойства металлической стенки, выращенной электродуговым способом в среде защитных газов / М.А. Кузнецов, В.И. Данилов, М.А. Крампит [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2020. – Т. 22, №3. – С. 18-32.

10. Кузнецов, М.А. Аддитивные технологии в сварочном производстве / М.А. Кузнецов, И.Ф. Турсунов // *Инновационные технологии в машиностроении: Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, Юрга, 27-29 мая 2021 года.* – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – С. 67-71.

11. Кузнецов, М.А. Влияние защитного газа на течение плазмы электрической дуги и на каплю расплавленного металла в процессе сварки / М.А. Кузнецов, С.А. Солодский, А.В. Крюков [и др.] // *Прикладная физика.* – 2020. – № 1. – С. 11-17.

12. Кузнецов, М.А. Исследование влияния защитного газа на течение плазмы электрической дуги и расплавленного металла / М.А. Кузнецов, С.А. Солодский, А.В. Крюков, М.А. Крампит // *Международный междисциплинарный симпозиум «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций»: Тезисы докладов International Workshop, Международной конференции и VIII*

Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти, Томск, 01-05 октября 2019 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2019. – С. 232-233.

13. Крампит, М.А. Влияние параметров импульсно-дуговой наплавки с подогревом электродной проволоки на структуру и свойства наплавленных слоев / М.А. Крампит, М.А. Кузнецов, В.И. Данилов [и др.] // Международный междисциплинарный симпозиум «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций»: Тезисы докладов International Workshop, Международной конференции и VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти, Томск, 01-05 октября 2019 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2019. – С. 589-590.

14. Крампит, М.А. Процесс дугового прототипирования с предварительным подогревом проволоки / М.А. Крампит, М.А. Кузнецов, А.Г. Крампит, А.А. Зеленковский // Международный междисциплинарный симпозиум «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций»: Тезисы докладов International Workshop, Международной конференции и VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти, Томск, 01-05 октября 2019 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2019. – С. 604-605.

15. Кузнецов, М.А. Имитационная модель электродугового послойного выращивания валика / М.А. Кузнецов, М.А. Крампит, А.В. Крюков [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – №11(84). – С. 19-26.

16. Кузнецов, М.А. Определение оптимального режима электродугового послойного выращивания / М.А. Кузнецов, М.А. Крампит,

Д.П. Ильященко [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – №11. – С. 136-138.

17. Крампит, М.А. Применение устройства с подогревом вылета электродной проволоки током паузы в аддитивном производстве / М.А. Крампит // Фундаментальные исследования. – 2017. – №4-1. – С. 44-48.

18. Рыльников, Е.Н. Конечно-элементная модель тепловых процессов при послойной электродуговой наплавке для оценки деформаций и напряженного состояния / Е.Н. Рыльников, Д.В. Курушкин, И.В. Кладов О.В. Панченко // Сварка и диагностика. – 2020. – №3. – С. 25-29.

19. Хаустов, С.В. Численное моделирование тепловых процессов в сварке: учебно-методическое пособие / С.В. Хаустов, В.О. Харламов, С.В. Кузьмин // ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 60 с.

20. Кладов, И.В. Электродуговая наплавка градиентной структуры с использованием проволок аустенитного и мартенситного класса / И.В. Кладов, А.Р. Хисматуллин, Д.В. Курушкин [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 15-й Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию основания государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа», Минск, 14-16 сентября 2022 года. – Минск: Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Белорусская наука», 2022. – С. 681-685.

21. Кладов, И.В. Оценка влияния тепловой истории при электродуговой наплавке на микроструктуру и механические свойства низколегированной высокопрочной стали / И.В. Кладов, Е.Н. Рыльников, Д.В. Курушкин [и др.] // Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТ-2021): Сборник тезисов Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 21-23 сентября 2021 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2021. – С. 63-64.

22. Панченко, О.В. Электродуговое выращивание: технические и экономические преимущества / О.В. Панченко, Д.В. Курушкин, А.А. Попович // Технический оппонент. – 2020. – №1(6). – С. 16-22.

23. Курушкин, Д.В. 3D печать металлических изделий. Особенности применения электродуговой наплавки / Д.В. Курушкин, И.В. Мушников, Е.В. Панченко [и др.] // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2021. – №6(114). – С. 88-91.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662246 Российская Федерация. Программа для построения траектории движения сварочной горелки при аддитивном электродуговом выращивании изделий: №2019619722: заявл. 06.08.2019: опубл. 19.09.2019 / Ф.Ю. Исупов, О.В. Панченко, Л.А. Жабрев, А.А. Попович; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662211 Российская Федерация. Программа для построения каркаса траектории движения сварочной горелки при аддитивном электродуговом выращивании трехмерных неполых изделий: №2019619692: заявл. 06.08.2019: опубл. 19.09.2019 / И.В. Мушников, О.В. Панченко, Е.Н. Рыльков, А.А. Попович; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

26. Попович, А.А. Аддитивные технологии в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого: опыт и перспективы использования / А.А. Попович, В.Ш. Суфияров, Н.Г. Разумов [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые

композиционные материалы. Сварка: Сборник докладов 11-го Международного симпозиума. В 2-х частях, Минск, 10-12 апреля 2019 года. Том Часть 1. – Минск: Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Белорусская наука», 2019. – С. 73-92.

27. Мелюков, В.В. Моделирование оптимального теплового режима сварки и наплавки / В.В. Мелюков // Сварка и диагностика. – 2008. – №1. – С. 13-18.

28. Panas, M. et al. Robotic Arc Surfacing in the Additive Technique-Aided Creation of Models //Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach. – 2017. – V. 61.

29. Balanovsky, A.E., Osipov S.A., Shmakov A.K. Research of surface quality of structural components made using additive technology of electric arc welding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – V. 632. – №1.

30. Kargapol'tsev, S.K. et al. Possibility of obtaining complex form details using additive surface technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – V. 759. – №1.

31. Руктуев, А.А. Технологии аддитивного производства / А.А. Руктуев, Д.В. Лазуренко, Е.А. Колубаев [и др.]; коллектив авторов. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2023. – 99 с. – ISBN 978-5-7782-4892-2.

32. Сметанников, О.Ю. Исследование влияния параметров процесса 3D-наплавки проволочных материалов на формирование остаточных деформаций / О.Ю. Сметанников, П.В. Максимов, Д.Н. Трушников [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – №2. – С. 181-194.

33. Щербаков, А.В. Разработка элементов математической модели процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования / А.В. Щербаков, Р.В. Родякина, А.П. Слива [и др.] // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: Сборник материалов и докладов Второй

международной конференции, Москва, 14-17 ноября 2017 года. – Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2017. – С. 238-249.

34. Guo N., Leu M.C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2013. – V. 8. – №3. – P. 215-243.

35. Тилинин, М.В. Аддитивные технологии в отечественном авиастроении: текущие позиции и направления развития / М.В. Тилинин, Б.М. Прибытков // *Молодой ученый*. – 2019. – №47(285). – С. 133-138.

36. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2013. – 223 с. – ISBN 978-5-7422-4025-9.

37. Гаренский, Д.А. Сравнительный анализ методов 3D-печати / Д.А. Гаренский, М.А. Полякова // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. – 2022. – Т. 13, №1. – С. 16-19.

38. Ильющенко, А.Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия / А.Ф. Ильющенко // *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию основания государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа», Минск, 14-16 сентября 2022 года*. – Минск: Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Белорусская наука», 2022. – С. 17-34.

39. Михайлицын, С.В. Сварочные и наплавочные материалы: Учебник / С.В. Михайлицын, И.Н. Зверева, М.А. Шекшеев. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Инфра-Инженерия», 2020. – 228 с.

40. Осколков, А.А. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А.А. Осколков, Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников

[и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, №3. С. 90-105.

41. 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.

42. Зарипов, Р.Р. Сравнительный анализ инновационных технологий в сфере послойного синтеза изделий / Р.Р. Зарипов, Н.Е. Смольянинов // Инновационная экономика: Материалы Региональной научной конференции-школы для молодежи, Уфа, 18 октября 2018 года. – Уфа: ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», 2018. – С. 148-155.

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

44. Gadalean, R.V. et al. Additive Manufacturing of WC-Co by Indirect Selective Laser Sintering (SLS) using High Bulk Density Powders // Archives of Metallurgy and Materials. – 2022. – Т. 67.

45. Кубанова, А.Н. Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий / А.Н. Кубанова, А.Н. Сергеев, Н.М. Добровольский [и др.] // Чебышевский сборник. – 2019. – Т. 20, №3(71). – С. 453-477.

46. Aboulkhair, N.T. et al. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting // Progress in materials science. – 2019. – Т. 106.

47. Jia H. et al. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Т. 113.

48. Крештин, М.С. Современные материалы и технологии аддитивного производства металлических изделий / М.С. Крештин, А.А. Ханков, И.В. Кудрявцев, И.В. Белоусов // Национальная научно-техническая конференция с международным участием. Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2022): Сборник докладов конференции Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА, Москва, 11-15 апреля 2022 года / Под редакцией А.Н. Юрасова. Том 1. – Москва: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. – С. 252-256.
49. Yan L., Chen Y., Liou F. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials using laser metal deposition // Additive Manufacturing. – 2020. – Т. 31.
50. Сергеева, О.Ю. Аддитивные технологии и 3D-моделирование / О.Ю. Сергеева // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2018. – Т. 10, №4. – С. 142-158.
51. Svetlizky, D. et al. Directed energy deposition of Al 5xxx alloy using Laser Engineered Net Shaping (LENS) // Materials & Design. – 2020. – Т. 192.
52. Zhai, Y. et al. Understanding the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V and Inconel 718 alloys manufactured by Laser Engineered Net Shaping // Additive Manufacturing. – 2019. – Т. 27. – Р. 334-344.
53. Тилинин, М.В. Аддитивные технологии в отечественном авиастроении: текущие позиции и направления развития / М.В. Тилинин, Б. М. Прибытков // Молодой ученый. – 2019. – №47(285). – С. 133-138.
54. Galati M., Minetola P., Rizza G. Surface roughness characterisation and analysis of the electron beam melting (EBM) process // Materials. – 2019. – Т. 12. – №.13. – Р. 2211.
55. Osipovich, K. et al. Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing: A Review // Metals. – 2023. – Т. 13. – №.2. – Р. 279.

56. Ghods, S. et al. Electron beam additive manufacturing of Ti6Al4V: Evolution of powder morphology and part microstructure with powder reuse // *Materialia*. – 2020. – Т.9. – Р. 100631.

57. Яковлев, А.В. Перспективы и технология развития WAAM / А.В. Яковлев, Г.С. Лебедев, О.Р. Лузанов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 11-15 апреля 2022 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2022. – С. 560-563.

58. Pattanayak, S., Sahoo S.K. Gas metal arc welding based additive manufacturing-a review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2021. – Т. 33. – Р. 398-442.

59. Henckell, P. et al. Reduction of energy input in wire arc additive manufacturing (WAAM) with gas metal arc welding (GMAW) // *Materials*. – 2020. – Т. 13. – №.11. – Р. 2491.

60. Gierth, M. et al. Wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminum alloy AlMg5Mn with energy-reduced gas metal arc welding (GMAW) // *Materials*. – 2020. – Т. 13. – №.12. – Р. 2671.

61. Artaza, T. et al. Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Т. 9. – №.6.

62. Гребеньщикова, Е.В. Моделирование влияния управляющих параметров на размеры ванны расплава при аддитивном производстве / Е.В. Гребеньщикова, Н.Д. Няшина // Математическое моделирование в естественных науках. – 2019. – Т. 1. – С. 45-49.

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

64. Патент №2781510 С1 Российская Федерация, МПК В33У 10/00, В23К 31/00, В23К 9/04. Способ аддитивного производства металлических изделий: № 2022100700: заявл. 12.01.2022: опубл. 12.10.2022 / Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет».

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

66. Барчуков, Д.А. Ультразвуковой контроль качества сварных соединений несущих элементов подъемника / Д.А. Барчуков, Д.Д. Какорин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2023. – № 16. – С. 12-16.

67. Ловшенко, Ф.Г. Особенности структурообразования при дуговой наплавке в среде защитных газов / Ф.Г. Ловшенко, А.С. Федосенко, А.С. Оленевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – №3(72). – С. 24-34.

68. Kisarev, A.V., Kobernik N.V. Study on formation of aluminum alloy thin wall produced with WAAM method under various thermal conditions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 759. – №.1.

69. Votruba, V. et al. Experimental investigation of CMT discontinuous wire arc additive manufacturing of Inconel 625 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Т. 122. – №.2. – P. 711-727.

70. Chen, X. Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) System / X. Chen, C. Su, Y. Wang [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – V. 12, №6. – P. 1278-1284.
71. Lehmann, T. et al. Concurrent geometry-and material-based process identification and optimization for robotic CMT-based wire arc additive manufacturing // Materials & Design. – 2020. – T. 194.
72. Технологический центр «Тена»: [сайт]. – 2024 – URL: <https://www.tctena.ru/> (дата обращения 15.06.2024). – Текст: электронный.
73. 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.
74. Щербаков, А.В. Разработка элементов математической модели процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования / А.В. Щербаков, Р.В. Родякина, А.П. Слива [и др.] // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: Сборник материалов и докладов Второй международной конференции, Москва, 14-17 ноября 2017 года. – Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2017. – С. 238-249.
75. Сметанников, О.Ю. Исследование влияния параметров процесса 3D-наплавки проволочных материалов на формирование остаточных деформаций / О.Ю. Сметанников, П.В. Максимов, Д.Н. Трушников [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – №2. – С. 181-194.
76. Сметанников, О.Ю. Моделирование в ANSYS термо-механического поведения изделия в процессе 3D-наплавки проволочных материалов / О.Ю. Сметанников, Д.Н. Трушников, П.В. Максимов [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – №4. – С. 154-172.
77. Холопов, А.А. Экспериментальное и численное исследование теплообмена при выращивании тонкостенных деталей методом коаксиального

лазерного плавления / А.А. Холопов, И.И. Бинков, З. Мианджи // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – №4(130). – С. 25-33.

78. Панченко, В.Я. Разработка оборудования и технологии, включая численное моделирование, лазерного спекания металлических микрораспыленных и нанораспыленных материалов в ИПЛИТ РАН / В.Я. Панченко, В.В. Васильцов, В.Г. Низьев [и др.] // Перспективные материалы. – 2013. – №14. – С. 233-240.

79. Кузнецов, М.А. Имитационная модель электродугового послойного выращивания валика / М.А. Кузнецов, М.А. Крампит, А.В. Крюков [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – №11(84). – С. 19-26.

80. Киричек, А.В. Экспериментальное исследование характера распределения тепловых потоков в процессе послойного синтеза изделий методом 3DMP-печати на примере детали «оболочка» / А.В. Киричек, С.О. Федонина, С.В. Баринов // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 11-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Курск, 15-16 апреля 2021 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 106-109.

81. Селезнев, Ю.Н. Методические аспекты расчета коэффициента теплопроводности конструкционных углеродистых сталей / Ю.Н. Селезнев, В.С. Губанов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы IV Международной научно-технической конференции, Курск, 18-20 мая 2006 года / Ответственный редактор Е.И. Яцун. Том Часть 1. – Курск: Курский государственный технологический университет, 2006. – С. 156-161.

82. Ильичев, М.В. Экспериментальное определение зависимости коэффициента теплопроводности стали от температуры / М.В. Ильичев, В.Б. Мордынский, Д.В. Терешонок [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, №2. – С. 198.

83. Пучкин, В.Н. Исследование теплоотвода от кромок режущего инструмента / В.Н. Пучкин, В.Г. Корниенко, А.В. Таркинский // Материалы и технологии XXI века: сборник статей XVIII Международной научно-технической конференции, Пенза, 28-29 марта 2022 года / Под редакцией О.Е. Чуфистова. – Пенза: Автономная некоммерческая научно-методическая организация «Приволжский Дом знаний», 2022. – С. 64-69.

84. Хаустов, С.В. Тепловые процессы в сварке / С.В. Хаустов, В.О. Харламов, А.А. Артемьев, И.В. Зорин. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – 136 с.

85. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, – 1951. – 294 с. – Текст: электронный. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=220670>.

86. Капустьян, М.Ф. Расчет тепловых процессов при сварке и наплавке: Учебно-методическое пособие к выполнению практических работ / М.Ф. Капустьян, А.В. Обрывалин, М.И. Бисерикан. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2022. – 16 с.

87. Угловский, А.С. Численный метод моделирования процессов точечной контактной сварки / А.С. Угловский, И.М. Соцкая, Е.В. Шешунова // Вестник АПК Верхневолжья. – 2021. – №2(54). – С. 85-91.

88. Медведев, А.Ю. Моделирование температурного поля при линейной сварке трением / А.Ю. Медведев, С.П. Павлинич, В.В. Атрощенко, Н.И. Маркелова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, №2(37). – С. 75-79.

89. Мисиров, М.Х. Моделирование тепловых процессов при сварке / М.Х. Мисиров // Инновационные решения в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства: Сборник научных трудов всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Нальчик, 04 июня 2021 года. – Нальчик: ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, 2021. – С. 141-145.

90. Стаценко, В.Н. Моделирование распределения тепловложения в процессе сварки трением с перемешиванием / В.Н. Стаценко, А.Е. Сухорада // Сварка в России-2020: Современное состояние и перспективы: Сборник трудов II Международной конференции в рамках IX Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях низких климатических температур «EURASTRENCOLD-2020», посвященной 50-летию образования ИФТПС СО РАН, Якутск, 14-17 сентября 2020 года / ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН. Том 2. – Якутск: Дани-Алмас, 2020. – С. 133-138.

91. Слепцов, О.И. Разработка математической модели расчета тепловых процессов при сварке с подогревом стальных листов / О.И. Слепцов, Г.Н. Слепцов // Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в условиях Арктики: Тезисы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ и ЯАССР, д.т.н., проф. Э.А. Бондарева, Якутск, 12-17 июля 2021 года. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2021. – С. 284-285.

92. Михеев, Р.С. Применение математических методов для исследования температурно-временных условий процесса дуговой наплавки при изготовлении сталеалюминиевых композиций / Р.С. Михеев, И. Е. Калашников // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. – Т. 87, №3. – С. 64-75

93. Королев, С.А. Компьютерное моделирование тепловых процессов при дуговой сварке толстостенных конструкций из алюминиевых сплавов / С.А. Королев, А.Е. Зимаков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – №8(725). – С. 12-20.

94. Шатагин, Д.А. Оптимизация режимов 3D-печати электродуговой наплавкой с использованием цифрового двойника процесса / Д.А. Шатагин,

М.С. Аносов, Н.С. Ключкова, Е.Д. Абрамович // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – №80-3. – С. 152-157.

95. Суворов, С.В. Численное моделирование процесса каплеобразования электрода при сварке / С.В. Суворов, А.В. Вахрушев // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20. №3. С. 335-341.

96. Шапеев, В.П. Конечно-разностный алгоритм для численного моделирования процесса лазерной сварки металлических пластин / В.П. Шапеев, А.Н. Черепанов // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – №4. – С. 102-117.

97. Джашизов, В.Э. Математическое моделирование трехмерных нестационарных температурных полей при электронно-лучевой или лазерной сварке подвижными источниками тепла / В.Э. Джашизов, В.М. Панкратов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – №2. – С. 70-78.

98. Неровный, В.М. Теория сварочных процессов (2-е издание) / В.М. Неровный, А.В. Коновалов, Б.Ф. Якушин [и др.]. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2016. – 704 с.

99. Справочник по свойствам веществ Thermalinfo: [сайт]. – 2024 – URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/metally-i-splavy/temperaturoprovodnost-stali> (дата обращения 10.02.2024). – Текст: электронный.

100. Справочник по свойствам веществ Thermalinfo: [сайт]. – 2024 – URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/metally-i-splavy/teploprovodnost-stali-i-chuguna-teplofizicheskie-svoystva-stali> (дата обращения 15.02.2024). – Текст: электронный.

101. Зубченко, А.С. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др.; под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

102. Олейник, Б.М. Исследование теплопроводности нержавеющей и низкоуглеродистой сталей / Б.М. Олейник, В.Г. Сурин, О.К. Петрова, А.А. Раскин // Теплофизика высоких температур. – 1985. – Т. 23, №3. – С. 500-504.

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

104. 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.

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

106. Марголис, Б.И. Программа идентификации условий теплообмена для изделий плоской формы // Программные продукты и системы. 2017. №1. С. 148-151.

107. Марголис, Б.И. Автоматизированная система моделирования процессов отжига сортового стекла / Б.И. Марголис, Г.А. Мансур // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2019. – Т. 8. – С. 119-124.

108. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB: учеб. курс / Ю. Лазарев; Юрий Лазарев. – СПб. [и др.]: Питер, 2005. – 511 с.

109. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662504 Российская Федерация. Программа для моделирования температурного поля при аддитивном производстве металлических изделий: № 2024661374: заявл. 20.05.2024: опубл. 29.05.2024 / Б.И. Марголис, Д.Д. Какорин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет».

110. Бадамшин, Ф.Р. Эффективность использования дисковых тормозов на железнодорожном подвижном составе / Ф.Р. Бадамшин, А.А. Воробьев, И.Ю. Новосельский // Прогрессивные технологии,

применяемые при ремонте рельсового подвижного состава: электронный сборник трудов VIII Национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 29 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. – С. 135-143.

111. Войтенко, В.А. Перспективные конструкции дисковых тормозов для подвижного состава железных дорог / В.А. Войтенко // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23-26 апреля 2019 года. Том 3. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – С. 257-260.

112. Клюка, В.П. Внедрение дисковых тормозов на отечественном железнодорожном подвижном составе и перспективы их применения на грузовых вагонах / В.П. Клюка, С.А. Мосол, П.Б. Сергеев // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки, Омск, 08 февраля 2021 года / Министерство транспорта Российской Федерации, Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Омский государственный университет путей сообщения. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 178-192.

113. Патент №2791122 С1 Российская Федерация, МПК В61Н 7/02, В23К 9/04, F16D 65/04. Способ изготовления башмака дискового тормоза подвижного состава: №2022128159: заявл. 28.10.2022: опубл. 02.03.2023 / Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет».

114. Трескин, С.В. Применение дисковых тормозов в конструкции скоростного и высокоскоростного подвижного состава железнодорожного транспорта / С.В. Трескин // Железнодорожный транспорт и технологии: сборник трудов Международной научно-практической конференции,

Екатеринбург, 29-30 ноября 2023 года. – Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 31-34.

115. Зубченко, А.С. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

116. Бусько, В.Н. Оценка качества термообработки образцов стали 09Г2С, изготовленных с помощью аддитивной технологии / В.Н. Бусько, А.П. Крень, Е.В. Гнутенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Материалы Международной научно-технической конференции, Могилев, 22-23 апреля 2021 года / Редколлегия: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2021. С. 279-280.

117. Бернштейн, М.Л. металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. – 3-е изд., перераб. и доп. В 3-х т. Т. 2. Основы термической обработки / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1983. – 386 с.

118. Буркин, С.П. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие / С.П. Буркин, Г.В. Шимов, Е.А. Андрюкова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 248 с.

119. Григоров, И.Ю. Исследование микроструктуры образцов, полученных методом послойного построения электрической дугой в защищённой атмосфере / И.Ю. Григоров, А.Н. Гречухин, И.А. Чернышев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2023. – Т. 27, № 2. – С. 8-23.

120. Патент №2807572 С1 Российская Федерация, МПК В33У 10/00, В23К 9/04. Способ аддитивного производства металлических изделий с автоматической регулировкой режимов послойной электродуговой наплавки: №2023108380: заявл. 03.04.2023: опубл. 16.11.2023 / Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев; заявитель ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет».

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Завидовский

экспериментально-

механический завод»



Квасов Е.В.

«13» февраля 2025 г.

АКТ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

автоматизированной системы управления технологическим процессом
аддитивного производства и программы для моделирования и оптимизации
температурно-временного режима послойного наплавления

Сотрудники Тверского государственного технического университета заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов» (АТП) Марголис Б.И., аспирант кафедры АТП Какорин Д.Д., совместно с главными специалистами АО «Завидовский экспериментально-механический завод» Глазковым А.Н. и Некрасовым С.А. в период с 11.02.2025 по 13.02.2025 на рабочем месте главного технолога провели испытания двухконтурной автоматизированной системы управления технологическим процессом аддитивного производства и разработанных программных средств для оптимизации этапа технологической подготовки процесса послойного электродугового наплавления металлического изделия.

1. Целью испытаний являлась проверка работоспособности системы при расчете оптимального температурно-временного режима (ТВР) процесса, траектории и последовательности послойного наплавления изделия.

2. Испытания предусматривали расчет оптимального времени наплавления, температурных параметров установки, траектории и последовательности наплавления с учетом:

- химического состава выбранной марки стали;
- геометрической формы и размеров изделия;
- рабочих параметров технологического оборудования;
- точечного воздействия внешнего источника тепловой энергии;
- принудительного конвективного охлаждения наплавленного металла на этапе межслойной выдержки;
- зависимости теплофизических свойств стали от температуры;

- необходимости идентификации параметров теплообмена, включая коэффициенты теплопроводности w_1 и w_2 , определяющие формирование температуры в граничной точке, и коэффициент вынужденной конвекции α_2 для этапа отдыха;
- ограничений по температуре элементов конструкции и времени наплавления слоев;
- приоритета наплавливаемых элементов конструкции.

3. Расчет ТВР, траектории и последовательности послойного электродугового наплавления производился для корпусных изделий, изготавливаемых АО «Завидовский экспериментально-механический завод».

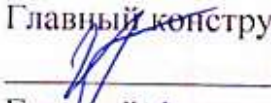
В результате промышленных испытаний установлена работоспособность двухконтурной автоматизированной системы управления технологическим процессом и программного обеспечения для оптимизации ТВР, расчета траектории и последовательности послойного наплавления металлических изделий с точки зрения достижения требуемой температуры и геометрии наплавленного металла.

Подтвержден эффект от использования разработанных средств автоматизации, заключающийся в повышении качества наплавливаемых изделий, снижении на 50% трудоемкости этапа технологической подготовки производства и сокращении более чем на 80% расхода основных и вспомогательных материалов.

Таким образом, продемонстрирована работоспособность двухконтурной автоматизированной системы управления технологическим процессом и программы для моделирования и оптимизации ТВР послойного наплавления. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы на АО «Завидовский экспериментально-механический завод» для расчета оптимального ТВР, траектории и последовательности послойного наплавления, а также организации автоматизированного управления технологическим процессом аддитивного производства.

От АО «Завидовский
экспериментально-механический
завод»

Главный конструктор

 Глазков А.Н.

Главный технолог

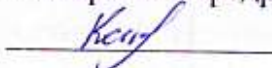
 Некрасов С.А.

От Тверского государственного
технического университета

Заведующий кафедрой АТП

 Марголис Б.И.

Аспирант кафедры АТП

 Какорин Д.Д.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ)

Наб. А.Никитина, д.22, г.Тверь, 170026

Тел. (4822) 78-63-35, факс (4822) 52-62-92

E-mail: common@tstu.tver.ru

<http://www.tstu.tver.ru>

ОКПО 02068284, ОГРН 1026900533747,

ИНН/КПП 6902010135 / 695201001

Акт внедрения

результатов диссертационного исследования

Какорина Даниила Дмитриевича на тему «Автоматизация технологического процесса аддитивного производства металлических изделий послойной электродуговой наплавкой» в образовательный процесс Тверского государственного технического университета

Настоящий Акт составлен о том, что созданная экспериментальная установка для послойного электродугового наплавки металлических изделий, а также полученные научные и практические результаты диссертационного исследования Какорина Даниила Дмитриевича «Автоматизация технологического процесса аддитивного производства металлических изделий послойной электродуговой наплавкой» на соискание ученой степени кандидата технических наук используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» на кафедре «Технология металлов и материаловедение» при:

- преподавании дисциплин «Технология конструкционных материалов» и «Материаловедение» для студентов инженерных специальностей;
- проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Теория сварочных процессов» и «Оборудование сварочного производства» для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, профиль «Технологии сварочного производства».

Внедрение результатов диссертационного исследования в учебный процесс позволяет увеличить насыщенность учебно-методических материалов, лабораторных работ, расширить понимание вопросов автоматизации современных машиностроительных производств, моделирования тепловых процессов при сварке и наплавке металлов, закрепить теоретические знания обучающихся путем выполнения практических занятий на созданной установке для аддитивного производства металлических изделий в лаборатории кафедры ТМиМ.

В связи с развитием и распространением в современной промышленности технологий аддитивного производства металлических изделий, а также недостатком учебно-методической литературы в данной предметной области материал диссертации Какорина Даниила Дмитриевича имеет как теоретическое, так и практическое значение для повышения качества учебного процесса.

Аспирант ТвГТУ

Зав. кафедрой «ТМиМ» ТвГТУ,
к.т.н., доцент

Проректор по учебной работе ТвГТУ,
д.ф.н., доцент



Д.Д. Какорин

Д.А. Барчуков

Э.Ю. Майкова