

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Энергетики и машиностроения
(наименование института)

Кафедра Машиностроения
(наименование кафедры)

Шова Лия Игорьевна

Исследование и моделирование многофункционального 3D-принтера по
металлу

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М07112 - Цифровизация машиностроительного производства

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Энергетики и машиностроения
(наименование института)

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах рукописи

Шова Лия Игорьевна
(Ф.И.О. обучающегося)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ (ПРОЕКТ)

На соискание академической степени магистра

Название диссертации: Исследование и моделирование многофункционального 3D-принтера по металлу

Направление подготовки 7M07111 - Цифровизация машиностроительного производства
(шифр и наименование образовательной программы)

Научный руководитель

Доктор Ph.D, асс. проф.
(ученая степень, звание)

Нурман Е.З.
подпись Ф.И.О.

«09» 06 2025 г.

Рецензент

Доктор Ph.D
(ученая степень, звание)

Аликулиев А.М.
подпись Ф.И.О.

«09» 06 2025 г.

Норм. контроль

М.Т.Н.

(ученая степень, звание)

Калимулбеков С.А.
подпись Ф.И.О.

«05» 06 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

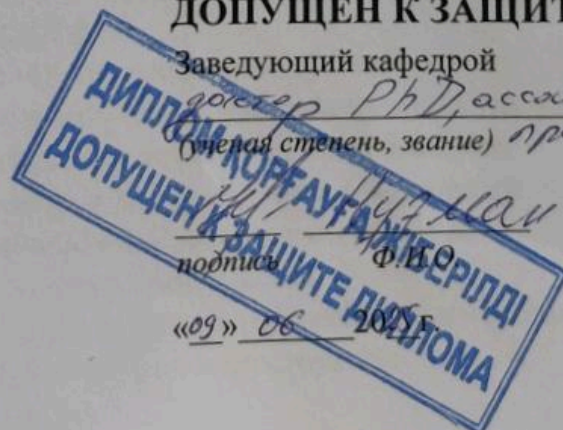
Доктор Ph.D, асс. проф.

(ученая степень, звание) проф

Нурман Е.З.

подпись Ф.И.О.

«09» 06 2025 г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Энергетики и машиностроения
(наименование института)

Кафедра Машиностроения
(наименование кафедры)

7M07112 - Цифровизация машиностроительного производства
(шифр и наименование образовательной программы)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой _____

Машиностроение
(наименование кафедры)

доктор PhD
(ученая степень, звание)

Мухамед Е.З.
подпись Ф.И.О.

«20» 01 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Шова Лие Игорьевне
(Ф.И.О. обучающегося)

Тема Исследование и моделирование многофункционального 3D-принтера по металлу
(тема магистерской диссертации)

Утверждена приказом Закенбаева Р.К. № 521 от «13» 11 2024 г.
(курирующий проректор)

Срок сдачи законченной диссертации «09» 06 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: технология получения образцов из нержавеющей стали марки ER308LSi диаметром 0,8 мм

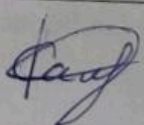
Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

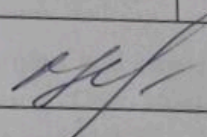
- анализ современного состояния аддитивных технологий в машиностроительной отрасли
- организация и проведение экспериментальных исследований с использованием технологии WAAM, включающих выбор параметров процесса, подбор материалов и отладку оборудования, с целью получения стабильных образцов, пригодных для последующего анализа механических и структурных характеристик
- разработка и реализация упрощенной модели 3D-принтера, работающего по принципу WAAM, с последующим проведением инженерного анализа конструкции
- расчет экономической эффективности разработки
- приложения

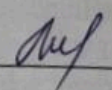
ГРАФИК подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Поиск информации, обзор литературы, общая часть	15.03.2025- 25.04.2025	Выполнено
Экспериментальная и расчетная часть	25.04.2025- 25.05.2025	Выполнено
Оформление по СТП	27.05.2025- 31.05.2025	Выполнено
Написание диссертации	01.06.2025- 09.06.2025	Окончательная версия дипломной работы (без учета Приложений), Справка антиплагиата. Отзыв и Рецензия

Подписи
консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с
указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименование разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч.степень, звание)	Дата Подписания	Подпись
Нормоконтролер	Калмаганбетов С.А. М.Т.Н.	05.06.25	

Научный руководитель  Нұғман Е.З.

Задание принял к исполнению обучающийся  Шова Л. И.

«05» января 2025 г.

АНДАТПА

Бұл магистрлік диссертацияда балқитын электродты сыммен жүзеге асатын газбен доғалық дәнекерлеу (GMAW) әдісіне негізделген WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) аддитивті өндіріс технологиясын әзірлеу және оны тәжірибелік тұрғыдан негіздеу, сондай-ақ арнайы порталды типтегі 3D-принтердің жобалық тұжырымдамасы қарастырылады. Зерттеудің тәжірибелік бөлімінде 0.8 мм диаметрлі ER308LSi сыммен AOTAI TIG құрылғысында үлгілердің қабаттап наплавкасы жүргізіліп, технологияның тиімділігі дәлелденді және құрылым түзілуіне әсер ететін негізгі мәселелер, мысалы, қорғаныс газының біркелкі берілмеуі анықталды. Жүргізілген талдау негізінде WAAM-принтердің конструкциясына қойылатын талаптар айқындалды. Инертті ортаны тұрақтандыру үшін жабық жұмыс кеңістігімен, әмбебап платформамен және масштабтауға бейімділікпен ерекшеленетін порталды жүйе ұсынылды. Бұл жұмыс дәнекерлеу технологиясын, материалтануды, құрылғы жобалауды және сандық модельдеуді біріктіретін пәнаралық зерттеу болып табылады. Алынған нәтижелер WAAM технологияларын одан әрі дамытуға, сондай-ақ 3D-басып шығаруды кейінгі механоөндеумен үйлестіретін гибриді өндірістік кешендерді құруға қолданылуы мүмкін.

АННОТАЦИЯ

В данной магистерской диссертации рассматривается разработка и экспериментальное обоснование технологии аддитивного производства методом WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) с применением GMAW (газодуговой сварки плавящейся электродной проволокой) и концепции проектирования специализированного 3D-принтера порталного типа. Экспериментальной частью исследования стало наплавление образцов с использованием проволоки ER308LSi диаметром 0,8 мм на установке AOTAI TIG, где подтверждена работоспособность технологии и выявлены ключевые проблемы, влияющие на формирование структуры, такие как неравномерная подача защитного газа. На основе проведённого анализа были сформулированы требования к конструкции WAAM-принтера. Предложена концепция порталной установки, обладающей универсальной платформой, возможностью масштабирования и созданием замкнутого рабочего объема для стабилизации инертной среды. Полученные результаты могут быть использованы как для дальнейшего развития WAAM-технологий, так и для создания гибридных производственных комплексов, сочетающих 3D-печать и последующую механообработку.

ANNOTATION

This master's thesis presents the development and experimental validation of a Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process using Gas Metal Arc Welding (GMAW) with consumable electrode wire, along with the design concept of a specialized gantry-type 3D printer. The experimental part involved the deposition of samples using 0.8 mm ER308LSi wire on an AOTAI TIG machine, which confirmed the feasibility of the technology and revealed key challenges affecting structural formation, such as uneven shielding gas flow. Based on the analysis, specific design requirements for a WAAM printer were formulated. A gantry-based system was proposed, featuring a universal platform, scalability potential, and an enclosed build chamber for stabilizing the inert atmosphere. This work is an interdisciplinary study combining elements of welding technology, materials science, equipment design, and numerical modeling. The results can be applied both for further advancement of WAAM technologies and for the development of hybrid manufacturing systems integrating 3D printing with post-processing operations.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Анализ состояния и применимости технологии WAAM	8
1.1 Основы технологии WAAM и принципы GMAW	8
1.2 Обзор научных и технических решений в области WAAM и 3D-печати металлом	9
1.3 Выбор материалов: ER308LSi, ее особенность и применимость	32
1.4 Проблемы формирования валика и структура наплавленного металла	34
1.5 Потенциал гибридизации WAAM с постобработкой	35
1.6 Выводы по главе 1	36
2 Экспериментальное исследование WAAM-процесса	37
2.1 Описание оборудования: источник питания MIG 220S, проволока ER308LSi	37
2.2 Методика проведения эксперимента	38
2.3 Контроль стабильности формирования валиков	43
2.4 Анализ макро- и микроструктуры	44
2.5 Влияние микродефектов на эксплуатационные характеристики	50
2.6 Термообработка готового изделия и её влияние на структуру	50
2.7 Использование инертной среды	51
2.8 Выводы по применимости WAAM	52
2.9 Выводы по главе 2	53
3 Проектирование 3D-принтера для WAAM с учётом требований гибридной технологии	55
3.1 Целесообразность гибридного подхода в WAAM	55
3.2 Концепция портальной установки: требования и конструктивные особенности	55
3.3 Моделирование портального 3D-принтера и расчет конструкции на жесткость	57
3.4 Универсальная платформа: перспективы доработки и масштабирования	62
3.5 Расчет экономической эффективности разработки	63
3.6 Выводы по главе 3	65
Заключение	67
Список использованной литературы	69

ВВЕДЕНИЕ

Развитие аддитивных технологий металлообработки открывает новые возможности для гибкого, экономичного и быстрого производства металлических изделий сложной формы. Одной из наиболее перспективных технологий в этом направлении является WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) — дуговая послойная наплавка металла с использованием сварочной проволоки. Благодаря своей относительной простоте, высокой производительности и совместимости с доступным сварочным оборудованием, WAAM активно исследуется в научной и инженерной среде как альтернатива традиционным методам производства заготовок.

Тем не менее, практическая реализация WAAM-технологии требует решения ряда инженерных и технологических задач. Прежде всего это касается стабильности формирования многослойного валика, предотвращения дефектов структуры, а также обеспечения высокой точности, необходимой для последующей механической обработки. Особенно остро стоит вопрос создания специализированных установок, адаптированных не только для наплавки, но и для гибридной работы — то есть совмещения аддитивного и субтрактивного этапов на одной платформе. Проблема проектирования подобных установок остаётся открытой: необходимо сочетание высокой жёсткости, виброустойчивости, экономичности и адаптируемости конструкции.

В настоящем исследовании сделан акцент на экспериментальной оценке WAAM-процесса с использованием аустенитной сварочной проволоки ER308LSi, а также на разработке концепции 3D-принтера, предназначенного для реализации гибридной технологии. Отдельное внимание уделено вопросам повышения жёсткости конструкции за счёт простых и доступных решений — например, засыпки рамы наполнителем — и адаптации системы перемещения под возможные нагрузки от постобработки.

Цель исследования — оценка применимости технологии WAAM с использованием сварочной проволоки ER308LSi в качестве основы для разработки и моделирования 3D-принтера, ориентированного на аддитивное производство металлических изделий с возможностью последующей механической обработки.

Объект исследования — процесс дуговой послойной наплавки металла (WAAM) с применением аустенитной сварочной проволоки ER308LSi.

Предмет исследования — технологические параметры формирования наплавленного металла и конструктивные решения установки, обеспечивающие точность и устойчивость WAAM-процесса в условиях гибридной технологии.

Задачи исследования:

1. Проанализировать современное состояние технологии WAAM и её применимость для 3D-печати металлом.

2. Провести эксперимент по наплавке с использованием проволоки ER308LSi.
3. Оценить стабильность формирования многослойного валика и структуру наплавленного металла.
4. Подтвердить работоспособность WAAM в выбранной конфигурации.
5. Разработать конструкцию установки, обеспечивающую жёсткость, точность и виброустойчивость.
6. Предложить концепцию портального 3D-принтера, пригодного для гибридизации с механической обработкой.
7. Выполнить инженерные расчёты и обоснование выбора конструктивных решений.

Методы исследования:

В работе использованы сравнительный анализ существующих аддитивных технологий, экспериментальные методы оценки наплавки, визуальный и микроструктурный контроль образцов, инженерные методы расчёта жёсткости конструкций, а также элементы 3D-моделирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- Впервые предложена концепция портальной установки, ориентированной на WAAM с учётом интеграции с постобработкой.
- Разработан упрощённый конструктив с возможностью повышения жёсткости за счёт заполнения профилей инертным материалом.
- Подтверждена пригодность использования проволоки ER308LSi для формирования устойчивой структуры при многослойной наплавке.

Практическая значимость работы состоит в возможности реализации компактных и доступных установок для WAAM-печати, пригодных для малосерийного и опытного производства. Полученные результаты могут быть использованы при разработке оборудования, внедрении WAAM на малых предприятиях, а также в учебных целях для подготовки специалистов в области аддитивного производства.

1 Анализ состояния и применимости технологии WAAM

1.1 Основы технологии WAAM и принципы GMAW

Технология WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) представляет собой один из видов аддитивного производства, при котором послойное формирование металлического изделия осуществляется путём наплавки материала с использованием сварочной дуги. В отличие от порошковых технологий, WAAM использует сплошную сварочную проволоку в качестве исходного материала, что делает процесс менее затратным и более доступным для реализации в условиях среднего и малого машиностроения.

Процесс WAAM включает в себя поэтапную наплавку металла вдоль заданной траектории с последующим послойным наращиванием структуры до формирования конечной геометрии изделия. Одним из наиболее распространённых источников тепла при WAAM является метод газодуговой сварки плавящимся электродом в защитной среде (GMAW — Gas Metal Arc Welding), получивший широкое применение благодаря высокой скорости наплавки, относительной простоте настройки и возможности автоматизации.

Принцип работы GMAW основан на создании электрической дуги между расходуемым электродом в виде проволоки и поверхностью наплавляемого изделия. Под действием дуги проволока плавится, образуя капли расплавленного металла, которые переносятся в сварочную ванну. Защитный газ — как правило, аргон или его смесь с CO_2 — обеспечивает изоляцию зоны сварки от атмосферного кислорода, водяного пара и других примесей, предотвращая образование оксидов и пор в металле.

Среди основных преимуществ применения GMAW в WAAM можно выделить:

- Высокую производительность процесса, позволяющую наплавлять десятки и сотни граммов металла в минуту;
- Широкую применимость для различных сплавов, включая нержавеющие стали, алюминий и никелевые сплавы;
- Хорошую управляемость дуги и возможность точной настройки параметров подачи проволоки и тока;
- Совместимость с промышленными роботами и ЧПУ-системами, что делает возможным создание автоматизированных WAAM-установок.

Однако технология WAAM с применением GMAW также имеет ряд особенностей, требующих учёта при проектировании установки и выборе параметров процесса. Одной из таких особенностей является значительное тепловложение, приводящее к образованию остаточных напряжений, деформаций и структурной неоднородности металла. Кроме того, необходимо строго контролировать параметры подачи, скорость перемещения и охлаждение между слоями, чтобы избежать провисаний, пор и дефектов слияния.

Таким образом, WAAM на базе GMAW представляет собой эффективный и перспективный метод аддитивного производства, особенно в тех случаях, когда необходимо изготовление крупных металлических компонентов без привлечения дорогостоящих порошковых материалов. В то же время успешное применение технологии требует точной настройки оборудования, понимания физических процессов сварки и учёта специфических ограничений, связанных с термической нагрузкой на материал.

1.2 Обзор научных и технических решений в области WAAM и 3D-печати металлом

В целях развития и совершенствования технологии WAAM в научном обществе активно проводятся исследования в разных направлениях.

Ученые инженерного колледжа Конгу проводили исследования, в которых пытались определить выбор методов WAAM, входных параметров, постобработки и их влияние на конечные механические свойства, микроструктуру изделия. Суперсплавы на основе Ni WAAMed демонстрируют неоднородную микроструктуру. Чтобы получить однородные и улучшенные механические свойства, необходима адаптация таких стратегий, как межпроходное охлаждение, термообработка после осаждения и отжиг на раствор, которые улучшают механические свойства и могут помочь получить однородные характеристики.

Чтобы доказать целесообразность использования сварки плавлением для быстрого прототипирования, Рибейро и другие объединили программное обеспечение САПР и технологию GMAW (одна из разновидностей технологий WAAM) для “печати” цельнометаллической вазы, предложили параметры сварки, необходимые для быстрого прототипирования с использованием сварочного робота, и разработали систему быстрого прототипирования set robot [5,6].

Чжан и др. рассмотрели проблему, заключающуюся в том, что разница в высоте между начальной точкой дуги и точкой гашения дуги постепенно увеличивается с увеличением количества уложенных слоев во время формирования добавки GMAW, и предложили параметры начала дуги и, конца гашения дуги и переход капель такими, чтобы увеличения не происходило. Меры контроля метода и сравнение до и после технического усовершенствования показаны на рисунке 1. Можно видеть, что до технического усовершенствования, когда укладывалось определенное количество слоев, процесс формования не мог продолжаться, но после технического усовершенствования эффект формования значительно улучшился.

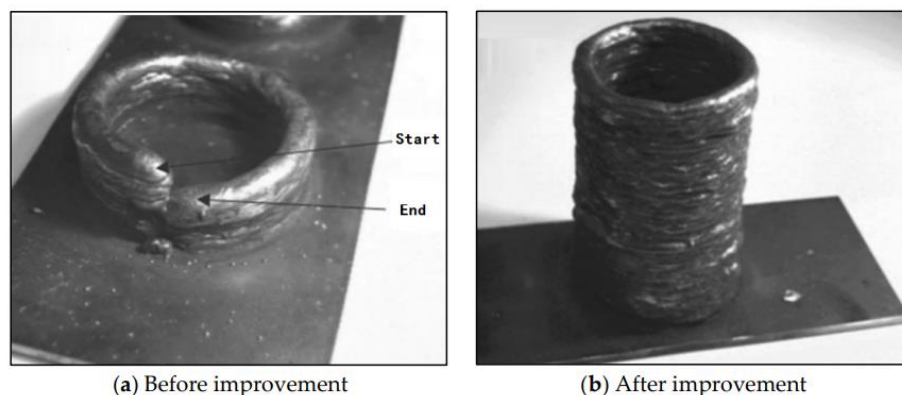


Рисунок 1.1 – Трубчатые детали

Исследования также проводились над другой разновидностью технологии GTAW - технология аддитивного производства газовой вольфрамовой дуговой сварки. Разница в том, что электроды технологии GTAW изготавливаются из вольфрама с высокой температурой плавления, поэтому ее также называют вольфрамовой сваркой с защитой от инертного газа (TIG). По сравнению с GMAW, технология GTAW требует меньших энергозатрат, ее нелегко разбрызгивать, она обладает более стабильной структурой и лучшим формообразующим эффектом. Поэтому эта технология широко используется в областях точного производства, таких как аэрокосмическая промышленность.

Оуянг и др. изготовили 5356 деталей из алюминиевого сплава с использованием технологии аддитивного производства GTAW с переменной полярностью. Исследование показало, что ключом к улучшению качества формования деталей является контроль длины дуги и температуры предварительного нагрева подложки: подложка предварительно должна быть разогрета до 118°C , и в процессе наращивания необходимо регулировать ток дуги и контролировать длину дуги, что эффективно улучшает смачиваемость и склонность к деформации осаждаемого слоя [7]. Впоследствии Оуянг и др. оптимизировали технологические параметры технологии GTAW и сформировали полую цилиндрическую деталь из алюминиевого сплава 4034 со стопкой из 120 слоев и хорошим качеством поверхности [8]. Голт и др. в качестве сырья использовали титановый сплав Ti-6Al-4V и использовали процесс аддитивного производства GTAW для изучения эмпирической модели для прогнозирования усадки, геометрической формы и отделки поверхности формованной детали. Средняя относительная погрешность разработанной предварительной эмпирической модели составила менее 10%, и модель нуждалась в улучшении путем добавления большего количества данных для повышения точности [9]. Ма и др. использовали комбинацию процесса GTAW и метода легирования in-situ для аддитивного производства алюминидных титановых сплавов и изучили влияние температуры промежуточного слоя на формообразующие детали. Результаты испытаний

показали, что при изменении температуры межслойного слоя не наблюдалось явных изменений в микроструктуре и составе ткани [10].

Плазменно-дуговая сварка (PAW) - это метод сварки плавлением, при котором в качестве источника сварочного тепла используется пучок плазменной дуги с высокой плотностью энергии. По сравнению с TIG-сваркой, PAW-сварка обладает преимуществами концентрированной энергии дуги, хорошей жесткости дуги и высокой стабильности дуги, но оборудование более сложное и потребляет много газа. В зависимости от режима работы и скорости потока плазменного газа сварку лапками можно разделить на: микропучковую плазменно-дуговую сварку, плазменно-дуговую сварку и сквозную плазменно-дуговую сварку.

Микроплазменная дуговая сварка обладает высокой плотностью энергии, низким тепловыделением и высокой точностью формирования сварного шва, поэтому она особенно подходит для прецизионного ремонта изделий из титановых сплавов.

Чжэнь создал систему аддитивного производства, основанную на микроплазменной дуговой наплавке, и изучил процесс аддитивного производства титанового сплава Ti-6Al-4V. После наплавки десяти слоев было обнаружено, что внутренние зерна слоя микроплазменной дуговой наплавки имели крупную столбчатую кристаллическую морфологию, направление их роста было перпендикулярно направлению сварки, внутренняя часть кристаллического зерна представляла собой сетчатую структуру корзины, и между каждым слоем можно было наблюдать очевидную слоистую морфологию [11].

Компания Jhavar, S. использовала процесс микролучевого плазменно-дугового плавления, чтобы заменить лазерный процесс аддитивного производства для изготовления небольших деталей, и получила более правильную и гладкую форму сварного шва. Толщина стенок могла достигать 2,45 мм при обработке прямых стенок, а максимальная скорость осаждения составляла 42 г/ч. Между нанесенными слоями не было трещин, пор или включений; сравнение показало, что процесс микроплазменной дуги требует меньших затрат тепла и позволяет осажать меньшие столбчатые кристаллы на единицу длины. Поэтому он отметил, что структура производства небольших деталей проста, и аддитивная технология микроплазменных дуговых плавких предохранителей подходит [12].

Импульсная плазменно-дуговая сварка обладает высокой плотностью энергии и высокой жесткостью. Импульсная технология дополнительно улучшает управляемость источником тепла. Компания Kaibo использовала метод ортогональных испытаний для изучения пикового тока, частоты импульсов, рабочего цикла, скорости сварки и скорости подачи проволоки. Закон влияния размера сварного шва и создание расчетной модели для высоты между слоями тонкостенных восстановленных деталей могут еще больше повысить точность размеров формованных деталей [13].

Несмотря на многочисленные преимущества WAAM, в использовании этой технологии все еще имеются некоторые дефекты, требующие внимания и устранения.

В процессе WAAM слишком высоко рассеивание тепла, распределение температурного поля заготовки является сложным, а остаточное напряжение, возникающее в процессе присадки, серьезно ограничивает качество формованной детали. В настоящее время остаточное напряжение компонентов присадки в основном снижается за счет изменения метода присадки, оптимизации пути подачи присадки и выполнения предварительного нагрева перед сваркой, межслойного охлаждения и термообработки после сварки.

Лонгвэй и другие обобщили причины остаточных напряжений в процессе WAAM. Один из них связан с неравномерным распределением температурного поля и несогласованным охлаждением, затвердеванием, а другой связан с локальным фазовым превращением металла, вызывающим остаточное напряжение фазового превращения [14]. Шостом и другими было проведено сравнение микроструктуры и остаточных напряжений деталей из сплава Ti-6Al-4V, полученных методом WAAM и лазерного аддитивного производства. Результаты показывают, что остаточные напряжения во всех направлениях детали, образующей WAAM, относительно низкие. Большое и максимальное остаточное напряжение возникает в нижней части формирующего слоя [15]. Прокатка на месте используется для снижения остаточного напряжения при добавлении титанового сплава TC4, который может эффективно снизить пиковое остаточное напряжение, особенно остаточное напряжение между нижним слоем и подложкой, и улучшить размер зерен [16,17]. Руджиян и другие применили лазерный удар для улучшения микроструктуры и механических свойств компонентов из алюминиевого сплава arc additive 2319. Результаты показывают, что после лазерного удара в процессе затвердевания средний размер зерен уменьшился с 68,86 мкм до удара до 34,32 мкм, а микротвердость увеличилась с 67,8 HV до удара до 100,6 HV. Остаточное напряжение изменилось с остаточного напряжения растяжения внутри материала на глубине 0,2 мм. Оно превратилось в остаточное напряжение сжатия приблизительно 90 МПа при максимальной глубине удара 0,65 мм [18]. Guilan et al. внедрил магнитное поле в процесс WAAM для низколегированной стали, чтобы улучшить распределение остаточных напряжений в отформованной детали. Индукционное тепло, генерируемое колеблющимся электромагнитным полем на поверхности заготовки, сделало распределение температуры более равномерным, скорость охлаждения замедлилась, а общее остаточное напряжение уменьшилось [19]. Байем и другими индукционный нагрев был добавлен в качестве второго источника тепла в процесс аддитивного производства, и остаточное напряжение было проанализировано в трех состояниях отсутствия второго источника тепла, предварительного нагрева и непрерывного нагрева после сварки, и было обнаружено, что как предварительный нагрев, так и непрерывный нагрев после сварки увеличивают выделение тепла и снижают

остаточное напряжение. Предварительный нагрев уменьшит несоответствие натяжения и предел текучести материала, поэтому эффект предварительного нагрева будет лучше [20].

Пористость является одним из основных дефектов аддитивного производства металлов, серьезно влияющим на качество изготавливаемых деталей. Эффективный контроль или даже устранение пор - ключевая технология улучшения деталей при аддитивном производстве.

Холодный перенос металла (СМТ) является одним из наиболее привлекательных аддитивных методов для получения присадок для дуговой сварки металлическими электродами. Он сочетает в себе перенос капель с технологией волочения проволоки. Во время переноса капля дуга гаснет, а сварочный ток практически равен нулю, что значительно снижает тепловыделение при сварке и улучшает скорость осаждения. Конг и другие сначала изучили и обнаружили, что увеличение расхода чистого защитного газа аргона может эффективно уменьшить образование пор при производстве присадок к алюминиевым сплавам, а затем статистически классифицировали диаметры пор в четырех различных процессах СМТ. Результаты показали, что большинство диаметров пор были 10-50 мкм. По сравнению с тремя другими режимами, традиционный режим СМТ давал наибольшее количество пор, причем диаметр некоторых пор превышал 100 мкм. Процесс СМТ + Р значительно уменьшил количество пор и их размер, процесс СМТ + ADV еще больше уменьшил количество пор, а процесс СМТ + PADV практически устранил устья. Компания Lei использовала двойную импульсную дугу в качестве источника тепла для изучения влияния низкой частоты и характеристик дуги на дефекты пор и механические свойства высокопрочного алюминиевого сплава Al-Mg при производстве присадок. Результаты показали, что тщательное удаление примесей, таких как масло, с поверхности основного металла и проволоки может снизить скорость образования пор в источнике. Использование изменения периода сильного и слабого импульсов для снижения скорости кристаллизации способствовало выделению водорода в процессе присадки [21].

Вследствие анизотропии механических свойств в процессе WAAM (явление, при котором свойства материала могут варьироваться из-за различной ориентации молекул или кристаллических зерен в материале), получается крупная зернистая структура. На форуме AT23 «WAAM: перспективы развития технологии, текущие проекты и вызовы» были представлены разработки Пермского Политеха совместно с компанией X-WELD – оборудование на базе системы ЧПУ, совмещающее не только аддитивные процессы и фрезерование, но и послойное деформационное упрочнение. Это процесс, при котором каждый наплавленный слой деформационно упрочняется, далее накладывается следующий слой, происходит сложное термомеханическое воздействие на наплавленный металл, образуются дислокации, слои претерпевают фазовые изменения под воздействием термических циклов при последующих наплавках и все это в

совокупности позволяет получать очень хорошие механические характеристики. В результате предел текучести для сплава ВТ6 получился больше чем по паспорту, предел прочности достигает паспортных значений при этом без потери пластичности материала. Аналогичные результаты получаются для нержавеющей хромоникелевых сталей. Проковка позволяет убрать межслойное прорастание зерна и как следствие снижает анизотропию, повышает механические свойства наплавленных образцов.

В [22] были проведены эксперименты, в ходе которых было выявлено влияние различных траекторий наплавки на конечные свойства материалов. Всего видов траекторий было рассмотрено четыре: горизонтальный зигзаг, наклонный зигзаг, спираль и кривой зигзаг (рис. 2). В результате было выявлено что самое мелкое зерно, и соответственно лучшие механические свойства получаются при использовании траектории спираль. Эта закономерность объясняется тем, что траектория печати влияет на скорость остывания материала в процессе печати, и различные траектории WAAM обеспечивают разную скорость остывания и затвердевания, что влияет на размер зерен образца. Многократный и кратковременный нагрев зерна может увеличить его размер. И наоборот, на траектории, где цикл нагрева длиннее, зерно имеет тенденцию становиться мельче.

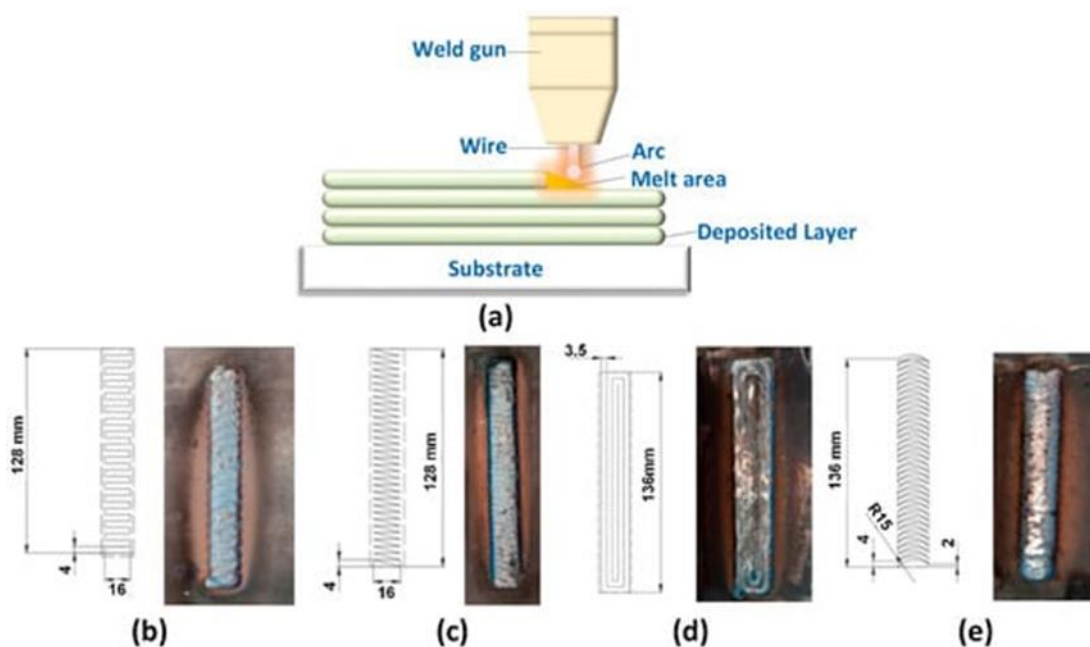


Рисунок 1.2 – Процесс WAAM и траектории сварки: (a) процесс WAAM, (b) траектория 1 — горизонтальный зигзаг, (c) траектория 2 — наклонный зигзаг, (d) траектория 3 — спираль и (e) траектория 4 — кривой зигзаг

Однако в этом исследовании не были учтены такие параметры, как геометрия полученного продукта, правильность формы и т.д. В [23] проводятся эксперименты по траекториям с выявлением особенностей каждой из них. В эксперименте были получены результаты наплавки без осциляции и с ней по пилообразной и п-образной траекториям. По результатам

эксперимента с выбранными оптимальными значениями параметров траекторий было выявлено, что выбор траектории должен зависеть от геометрии печатаемого изделия. Для более тонких стенок лучшим вариантом является пилообразная траектория, для широких – п-образная. Кроме того, использование траектории без осцилляции дает большие дефекты формы, нарушается геометрическая правильность и сплошность стенки. Траектория с осциллирующими движениями фидстока дает стабильность процесса наращивания и предотвращение дефектов формы. При необходимости применения траектории без осцилляции – исходным материалом должны служить материалы с минимальным растеканием в расплавленном состоянии.

Другим дефектом является растрескивание и расслоение. Трещины в WAAM в основном делятся на трещины затвердевания и трещины разжижения. Первые в основном зависят от свойств материала, обычно из-за того, что осажденный слой затруднен в процессе затвердевания или вызваны высокой деформацией в ванне расплава. Последние в основном распределяются в кашицеобразной зоне или зоне частичного расплавления, а также частично в процессе затвердевания компонента. На зону плавления будет воздействовать сжимающая сила из-за усадки нанесенного слоя, что может привести к образованию трещин при разжижении. Особенно при производстве разнородных металлов WAAM, вероятность возникновения трещин выше из-за различных свойств материала.

Также существующие результаты исследований касаются и механических свойств. Команда Ван Кехонга из Нанкинского университета науки и техники использовала тестер микротвердости HVS 1000Z для измерения значения твердости вдоль центральной линии сварного шва по мере увеличения высоты наплавки и значения твердости в различных положениях по ширине на одной и той же высоте при нагрузке 0,3 кг. Как показано на рисунке 3, распределение твердости облицовочного слоя имело очевидные недостатки: чем больше высота, тем больше твердость и тем ниже средняя часть; твердость в центре сварного шва была высокой, а твердость с обеих сторон сварного шва была низкой [24]

Сянхуэй и др. исследовали микроструктуру деталей с присадками, изменяя скорость подачи проволоки, как показано на рисунке 4. Когда скорость подачи проволоки была увеличена с 3 до 4 м/мин, мощность дуги также увеличилась. Увеличение подводимого тепла привело к уменьшению скорости охлаждения задней кромки ванны расплава и увеличению расстояния между вторичными дендритами. Следовательно, по мере увеличения скорости подачи проволоки размер дендритов увеличивался, а прочность на растяжение снижалась [25].

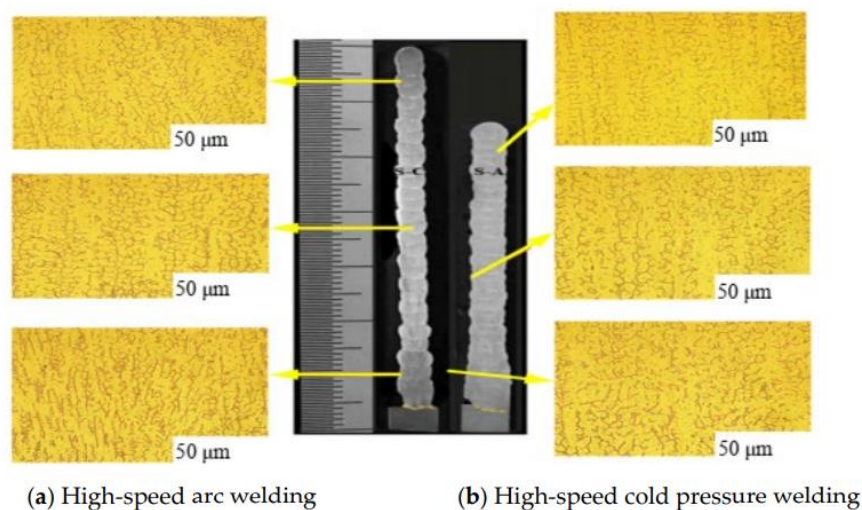


Рисунок 1.3 – Микроскопический обзор двух способов сварки

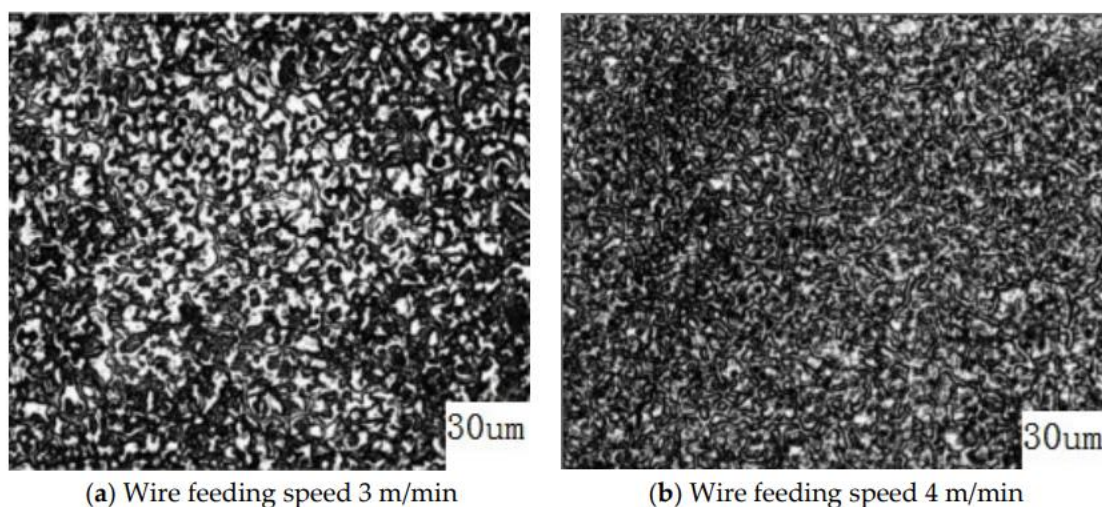


Рисунок 1.4 – Металлографическая схема организации при различных скоростях подачи проволоки

В рамках нашего исследования мы занимаемся изучением и анализом современных достижений и пробелов, нуждающихся в дальнейших исследованиях и планируем проводить анализ воздействия различных параметров на процесс изготовления изделий с использованием технологии WAAM. Наша цель состоит в том, чтобы детально рассмотреть, как разнообразные факторы могут влиять на возникновение дефектов в конечных изделиях, произведенных с использованием данной техники.

Мы сосредоточимся на изучении уже имеющихся исследований в данной области, проведенных другими учеными, а также учтем применение передовых методов и технологий в сфере WAAM. На основе этих данных мы планируем выявить ключевые факторы, влияющие на качество изделий, а также выделить основные виды дефектов, которые могут возникнуть в процессе производства.

Как видно из обзора на качество готового изделия, полученного методом WAAM влияет огромное количество факторов. Одним из них, например, является траектория. Анализ различных исследований, касающихся этого фактора дает увидеть важность правильного его выбора. Например, если обратить внимание на эксперимент [22] можем заметить, что траектория, показавшая себя наилучшей по структуре и механическим свойствам, является траекторией без осцилляции, которая в эксперименте [23] была отнесена к ненадежной, так как дает большие дефекты формы, нарушается геометрическая правильность и сплошность стенки. Если посмотреть на рисунок 3 видно, как траектория 3 уступает остальным по форме и геометрии. Отсюда, нельзя не сделать вывод о том, что траектория спираль не является безупречной и выбор траектории должен зависеть от желаемого результата. Но эксперимент [22] дает ясность в том, каков основной фактор влияния на важные свойства наплавленного материала. Если для процесса плавления важен цикл остужения материала, определенная степень затвердевания слоя перед наплавкой следующего, то выявив оптимальные температурные режимы можно создать необходимые условия печати посредством вспомогательных факторов, таких, как например искусственное остужение, выбор максимальной длины осцилляции, подложки с высокой теплопроводностью и т.д.

Исследования, касающиеся распределения тепла, дополнительного нагрева мы видим в [19], где говорится о том, что равномерное распределение тепла уменьшает остаточные напряжения. И это было достигнуто индукционным теплом, генерируемым колеблющимся электромагнитным полем на поверхности заготовки. Таким образом можно решить проблему как геометрии и формы заготовки, так и её свойств.

Также мы видим в [24] что на механические свойства влияет и сама геометрия образца, а если быть точнее, то влияние оказывают геометрические параметры осаждаемых слоев, и чем больше высота наплавленного слоя, тем выше твердость. А на это главным образом влияет правильность траектории, а также других параметров, таких как скорость подачи материала и т.д.

Закономерность влияния скорости на свойства заготовки мы видим в [25]: чем выше скорость подачи проволоки, тем ниже прочность на растяжение.

Таким образом видна прямая взаимосвязь всех факторов и важно их комплексное изучение и поиск оптимального решения всех задач, которые необходимо решить в конкретном случае.

Статья [26] производит обзор и анализ и делает общие выводы по различным методам WAAM, таким как GMAW, CMT, PAAM, PAW структурируя все в одну таблицу, в которой описаны оптимальные стратегии печати в соответствии с выбранным материалом. Ниже представлена эта таблица:

Таблица 1.1 – Оптимальные стратегии печати в соответствии с выбранным материалом

Год	Ссылка	Источник сварки	Материальная система	Стратегия депонирования
2003	[71]	GMAW	W = 0,8 мм ER70S-6 S = SS308	Более высокий подвод тепла обеспечивается в начале и постепенно уменьшается до конца осаждения для достижения заданной плотности и высоты структуры.
2011	[72]	GMAW	W = 1,2 мм Ho8Mn2Si S = 10 мм S235JR	Используйте два различных направления осаждения: (1) в том же направлении и (2) в обратном направлении, где осаждение слоев в том же направлении оказалось лучше, чем обратная последовательность осаждения.
2012	[73]	CMT	1. W = 0,8 мм ER70S-6, S = 15 мм S355 2. W = 1,2 мм ER4043, S = 12 мм AA6082	Предложить стратегию осаждения колебаний для наклонных стенок с углами 15°, 30°, 45° и 60°, которая успешно преодолевает образование горбов.
2014	[74]	GMAW	Ш = 1,2 мм ER70S-6	Использование метода непрерывной генерации траектории движения инструмента, сочетает стратегию нанесения зигзагообразного и контурного рисунка, приводит к формированию выпуклой многоугольной

				структуры и повышению точности поверхности.
2015	[75]	GMAW	Ш = 1,2 мм ER70S-6	Используйте двухфазную трансформацию медиальной оси (МАТ): фаза 1 — подготовка геометрии МАТ; и фаза 2 — траектория, созданная из медиальной оси, что улучшает качество структуры и эффективность материала.
2015	[219]	GMAW	Ш = 1,2 мм ER70S-6	Предложена модель касательного перекрытия (ТОМ) в качестве контрмеры для достижения более высокой точности геометрии множественных валиков при оптимальном сокращении отходов материала.
2016	[220]	GMAW	Ш = 0,8 мм ER70S-6, S = 12 мм S235JR	Разработано шесть различных стратегий осаждения для оптимизации компонентов с Т-образными пересечениями за счет поддержания точности высоты.
2019	[225]	GMAW	Ш = 1,2 мм ER4043	Используйте три различные стратегии оптимизации: (1) осаждение методом переплетения, (2) точный контроль зажигания и гашения

				дуги и (3) локализованное измерение в сочетании с методом фрезерования для минимизации колебаний высоты слоев.
2019	[153]	GMAW	Ш = ДСС ER2209, S = 27 мм ДСС 2205	Используйте два типа стратегии осаждения: чередующееся направление и однонаправленный путь осаждения для получения слоев одинаковой высоты.
2020	[226]	GMAW	Ш = 1,2 мм ER70S-6, S = 8 мм S235JR	Используйте два метода осаждения: колебательный и перекрывающий, чтобы изготавливать сложные геометрические формы, структуру пересечения, кривизну и различную толщину стенок.
2020	[227]	GMAW	Ш = 1,2 мм ER70S-6, S = 8 мм S235JR	Используйте концепцию контрольного объема, сравнивая две различные стратегии осаждения: колебательную и перекрывающую, чтобы минимизировать дефекты.
2020	[60]	CMT	Ш = 1,2 мм ER120S-G, S = 10 мм S355	Для получения одиночных сварных швов и получения стенок с геометрией, обеспечивающей более низкий предел текучести, можно

				использовать стратегии колебания и параллельной наплавки.
2020	[228]	CMT	Ш = 1,2 мм SS316L, S = 15 мм SS316L	Применение стратегии плетения при одновременном увеличении угла наклона горелки позволяет добиться превосходной морфологии поверхности и измельчения зерна.
2021	[229]	CMT	Ш = 1,2 мм ER2319, S = 12,7 мм AA6082-T6	Используйте методы осцилляции и параллельного осаждения для создания более толстого сегмента линейной стенки с целью повышения ее твердости.
2022	[191]	CMT	W = 1,2 мм ER70S-6, S = 20 мм Пластина из углеродистой стали	Выполняйте колебательные, параллельные и тактические стратегии для изготовления стен, блоков и биметаллических конструкций.
2022	[57]	CMT	W = 1,6 мм DSS ER2209, S = 10 мм сталь Q235A	Для нанесения 10-слойной структуры стенки использовались два пути присоединения: однонаправленное и возвратно-поступательное.
2022	[230]	GMAW	Ш = 1,2 мм ER70S-6, S = S235JR	Тестируются три различных стратегии осаждения: (1) стратегия «вперед», (2) стратегия «вперед» с

				измененными условиями входа и выхода и (3) метод «назад и вперед».
2022	[56]	GMAW	W = 1,2 мм FCWA-AM, Супердуплексная нержавеющая сталь (SDSS)	Для каждого n-го слоя применялись различные параметры процесса, чтобы достигнуть содержания аустенита 45%.
2022	[131]	GMAW и ПААС	W = 1,2 мм ER70S-6 и ASS 316L, S = 10 мм ASS 316L	Для нанесения бездефектной биметаллической структуры стенки используются две различные технологии: наложение и перекрытие.
2022	[231]	GTAW	W = 1,0 мм ASS 316L (ER 316LSi) и Inconel 625 (ER NiCrMo-3), S = 6 мм Пластина из мягкой стали	Свойства FGM сравнивались при различных стратегиях осаждения: прямого интерфейса и плавного перехода, при этом плавный интерфейс оказался более эффективной стратегией с точки зрения прочности и удлинения при разрыве.
2022	[232]	CMT	W = 1,2 мм Ti–6Al–4V, S = 4 мм Ti–6Al–4V	Используйте стратегию зигзагообразного осаждения при различных условиях режимов переноса СМТ для достижения стабильных свойств структуры.
2022	[233]	ПААМ	W = 1,2 мм Ti–6Al–4V, S = 4 мм Ti–6Al–4V	Сравните два набора образцов РААМ: (1) послойное нанесение без усилия прокатки, (2) послойное

				нанесение с усилием прокатки in situ 15 кН.
2022	[234]	CMT	W = 0,9 мм ER70S-6, S = 10 мм стальная пластина Q235	Предложен инновационный подход к автоматизации процесса планирования пути в робототехнике, включая движок Automated Robot Offline Programming (AROLP).
2022	[235]	CMT	W = Кислород 1,2 мм M-308, S = 25 мм SS304	Интеграция регрессионной модели с классификатором машины опорных векторов (SVM) может уменьшить различия в осаждении капель между зоной зажигания дуги и промежуточной зоной.
2022	[236]	CMT	Ш = 1,2 мм ER4043, S = 3,15 мм AA6061-T6	Используйте две различные стратегии планирования пути: (1) однонаправленную и (2) двунаправленную для снижения поступления тепла.
2022	[237]	CMT	W = 1,2 мм Алюминий ER2319, S = 10 мм AA6082-T6	Используйте два метода осаждения для перемещения горелки, а именно стратегию штриховки и метод кругового перемещения, чередуя направление перемещения от нечетных слоев к четным для обеспечения стабильности.

2022	[238]	ПАУ	W = 1,2 мм ASS 316L-Si, S = 15 мм S235JR	Оптимальная высококачественная структура геометрии пересечения X-Cross была получена путем использования стратегий осаждения Cross-Waving и Cross-Overlapping.
2023	[239]	СМТ	W = 1,2 мм Низколегированная сталь (Fe-2Mn-1Si-0,08C), S = 10 мм Низкоуглеродистая сталь (Fe-1,4Mn-0,35Si-0,2C)	Многопроходные пути с различными междурядными расстояниями и дополнительные пути заполнения зазоров были использованы с помощью искусственной нейронной сети (ИНС) для создания компонентов без зазоров.
2023	[240]	СМТ	W = 1,2 мм Алюминий ER2319, S = 10 мм 2A14 Алюминиевый сплав	Применение спиральной и асимметричной стратегии дуговой колебательной схемы осаждения позволило снизить образование пор с 2,64% до 1,09% и 1,22% соответственно.

В статье [27] для исследования параметров процесса WAAM и их влияния на свойства поверхностной зоны компонентов из Al-4047 (AlSi12) использовалась сварочная проволока диаметром 1,2 мм

Изготовление заготовок выполнялось на системе WAAM, состоящей из 6-осевой роботизированной системы Manutec и источника питания для сварки EWM Alpha Q 352 puls. Для уменьшения теплового ввода использовался процесс ColdArc puls от EWM. Защитным газом был аргон. Процесс WAAM выполнялся с использованием стандартной программы для AlSi

В соответствии с анализом автора исследований других авторов, были выбраны параметры, которые варьировались: скорость подачи проволоки ($v_{\text{wire}} = 8\text{--}10$ м/мин) и скорость подачи материала ($v_f = 600\text{--}1000$ мм/мин). Эти параметры имеют влияние на энергию и тепловой ввод, а следовательно,

на микроструктуру и механические свойства компонентов. Температура между слоями поддерживалась на уровне $T_i = 50^\circ\text{C}$, что, как показали предыдущие исследования, позволяет снизить содержание пор до 1.5% или менее

После WAAM все компоненты были обработаны до заданной геометрии вращающихся изгибаемых валов методом токарной обработки.

Основная цель этой статьи заключается в исследованиях полученных результатов после постобработки и глубокой прокатки. Были проведены испытания на изгиб, измерение остаточных напряжений,

Для измерения остаточных напряжений использовалась рентгеновская дифракция с помощью дифрактометра Seifert XRD 3003 ETA с использованием метода $\sin^2\psi$. Результат оказался таким:

Набор параметров с низкой скоростью подачи v_f (600 мм/мин) и высокой скоростью подачи проволоки v_{wire} (10 м/мин) приводит к относительно высоким растягивающим напряжениям вблизи поверхности. Это связано с высоким энергетическим и тепловым вводом, вызванным низкой скоростью подачи и высокой скоростью нанесения материала.

При более высокой скорости подачи (например, красные и синие линии) наблюдаются более низкие растягивающие напряжения вблизи поверхности.

Для параметров процесса WAAM со скоростью подачи $v_f = 1,000$ мм/мин и скоростью подачи проволоки $v_{wire} = 10$ м/мин минимальные растягивающие напряжения наблюдаются вблизи поверхности, а на глубине около 100 мкм появляются сжимающие остаточные напряжения.

Отсюда был сделан вывод, в котором с учетом погрешностей измерений можно отметить лишь тенденцию к снижению остаточных напряжений на поверхности с увеличением скорости подачи f

Далее проводились испытания на изгиб, в результате которых выяснилось, что комбинация параметров процесса WAAM с подачей $v_f = 1,000$ мм/мин и скоростью проволоки $v_{wire} = 10$ м/мин в среднем приводит к самому долгому сроку службы. Однако на среднее значение влияет выброс данных, а первый отказ произошел менее чем через 200,000 циклов нагрузки.

Комбинация $v_f = 600$ мм/мин и $v_{wire} = 8$ м/мин демонстрирует наибольший средний срок службы с относительно низкой вариативностью.

Низкий тепловой ввод в процессе WAAM способствует более мелкой микроструктуре, улучшению механических свойств и уменьшению размеров пор. Согласно результатам, комбинация $v_f = 1,000$ мм/мин и $v_{wire} = 8$ м/мин имеет самый низкий тепловой ввод. Однако, вопреки ожиданиям, такие образцы имеют самый короткий срок службы среди всех исследованных комбинаций, хотя вариативность их срока службы минимальна.

Компоненты, изготовленные методом WAAM, в целом имеют короткий срок службы. Это означает, что они не могут использоваться в условиях с высокими требованиями без дополнительной механической обработки

Основные выводы:

– Образцы с более низким тепловым вводом демонстрируют более мелкую и нерегулярную микроструктуру с мелкими дендритами (В II).

– Образцы с наибольшим сроком службы (А) имеют крупные дендриты, ориентированные параллельно поверхности. Эта ориентация, вероятно, препятствует распространению трещин, что увеличивает срок службы.

Для изготовления деталей, которые будут анализироваться в данном исследовании [28], был использован процесс WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) на основе импульсной технологии холодной металлопередачи (CMT-PADV) с присадочным металлом ER2319 диаметром 1,2 мм.

Присадочный металл наносился на подложку из AA6082-T6 толщиной 10 мм с использованием синергетической кривой CMT 1369 + P Adv. В процессе применялись источник питания для сварки Fronius CMT Advanced 4000 R и сварочная горелка RA 5000 22G, установленные на роботизированной системе Fanuc ARC Mate 120iC. В качестве защитного газа использовался чистый аргон (99,999 %) с постоянным расходом 30 л/мин. Расстояние от сопла до детали было фиксировано на уровне 12 мм.

Параметры процесса, используемые для изготовления деталей, оставались неизменными на протяжении всего исследования: сила тока составляла 96 А, скорость перемещения горелки (TS) – 0,6 м/мин, а скорость подачи проволоки (WFS) – 6 м/мин. Технология CMT-PADV имеет дополнительный параметр EP/EN-баланс в диапазоне от –5 до +5, который изменяет баланс между положительными и отрицательными циклами. Этот параметр был установлен на 0, за исключением первого слоя, где для предотвращения дефекта сужения шейки из-за отвода тепла через подложку он был установлен на +4, а скорость подачи проволоки увеличена до 10 м/мин. В результате тепловложение в первый слой увеличилось, что позволило избежать усадки. Другие авторы рекомендуют использовать режим переноса MIG-P для первого слоя при работе со сплавом 2319, чтобы избежать растрескивания на интерфейсе и сокращения несущей площади.

Были выбраны две стратегии нанесения с учетом движения горелки (рис. 3). Первая стратегия – штриховка, представляет собой прямой сварочный валик без колебаний, тогда как во второй – круговая, горелка колеблется, создавая перекрытие кругов с амплитудой 1 мм и частотой 2 Гц. В обеих стратегиях направление перемещения менялось от нечетного к четному слою для обеспечения стабильного роста. Были изготовлены две различные геометрии (рис. 4). Первая, называемая прямоугольной, представляет собой непрерывную прямоугольную спираль без остановок дуги, что исключает время задержки между слоями. Вторая – это прямая стена с 90-секундным временем задержки между слоями. Прямая стена была исследована для обеих стратегий нанесения, тогда как прямоугольная геометрия изготавливалась только с использованием стратегии штриховки.

Для анализа микроструктуры образцы, извлеченные перпендикулярно основному металлу, травились в течение 20 секунд с использованием реактива Келлера (95 мл H₂O + 2,5 мл HNO₃ + 1,5 мл HCl + 1 мл HF) и анализировались

на микроскопе Olympus Gx51. На том же микроскопе были сделаны микрофотографии для определения процентного содержания пористости с помощью программы ImageJ. Используемая методика позволила количественно определить поры диаметром более 10 мкм.

При применении установленных параметров сварки толщина стен варьировалась от 7 до 11 мм в зависимости от геометрии и движения горелки. Стены толщиной около 7 мм были получены при нанесении слоев по стратегии штриховки для прямой геометрии, тогда как средняя конечная толщина увеличивалась до 9 мм при той же геометрии, но с использованием круговой стратегии

В данной статье основной анализ был сосредоточен на различных стратегиях осаждения. По итогам исследований было выявлено, что прямоугольная геометрия (со стратегией штриховки) демонстрирует равноосные зерна из-за уменьшенных вертикальных градиентов температуры и более медленных скоростей охлаждения, что способствует однородности и изотропии механических свойств. Равноосные структуры зерен обеспечивают превосходные механические свойства при сниженной анизотропии по сравнению со столбчатыми зернами.

Авторы исследования [29] для изготовления толстостенных сплавов на основе алюминия и магния (AlMg) провели эксперименты с использованием системы WAAM-CMT. Система включает в себя источник питания Fronius CMT-Advance, подающий механизм, контроллер робота и сварочную горелку CMT, подключённую к шестиосевому роботу Fanuc.

В качестве присадочной проволоки использовалась проволока из сплава ER5356 диаметром 1,2 мм. Во время экспериментов металл наносился с использованием системы WAAM-CMT и шестиосевого робота Fanuc. В качестве подложки использовалась пластина из алюминиевого сплава 6061-T6 размером $200 \times 60 \times 10$ мм. Для защиты применялся аргон с чистотой 99,99% и расходом 20 л/мин. Расстояние от наконечника до подложки (CTWD) поддерживалось на уровне 15 мм. Значение приращения по оси Z составляло 2,0 мм, а время ожидания между слоями – 90 секунд.

В данной статье исследовались 6 образцов с разными параметрами, среди которых лучший результат на предел прочности, текучести и другие параметры показал образец со скоростью наплавки 7 м/мин, скоростью движения фидстока 0,9 м/мин, силой тока 158 А и напряжением 16,8 В.

В отрывке [30] представлена подробная информация о процессе аддитивного производства, используемом для производства структур с использованием аддитивного производства с использованием проволоки и дуги (WAAM) с методами холодного переноса металла (CMT) и металлического активного газа (MAG). Ниже приведена обобщенная интерпретация:

Материал подложки и наполнителя:

Подложка: сталь AISI H11 (горячедеформируемая инструментальная сталь) толщиной 35 мм, термообработанная для достижения твердости 380–420 HB (~400–440 HV).

Присадочная проволока: X10CrMo6-3 (низкоуглеродистая проволока с высоким содержанием хрома и молибдена), диаметр 1,2 мм. Для процессов СМТ и МАГ использовался тот же материал проволоки и диаметр.

Химический состав и прогнозирование фаз:

Химический состав анализировали с использованием диаграммы Шеффлера, рассчитав значения эквивалента хрома (C_{req}) и эквивалента никеля (Ni_{eq}):

Базовый материал: $C_{req} = 7,85\%$, $Ni_{eq} = 11,60\%$.

Присадочная проволока: $C_{req} = 10,40\%$, $Ni_{eq} = 3,30\%$.

Защитный газ и оборудование:

Защитный газ:

СМТ: M21-ArC-18 (82% аргона, 18% CO_2), расход 15 л/мин.

МАГ: M20-ArC8 (92% аргона, 8% CO_2), расход 15 л/мин.

Оборудование:

СМТ: источник питания Fronius TPS 400i, горелка push-pull (привод WF 60i Robacta) и буфер для проволоки.

МАГ: импульсная сварка МАГ (вариант МАГ Puls-Synergic).

Управление движением: робот ABB IRB 140 с позиционером IRBP A и системой управления IRC5.

Экспериментальные параметры:

Оптимизация:

Параметры были оптимизированы с использованием центральной композитной конструкции (CCD) для односторонних сварных швов.

Подложка предварительно нагрета до 400 °C (выше температуры M_s AISI H11).

Сварочный ток варьировался:

СМТ: 178–262 А.

МАГ: 165–225 А.

Скорость сварки: 0,65–1,35 см/с.

Ввод материала:

Низкая энергия: 5,40 м/мин.

Высокая энергия: 7,20 м/мин.

Для обеспечения единообразия входящие материалы поддерживались сопоставимыми между процессами СМТ и МАГ.

Процесс осаждения:

Размеры конструкции: 70 × 20 × 120 мм.

Конструкция слоя:

Слой состояли из трех смежных сварных швов с осевым смещением, равным 65% перекрытия.

Для определения оптимального смещения и последовательности сварки использовались литературные источники.

Межслойный контроль температуры:

Температура между слоями контролируется с помощью термопар типа К.

Осаждение приостанавливалось до тех пор, пока температура между слоями не стабилизировалась на уровне 350–400 °С (близко к температуре Ms).

Основной акцент исследования в сравнении двух методов: СМТ и МАГ. По результатам исследования СМТ в большинстве выигрывает. Параметры, которые использовались при сварке: скорость наплавки 5,40 м/мин, скорость движения фидстока 0,45 м/мин, сила тока 190 А и напряжение 15,6 В.

В статье [31] рассматриваемым присадочным материалом является нержавеющая сталь 316L. Наносится до пяти слоев попеременно, так что начальная точка следующего слоя является конечной точкой предыдущего. Время охлаждения (или время выдержки) между каждым слоем составляет около 35 с. Длина отложения составляет 100 мм, а его средняя высота составляет около 2 мм на слой. Защитный газ представляет собой бинарную смесь: 98% аргона и 2% CO₂. Вылет электрода установлен на 10 мм и проверяется перед каждым нанесением с помощью калибровочного блока. Металлический наполнитель представляет собой проволоку из нержавеющей стали 316L диаметром 1,2 мм. Было использовано три набора технологических параметров для изучения влияния технологических параметров на температурный цикл и остаточные напряжения, из которых в результате самыми оптимальными оказались: скорость наплавки 0,5 м/мин, скорость движения фидстока 4,2 м/мин для первого слоя и 3,3 м/мин для пятого слоя; сила тока 144А для первого слоя и 122 А для пятого; напряжение 14,5 В для первого и 13,6 для пятого слоя.

В [32] быстрое прототипирование провода из алюминиевого сплава 5356 происходило с использованием оборудования VPGTAW (модель LTP200-VP3, Liburdi Engineering, Inc., Канада) с вольфрамовым электродом диаметром 3,2 мм и чистым аргоном в качестве защитного газа. В качестве подложки для создания 3D-деталей использовалась алюминиевая пластина 6061-T6.

Управляя движением вдоль горизонтальной оси Y, можно изготовить детали с переменным диаметром. Обратите внимание, что вольфрамовый электрод может быть подключен к отрицательной клемме источника питания (DCEN) или положительной клемме (DCEP) при использовании постоянного тока. В этом эксперименте применялась техника переменной полярности, при которой можно отдельно контролировать продолжительность и величину токов DCEN и DCEP, чтобы очистить оксидную пленку на поверхности алюминиевого сплава. Амплитуда тока DCEP увеличивает величину тока DCEN, однако продолжительность DCEP значительно изменяется. В данном эксперименте для эффективной очистки поверхности сварного шва ток DCEP увеличили на 30–80.

Диаметр присадочной проволоки составлял 1,2 мм. Предварительные экспериментальные результаты показывают, что для улучшения

смачиваемости и уменьшения склонности к деформации наносимого слоя в процессе наплавки необходим предварительный нагрев. Для контроля температуры вращающейся подложки, нагреваемой сварочной дугой, используют инфракрасный термометр. Процесс предварительного нагрева осуществляется при токе 140 А и угловой скорости сварки 0,1 об/сек. Сварочная горелка находится на расстоянии около 50 мм от центра подложки. Исследование температуры на верхней поверхности подложки имело круглую форму диаметра.

В ходе анализа образцов применяются испытания микротвердости, изучение микроструктуры и пористости, оценка шероховатости поверхности, измерение наклона и высоты наплавленного слоя. Испытания микротвердости проводят с использованием микротвердомера Виккерса (Lietz Wetzlar, Германия) при воздействии 200 г в течение 10 секунд на полированных образцах. Для изучения микроструктуры кристаллы травили модифицированным реактивом Келлера (150 мл воды, 3 мл азотной кислоты и 6 мл плавиковой кислоты при низкой температуре), а затем наблюдали с использованием высокоразрешающего оптического микроскопа. Для изучения шероховатости поверхности воспользовался прибором для измерения текстуры поверхности. Максимальная шероховатость профиля высоты определяется расстоянием между самой низкой и самой высокой t.

Таблица 1.2 - Взаимосвязи параметров сварки и геометрической формы для трех различных деталей из алюминиевого сплава 5356

Параметры	Цилиндр	Конус (сегменты I и II)	Редуктор трубы (сегменты I, II, III)
Длина дуги, мм	5	5	5
Скорость сварки, мм/с	80	80	70
Сварочный ток, А	140–100 (первые 40 слоев), 100 (остальные)	150–110 (I), 110 (II)	140–100 (I), 100 (II), 100 (III)
Число слоев	300	60 (I); 100 (II)	80 (I); 60 (II); 20 (III)
Ширина слоя, мм	4.4	5.0	4.6
Высота слоя, мм	0.4	0.4	0.4
Высота детали, мм	116.0	66.0	65.1
Толщина детали, мм	4.3	4,9 (I); 5,3 (II)	4,5 (I); 4,6 (II); 4,8 (III)
Диаметр детали, мм	102	75,5 (I); 75,5–47,0 (II)	75,5 (I); 75,5–65,5 (II); 65,5 (III)

Погрешность высоты	3,3%	3.1%	1,7%
Погрешность угла	2.3%	6.0%	4.3%
Погрешность диаметра	1.0%	2.2%	2.3%
Шероховатость, мкм	2,45–2,77	1,76–2,17	2,36–2,99

Эти результаты подчеркивают эффективность технологии VPGTAW для изготовления деталей из алюминиевого сплава 5356 с высокой толщиной, улучшенной микроструктурой и развитыми механическими явлениями.

1.2 Выбор материалов: ER308LSi, ее особенность и применимость

При выборе присадочного материала для WAAM важнейшими критериями являются свариваемость, стабильность формирования наплавки, устойчивость к горячим трещинам, а также соответствие требуемым механическим и коррозионным свойствам. В рамках настоящего исследования в качестве основного материала выбрана аустенитная сварочная проволока ER308LSi, широко применяемая при сварке нержавеющей сталей марки 304 и аналогичных им по составу сплавов.

Проволока ER308LSi представляет собой легированную хромоникелевую сталь с пониженным содержанием углерода и повышенным содержанием кремния. Типичный химический состав включает:

- Cr — 19–21%,
- Ni — 9–11%,
- Si — до 0,65–0,95%,
- C — не более 0,03%.

Низкое содержание углерода (литера "L") обеспечивает высокую устойчивость к межкристаллитной коррозии, а повышенное содержание кремния ("Si") способствует лучшему формированию валика и повышает текучесть расплава. Это особенно важно в контексте WAAM, где многослойное наплавление требует равномерного растекания и смачивания подложки без дефектов слияния и провисаний.

Среди основных преимуществ ER308LSi в условиях WAAM можно выделить:

- Хорошие сварочные характеристики, включая стабильную дугу и низкую склонность к разбрызгиванию;
- Устойчивость к горячим трещинам, возникающим при повторном нагреве в многослойной структуре;
- Поддержание аустенитной структуры даже при циклическом термическом воздействии, что снижает риск образования хрупкой ферритной или σ -фазы;

– Коррозионная стойкость, позволяющая использовать наплавленные изделия в агрессивных средах.

Одним из важных факторов при использовании ER308LSi в WAAM является контроль δ -феррита в первом слое, особенно при наплавке на ферритную или углеродистую подложку. Как показано в ряде исследований, содержание δ -фазы может варьироваться в зависимости от теплового цикла и геометрии валика, что оказывает влияние на механические свойства и микроструктурную устойчивость изделия.

Применение ER308LSi позволяет обеспечить хорошую повторяемость наплавки и приемлемое качество поверхности при относительно невысоких требованиях к оборудованию. Это делает данный материал рациональным выбором для апробации WAAM в лабораторных и полупромышленных условиях, а также при создании прототипов.

Таким образом, выбор ER308LSi в рамках настоящего исследования обусловлен её высокой технологичностью, стабильными сварочными характеристиками и соответствием задачам моделирования WAAM-процесса на опытной установке.

Изделия, изготовленные с использованием проволоки ER308LSi, находят широкое применение в различных отраслях промышленности, благодаря высокому уровню коррозионной стойкости и механической прочности:

– Пищевая и фармацевтическая промышленность — оборудование, контактирующее с агрессивными средами (резервуары, трубопроводы, элементы дозаторов и фасовочных машин);

– Энергетика и химическая промышленность — корпуса теплообменников, насосов, элементы трубных систем, работающих с кислотами и щелочами;

– Автомобилестроение и транспорт — выхлопные системы, теплоизолированные компоненты, декоративные и несущие детали из нержавеющей стали;

– Архитектура и гражданское строительство — элементы внешней отделки, поручни, лестничные ограждения и несущие конструкции, подверженные атмосферному воздействию;

– Медицинская техника — второстепенные компоненты, не контактирующие напрямую с тканями, но требующие высокой чистоты и коррозионной стойкости.

Благодаря устойчивости к межкристаллитной коррозии, изделия из ER308LSi могут эксплуатироваться в условиях переменных температур и влажности, что особенно важно для оборудования, подвергающегося частым циклам нагрева и охлаждения. Это делает проволоку ER308LSi универсальным материалом для создания функциональных деталей в условиях ограниченного производственного бюджета — как в рамках прототипирования, так и мелкосерийного выпуска.

1.3 Проблемы формирования валика и структура наплавленного металла

Процесс формирования валика при WAAM напрямую влияет на геометрическую точность изделия, прочность межслойных связей и однородность структуры металла. В отличие от традиционной сварки, где валик служит соединением, в WAAM он является строительным элементом, от которого зависит вся пространственная геометрия детали. Поэтому качество каждого слоя критически важно для успешного наращивания последующих уровней.

Одна из ключевых задач — обеспечение стабильности формирования валика в условиях многослойной наплавки. При недостаточной подаче материала или повышенной скорости перемещения возможно образование узких валиков с неполным слиянием с подложкой или предыдущим слоем. При избыточной подаче и недостаточном охлаждении возникают провисания, «наплывы» металла и изменение профиля валика, что может привести к накапливающимся геометрическим искажениям. Кроме того, при значительной высоте изделия возможен эффект «наклона стенки» — отклонение траектории роста от вертикали.

Одной из существенных проблем, выявленных в ходе проведения эксперимента, стало неравномерное поступление защитного газа при наплавлении одного из валиков. Это было связано с частичным засорением сопла сварочного пистолета, что привело к прерывистому газовому потоку. На макрофотографиях (см. правую сторону снимков) отчетливо видно, что такая ситуация существенно ухудшает качество формирования валика.



Рисунок 1.5 – Сравнение стабильной и не стабильной подачи защитного газа (сверху валик образовавшийся при неравномерной подаче газа, снизу – после очищения сопла и равномерной подаче газа)

При нормальном газовом потоке защитная атмосфера эффективно изолирует расплавленную ванну от контакта с воздухом, минимизируя окисление и обеспечивая стабильность процесса. Однако при перебоях в подаче газа наблюдается неравномерное охлаждение и незащищённость зоны сварки, что ведет к дефектам: появлению окисных включений, изменению геометрии валика, образованию пор и нестабильному смачиванию поверхности. В данном случае в зоне с нарушенным газовым потоком валик получился более шероховатым, с чётко выраженной неравномерной шириной, а также с признаками локального перегрева или переохлаждения.

Этот пример демонстрирует важность контроля подачи защитного газа и регулярной проверки сопла на предмет загрязнений. Даже небольшое нарушение в системе подачи газа может привести к заметному снижению качества наплавленного слоя, а в более ответственных конструкциях — к появлению критических дефектов.

Другой важный аспект — термическое воздействие при многократной наплавке. Повторный нагрев ранее сформированных слоёв вызывает перераспределение микроструктурных фаз и может приводить к образованию структурных дефектов: пор, трещин, включений и границ перекристаллизации. Особенно чувствительны к этому первый и второй слои, находящиеся в непосредственном контакте с подложкой и получающие наибольшую тепловую нагрузку.

Структура наплавленного металла при WAAM с применением проволоки ER308LSi, как правило, представлена аустенитной матрицей с незначительным содержанием δ -феррита. Образование δ -фазы (ферритного компонента) частично стабилизирует металл и снижает склонность к горячим трещинам, но её избыток может негативно сказаться на пластичности и коррозионной стойкости. Концентрация δ -феррита определяется сложным взаимодействием состава проволоки, параметров сварки и теплового цикла, особенно в первом слое, где возможен переход к более ферритной структуре за счёт разбавления подложкой.

Дополнительные сложности создают остаточные напряжения, возникающие в результате неравномерного нагрева и охлаждения. Они могут вызывать деформации изделия, коробление или даже растрескивание при последующей механической обработке. Для минимизации этих эффектов необходимо тщательно подбирать параметры сварочного тока, скорости перемещения, стратегии заполнения и промежуточного охлаждения.

Таким образом, эффективное управление процессом формирования валика в WAAM требует комплексного подхода: оптимизации режимов наплавки, использования подходящих материалов, систем охлаждения и адаптации конструкции установки. Эти задачи становятся особенно актуальными при проектировании принтера, ориентированного на гибридное применение, где точность каждого слоя критична для последующего фрезерования или другой постобработки.

1.5 Потенциал гибридизации WAAM с постобработкой

Одним из наиболее перспективных направлений развития WAAM-технологии является её интеграция с методами механической обработки в рамках гибридного производства. Такой подход позволяет не только изготавливать крупногабаритные изделия с высокой материалоеффективностью, но и одновременно обеспечивать необходимую точность и качество поверхностей, характерное для субтрактивных методов.

WAAM отличается высокой производительностью и возможностью быстрого формирования сложной геометрии. Однако получаемые детали часто требуют доработки — как по геометрическим допускам, так и по качеству поверхности. Механическая обработка, особенно фрезерование, является необходимым этапом в таких случаях. Это приводит к естественной интеграции WAAM в гибридные технологические цепочки, где оба процесса выполняются последовательно или даже одновременно на одной установке.

Гибридный подход открывает несколько ключевых преимуществ:

- Сокращение производственного цикла за счёт объединения этапов наплавки и обработки в одной системе;
- Повышение точности изготовления благодаря механической коррекции наплавленной геометрии;
- Локальная коррекция ошибок, допущенных на этапе формирования валиков;
- Минимизация заготовочного материала, что особенно важно при работе с дорогостоящими сплавами;
- Снижение деформаций за счёт возможности промежуточного снятия напряжений при механической обработке.

Вместе с тем реализация гибридной WAAM-системы предъявляет повышенные требования к конструкции установки. В частности, жёсткость рамы должна быть достаточной не только для перемещения сварочного пистолета, но и для компенсации сил, возникающих при фрезеровании. Также требуется точная система позиционирования, устойчивая к вибрациям и нагрузкам. Кроме того, важно предусмотреть доступ к области наплавки для режущего инструмента, возможность смены оснастки и программное управление обоими типами операций.

В настоящем исследовании концепция гибридизации реализуется через проектирование портальной установки, конструкция которой изначально адаптирована к требованиям фрезерной обработки. Особое внимание уделяется повышению жёсткости — в том числе путём частичного заполнения элементов рамы инертным материалом (щебнем или песком), а также использованию направляющих и компонентов, способных работать в условиях циклической нагрузки.

Таким образом, гибридизация WAAM с постобработкой представляет собой логичный и перспективный путь развития технологии, способствующий её внедрению в промышленную практику. Адаптация установки под такие

условия является необходимым шагом на пути от экспериментальных образцов к функциональным изделиям, отвечающим современным требованиям точности и качества.

1.6 Выводы по главе 1

В первом разделе диссертационной работы рассмотрены теоретические основы технологии WAAM, её место среди современных аддитивных процессов, а также физико-технологические аспекты, определяющие эффективность и качество наплавки. Анализ показал, что WAAM на основе GMAW обладает высокой производительностью, широким выбором доступных материалов и возможностью интеграции в гибкие производственные цепочки. При этом процесс требует строгого контроля параметров, особенно в условиях многослойной наплавки.

Обоснован выбор сварочной проволоки ER308LSi как материала, обладающего высокой стабильностью формирования валика, устойчивостью к трещинообразованию и хорошей свариваемостью, особенно в сочетании с GMAW. Отмечены проблемы, возникающие при формировании структуры наплавленного металла, включая наличие остаточных напряжений, пор и δ -фазы, особенно в зоне первого слоя.

Особое внимание в главе уделено перспективам гибридизации WAAM с механической обработкой. Такой подход позволяет объединить преимущества аддитивного и субтрактивного производства, повысить точность изделий и сократить производственный цикл. Выявлены основные требования к конструкции оборудования, предназначенного для работы в гибридном режиме, в том числе повышенная жёсткость, виброустойчивость и точность позиционирования.

На основании проведённого анализа сформулированы направления дальнейшего исследования, включающие экспериментальную проверку WAAM-процесса с использованием ER308LSi и разработку концепции принтера, адаптированного под гибридную технологию. Эти задачи раскрываются в последующих главах работы.

2 Экспериментальное исследование WAAM-процесса

2.4 Описание оборудования: источник питания MIG 220S, проволока ER308LSi

Для проведения экспериментальных исследований по реализации технологии WAAM была сформирована простейшая опытная установка, включающая источник питания дуги, механизм подачи сварочной проволоки, рабочую платформу и направляющую систему для управления перемещением сварочной головки.

В качестве основного источника тепла использовался инверторный сварочный аппарат MIG 220S (производства АОТАИ), работающий в режиме GMAW (газодуговая сварка плавящимся электродом). Аппарат предназначен для полуавтоматической сварки в среде защитного газа с применением сплошной проволоки диаметром 0,6–1,0 мм и способен обеспечивать стабильную дугу при токах до 220 А. Среди ключевых характеристик аппарата можно выделить:

- плавную регулировку сварочного тока и скорости подачи проволоки;
- стабильную работу при продолжительной нагрузке;
- поддержку сварки в среде Ar/CO₂ и чистого аргона;
- простую настройку, подходящую для ручного и полуавтоматического управления.

Сварочная проволока, используемая в эксперименте — ER308LSi, с диаметром 0,8 мм, соответствует классу присадочных материалов для сварки аустенитных нержавеющей сталей (например, AISI 304/304L). Она поставляется на стандартных катушках и используется без предварительного подогрева, что облегчает её интеграцию в WAAM-процесс. Высокое содержание кремния (до 0,95%) способствует формированию ровных валиков с хорошей смачиваемостью и минимальным количеством разбрызгиваний.

Для подачи проволоки применялся встроенный механизм подачи с тягловым приводом, обеспечивающий постоянную скорость подачи, которая регулировалась вручную в пределах 2–10 м/мин. Контроль над процессом наплавки осуществлялся визуально, с возможностью настройки расстояния до подложки и угла наклона пистолета.

Подача защитного газа — аргона технической чистоты (Ar 99,996%) — осуществлялась через редуктор и систему подачи, встроенную в сварочный аппарат. Газ поступал через рукав и выходил непосредственно через сопло сварочного пистолета. Расход газа поддерживался на уровне 30 л/мин, что обеспечивало надёжную защиту сварочной ванны от воздействия атмосферного воздуха и предотвращало образование оксидов и пор.

Перемещение сварочного пистолета осуществлялось не вручную, а с использованием токарного станка, модифицированного под экспериментальные цели. На станке были закреплены приспособления, обеспечивающие надёжную фиксацию пистолета и возможность его

равномерного перемещения вдоль заготовки. Такое решение позволило добиться стабильной траектории движения и сократить влияние человеческого фактора при наплавке. Платформа и пистолет ориентировались параллельно оси перемещения, что условно имитировало движение по оси X или Z в будущей модели установки.

Таким образом, подобранное оборудование в совокупности с применёнными техническими решениями обеспечило реализацию WAAM-процесса в контролируемых условиях и позволило получить образцы, пригодные для анализа геометрии валиков и оценки микроструктуры наплавленного металла.

2.2 Методика проведения эксперимента

Экспериментальная часть исследования была направлена на изучение особенностей формирования микроструктуры в процессе наплавки проволокой ER308LSi методом WAAM-GMAW. Особое внимание уделялось первому слою наплавки, где наблюдаются наиболее выраженные фазовые и термические преобразования.

Оборудование и материалы

Для наплавки использовался полуавтоматический сварочный аппарат MIG-220S, представленный на рис. 1. Аппарат работал в режиме газовой дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа (GMAW). Подача проволоки осуществлялась автоматически, с возможностью точной настройки скорости.

В качестве наплавляемого материала использовалась проволока ER308LSi диаметром 0,8 мм, обладающая повышенным содержанием кремния, способствующим лучшему формированию шва и снижению риска образования пор. В качестве защитной среды применялся аргон с расходом 30 л/мин, обеспечивающий стабильную дугу и защиту от окисления.

Подложки — стальные пластины из Стали 3, предварительно очищенные и обезжиренные. Для предотвращения повреждений токарного станка при подаче минуса, под приспособление, на которое крепится подложка, укладывалось резиновое уплотнение, выполняющее изолирующую функцию.

Пистолет от сварочного аппарата крепился к суппорту токарного станка, который двигался по запрограммированной подаче — именно она и задавала скорость движения горелки при наплавке. Такой подход позволяет получить строго постоянную скорость, сопоставимую с режимами, используемыми при промышленной роботизации.

Режимы наплавки:

Таблица 2.1 – Параметры эксперимента

Параметр	Значение
Скорость движения пистолета	82 мм/мин
Расстояние от сопла до подложки	5,5 мм
Сила тока	80 А
Напряжение дуги	21 В
Скорость подачи проволоки	3 м/мин
Расход защитного газа	30 л/мин (аргон)
Угол наклона горелки	90°
Стратегия укладки	одинарный валик по прямолинейной траектории, вертикальные слои
Количество слоев	7
Выдержка между слоями	отсутствует

Температурный контроль в эксперименте не осуществлялся из-за отсутствия подходящих датчиков (например, термопар типа К или TRM-модуля).



Рисунок 2.1 – Параметры, использованные в процессе наплавки

Этапы эксперимента

Наплавка стенок

В рамках первого этапа были наплавлены пять вертикальных стенок, каждая из которых формировалась из семи слоев. Все параметры оставались постоянными для каждой из стенок. Полученные образцы маркировались и откладывались для дальнейшей подготовки.



Рисунок 2.2 – Многослойный валик, образованный методом WAAM

Подготовка образцов

С каждой из стенок вырезались по два образца: один — в поперечном направлении, второй — в продольном. Образцы подвергались предварительной механической обработке: острые кромки стачивались вручную.



Рисунок 2.3 – Образцы, отшлифованные и отполированные с одной стороны

Шлифовка проводилась на полировально-шлифовальном станке Buehler, поэтапно:

1. Шлифовка наждачной бумагой 180р, затем 240р, 600р и 1200р
2. Полировка по стандарту: три круга с суспензиями 9 мкм, 3 мкм, 1 мкм.
3. Травление выполнялось раствором HF (плавиковая кислота) — 6 мл, HCl (соляная кислота) — 1.8 мл, HNO₃ (азотная кислота) — 6 мл, H₂O (вода) — 100 мл, экспозиция — 10 секунд.



Рисунок 2.4 - Шлифовка проводилась на полировально-шлифовальном станке Buehler

Микроструктурные исследования

Для проведения металлографических исследований в настоящей работе использовался инвертированный микроскоп Leica DMi LM (Leica Microsystems, Германия). Эта модель предназначена для анализа шлифов и полированных образцов с высокой точностью и качеством изображения. Основные характеристики микроскопа включают широкий диапазон увеличений (от 50× до 1000× в оптическом режиме) и возможность цифрового увеличения (до 5000× и выше) при использовании встроенной камеры и программного обеспечения для анализа изображений.

Микроскоп Leica DMi LM оснащён современной системой освещения и позволяет получать чёткие и контрастные изображения микроструктуры металлов и сплавов, включая видимые границы зёрен, включения и дефекты поверхности. Его конструкция инвертированного типа обеспечивает удобство работы с полированными шлифами и массивными образцами, характерными для металлографических исследований.

Для анализа и измерения полученных изображений использовалось программное обеспечение Enersight, интегрированное с микроскопом. Этот программный комплекс позволяет проводить автоматические измерения линейных и площадных характеристик структуры, анализировать распределение фаз и строить морфологические карты исследуемых материалов.

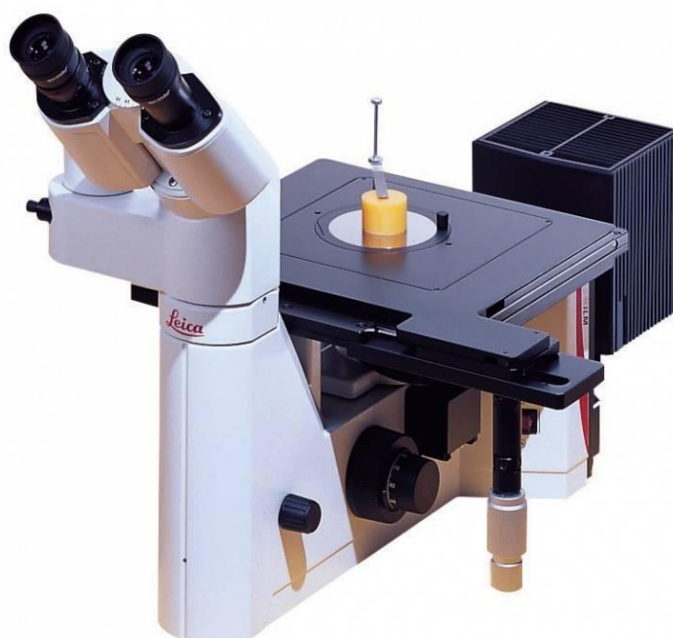


Рисунок 2.5 - Микроскоп Leica DMi LM

Основной задачей было выявление морфологии δ -феррита и его распределения относительно аустенитной матрицы. Известно, что в аустенитных нержавеющей сталях, таких как ER308LSi, формирование δ -феррита происходит в результате термических циклов сварки и аддитивного производства, включая процесс WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Образование δ -феррита в структуре может оказывать значительное влияние на механические свойства и коррозионную стойкость сварных соединений и наплавленных слоёв.

Морфология δ -феррита включает его форму (скелетообразная, точечная или сетчатая), размер, а также пространственное распределение по отношению к аустенитной матрице. Эти параметры важны для понимания механизмов формирования структуры при термической обработке и позволяют прогнозировать поведение материала при эксплуатации.

2.3 Контроль стабильности формирования валиков

Стабильность формирования наплавленных валиков является одним из ключевых показателей качества WAAM-процесса. Именно от геометрической повторяемости и надёжности межслойного слияния зависит возможность дальнейшего наращивания структуры без искажений, провалов и разрушений. В рамках данного эксперимента оценка стабильности осуществлялась комплексно: визуально, геометрически и на основе повторяемости результатов при использовании одних и тех же параметров.

После каждого прохода производился визуальный осмотр валика, с фиксацией следующих параметров:

- Равномерность ширины вдоль всей длины;
- Наличие провисаний, каплеобразных утолщений или пропусков;
- Степень смачивания подложки — по углу растекания;
- Отсутствие прожогов, пор или трещин;
- Контур границы валика (симметричность сечения).

Для одиночных валиков получены стабильно формируемые структуры с шириной в пределах 5–6 мм и высотой до 3 мм при скорости перемещения около 3000 мм/мин. Контур валика был устойчивым, с плавным переходом в подложку. Благодаря повышенному содержанию кремния в проволоке ER308LSi отмечалось хорошее растекание металла и отсутствие резких краевых утолщений.

В многослойных участках наплавка осуществлялась по схеме "валик на валик" без смещения. Высота каждого слоя составляла 1,5–2,0 мм. Контроль стабильности включал визуальную проверку повторяемости ширины и высоты, а также сплошности слияния. Межслойная адгезия оценивалась по равномерности растекания, отсутствию непроплавов и визуальному сцеплению. В отдельных участках выявлены локальные провалы и незначительные смещения, возникавшие при колебаниях угла пистолета, что обусловлено механическими ограничениями экспериментальной установки.

В итоге средняя толщина многослойного валика составила 7,5 мм, а общая высота 24 мм.

Также отмечено, что применение токарного станка как направляющей платформы дало положительный результат по контролю траектории, но имело ограничение по точности скорости перемещения, что в перспективе должно быть решено в рамках проектирования специализированной установки.

Таким образом, проведённый контроль показал, что при соблюдении выбранных параметров возможно получение стабильных и повторяемых валиков, пригодных для дальнейшего анализа структуры, а также подтверждающих работоспособность базовой схемы WAAM-наплавки.

2.4 Анализ макро- и микроструктуры

Для комплексной характеристики наплавленных образцов был проведён анализ их макро- и микроструктуры. В исследовании рассматривались четыре образца, полученные при одинаковых параметрах WAAM-процесса с использованием проволоки ER308LSi диаметром 0,8 мм. Наплавка производилась методом GMAW. Образцы исследовались в продольных и поперечных сечениях при помощи световой микроскопии.

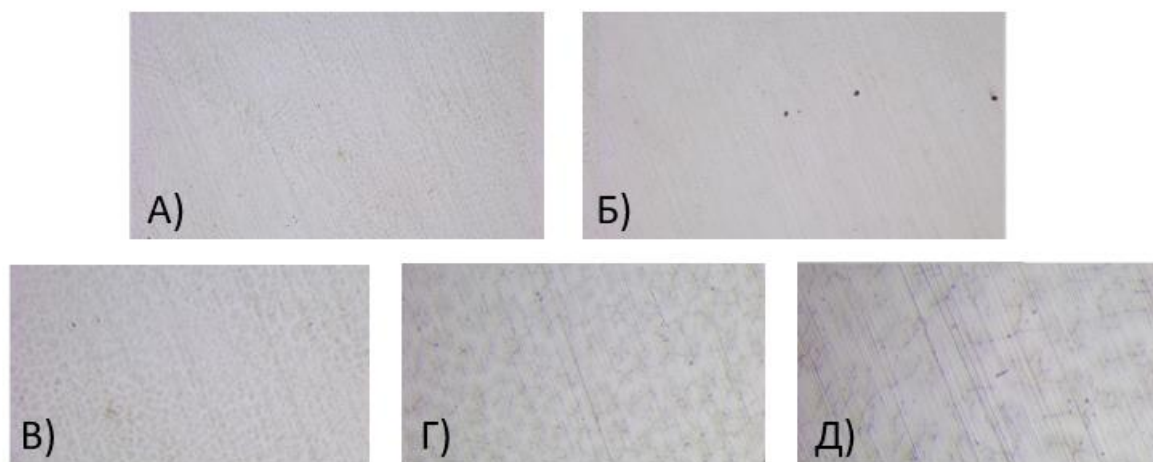


Рисунок 2.6 - Образец 1 – продольный срез. Увеличения А) 50х, Б) 100х, В) 200х, Г) 500х, Д) 1000х

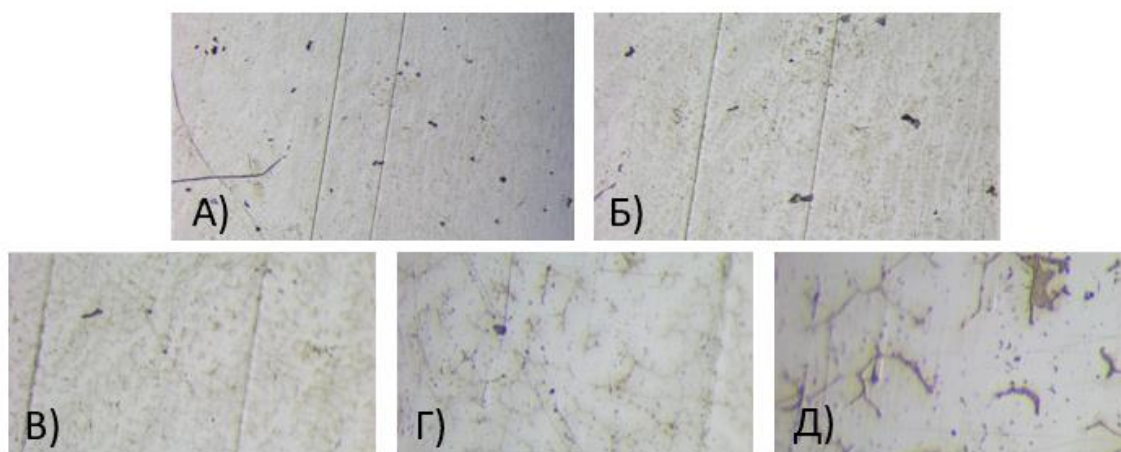


Рисунок 2.7 - Образец 1 – продольный срез. Увеличения А) 50х, Б) 100х, В) 200х, Г) 500х, Д) 1000х

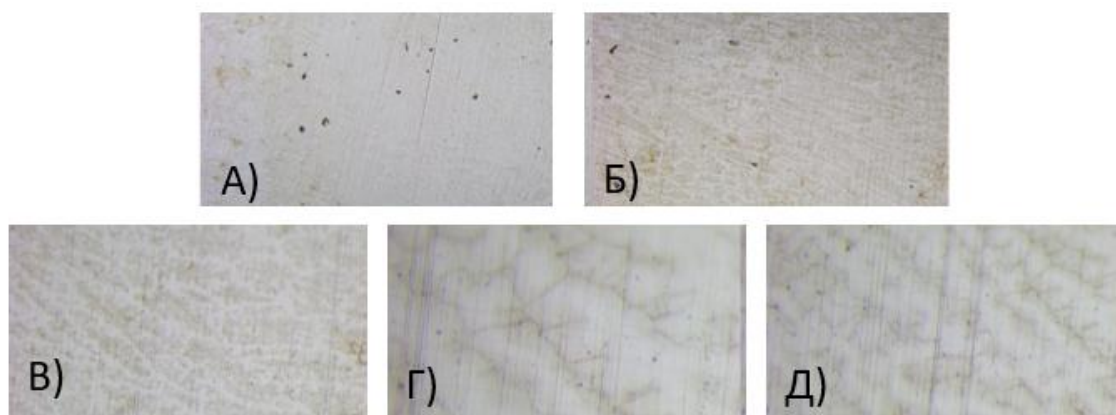


Рисунок 2.8 - Образец 2 – поперечный срез. Увеличения А) 50х, Б) 100х, В) 200х, Г) 500х, Д) 1000х

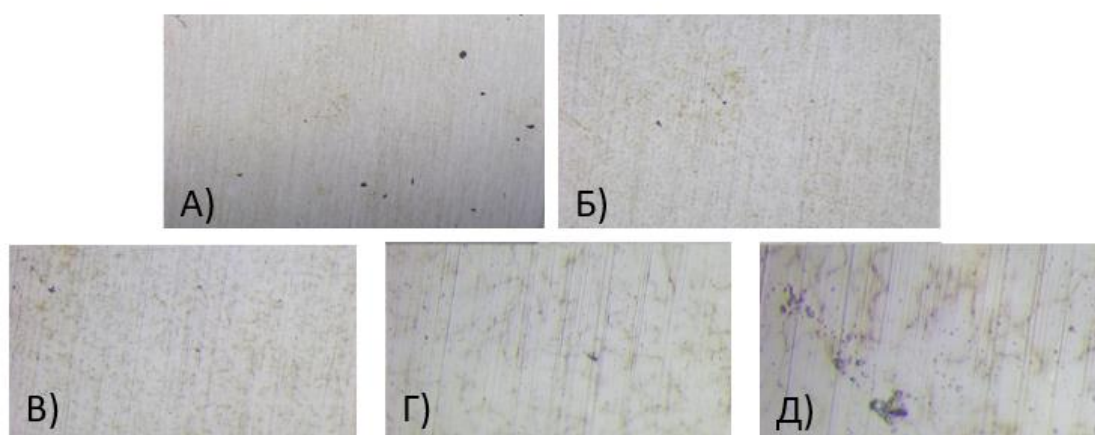


Рисунок 2.9 - Образец 2 – продольный срез. Увеличения А) 50х, Б) 100х, В) 200х, Г) 500х, Д) 1000х

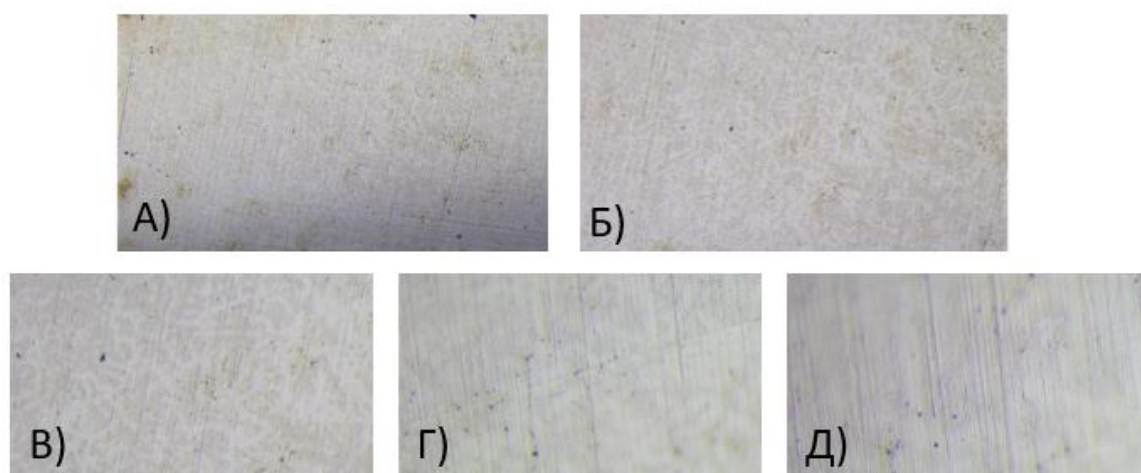


Рисунок 2.10 - Образец 3 – поперечный срез. Увеличения А) 50х, Б) 100х, В) 200х, Г) 500х, Д) 1000х

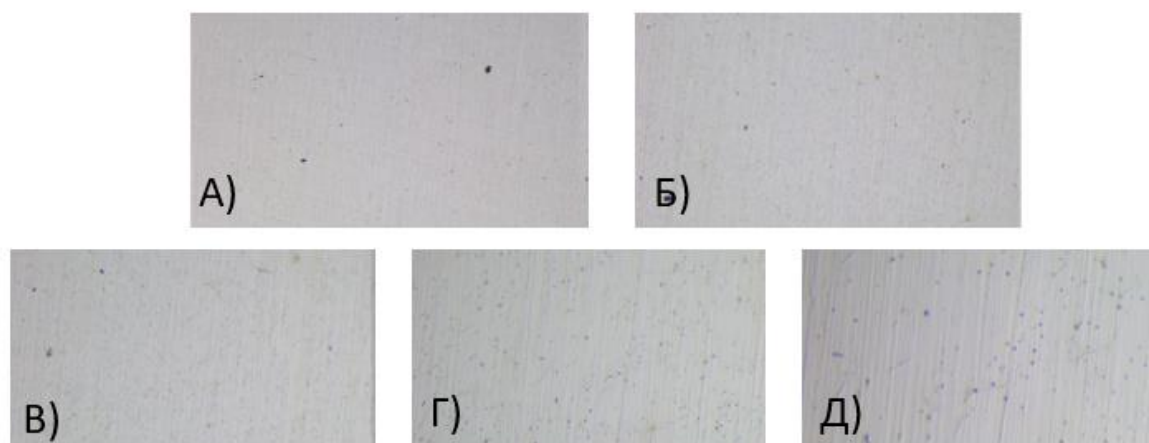


Рисунок 2.11 - Образец 3 – продольный срез. Увеличения А) 50х, Б)100х, В) 200х, Г) 500х, Д) 1000х

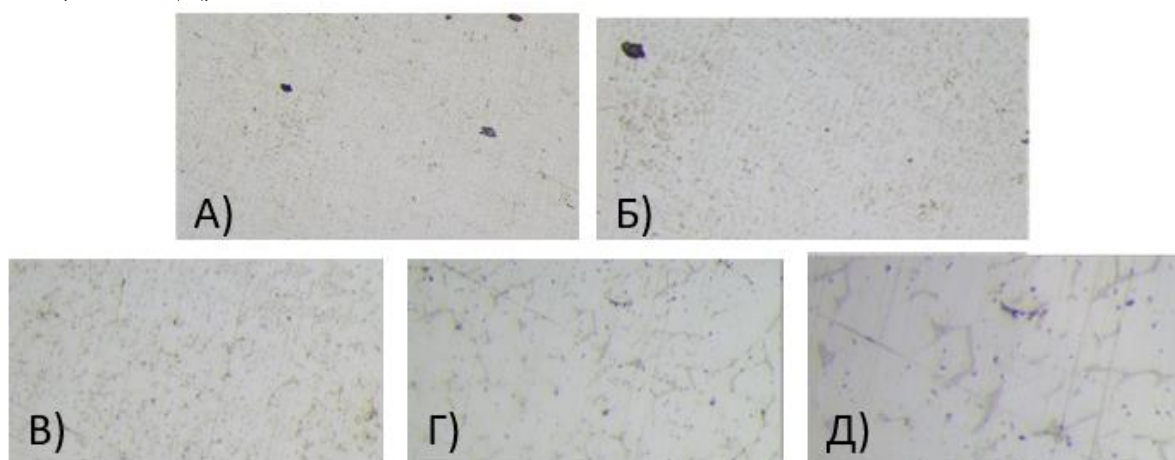


Рисунок 2.12 - Образец 4 – поперечный срез. Увеличения А) 50х, Б)100х, В) 200х, Г) 500х, Д) 1000х

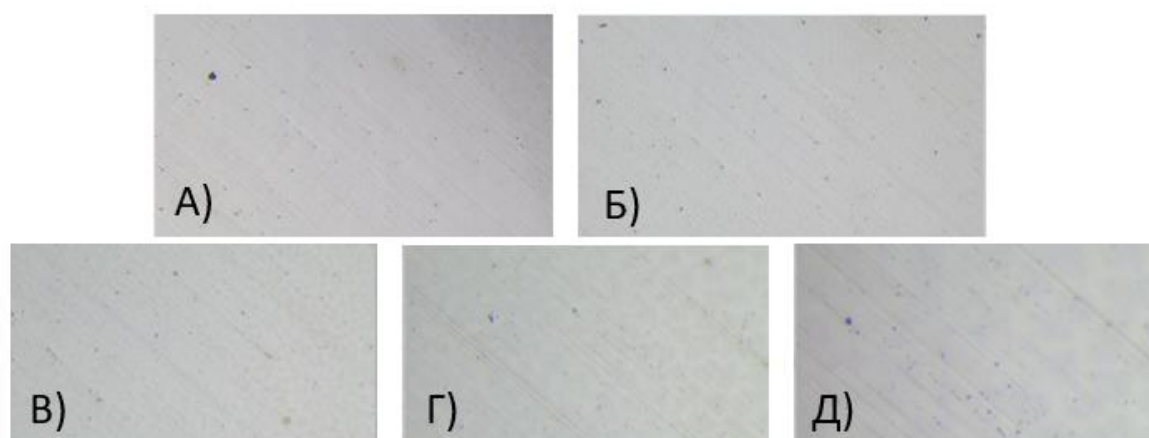


Рисунок 2.13 - Образец 4 – продольный срез. Увеличения А) 50х, Б)100х, В) 200х, Г) 500х, Д) 1000х

Макроструктура

Макроструктура всех четырёх исследованных образцов демонстрирует типичные для WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) характеристики. На поперечных и продольных срезах отчётливо видны слоистая структура и рельеф, образованный последовательной наплавкой материала. Каждый слой идентифицируется по слегка различающейся текстуре и оттенкам в микроскопическом изображении, что связано с особенностями кристаллизации и термической обработки каждого последующего слоя.

Общие наблюдения:

- Слои материала расположены равномерно, без значительных перекосов или нарушений в геометрии. Высота каждого слоя примерно одинакова, что свидетельствует о стабильности процесса наплавки.

- Межслойные границы заметны визуально, но при этом качественная связь между слоями сохраняется — отсутствуют крупные макропоры или расслоения. Это указывает на хорошую сплавляемость между слоями при наплавке.

- Контур каждого слоя в макроструктуре имеет характерное дугообразное очертание, типичное для сварочной ванны в процессе наплавки.

Особенности каждого образца:

- Образец 1 характеризуется достаточно ровной макроструктурой с минимальными волнистостями между слоями. Грани слоёв чётко просматриваются, но без явных дефектов.

- Образец 2 демонстрирует более выраженные колебания толщины слоёв. Возможно, это связано с небольшими изменениями стабильности дуги в процессе наплавки.

- Образец 3 отличается особенно однородной макроструктурой. Слои наплавлены с чёткой повторяемостью формы, межслойные границы едва заметны. Такой результат может указывать на максимально стабильный процесс в этом случае.

- Образец 4 имеет более выраженные линии между слоями. В некоторых зонах заметны локальные утолщения или небольшие наплывы материала, что может быть следствием колебаний температуры дуги или кратковременного изменения подачи проволоки.

Выводы по макроструктуре:

Анализ макроструктуры показал, что все четыре образца выполнены с достаточно высокой степенью качества, без значительных макродефектов. Однако локальные различия в толщине слоёв, их форме и выраженности межслойных границ подтверждают важность контроля стабильности параметров наплавки. Эти особенности макроструктуры могут оказывать влияние на механические свойства конечного изделия — прочность, пластичность и сопротивление трещинообразованию.

Микроструктура

Микроструктурный анализ всех четырёх образцов выявил важные особенности формирования структуры, связанные с технологией WAAM и применяемыми параметрами наплавки.

Общие закономерности микроструктуры:

- Основной вид структуры — это дендритная или ячеистая микроструктура, характерная для быстрых тепловых циклов при сварке дугой. Образуется в результате направленного роста кристаллов в зонах с наибольшим тепловым градиентом.

- Присутствуют термически изменённые зоны (heat-affected zones, HAZ), в которых отмечается перераспределение карбидов и изменение морфологии зёрен. Эти зоны обычно прилегают к границам наплавленных валиков.

- Локальные дефекты — мелкие поры, включения и микротрещины (особенно в зонах быстрого охлаждения), однако они встречаются редко и имеют малые размеры. Поры чаще всего имеют округлую форму, а включения — неправильную.

Особенности зеренной структуры:

- Вблизи подложки и между слоями наблюдается более мелкозернистая структура. Это связано с повышенной скоростью охлаждения в этих зонах.

- В центральных участках слоёв формируются более крупные зерна, вытянутые в направлении теплового градиента (продольная текстура).

- Границы зёрен хорошо различимы: они отмечены более насыщенным травлением. Видно, что зёрна вытянуты в направлении теплопереноса — от зоны расплава к более холодным участкам.

Индивидуальные особенности образцов:

- Образец 1

Имеет относительно равномерное распределение дендритной структуры с чёткими ячейками. Видны отдельные включения (поры), расположенные преимущественно вдоль линий роста дендритов. Субструктура ячеистая, с выраженной ориентировкой в направлении теплопереноса.

- Образец 2

Характеризуется большей неоднородностью: в некоторых зонах наблюдается более интенсивное травление, указывающее на локальную перегревку. Зёрна варьируют по размеру — от очень мелких до вытянутых (столбчатых). Это связано с неустойчивостью теплового поля во время наплавки.

- Образец 3

Показывает наиболее «спокойную» микроструктуру с минимальной неоднородностью. Зёрна имеют вытянутую форму, расположены более равномерно, без резких границ перехода. Количество включений минимально. Этот образец можно считать эталонным по стабильности формирования микроструктуры.

- Образец 4

Демонстрирует наибольшее количество микродефектов — поры и микротрещины более заметны. Структура ячеистая, но в некоторых зонах

зёрна раздроблены (вероятно, вследствие локальных температурных скачков). Это может негативно сказаться на механических свойствах при эксплуатации.

Цветовая картина (по травлению):

- Ярко выраженные линии травления, идущие вдоль слоя, указывают на межслойные границы.

- Фиолетовые оттенки в местах включений или пор — следствие локального насыщения травильным раствором в микроуглублениях.

- Более светлые области — это однородные ферритно-аустенитные области с низкой концентрацией дефектов.

Выводы по микроструктуре:

Микроструктурный анализ показал, что все четыре образца имеют типичную для WAAM-монолитов направленную структуру. Основные различия касаются степени неоднородности зеренной структуры и количества микродефектов. Эти различия напрямую связаны с колебаниями параметров процесса: стабильностью подачи проволоки, колебаниями температуры дуги и изменениями скорости наплавки. При этом Образец 3 демонстрирует наилучшую повторяемость и однородность микроструктуры, а Образец 4 — наибольшую степень локальных дефектов.

Таким образом, микроструктурный анализ подтверждает высокую повторяемость формирования направленной структуры при WAAM, но подчёркивает необходимость тонкой настройки процесса для минимизации дефектов.

Отличия между образцами

Несмотря на одинаковые параметры наплавки, микроструктура каждого из четырёх образцов имеет свои особенности:

- Образец 1 демонстрирует сравнительно равномерное распределение мелких точечных включений и вытянутых зёрен, характерных для устойчивого процесса наплавки.

- Образец 2 отличается более выраженной дендритной структурой, возможной локальной перегревной зоной, что проявляется в более активной сегрегации легирующих элементов.

- Образец 3 характеризуется меньшим количеством дефектов, структура выглядит более однородной, с чёткой ориентацией зёрен вдоль направления наплавки.

- Образец 4 имеет несколько зон с крупными скоплениями включений, а также выраженными сетчатыми областями, что может быть связано с локальными колебаниями температуры или нарушениями подачи материала.

Таким образом, результаты анализа показывают, что даже при одинаковых технологических параметрах каждый образец может демонстрировать индивидуальные особенности, связанные с микродефектами, локальной температурной историей и особенностями формирования структуры в процессе WAAM.

Эти наблюдения соответствуют данным, опубликованным в литературе [ссылка на базовую статью], подтверждая важность учёта локальных тепловых

условий при прогнозировании свойств материала. Общий характер микроструктуры соответствует типичной аустенитной структуре с возможным присутствием δ -феррита, что является нормальной особенностью сталей типа 308L, наплавленных с использованием GMAW.

2.5 Влияние микродефектов на эксплуатационные характеристики

Влияние микродефектов

Результаты микроструктурного анализа показали, что в наплавленных слоях присутствуют поры, включения и локальные участки неоднородной структуры. Эти микродефекты снижают эксплуатационную надёжность изделий, так как становятся концентраторами напряжений и потенциальными зародышами трещин при внешней нагрузке. Поры и микротрещины могут снижать сопротивление усталости и ударной вязкости, особенно в многослойных структурах, получаемых при WAAM.

В большинстве случаев выявленные поры имеют округлую форму и малый диаметр (единицы-десятки микрометров). При статических нагрузках их влияние на прочность незначительно, однако при циклическом нагружении или работе в агрессивных средах такие дефекты могут стать причиной преждевременного разрушения.

Кроме того, неоднородная зеренная структура в некоторых участках (особенно в Образце 2) может приводить к локальным различиям механических свойств. Более крупные зёрна обладают пониженной прочностью при динамических и ударных нагрузках, что важно учитывать при проектировании изделий.

Влияние термического цикла

Важную роль в формировании микродефектов играет тепловой цикл, сопровождающий наплавку. В условиях WAAM с GMAW локальные перегревы и быстрое охлаждение могут вызывать термические напряжения, которые, в свою очередь, способствуют образованию пор и трещин. Особенно это заметно в зонах между слоями и около подложки, где температурные градиенты максимальны.

2.6 Термообработка готового изделия и её влияние на структуру

Одним из наиболее эффективных способов устранения микродефектов и повышения эксплуатационных характеристик изделий, полученных методом WAAM, является термообработка. Термообработка позволяет снизить уровень остаточных напряжений, уменьшить неоднородность микроструктуры и повысить пластичность и вязкость материала.

Основные виды термообработки, которые могут применяться для изделий из нержавеющей стали (например, при использовании проволоки ER308LSi), включают:

- Отжиг (рекристаллизационный). При нагреве до температуры порядка 1050–1100 °С (в зависимости от состава сплава) и выдержке в течение 0,5–2 часов зеренная структура материала перераспределяется. Это приводит к снижению внутренних напряжений, более равномерной структуре и уменьшению склонности к межкристаллитной коррозии. При последующем охлаждении (обычно на воздухе или в воде) аустенитная матрица стабилизируется, а δ -феррит может быть частично растворён.

- Стабилизирующий отжиг. Применяется для снижения количества δ -феррита, который, хотя и повышает трещиностойкость, но в избытке может ухудшать пластичность. Стабилизирующий отжиг способствует частичному растворению δ -феррита и выравниванию структуры.

- Нормализация. Хотя для нержавеющей стали применяется редко, в некоторых случаях нормализация (нагрев выше критической температуры и последующее охлаждение на воздухе) также используется для стабилизации структуры.

При термообработке зерна аустенита становятся более однородными и округлыми, снижается доля вытянутых структур и дендритной текстуры, что улучшает изотропность механических свойств. Частично растворяются включения (особенно если это карбиды или сегрегации легирующих элементов), что повышает коррозионную стойкость. Кроме того, снижаются остаточные напряжения, что положительно сказывается на сопротивлении усталостному разрушению. При правильном подборе температуры и времени выдержки можно частично уменьшить количество пор, особенно если они связаны с диффузией газов в твёрдой фазе.

Для изделий, которые предполагается использовать в динамически нагруженных конструкциях или подвергать механической обработке, термообработка позволяет значительно повысить надёжность. Особенно это актуально в зоне между слоями, где термические градиенты приводят к концентрации δ -феррита и остаточных напряжений. Термообработка сглаживает эти эффекты и делает структуру более устойчивой к разрушению.

2.7 Использование инертной среды

При реализации процесса WAAM одним из факторов, существенно влияющих на качество наплавки, является взаимодействие расплавленного металла с атмосферным воздухом. В условиях обычной дуговой сварки в защитном газе (например, в режиме GMAW) основной защитой служит струя газа, подаваемого через сопло сварочного пистолета. Однако при наплавке крупных деталей или в условиях ограниченного газового покрытия возможно

образование оксидных включений, пор и других дефектов, связанных с попаданием кислорода и водяных паров.

Создание замкнутой камеры с инертной атмосферой (например, заполненной аргоном или гелием) позволяет значительно улучшить условия защиты зоны наплавки. В такой камере обеспечивается полное вытеснение воздуха, что предотвращает окисление и снижает вероятность образования пор, особенно при наплавке аустенитных нержавеющей сталей. Дополнительно снижается риск образования нитридов и карбидов, которые могут ухудшить коррозионную стойкость и пластичность изделия.

Возможность создания закрытой камеры для WAAM-принтера зависит от размеров изделия, конструкции самого принтера и экономической целесообразности. Для небольших и средних по размеру деталей реализация закрытой камеры представляется технически возможной. В конструкцию могут быть интегрированы:

- герметичный кожух из нержавеющей стали или алюминия с окнами для наблюдения;
- система автоматической подачи и поддержания уровня инертного газа;
- шлюз для загрузки проволоки и заготовок без потери защитной атмосферы.

Преимущества такой камеры заключаются в улучшенной защите зоны сварки по сравнению с обычной подачей газа через сопло пистолета. Это особенно важно при многослойной наплавке, где межслойные зоны могут окисляться между проходами при перерывах или при неидеальном потоке газа.

Тем не менее, при оценке целесообразности внедрения закрытой камеры необходимо учитывать экономические и конструкционные ограничения. Устройства для поддержания инертной атмосферы требуют дополнительных расходов на газ и оборудование, а также увеличивают стоимость установки. В большинстве случаев для небольших партий или опытных образцов достаточно тщательно организованной подачи защитного газа из сопла, при условии отсутствия сквозняков и хорошей вентиляции в зоне работы.

Таким образом, создание закрытой камеры с инертной атмосферой действительно способно повысить качество наплавки, особенно в отношении пористости и коррозионной стойкости изделий. Однако её внедрение должно быть обосновано предполагаемыми эксплуатационными требованиями и экономической эффективностью процесса.

2.8 Выводы по применимости WAAM

Проведённые исследования подтвердили, что технология WAAM обладает значительным потенциалом для производства крупногабаритных металлических деталей с хорошей воспроизводимостью формы и высокой степенью гибкости. Основные выводы можно обобщить следующим образом:

– Несмотря на наличие дефектов (микропоры, неравномерность структуры, локальное окисление), WAAM позволяет получать слоистую структуру наплавленного металла с характерными зонами термического влияния и ориентированными зёрнами.

– Установлено, что термообработка наплавленного изделия способствует перераспределению остаточных напряжений, уменьшению пористости и выравниванию структуры, повышая эксплуатационные свойства материала.

– Применение инертной атмосферы и закрытых камер при наплавке способно существенно снизить содержание кислорода в зоне плавления и, следовательно, уменьшить образование оксидных включений и пор.

– Результаты экспериментов показали, что ключевым фактором при WAAM остаётся стабильность подачи газа: даже небольшие отклонения, например, засорение сопла, приводят к изменению формы валика и структуре металла. –

– Выявленные особенности формирования структуры в условиях WAAM открывают перспективы для дальнейшей оптимизации режимов наплавки, включая регулирование параметров тока, скорости наплавки и характеристик защитного газа.

Таким образом, технология WAAM применима для изготовления прототипов и малосерийного производства конструкций из нержавеющей стали и других материалов. Однако для повышения качества изделий требуется дальнейшая проработка режимов наплавки, оптимизация газовой защиты и внедрение систем автоматического контроля.

2.9 Выводы по главе 2

В рамках второй главы диссертационной работы проведён комплексный экспериментальный анализ WAAM-процесса с использованием аустенитной сварочной проволоки ER308LSi. Основные выводы по результатам исследований можно сформулировать следующим образом:

– Эксперимент подтвердил возможность формирования многослойных металлических конструкций методом WAAM с использованием стандартного оборудования — источника питания MIG 220S и токарного станка в качестве платформы для движения пистолета. Полученные образцы обладают удовлетворительной геометрией валиков и достаточной сплошностью структуры.

– Анализ макроструктуры показал характерную слоистую структуру с чётко выраженными межслойными границами. В большинстве случаев наплавленные слои имели стабильную форму, однако локальные отклонения в толщине и ширине валиков указывают на важность прецизионного контроля режимов наплавки.

– Микроструктурные исследования выявили типичную для WAAM ячеисто-дендритную структуру аустенита с локальной ориентацией зёрен вдоль теплового градиента. В различных образцах наблюдаются различия в размерах зёрен, количестве пор и включений, что связано с локальными изменениями теплового цикла при наплавке.

– Зафиксированы дефекты в виде микропор, включений и зон неоднородного охлаждения, которые могут снижать механические свойства изделий. При этом Образец 3 продемонстрировал наиболее стабильную и однородную микроструктуру, а Образец 4 — наибольшее количество локальных дефектов.

– Выявлено влияние стабильности подачи защитного газа на формирование структуры валика. Засорение сопла в одном из опытов привело к неравномерной подаче газа и ухудшению геометрии и качества металла в зоне наплавки.

– Проведённый анализ подтвердил, что термообработка готовых изделий может служить эффективным инструментом для снижения остаточных напряжений, улучшения структуры и устранения дефектов, а создание закрытой камеры с инертной атмосферой позволит дополнительно снизить содержание кислорода и улучшить защиту сварочной ванны.

Таким образом, результаты главы 2 демонстрируют возможность успешного применения WAAM-процесса с ER308LSi в условиях лабораторной установки. При этом подчёркивается необходимость дальнейшей оптимизации режимов наплавки и разработки конструктивных решений для повышения стабильности процесса и качества наплавленных изделий.

3 Проектирование 3D-принтера для WAAM с учётом требований гибридной технологии

3.1 Целесообразность гибридного подхода в WAAM

В последние годы технология WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) демонстрирует значительный прогресс, обеспечивая высокую производительность и гибкость при производстве крупногабаритных металлических конструкций. Однако основной проблемой остаётся обеспечение стабильных механических свойств и точной геометрии наплавленных изделий. Эти задачи могут быть эффективно решены с помощью гибридного подхода, который объединяет аддитивное изготовление и последующую механическую обработку.

Гибридная технология позволяет интегрировать процессы наплавки металла и механической доработки в едином производственном цикле. Такой подход обеспечивает следующие преимущества:

- Повышение точности: после каждого слоя или группы слоёв возможно локальное фрезерование или шлифование, устраняющее деформации, обеспечивая высокую точность геометрии изделия.

- Улучшение качества поверхности: механическая обработка снижает шероховатость и дефекты поверхности, что особенно важно для функциональных и монтажных поверхностей.

- Контроль внутренних напряжений: гибридный процесс позволяет регулировать уровень остаточных напряжений и устранять их с помощью промежуточной механической обработки.

- Оптимизация структуры: совмещение WAAM с механической обработкой способствует формированию более равномерной структуры, снижая влияние возможных дефектов наплавки.

Таким образом, применение гибридного подхода в WAAM представляет собой целесообразное направление для повышения качества наплавленных изделий. Это особенно актуально при производстве деталей сложной формы, где требуются высокая точность размеров и стабильные механические свойства. В последующих подразделах будут рассмотрены проектные и конструктивные особенности 3D-принтера, обеспечивающего реализацию гибридной технологии WAAM.

3.2 Концепция портальной установки: требования и конструктивные особенности

Для реализации гибридной технологии WAAM необходима установка, сочетающая высокую точность перемещений сварочной головки и достаточную жёсткость для последующей механической обработки. В рамках данного исследования в качестве концепции выбрана портальная установка,

которая обеспечивает доступ к обрабатываемой детали с трёх сторон и возможность интеграции фрезерной оснастки.

Основные требования к конструкции:

Жёсткость и виброустойчивость

Конструкция установки должна обеспечивать высокую жёсткость при динамических нагрузках, возникающих как при наплавке, так и при механической обработке. Это предотвращает колебания и смещения сварочной головки, что особенно важно при многослойной наплавке.

Универсальность

Установка должна позволять работу с различными по размеру заготовками и материалами. Конструкция рамы предусматривает возможность адаптации высоты и ширины рабочего пространства.

Точность позиционирования

Прецизионные направляющие и приводы с ЧПУ должны обеспечивать точность перемещения сварочной головки в пределах десятков микрон, что особенно важно для формирования правильной геометрии слоёв.

Возможность интеграции гибридной обработки

Конструкция должна предусматривать установку шпиндельной головки или другой фрезерной оснастки, что позволяет реализовать локальное фрезерование слоёв в процессе наплавки.

Конструктивные особенности порталной рамы:

Рама выполнена в виде сварной конструкции из профильных труб, что обеспечивает необходимую жёсткость при относительно низкой массе. Для повышения виброустойчивости возможно заполнение профилей инертным материалом (например, щебнем или песком).

Направляющие расположены вдоль осей X, Y и Z, обеспечивая перемещение сварочной головки и оснастки. Применяются линейные направляющие промышленного типа, обладающие высокой износостойкостью.

Приводы представляют собой шаговые или сервомоторы, управляемые ЧПУ-системой. Это обеспечивает плавное и точное позиционирование головки, а также возможность реализации различных стратегий наплавки.

Механизмы фиксации головки и заготовки выполнены с возможностью быстрой перенастройки и адаптации к разным задачам, что расширяет функционал установки.

Интеграция подачи газа и электрических цепей предусмотрена таким образом, чтобы минимизировать помехи для перемещений и обеспечить надёжную защиту сварочной ванны.

В последующих разделах будут рассмотрены вопросы расчёта жёсткости конструкции, выбора конкретных компонентов (направляющих, моторов, системы управления) и возможность повышения устойчивости к вибрациям.

3.3 Моделирование портального 3D-принтера и расчет конструкции на жесткость

В качестве 3D-принтера предлагается такая портальная установка, которая обладает рядом уникальных особенностей и преимуществ по сравнению с традиционными решениями для WAAM.

Основная особенность конструкции заключается в её портальной архитектуре с прочной рамой и возможностью интеграции всех необходимых компонентов для WAAM: держателей горелки, системы подачи проволоки и датчиков мониторинга процесса. Это позволяет минимизировать вибрации и обеспечивать высокую точность позиционирования сварочной головки в процессе наплавки.

К преимуществам установки относятся:

- Высокая жёсткость и стабильность конструкции: портальная рама выполнена из профильных труб с оптимальным сечением, что позволяет эффективно сопротивляться нагрузкам от привода подачи проволоки и массы горелки.

- Универсальность применения: конструкция может быть адаптирована под различные задачи в рамках WAAM — от наплавки тонкостенных образцов до крупных деталей.

- Открытая компоновка: удобство доступа к зоне наплавки упрощает настройку параметров и визуальный контроль процесса, что особенно важно при опытных и лабораторных испытаниях.

- Возможность создания закрытой камеры: установка может быть оснащена панелями из стекла или поликарбоната, формируя замкнутую среду для защиты от сквозняков и стабилизации температуры. Это особенно важно для наплавки высококачественных металлических изделий.

- Простота модификации и масштабирования: конструкция легко адаптируется к изменению размеров рабочей зоны или установке дополнительного оборудования (например, системы контроля температуры или изменения режима подачи газа).

Все эти преимущества делают портальную установку не только надёжной платформой для WAAM, но и удобным инструментом для проведения экспериментальных исследований, а также для малосерийного производства металлических изделий.

Моделирование расчёта жёсткости портальной установки в Autodesk Inventor

Для определения жёсткости конструкции портальной установки 3D-принтера выполнен статический расчёт с использованием модуля Stress Analysis в Autodesk Inventor.

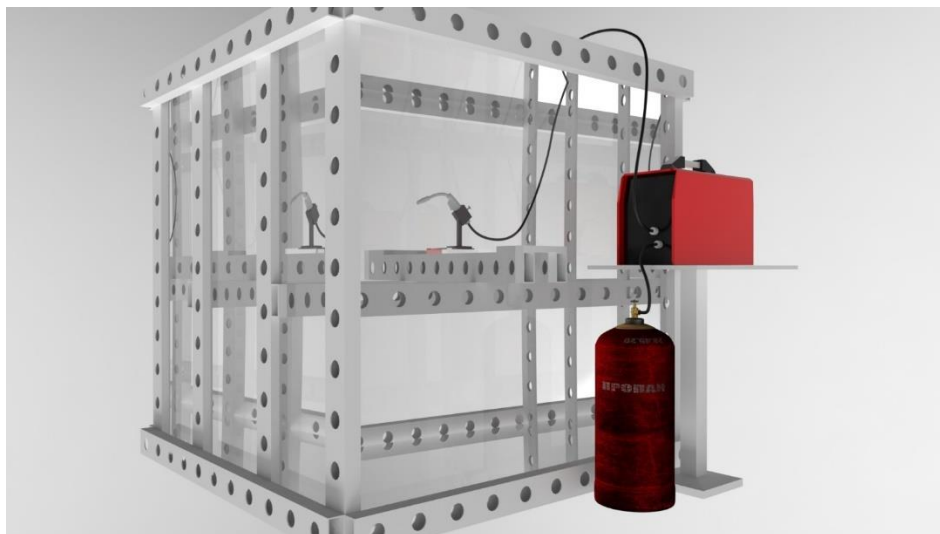


Рисунок 3.1 – Упрощенная модель 3D-принтера по металлу

Была создана 3D-модель рамы, состоящая из профильных труб сечением 40×40 мм и толщиной стенки 2 мм.

Граничные условия

Нижняя плоскость рамы зафиксирована по всем степеням свободы.

– На верхнюю часть плиты, на которой установлена головка, направлена сила 3000 Н, направленная вниз (симуляция массы привода и сварочного пистолета, а также возможных динамических нагрузок).

Материал

– Сталь конструкционная Ст3, модуль упругости 210 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3.

Сетка

– Автоматическая генерация сетки с уточнением в зонах концентрации напряжений.

Результаты расчёта:

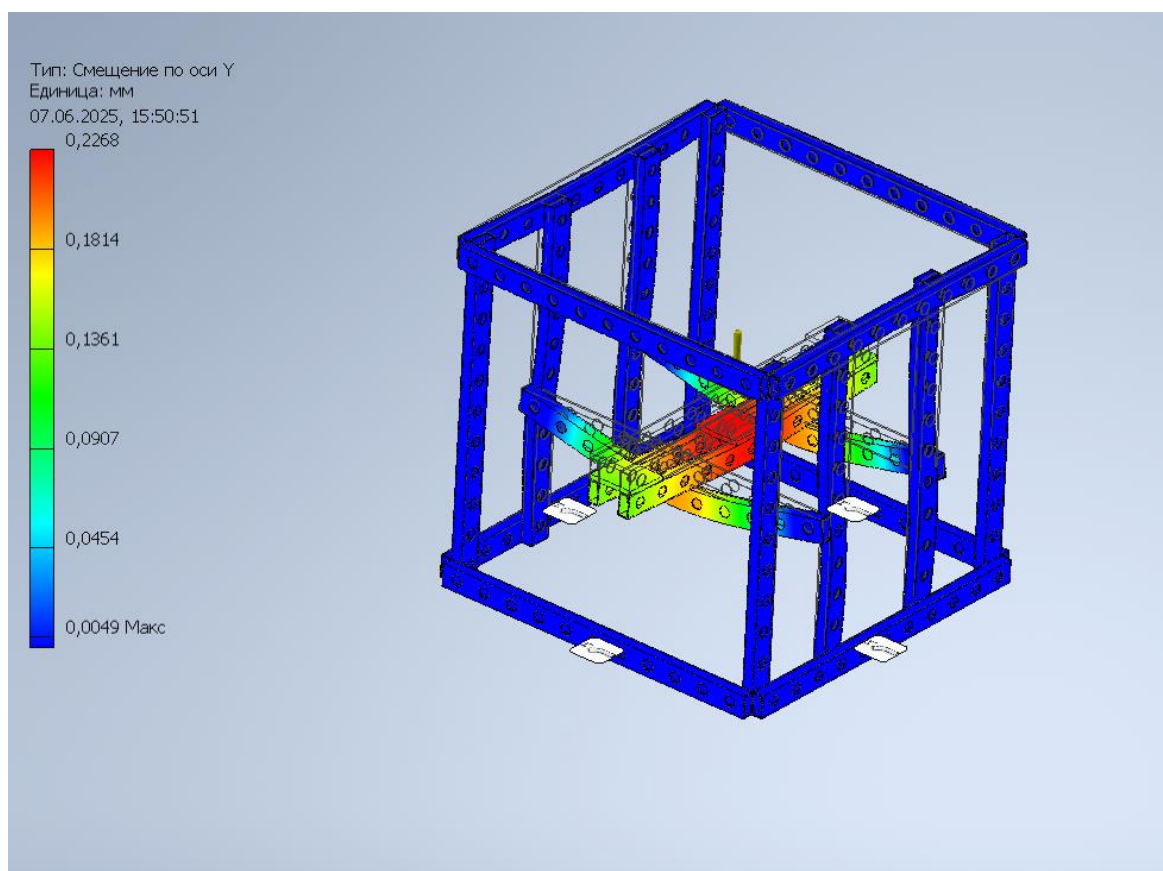


Рисунок 3.2 – Смещение по оси Y

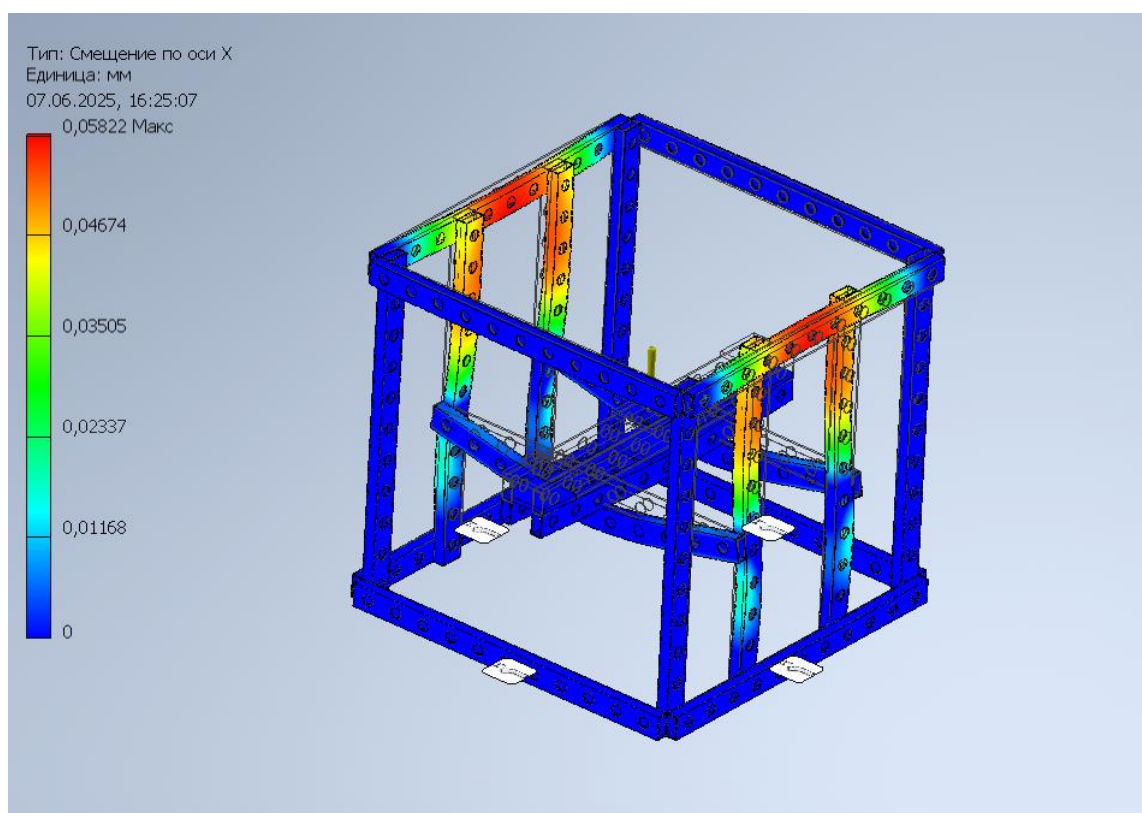


Рисунок 3.3 – Смещение по оси X

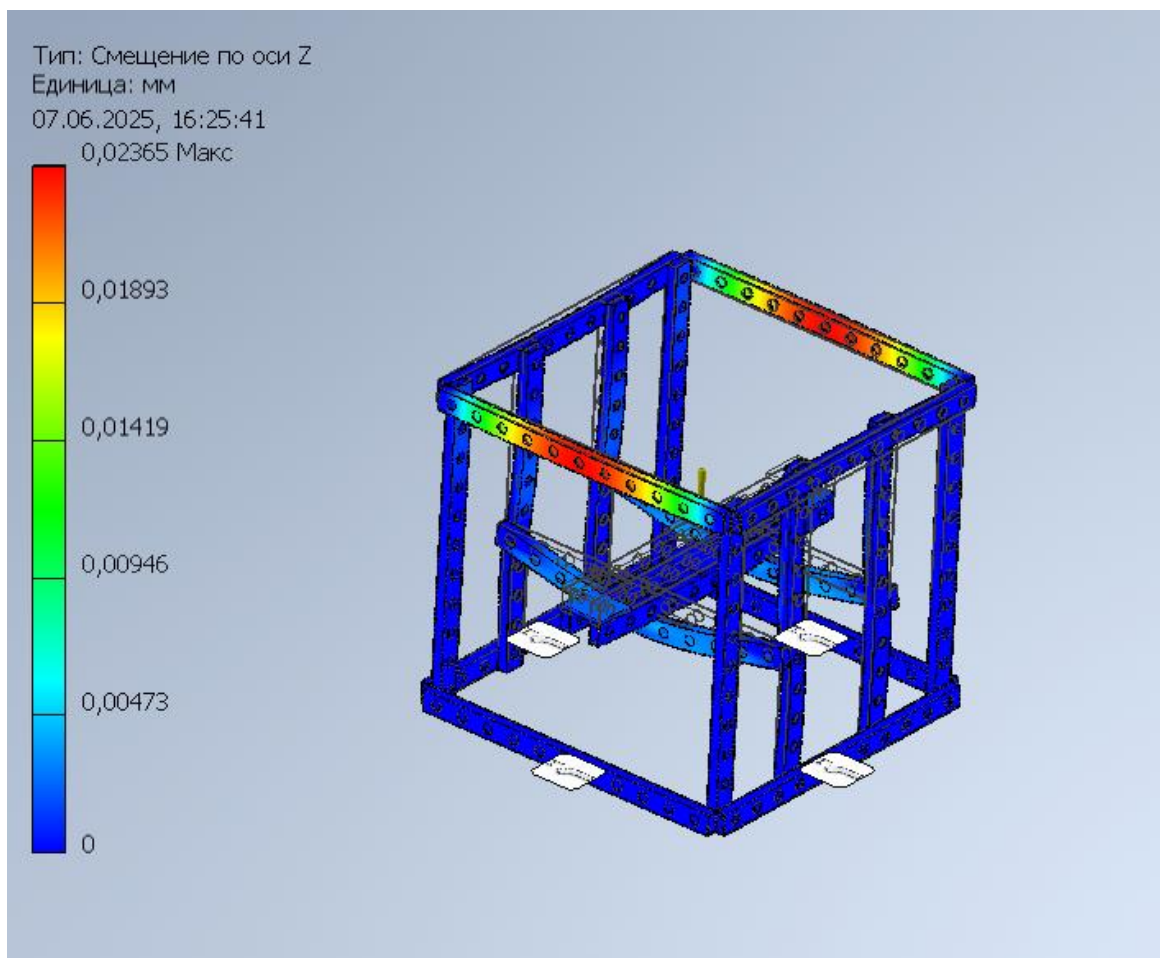


Рисунок 3.4 – Смещение по оси Z

Для того, чтобы рассчитать жесткость конструкции, нам необходимо использовать формулу:

$$k = \frac{F}{\Delta l} \quad (1)$$

Итак, для каждой оси рассчитаем:

Для оси X

$$k_x = \frac{3000 \text{ (Н)}}{0,058 \text{ (мм)}} = 51724 \frac{\text{Н}}{\text{мм}} \quad (2)$$

Для оси Y

$$k_y = \frac{3000 \text{ (Н)}}{0,23 \text{ (мм)}} = 13043 \frac{\text{Н}}{\text{мм}} \quad (3)$$

Для оси Z

$$k_z = \frac{3000 \text{ (Н)}}{0,024 \text{ (мм)}} = 125000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}} \quad (4)$$

Исходя из полученных результатов, можно сказать с уверенностью, что конструкция достаточно жесткая.

– Максимальное напряжение (по Мизесу): ~18,4 МПа, что является абсолютно незначительным по сравнению с пределом текучести стали (240 МПа для St3).

– Максимальный прогиб конструкции: ~0,2 мм, что является отличным показателем для данного типа установки и не приведёт к ухудшению точности 3D-печати.

– Коэффициент запаса прочности: ~15.

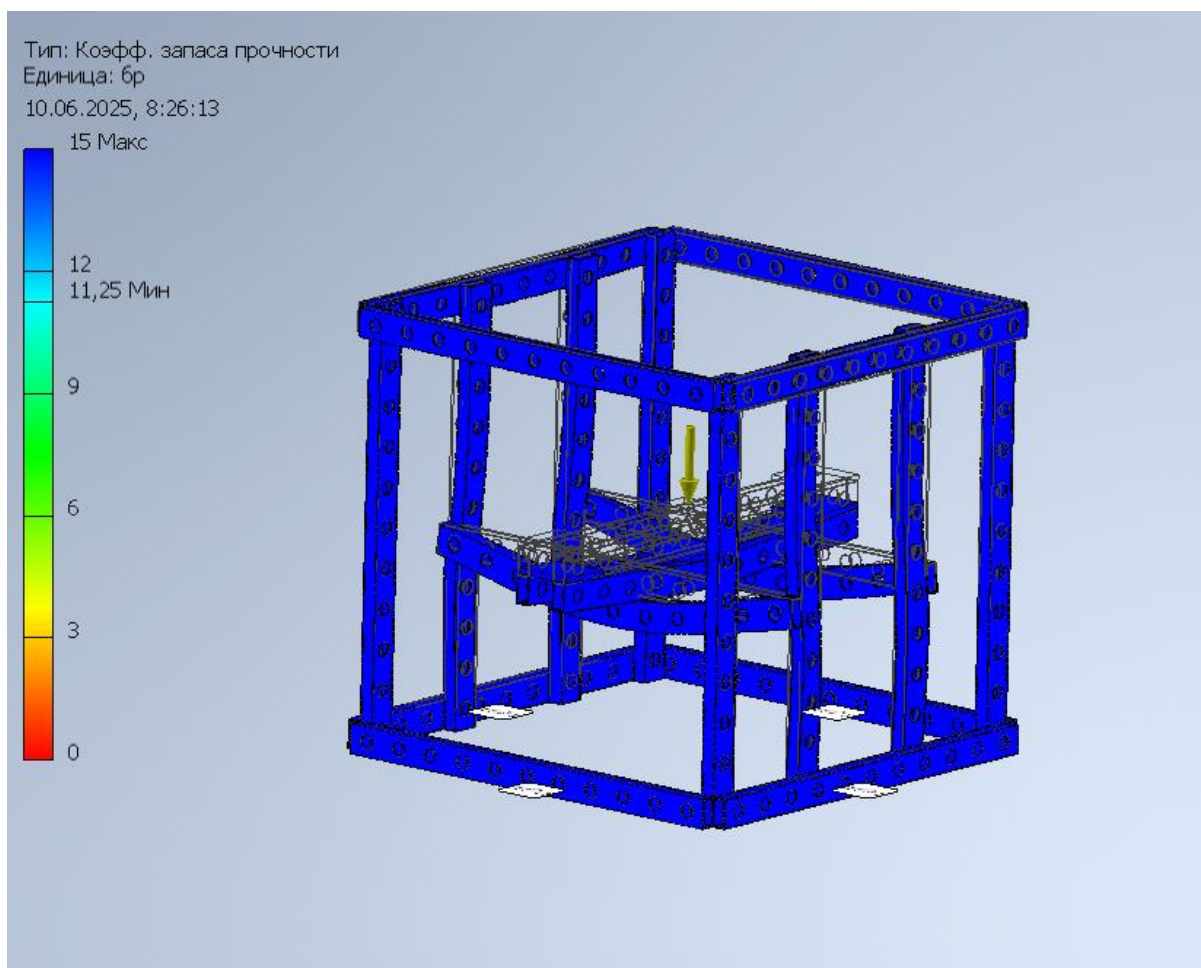


Рисунок 3.5 – Коэффициент запаса прочности

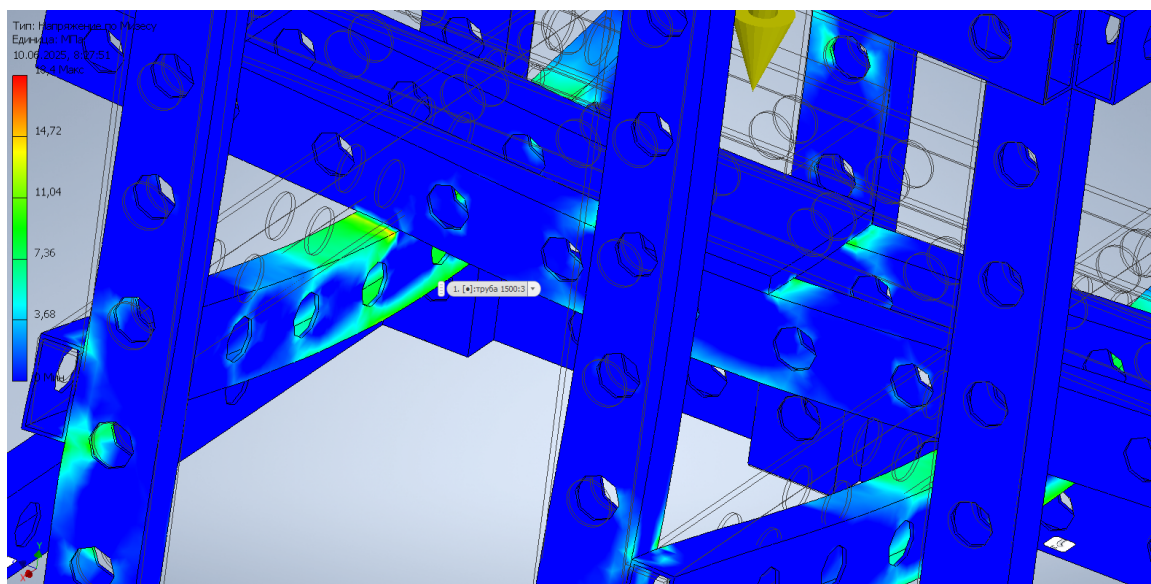


Рисунок 3.6 – Напряжение по Мизесу

Вывод

- Конструкция портальной рамы обладает достаточной жёсткостью с большим запасом при нагрузке 3000 Н.
- Полученные прогибы находятся в пределах допустимых значений для большинства промышленных применений.
- Конструкция способна выдерживать подобные нагрузки без остаточных деформаций, при условии корректного монтажа и использования качественного материала.

3.4 Универсальная платформа: перспективы доработки и масштабирования

Разработанная портальная установка представляет собой универсальную платформу для технологии WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Благодаря высокой жёсткости и открытой конструкции, установка может быть адаптирована под различные модификации процесса WAAM, включая выбор проволоки, изменение размеров изделий и гибкую настройку параметров наплавки.

Перспективы доработки заключаются в следующем:

- Масштабирование рабочей зоны. Конструкция позволяет увеличивать габариты зоны наплавки путём удлинения направляющих и применения более жёстких профилей. Это обеспечит возможность изготовления более крупных металлических изделий без ущерба для точности процесса.
- Интеграция датчиков и интеллектуальных систем управления. Внедрение системы мониторинга (температуры, перемещений и параметров

сварки) позволит автоматизировать контроль качества и оптимизировать режимы наплавки.

- Создание закрытой камеры. Возможность закрыть рабочую зону стеклянными или поликарбонатными панелями позволяет сформировать замкнутую камеру. Это существенно снизит влияние сквозняков и колебаний температуры окружающей среды, а также обеспечит защиту процесса от попадания пыли и влаги. В случае применения защитного газа (например, аргона) закрытая камера поможет обеспечить стабильные параметры газовой защиты сварочной дуги. Всё это способствует более качественному формированию валика и повышению однородности структуры металла.

- Гибкость настройки. Конструкция установки предусматривает простую замену или модификацию основных компонентов (например, держателей сварочной горелки, оснастки для подачи проволоки). Это позволяет быстро переходить к новым конфигурациям процесса WAAM, сохраняя общую геометрию и надёжность установки.

Таким образом, данная платформа в рамках WAAM обладает высоким потенциалом для модернизации и адаптации, что делает её перспективным решением как для лабораторных исследований, так и для малосерийного производства металлических изделий.

3.5 Расчет экономической эффективности разработки

Для оценки экономической эффективности разработанной WAAM-установки рассмотрим следующие параметры:

- Стоимость сварочного источника (аппарата):
 - бюджетная модель: 200 000 ₹
 - профессиональная модель: 700 000 ₹
- Расход аргона при наплавке:
 - средний расход: 20 л/мин
 - плотность аргона при 20 °С и 1 атм: $\approx 1.784 \text{ кг/м}^3$
 - цена аргона: 600 ₹ за 1 м³ (или 600 ₹/1000 л)
- Энергопотребление аппарата:
 - мощность: $\sim 3 \text{ кВт}$
 - цена за 1 кВт·ч: 25 ₹
 - продолжительность одного часа наплавки: 1 ч
- Материал – сварочная проволока ER308LSi:
 - цена: 1800 ₹/кг
 - средний расход проволоки: 1.2 кг/ч

Формула расчёта полной себестоимости наплавки:

Себестоимость 1 часа наплавки (S), тг/ч:

$$S = C_{\text{газ}} + C_{\text{эл}} + \frac{C_{\text{оборуд}}}{T} \quad (5)$$

где $C_{\text{газ}}$ — стоимость аргона, тг;
 $C_{\text{эл}}$ — стоимость электроэнергии, тг;
 $C_{\text{оборуд}}$ — стоимость аппарата, тг;
 T — срок службы в часах (примем 5000 ч для расчёта амортизации).

1. Стоимость аргона:

$$20 \text{ л/мин} \times 60 = 1200 \text{ л/ч} \quad (6)$$

$$C_{\text{газ}} = \frac{600}{1000} * 1200 = 720 \frac{\text{тг}}{\text{час}} \quad (7)$$

2. Электроэнергия:

$$C_{\text{эл}} = 3 \text{ кВт} * 25 = 75 \text{ тг/ч} \quad (8)$$

3. Амортизация:

– Бюджетный аппарат:

$$\frac{200000}{5000} = 40 \text{ тг/ч} \quad (9)$$

– Профессиональный аппарат:

$$\frac{70000}{5000} = 140 \text{ тг/ч} \quad (10)$$

Итого

Вариант 1: бюджетный аппарат

$$S = 720 + 75 + 2160 + 40 = 2995 \text{ тг/ч}$$

Вариант 2: профессиональный аппарат

$$S = 720 + 75 + 2160 + 140 = 3095 \text{ тг/ч}$$

Металлоконструкция (рама):

– Материал: сталь 3, профильная труба 40×40×2 мм

– Габариты установки: 1000×1000×500 мм

– Протяжённость труб: ~12 метров

– Масса трубы: ~2.45 кг/м

– Общая масса: $12 \times 2.45 = 29.412 \times 2.45 = 29.412 \times 2.45 = 29.4 \text{ кг}$

– Цена стали 3: ~500 ₴/кг

$$C_{\text{рама}} = 29.4 \cdot 500 = 14,700 \text{ тг} \quad (11)$$

Механика и приводы

Направляющие, шаговики, винты, крепёж – 69000 тг

Электроника и управление

Arduino, драйверы, датчики, БП – 30000 тг

Таблица 3.1 - Общая стоимость установки

Элемент	Сумма, тг
Металлоконструкция	14,700
Механика	69,000
Электроника	30,800
Прочее	20,000
Сварочный аппарат (средняя цена)	450,000
ИТОГО	584,500 ₸

Расчёт окупаемости

Предположим, что услуги WAAM-печати стоят 6000 тг/ч. Тогда:

– Прибыль с одного часа:

$$6000 - 3045 = 2955 \text{ ₸}$$

– Срок окупаемости:

$$2955 / 584500 \approx 198 \text{ ч}$$

Себестоимость 1 часа работы WAAM-установки составляет ~3045 ₸

Полная стоимость установки (включая сварочный аппарат, механику, электронику и раму) — около 584,500 ₸

Срок окупаемости — менее 200 часов, что при непрерывной работе эквивалентно 1.5–2 неделям (по 8 ч/день), делает проект экономически выгодным

Данный подход оправдан для малого производства, прототипирования и сервисного применения WAAM-технологии

Для сравнения с традиционными методами, стоимость обработки детали с аналогичными размерами на фрезерном или токарном станке из заготовки может составлять от 4000 до 8000 ₸/ч, не включая стоимость материала и отходов.

Таким образом, WAAM позволяет снизить стоимость производства деталей с учётом прямого формирования из проволоки, минимизации отходов и более гибкого подхода к формам.

3.5 Выводы по главе 3

Разработанная портальная установка демонстрирует высокую универсальность и потенциал для применения в аддитивном производстве с использованием технологии WAAM. Проведённый анализ показал, что базовая конструкция обладает достаточной жёсткостью и устойчива к нагрузкам, типичным для наплавки металлических изделий. Предусмотренная

возможность масштабирования конструкции, интеграции интеллектуальных систем мониторинга и создания закрытой камеры существенно расширяет функциональные возможности установки.

Всё это позволяет рассматривать платформу не только как опытный образец, но и как перспективную основу для дальнейших исследований и опытно-промышленных разработок в области WAAM. С её помощью можно решать задачи повышения качества наплавки, оптимизации процесса и повышения надёжности выпускаемых изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной диссертационной работы проведён комплексный анализ технологии WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) с применением аустенитной сварочной проволоки ER308LSi и источника питания MIG 220S. Экспериментально подтверждена возможность формирования устойчивой структуры наплавленного металла с приемлемым качеством поверхности и сплошностью слоя. Выявлены ключевые проблемы, возникающие при многослойной наплавке: наличие пор, остаточных напряжений, неоднородность структуры, которые обусловлены термическими циклами и особенностями газовой защиты.

Сформулированы основные направления улучшения процесса, включая использование термообработки для снижения остаточных напряжений и упрочнения структуры, а также возможность применения закрытой камеры с инертной атмосферой для повышения качества наплавки. Особое внимание уделено разработке концепции портальной установки для WAAM с учётом требований гибридной технологии. Предложенные конструктивные решения, включая заполнение профильных труб инертным наполнителем и использование высокоточных направляющих, позволят повысить жёсткость и виброустойчивость установки.

Работа подчёркивает целесообразность гибридного подхода, сочетающего аддитивное изготовление и механическую обработку, для повышения точности, качества поверхности и механических свойств изделий. Выявленные закономерности формирования структуры и локальные дефекты, такие как поры и δ -феррит, послужат основой для дальнейших исследований по оптимизации технологических параметров и разработке интеллектуальных систем управления WAAM-процессами.

Полученные результаты могут быть использованы в промышленности для создания гибридных аддитивных установок, а также для образовательных целей при подготовке специалистов в области аддитивных технологий и сварки.

Основные выводы по результатам исследования

- Проведён экспериментальный анализ процесса WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) с использованием аустенитной сварочной проволоки ER308LSi и инверторного источника питания MIG 220S. Подтверждена возможность формирования многослойной структуры с удовлетворительными геометрическими параметрами валиков.

- Выявлены основные дефекты, возникающие при наплавке: поры, включения, локальные зоны с неоднородной структурой. Эти дефекты обусловлены особенностями теплового цикла, локальными колебаниями подачи защитного газа и динамическими факторами процесса.

- Анализ макроструктуры показал слоистое строение наплавленных конструкций с чётко выраженными границами между слоями, что характерно для WAAM. Микроструктурный анализ выявил ячеисто-дендритную

структуру аустенита с зонами вытянутых зёрен вдоль направления теплопереноса.

- Установлено, что термообработка готовых изделий способствует снятию остаточных напряжений, выравниванию структуры и снижению количества пор, а закрытая камера с инертной атмосферой может существенно повысить качество наплавки.

- Разработана концепция портальной установки для WAAM с учётом гибридного подхода, сочетающего наплавку и последующую механическую обработку. Предложены конструктивные решения, обеспечивающие необходимую жёсткость и виброустойчивость при эксплуатации.

- Полученные результаты показывают целесообразность применения WAAM для создания опытных образцов и мелкосерийного производства, подчёркивая важность дальнейшей оптимизации режимов наплавки и систем газовой защиты.

Перспективы дальнейшей работы

- Разработка цифровых моделей газодинамики и теплового цикла при WAAM для более точного прогноза формирования структуры и дефектов.

- Изучение влияния промежуточной механической обработки на устранение локальных дефектов и повышение точности формы изделия.

- Оптимизация конструкции портальной установки с учётом интеграции шпиндельной головки для гибридной обработки.

- Внедрение автоматизированных систем контроля подачи защитного газа и параметров наплавки для повышения стабильности процесса и повторяемости качества.

- Расширение области исследований на другие материалы и сплавы для более широкой промышленной применимости WAAM.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Аддитивные технологии в машиностроении: инновации, преимущества и перспективы. URL: <https://nauchniestati.ru/spravka/additivnye-tehnologii-v-mashinostroenii/>
- 2 Ускорение аддитивного производства — доклад компании iga technologies на конференции индустрия 4.0. URL: <https://igatec.com/uskorenie-additivnogo-proizvodstva-doklad-kompanii-iga-technologies-na-konferenczii-industriya-4-0/>
- 3 Основные Технологии 3D печати. URL: <https://rec3d.ru/rec-wiki/tehnologii-3d-pechati/>
- 4 Инновационная технология 3D-печати металлами: обзор современных и перспективных технологий | ТЕХНОЛОГИИ, ИНЖИНИРИНГ, ИННОВАЦИИ. URL: <https://integral-russia.ru/2022/04/12/innovatsionnaya-tehnologiya-3d-pechati-metallami-obzor-sovremennyh-i-perspektivnyh-tehnologij/>
- 5 Ribeiro, F.; Norrish, J.; McMaster, R.S. Practical Case of Rapid Prototyping Using Gas Metal Arc Welding. In Proceedings of the Conference on Computer Technology in Welding, Paris, France, 15–16 June 1994; p. 55.
- 6 Ribiero, F.; Ogunbiyi, B.; Norrish, J. Mathematical model of welding parameters for rapid prototyping using robot welding. Sci. Technol. Weld. Join. 1997, 2, 185–190.
- 7 Ouyang, J.H.; Wang, H.; Kovacevic, R. Rapidprototypingof 5356–aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: Process control and microstructure. Mater. Manuf. Process. 2002, 17, 103–124.
- 8 Wang, H.; Jiang, W.; Ouyang, J.; Kovacevic, R. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW. J. Mater. Process. Technol. 2004, 148, 93–102.
- 9 Gault, R.; Ridgway, K.; Escobarpalafox, G. Preliminary Empirical Models for Predicting Shrinkage, Part Geometry and Metallurgical Aspects of Ti–6Al–4V Shaped Metal Deposition Builds. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2011, 26, 012002.
- 10 Ma, Y.; Cuiuri, D.; Shen, C.; Li, H.J.; Pan, Z.X. Effect of interpass temperature on in–situ alloying and additive manufacturing of titanium aluminides using gas tungsten arc welding. Addit. Manuf. 2015, 8, 71–77.
- 11 Luo, Z.; Zhang, Y.; Jia, P. Research on additive manufacturing process of Ti–6Al–4V titanium alloy micro–plasma arc surfacing. Welding 2016, 36, 13–16.
- 12 Jhavar, S.; Jain, N.K. Development of micro–plasma wire deposition process for layered manufacturing. Int. Sci. Book 2014, 214, 239–256.
- 13 Wang, K.; Lu, Y.; Liu, Y.; Xu, B.S. Research on Additive Remanufacturing Process Based on Pulsed Plasma Arc Welding. J. Acad. Armored Forces Eng. 2016, 30, 86–90.
- 14 Pan, L.; Dong, H. New progress in welding additive manufacturing research. Welding 2016, 4, 27–32.
- 15 Szost, B.A.; Terzi, S.; Martina, F.; Boisselier, D.; Prytuliak, A.; Pirling, T.; Hofmann, M.; Jarvis, D.J. A comparative study of additive manufacturing

techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti–6Al–4V components. *Mater. Des.* 2016, 89, 559–567.

16 Colegrove, P.A.; Martina, F.; Roy, M.J.; Szost, B.; Terzi, S.; Williams, S.; Withers, P.; Jarvis, D. High pressure interpass rolling of wire + arc additively manufactured titanium components. *Adv. Mater. Res.* 2014, 996, 694–700.

17 Martina, F.; Roy, M.J.; Szost, B.A.; Terzi, S.; Hofmann, M. Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti–6Al–4V components. *Met. Sci. J.* 2016, 32, 1439–1448.

18 Sun, R.; Zhu, Y.; Li, L.; Guo, W.; Peng, P. The effect of laser shock strengthening on the microstructure and residual stress of arc additive 2319 aluminum alloy. *Prog. Laser Optoelectron.* 2018, 55, 011402.

19 Wang, G.; Sun, Y.; Bai, X.; Zhang, H. The influence of electromagnetic field on the temperature field and residual stress of arc fusion rapid prototyping. *Weld. Technol.* 2013, 42, 6–8.

20 Bai, X.; Zhang, H.; Wang, G. Modeling of the moving induction heating used as secondary heat source in weld–based additive manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015, 77, 717–727.

21 From, B.; Ding, J. The influence of CMT process on the porosity of Al–Cu alloy arc additive manufacturing. *Rare Met. Mater. Eng.* 2014, 43, 3149–3153.

22 Киричек А. В. Технологическое обеспечение параметров качества синтезируемой ваам-методом детали управлением траекторией движения фидстока / А. В. Киричек, А. Г. Сергеев, С. О. Федонина, Д. И. Петрешин // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 4. – С. 60 –68.

23 Uyen, T.M.T.; Minh, P.S.; Nguyen, V.-T.; Do, T.T.; Nguyen, V.T.; Le, M.-T.; Nguyen, V.T.T. Trajectory Strategy Effects on the Material Characteristics in the WAAM Technique. *Micromachines* 2023, 14, 827.

24 Cong, B.Q.; Ding, J.L.; Williams, S. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al–6.3% Cu alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015, 76, 1593–1606.

25 Yin, F. Research on Forming Process and Dimensional Accuracy Control of Stainless Steel Arc Additive Manufacturing; Nanjing University of Science and Technology: Nanjing, China, 2017.

26 Muhammad Safwan Mohd Mansor, Sufian Raja, Farazila Yusof, Mohd Ridha Muhamad, Yupiter HP. Manurung, Mohd Shahrman Adenan, Nur Izan Syahriah Hussein, James Ren, Integrated approach to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 30, 2024, Pages 2478-2499, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.170>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785424006999>)

27 Berend Denkena, Marcel Wichmann, Philipp Pillkahn, Effect of process parameters during wire arc additive manufacturing (WAAM) and mechanical finishing on the surface zone properties, *Procedia CIRP*, Volume 123, 2024, Pages

262-267, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.05.047>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827124002518>)

28 Maider Arana, Eneko Ukar, Iker Rodriguez, David Aguilar, Pedro Álvarez, Influence of deposition strategy and heat treatment on mechanical properties and microstructure of 2319 aluminium WAAM components, *Materials & Design*, Volume 221, 2022, 110974, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110974>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127522005962>)

29 Chuanchu Su, Xizhang Chen, Chuang Gao, Yangfan Wang, Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM, *Applied Surface Science*, Volume 486, 2019, Pages 431-440, ISSN 0169-4332, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.255>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433219312735>)

30 Florian Pixner, Ricardo Buzolin, Fernando Warchomicka, Mária Dománková, Mária Čaplovičová, Florian Riedlsperger, Sebastian Fritsche, Marta Orłowska, Josef Domitner, Michael Lasnik, Norbert Enzinger, Influence of process and heat input on the microstructure and mechanical properties in wire arc additive manufacturing of hot work tool steels, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 888, 2023, 145799, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145799>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509323012236>)

31 Camille Cambon, Issam Bendaoud, Sébastien Rouquette, Fabien Soulié, A WAAM benchmark: From process parameters to thermal effects on weld pool shape, microstructure and residual stresses, *Materials Today Communications*, Volume 33, 2022, 104235, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104235>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822010844>)

32 Ouyang, JH & Wang, H. & Kovacevic, Radovan. (2002). Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: Process control and microstructure. *Materials and Manufacturing Processes - MATER MANUF PROCESS*. 17. 103-124. 10.1081/AMP-120002801.