

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

На правах рукописи

Терентьев Сергей Александрович

**Разработка технологии и оборудования аддитивного производства
металлических изделий плазменной наплавкой плавящимся электродом**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Щицын Юрий Дмитриевич,
доктор технических наук

Пермь – 2019

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Состояние вопроса, цель и задачи исследования	11
1.1. Обзор технологии аддитивного формирования металлических изделий послойной дуговой наплавкой	14
1.2. Способы дуговой наплавки, применяемые для аддитивного производства	20
1.3. Плазменная наплавка плавящимся электродом	25
Глава 2. Исследование особенностей формирования металлических изделий послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом	34
2.1. Исследование условий устойчивого процесса плазменной наплавки плавящимся электродом для аддитивного формирования металлических изделий ...	35
2.2. Исследование плавления электродной проволоки при плазменной наплавке плавящимся электродом	39
2.3. Исследование тепловых процессов при плазменной наплавке плавящимся электродом	44
2.4. Исследование влияния параметров плазменной наплавки плавящимся электродом на геометрические размеры наплавленного валика	48
2.5. Разработка математической модели формирования валика при плазменной наплавке плавящимся электродом	55
2.6. Выводы по Главе 2.	64
Глава 3. Разработка оборудования для аддитивного производства металлических заготовок плазменной наплавкой плавящимся электродом	65
3.1. Исследование особенностей теплопередачи в кольцевой анод плазмотрона ..	68
3.2. Разработка плазмотрона для плазменной наплавки плавящимся электродом ...	74
3.3. Исследование тепловых нагрузок в узлы плазмотрона при плазменной наплавке плавящимся электродом	79

3.4. Оборудование для послойного формирования изделий плазменной наплавкой плавящимся электродом	85
3.5. Выводы по Главе 3	94
Глава 4. Исследование свойств и структуры металла, полученного послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом	95
4.1. Исследование заготовки, полученной послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом, методами неразрушающего контроля	97
4.2. Исследование химического состава наплавленного металла	99
4.3. Исследование структуры металла, полученного многослойной плазменной наплавкой плавящимся электродом	100
4.4. Исследование механических свойств наплавленного металла	104
4.5. Исследование коррозионных свойств наплавленного металла	110
4.6. Выводы по Главе 4	113
Основные выводы и результаты работы	114
Список литературы	115
Приложение 1	133
Приложение 2	134

Введение

Изготовление сложных габаритных металлических изделий с использованием традиционных технологий (литье,ковка,штамповка и др.) сталкивается с большими затруднениями и требует значительных ресурсов при производстве. Аддитивные технологии позволяют получать детали разнообразной геометрической формы путем послойного нанесения материала на подложку или элемент готового изделия, исходя из цифровой модели объекта, что существенно сокращает затраты. Разработка и внедрение гибридных технологий, сочетающих в себе послойное формирование с последующей термической и механической обработкой, является одним из перспективных путей развития машиностроения.

Существующие способы аддитивного производства базируются на технологиях плавления исходного материала (DED, PBF, DMD и др.). Технологии послойного формирования изделий без плавления наносимого материала (листовая ламинация, спекание, диффузионное нанесение материала и др.) сложны, трудоемки и применяются в основном в специфических областях. Способы формирования изделий послойной наплавкой отличаются простотой и гибкостью процесса.

В качестве источников нагрева в аддитивных технологиях применяются электронный луч, лазер, электрические и плазменные дуги. Лучевые технологии применяются в основном для построения малогабаритных точных изделий и отличаются низкой производительностью. Дуговые технологии ориентированы на создание крупногабаритных изделий с высокой производительностью. При этом снижается точность формируемых заготовок, увеличиваются припуски на последующую механическую обработку [1-4]. Повышение производительности процесса при одновременном обеспечении высокой точности получаемого изделия является актуальной задачей.

В качестве исходного сырья используются порошки, проволоки, а также их комбинации. Порошковые материалы применяются для создания малогабаритных изделий со сложной геометрией. Применение присадочных проволок предпочтительно для аддитивного производства крупногабаритных изделий

относительно простой формы. Присадочная проволока является основным исходным материалом для формирования изделий дуговой наплавкой [3, 5, 6].

Аргонодуговая, механизированная в среде защитного газа, плазменная и другие способы наплавки применяются в аддитивном производстве. Плазменная наплавка обеспечивает ряд технологических и экономических преимуществ: высокая производительность, регулирование теплопередачи в широких пределах и, как следствие, управление глубиной и шириной проплавления, структурой, составом и свойствами формируемого материала. Осевая подача проволоки способствует повышению точности наплавляемой заготовки. При этом не требуется применять специальные устройства для ориентации подачи проволоки относительно траектории наплавки [5, 7, 8].

Плазменная наплавка плавящимся электродом (плазма-МИГ) является гибридным процессом, объединяющим дуговую наплавку плавящимся электродом и плазменную наплавку. Процесс обладает рядом преимуществ: высокой стабильностью и производительностью, гибким регулированием параметров наплавки, отсутствием разбрызгивания, управляемым каплепереносом присадочного металла и др. Применение кольцевого анода позволяет устойчиво вести наплавку плазменной дугой обратной полярности. При этом происходит эффективное разрушение и удаление оксидных пленок, улучшается смачиваемость и растекание наплавляемого металла за счет процесса катодной очистки. Способ плазма-МИГ сочетает в себе особенности высококонцентрированного источника энергии, высокую производительность и качество наплавки, при сравнительно низкой стоимости оборудования. Таким образом, плазма-МИГ наплавка может стать перспективным способом для послойного формирования габаритных металлических заготовок.

На сегодняшний день крупнейшими разработчиками в области аддитивных технологий являются такие организации, как ФГУП «ВИАМ», ИММиТ, 3D Systems Corporation (США), 3T RPD (Великобритания), Arcam AB (Швеция), Biomedical Modeling Inc. (США), Envisiontec GmbH (Германия), EOS GmbH Electro Optical Systems (Германия), Fcubic AB (Швеция), GPI Prototype and Manufacturing

Services Inc. (США), Greatbatch, Inc. (США), Layerwise NV (Бельгия), Limacorporate SPA (Италия), Materialise NV (Бельгия), NorskTitanium (США), Sciaky (США) и др. Основное направление работ по аддитивным технологиям ведется в таких областях как авиастроение и космонавтика, медицина и протезирование, восстановительный ремонт и др.

Создание технологий послойного выращивания изделий требует подробного изучения влияния условий изготовления на эксплуатационные характеристики получаемых заготовок. Получение изделий с высокими служебными характеристиками и минимальным припуском на механическую обработку связано с решением большого количества разнообразных задач. Размеры ванны жидкого металла определяются тепловой обстановкой в зоне воздействия дуги, которая зависит от многих факторов: мощности дуги, скорости наплавки, диаметра и скорости подачи присадочной проволоки, поперечного сечения наплавляемой стенки, химического состава проволоки, качества защиты и ряда других. Поддержание теплового баланса в зоне обработки достаточно сложная задача. Для ее решения необходима текущая корректировка режимных параметров наплавки или периодическая остановка процесса для охлаждения наплавляемого изделия. Корректировкой режимных параметров, в принципе, можно выйти на режим теплового равновесия, при котором обеспечивается стабильность процесса послойной наплавки. Необходимо учитывать то, что размеры ванны жидкого и перегретого металла, в конечном итоге, определяют структуру и свойства металла, а также качество защиты поверхности, которое влияет на дефектность наплавляемых слоев. Точность формируемой заготовки зависит от формы и размеров наплавляемого валика. Поэтому наличие достоверной математической модели наплавки является ключевым звеном процесса аддитивного производства.

Исходя из вышесказанного, *целью диссертационной работы* является повышение производительности и качества аддитивного производства металлических изделий применением плазменной наплавки плавящимся электродом.

Задачи:

1. Определить влияние технологических параметров на граничные условия устойчивости процесса и закономерности формообразования наплавленного валика при плазменной наплавке плавящимся электродом.
2. Разработать математическую модель расчета геометрических параметров одиночного валика при плазменной наплавке плавящимся электродом применительно к условиям аддитивного формирования металлических изделий.
3. Установить особенности теплопередачи в плазмотрон и изделие при плазменной наплавке плавящимся электродом и разработать оборудование, обеспечивающее работу в условиях аддитивного производства металлических изделий.
4. Исследовать процесс послойной плазменной наплавки плавящимся электродом и разработать технологические рекомендации для аддитивного формирования металлических изделий из высоколегированных сталей аустенитного класса.
5. Исследовать структуру и свойства высоколегированной стали, полученной послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом.

Научная новизна работы:

1. Выявлены зависимости параметров режима плазменной наплавки плавящимся электродом на устойчивость процессов взаимного горения дуг, переноса электродного металла и формирование наплавленного валика при работе на режимах с минимальными плотностями тока электрических дуг.
2. Разработана математическая модель прогнозирования размеров и профиля наплавленного валика, для формирования алгоритма построения изделия послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом.
3. Установлено комплексное влияние конструктивных и технологических параметров плазменной наплавки плавящимся электродом на характер распределения и величину теплопередачи в узлы плазмотрона и изделие.

Практическая значимость работы:

1. Создан компактный плазмотрон, как составная часть оборудования для аддитивного производства полного цикла, совместимый с серийным сварочным оборудованием, имеющий простое устройство, позволяющий выполнять плазменную сварку и наплавку плавящимся электродом с аксиальной подачей присадочной проволоки черных и цветных металлов и их сплавов.

2. Разработаны технологические рекомендации для аддитивного формирования изделий плазменной наплавкой плавящимся электродом, обеспечивающие стабильное горение дуг, равномерное плавление электродного металла и постоянство формирования наплавленного валика.

3. Разработан высокопроизводительный способ аддитивного формирования металлических изделий из высоколегированных сталей плазменной наплавкой плавящимся электродом, который обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики.

Диссертационная работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 11708ГУ/2017, «Разработка технологии аддитивного формирования металлических изделий послойно плазменной наплавкой»), Минобрнауки России (проведение исследований в рамках многосторонней научно-исследовательской инициативы БРИКС (RFMEFI58317X0062), «Гибридный процесс изготовления деталей для аэрокосмической отрасли: моделирование, разработка программного обеспечения и верификация»), Министерства образования Пермского края (грант на поддержку проектов, реализуемых международными исследовательскими группами №26/795, «Гибридные аддитивные технологии. Послойное деформационное упрочнение»). По результатам работы получен патент на изобретение № 2702512.

Методология исследования:

Результаты проведенных исследований получены с использованием современного научно-исследовательского оборудования и методов, всестороннего и тщательного проведения экспериментов, комплексным анализом результатов

экспериментов. Результаты исследований не противоречат известным результатам других ученых, опубликованных в открытой печати. Математическая модель верифицирована с применением стандартных методик и сравнением расчетных данных с эмпирическими результатами. В экспериментальных исследованиях использовалось калиброванное измерительное оборудование. Исследование образцов полученного материала осуществлялось методами визуально-измерительного, цветного, ультразвукового, рентгенографического контроля. Структура металла исследовалась с применением стандартных методик металлографического исследования. Рентгенофлюоресцентный анализ применялся для определения химического состава наплавленного металла. Прочностные характеристики определяли по стандартным методикам для одноосного растяжения, ударного изгиба и др. на стандартном испытательном оборудовании.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально определенная область режимов формирования одиночного валика при плазменной наплавке плавящимся электродом.
2. Математическая модель прогнозирования размеров и профиля одиночного валика при плазменной наплавке плавящимся электродом.
3. Результаты исследования закономерностей теплопередачи в плазмотрон и изделие при плазменной наплавке плавящимся электродом.
4. Технологические рекомендации плазменной наплавки плавящимся электродом для аддитивного формирования изделий из высоколегированных сталей аустенитного класса и результаты исследования структуры и свойств сталей 12X18H10T и 04X19H9, полученных послойной наплавкой.

Степень достоверности и апробация:

Основные результаты диссертационной работы представлялись на 7 международных, всероссийских и других конференциях. Среди них: VII Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике», г. Томск, 26-30

ноября 2018 г.; Международная научно-техническая конференция «Сварка и контроль», посвященная 130-летию изобретения Н.Г. Славянова электродуговой сварки плавящимся электродом, г. Пермь, 18-21 сентября 2018 г.; Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные и прогрессивные технологии сварки», посвященная памяти заведующего кафедрой «Сварочное производство» с 1982 по 1994 года «Каратыша Виктора Васильевича», г. Пермь, 10-11 мая 2017 г.; I Всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и студентов «Фундаментальные и прикладные исследования в области материаловедения и машиностроения 2016, г. Пермь, 26-27 апреля 2016 г. и др. Практические результаты диссертационной работы демонстрировались на 3-х международных выставках: Авиационно-космический салон «МАКС-2019, г. Жуковский, 28 августа 2019 г.; «Металлообработка-2019», г. Москва, 27-30 мая 2019 г.; Ганноверская промышленная выставка-ярмарка «Hannover Messe», г. Ганновер (Германия), 1-5 апреля 2019 г.

Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 6 печатных работах, из них 5 работ опубликованы в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 2 – в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus или Web of Science; получен 1 патент РФ.

Глава 1. Состояние вопроса, цель и задачи исследования

Аддитивные технологии согласно ГОСТ Р 57558-2017 - это процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем послойного добавления материала, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки).

В течение последних 30 лет было разработано более 20 способов аддитивного производства [7, 9]. Их классифицируют по следующим критериям:

- По видам применяемых материалов (пластмассы, металлы, органические материалы и т.д.) и типам (порошковые, жидкие, проволоочные и т.д.).

Вид и тип используемого материала определяется исходя из свойств, области применения, технологии аддитивного производства и др. В машиностроении, аэрокосмической промышленности, судостроении и т.д., как правило, применяются металлические материалы в виде порошков и цельнометаллических проволок.

В основном для аддитивного производства металлических изделий применяются порошки с дисперсностью от 10 до 40 мкм. Также могут применяться порошки средней дисперсности (40-250 мкм) и высокодисперсные (0,1-10 мкм) [3, 10, 11]. Малый размер частиц порошков позволяет получать тонкостенные изделия сложной формы. Однако порошковые материалы имеют следующие недостатки:

1. Выполнение трудоемких подготовительных технологических операций: сушка, просеивание, очистки и т.д.
2. Фракционная неоднородность (несферичность, дисперсность).
3. Необходимость специального оборудования для подготовки, транспортировки, очистки порошковых материалов.
4. Взрыво- и пожароопасность применения высокодисперсных порошков из таких металлов, как титановые и алюминиевые сплавы.
5. Высокие требования по экологической безопасности работы с порошковыми материалами.

6. Высокая стоимость.

Присадочные проволоки имеют обширную номенклатуру, как по химическому составу, так и по типоразмерам. Это обусловлено широким применением проволок для сварки и наплавки. Использование проволоочного материала позволяет избавиться от проблем, присущих порошкам. В качестве дополнительного преимущества, присадочная проволока имеет значительно меньшую удельную площадь поверхности, чем порошковые материалы, и менее склонна к окислению и поглощению влаги или загрязняющих веществ. Система подачи присадочной проволоки в зону наплавки значительно проще и компактнее порошкового питателя.

- По типам используемых источников подвода энергии.

Существуют технологии аддитивного производства без расплавления присадочного материала (листовая ламинация, спекание, склеивание и др.) и с расплавлением. При изготовлении заготовок с расплавлением присадочного материала чаще всего применяются лучевые (электронный луч и лазер) и дуговые (электрическая и плазменная дуга) источники нагрева. Основные характеристики и возможности применяемых источников нагрева представлены в таблице 1.

Лучевые источники нагрева целесообразно применять для создания тонкостенных малогабаритных изделий со сложной геометрической формой. Способы аддитивного производства на основе дуговой наплавки, в совокупности с использованием проволоочных присадочных материалов, эффективны для создания габаритных изделий простой формы.

Таблица 1 – Характеристики источников нагрева, применяемых в процессах аддитивного производства [7]

Источник нагрева	Электронный луч	Лазерный луч	Электрическая дуга
Энергоэффективность, %	15-20	2-5	более 90
Производительность процесса наплавки, кг/ч	3-9	1-2	до 10
Высота формируемого слоя, мм	0,1-3	0,1-3	1-4
Минимальная ширина создаваемого элемента, мм	0,02-0,1	0,02-0,1	1,5-2,0
Защита зоны построения	вакуум (камера)	защитный газ (местная)	защитный газ (местная)
Габариты получаемого изделия	ограничены размером камеры	без ограничений	без ограничений
Точность изделия	высокая	высокая	низкая
Припуски на механическую обработку, мм	0,2-3	0-0,5	1-3
Примерная стоимость оборудования, млн/руб.	65-650	100-200	7-20

1.1. Обзор технологии аддитивного формирования металлических изделий послойной дуговой наплавкой

Способ аддитивного производства металлических изделий послойной дуговой наплавкой, именуемый как Wire Arc Additive Manufacture (WAAM), является одним из ключевых звеньев гибридного производства металлических изделий, которое включает в себя аддитивные, субтрактивные и другие технологические процессы. Схема процесса гибридного формирования изделия с применением WAAM показана на рисунке 1.

Неустойчивость свободных электрических дуг, аккумуляция тепла в наплавляемом металле и другие факторы, делают процесс формирования изделия сложным, изменчивым и трудно управляемым. Геометрическая точность и механические свойства конечного продукта напрямую зависят от размерной точности и способа формирования каждого слоя. Как видно из рисунка 1, моделирование формы одиночного валика является основой программирования производственного процесса, а именно определение количества проходов и положения каждого валика [12-15].

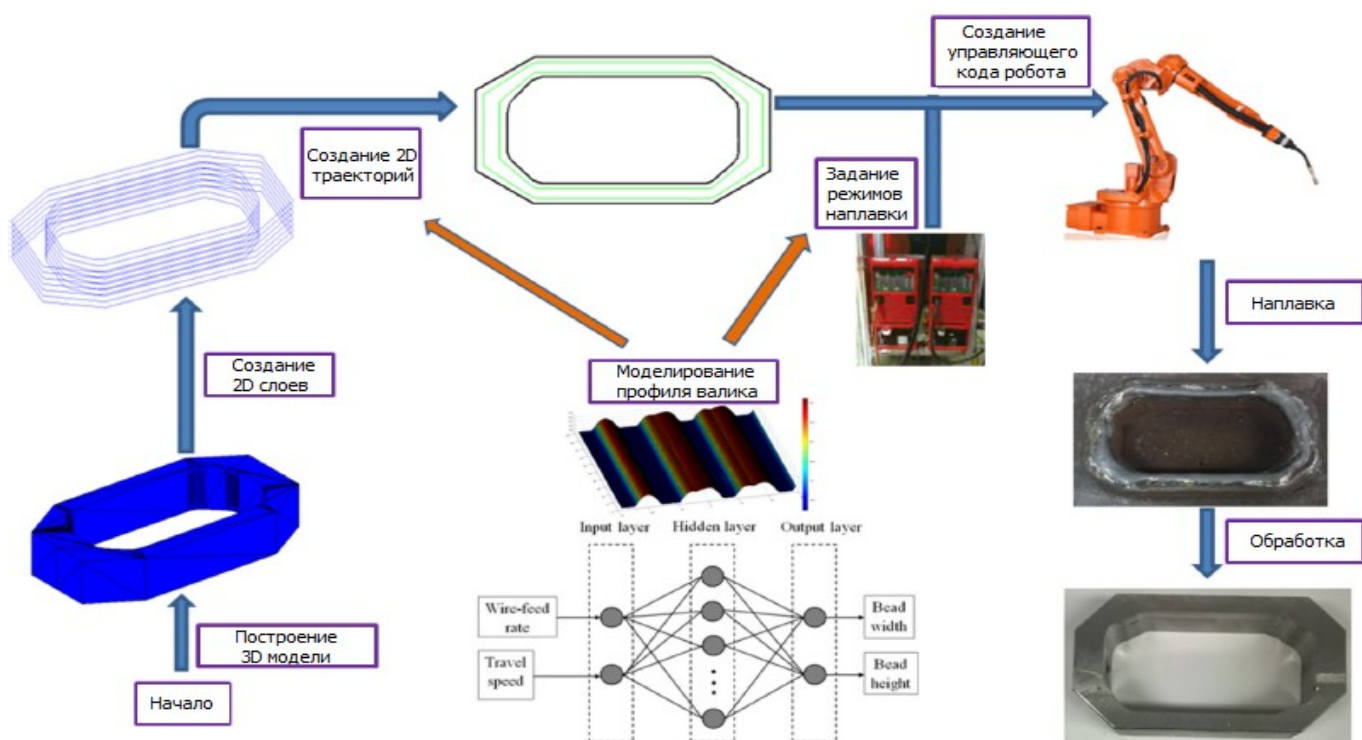


Рисунок 1. Структурная схема процесса гибридного формирования изделия с применением WAAM [16]

Геометрия наплавленного компонента формируется по заданной иерархии. Схема создания изделия показана на Рисунке 2. Первым этапом задается геометрия одиночного валика. После этого производится формирование плоского слоя. Далее осуществляется послойное формирование изделия. Таким образом, геометрические параметры одиночного валика (ширина, высота, профиль) являются базовыми элементами технологии формирования всего изделия.

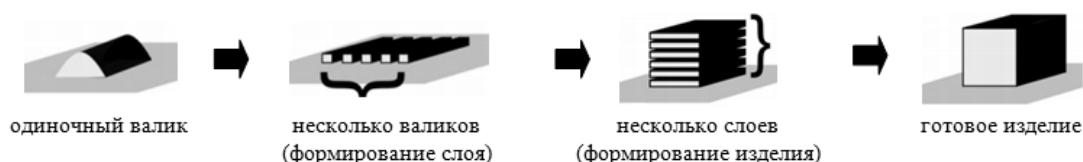


Рисунок 2. Алгоритм построения изделия способом WAAM [17]

Применяемый способ наплавки должен обеспечивать постоянство формы и качества одиночного валика. Форма одиночного валика зависит от большого количества факторов: свойств материала, тепловой обстановки в зоне наплавки, технологических особенностей процесса и прочих. Важными условиями формирования высококачественных многослойных изделий являются: создание металлургической связи за счет сплавления с предыдущим слоем, обеспечение оптимальной скорости охлаждения, как подложки, так и наплавленного материала, осуществление надежной защиты жидкого металла. При построении многослойной структуры необходимо, чтобы тепловложение было достаточным для сплавления присадочного и основного металла. Избыток подводимого тепла способствует чрезмерному проплаву предыдущего слоя и растеканию сварочной ванны. Недостаток – к отсутствию сплавления [18-20].

Определение взаимосвязей между формой валика и параметрами режима наплавки, включая моделирование всех физических процессов, вызывает затруднение. Зачастую, параметры наплавки выбираются исходя из опыта или технических рекомендаций.

Создание математической модели, связывающей профиль одиночного валика с параметрами наплавки, является одной из ключевых задач разработки технологии аддитивного формирования. Также важно, чтобы модель валика связывала не только параметры процесса и геометрию валика, а также позволяла делать выбор

параметров режима наплавки с учетом эволюции микроструктуры и механических свойств конечных изделий [12-15, 17-36].

Существует большое количество работ, посвященных исследованию геометрии одиночного валика, в том числе – моделированию и предсказанию основных параметров валика [18, 26, 27, 33]. Однако, для WAAM, полученные модели оказались частично или полностью неприменимы. Это связано с тем, что:

1. Предыдущие исследования базировались на измерении только высоты и ширины валика, вместо построения полного профиля поперечного сечения [23].
2. Отсутствует анализ ошибок и проверка точности надежным способом [27, 31].
3. Рассматривается влияние только основных факторов при определении геометрии валика, а эффекты взаимодействия этих факторов не учитываются [13].
4. Сложные модели, учитывающие большое количество различных физических взаимодействий, требует длительного по времени расчета [34].

При исследовании и построении геометрической модели сечения валика, в качестве входных параметров процесса принимают ток дуги, скорость подачи проволоки, скорость наплавки, напряжение дуги, диаметр проволоки. Также применяются комплексные параметры: мощность дуги, отношение скорости подачи проволоки к скорости наплавки, погонная энергия и другие [17, 20, 21, 24, 26, 27, 29, 30, 32, 33-38].

Помимо параметров процесса следует учитывать ряд таких факторов, как:

- смещение проволоки от центра дуги, которое может привести к искажению геометрии валика [32];
- температуру подложки и предыдущего слоя [29, 30, 35, 36];
- изменение длины дуги [29, 30, 35, 36];
- теплосодержание капли и характер переноса присадочного металла [19];
- скорость охлаждения [19].

Диапазоны входных параметров определяются посредством предварительных экспериментов. Режим наплавки, при котором процесс стабильный и без разбрызгивания, считается оптимальным. Изменение скорости наплавки в пределах 0,2...1,2 м/с является эффективным способом управления формой валика.

Установлено, что при фиксированном значении силы тока существует критическая скорость наплавки, выше которой происходит образование дефекта Humping («пилообразный шов») [17, 21, 28, 29, 34-36, 38].

Повышение КПД процесса аддитивного производства и сокращение производственного цикла достигается путем подбора оптимального режима наплавки. При этом количество проходов должно быть минимально необходимым и достаточным для получения конечной формы изделия. Это реализуется путем расчета и выбора оптимального профиля валика [14, 17, 33].

Процесс формирования слоя представляет собой наплавку одиночных валиков по траектории (см. рисунок 3). Качество наплавленного слоя определяется межцентровым расстоянием соседних валиков (d) и траекторией наплавки. Межцентровое расстояние определяет волнистость слоя. Чрезмерная волнистость способствует возникновению проблем при нанесении последующего слоя и, способна нарушить процесс создания изделия [39].

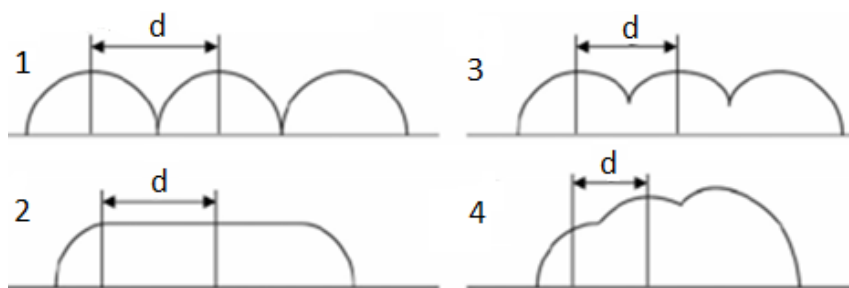


Рисунок 3. Влияние межцентрового расстояния на волнистость наплавленной поверхности: 1 – общий вид; 2 – чрезмерное расстояние между валиками приводит к образованию впадин между валиками; 3 – оптимальное расстояние между валиками; 4 – недостаточное расстояние между валиками приводит к увеличению высоты наплавленного слоя [39]

Устранить волнистость слоя возможно следующими способами:

1. Послойная механическая обработка путем фрезерования наплавленного слоя до плоскости [23, 40].
2. Управление процессом наплавки на основании созданной математической модели.

Основными моделями, применяемыми в WAAM, являются традиционная и тангенциальная [20, 31, 41, 42].

В традиционной модели изначально вводятся следующие параметры: высота (g) и ширина (e) одиночного валика, а также межцентровое расстояние (d) (см. рисунок 4). В качестве аппроксимирующей функции профиля валика чаще всего применяется парабола. Когда $d > e$, то отсутствует перекрытие в пределах двух соседних валиков (рисунок 3.1). При уменьшении d до определенного значения, площадь перекрытия становится равной площади вогнутости, и поверхность слоя становится плоской (рисунок 3.2). При дальнейшем уменьшении d , чрезмерная площадь перекрытия приводит к увеличению толщины нанесенного слоя и увеличению волнистости поверхности (рисунок 3.3.). Экспериментально доказано, что невозможно добиться идеальной плоской поверхности, что приводит к накоплению ошибок в вертикальном направлении и нарушению стабильности наплавки [20, 39, 42].



Рисунок 4. Схема наплавленного слоя [20]

В тангенциальной модели, ключевым этапом является расчет «критического межцентрового расстояния» (d') для заданного профиля валика. Согласно предложенной модели, расстояние $d' = 0,738e$. Коэффициент использования материала по представленным моделям соответствует 75,7% (традиционная) и 84,1% (тангенциальная) [39].

Другой важной задачей является формирование траектории движения горелки. При этом необходимо учитывать особенностей дугового процесса [26]:

1. Низкая геометрическая точность.
2. Искажения геометрии валика на начальном и конечном участках предъявляют требование создания непрерывной траектории наплавки.

Для WAAM применяются такие траектории наплавки, как растровая, контурная, гибридная и другие. Растровые шаблоны предпочтительны для получения тонкостенных конструкций, но приводят к снижению точности, короблению и большой анизотропии материала. Метод контурного пути снижает деформации и анизотропию, однако имеет склонность к созданию несплошностей. Траектория «среднеосевой трансформации» позволяет избежать возникновения зазоров между наплавленными валиками и не приводит к образованию несплошностей [43].

Управление нарезкой модели на плоские слои (адаптивная стратегия нарезки) позволяет уменьшить несоответствия формы заготовки и модели: эффект несогласованности и «лестницы» (см. рисунок 5) [44].

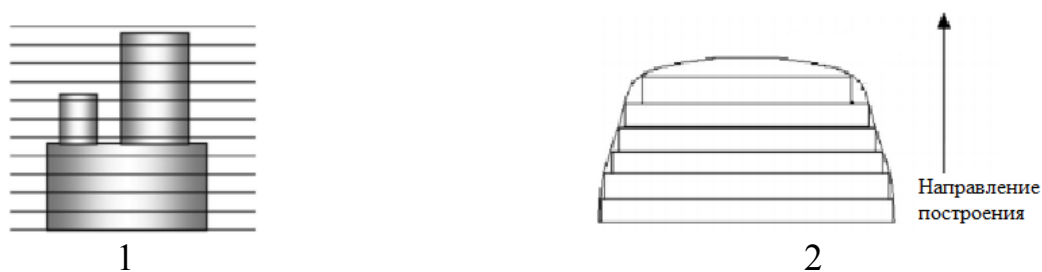


Рисунок 5. Причины снижения точности заготовки: 1 – эффект несогласованности; 2 – эффект «лестницы» [44]

Основными проблемами построения заготовок являются [45]:

- накопление тепла в наплавленном слое;
- неравномерность высоты слоя, вызванная аккумуляцией тепла;
- окисление наплавленного металла по мере увеличения высоты стенки;
- высокие остаточные напряжения и деформации.

Управление параметрами наплавки позволяет избежать большинства негативных процессов при формообразовании изделия, а также получать элементы различной конфигурации. Электромагнитное воздействие на наплавленную ванну, позволяет создавать элементы с углом наклона до 60° [12, 35, 46-54].

WAAM позволяет изготавливать изделия из различных материалов: углеродистых и легированных сталей, цветных металлов и их сплавов (Al, Ti, Ni, Cu и др.), а также из разнородных материалов [7, 13, 17, 18, 21-23, 25-30, 32, 36-41, 43-45, 47-50, 52-107].

1.2. Способы дуговой наплавки, применяемые для аддитивного производства

Для создания металлических изделий по технологии WAAM применяются разные способы дуговой наплавки (см. рисунок 6).

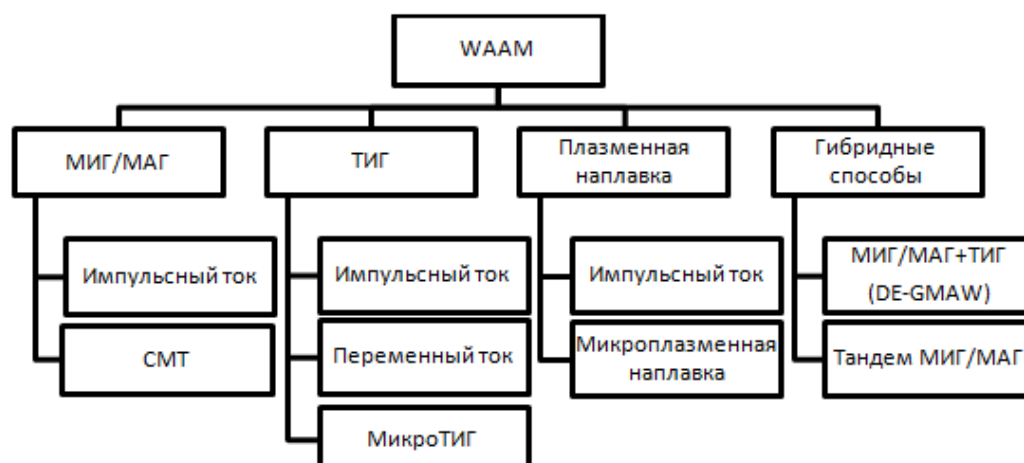


Рисунок 6. Способы дуговой наплавки, применяемые для WAAM

Кратко рассмотрим наиболее используемые из них:

1. Механизированная наплавка плавящимся электродом в среде защитного газа (МИГ/МАГ) наиболее часто применяется для WAAM [12, 22-24, 40, 46-52, 55-62, 108-111].

Преимуществами способа МИГ/МАГ являются: осевая подача присадочной проволоки обеспечивает высокую точность наплавки, малое количество параметров режима способствуют простоте управления и автоматизации процесса, простота, доступность и низкая стоимость оборудования, наличие эффекта катодной очистки зоны наплавки в силу использования тока обратной полярности, минимальная зона структурного изменения металла.

Однако процесс имеет ряд недостатков: большое тепловложение, высокое разбрызгивание присадочного металла, использование активных газов требует наличие раскислителей в присадочных материалах. В результате действия раскислителей, на поверхности наплавленного металла образуется шлак, который необходимо удалять перед нанесением следующего слоя. Отсутствие раскислителей, в свою очередь, ведет к разбрызгиванию металла и образованию дефектов (поры,

трещины и т.д.). Процесс МИГ/МАГ в основном ведут на постоянном токе обратной полярности, что делает невозможным производство изделий из титановых сплавов.

Применение МИГ/МАГ с импульсным режимом сварочного тока способствует снижению разбрызгивания и повышает управляемость тепловложением [37].

2. Cold Metal Transfer (CMT) - модифицированный вариант МИГ/МАГ процесса, основывающийся на механизме управляемого тепловложения и массопереноса электродного металла. Процесс CMT имеет малое тепловложение в изделие, стабильное поведение процесса и минимальное разбрызгивание присадочного металла. Недостатками CMT являются высокая остаточная пористость наплавленного металла и низкая скорость наплавки (0,5-0,6 м/мин). Реализация процесса требует специального оборудования фирмы Fronius [7, 25-28, 39-41, 43, 53, 63-71, 112-114].

3. Дуговая наплавка неплавящимся электродом в среде защитного газа (ТИГ).

Преимуществами ТИГ наплавки являются: отсутствие разбрызгивания, используется инертная защитная атмосфера (чистый аргон), возможность применения двух и более присадочных проволок, в том числе разнородных, простота, доступность и низкая стоимость оборудования. Использование импульсного режима способствует повышению гибкости процесса наплавки и снижению тепловложения. Применение переменного тока позволяет эффективно наплавлять алюминиевые сплавы за счет эффекта катодной очистки рабочей поверхности, но при этом снижается ресурс работы неплавящегося электрода и повышается риск образования вольфрамовых включений [13, 29, 30, 89-97].

Основными недостатками ТИГ являются: низкая производительность, высокий риск разрушения неплавящегося электрода (перегрев, дефект электрода, некачественный защитный газ и др.) с последствиями возникновения вольфрамовых включений в наплавленном металле, использование высокочастотного разряда (требуется экранирование оборудования), высокая зависимость процесса наплавки от настройки подачи проволоки. Присадочная проволока должна подаваться в сварочную ванну строго под определенными углами относительно столба дуги и

наплавляемой поверхности. В противном случае снижается точность наплавки. [49, 72-88, 115, 116].

Способ микро ТИГ позволяет изготавливать малоразмерные заготовки, за счет дозированного расплавления присадочного металла [45].

4. Комбинированный способ МИГ/МАГ+ТИГ (DE-GMAW) позволяет управлять тепловложением в изделие и геометрией наплавленного валика за счет изменения величины тока дуги между плавящимся и неплавящимся электродами. Недостатками данного способа являются несоосная подача плавящегося электрода и сложность настройки оборудования [31].

5. Особенность процесса Тандем МИГ/МАГ заключается в одновременной подаче двух присадочных проволок в общую сварочную ванну, что повышает производительность. Повышенное тепловложение, разбрызгивание электродного металла, высокая стоимость специализированного оборудования и сложность его настройки затрудняют применение данного процесса для WAAM [17].

6. Плазменная наплавка неплавящимся электродом применяется для аддитивного формирования изделий из титановых сплавов и высоколегированных сталей. Плазменная наплавка похожа на ТИГ наплавку и имеет такие же преимущества и недостатки. За счет сжатой дуги плазменная наплавка обладает такими преимуществами, как высокий КПД (до 95%) и высокая гибкость процесса. К недостаткам плазменной наплавки относятся: большое количество взаимозависимых параметров процесса, динамическое воздействие столба дуги на ванну жидкого металла, значительное тепловое воздействие [38, 84, 98-106, 117].

Плазменная наплавка характеризуется высокой теплопередачей при послойном формировании изделия. Однако микроплазменная наплавка позволяет получать наплавляемые валики по размерам и величине теплопередачи, сравнимым с лучевыми способами АП [18, 21, 32, 42, 54].

Сравнение способов дуговой наплавки, применяемых для WAAM, представлено в таблице 2. Такие разновидности как микроТИГ и микроплазменная

наплавка обладают низкой производительностью (0,03-0,04 кг/ч), и рассматривать их совместно с другими дуговыми способами нецелесообразно.

Таблица 2 - Способы дуговой наплавки, применяемые для WAAM

Критерий	МИГ/МАГ	СМТ	ТИГ	Плазменная наплавка	DE-GMAW	Тандем МИГ/МАГ
Количество дуг	1	1	1	1	2	2
Тип дуги	Свободно горящая	Свободно горящая	Свободно горящая	Сжатая	Свободно горящая	Свободно горящая
Полярность тока дуги	Обратная	Обратная	Прямая	Прямая, обратная	Обратная	Обратная
Род тока дуги	Постоянный	Постоянный	Постоянный	Постоянный	Постоянный	Постоянный
Возможность применения импульсного режима	Есть	Только управляемый импульсный	Есть	Есть	Есть	Только управляемый импульсный
Тип электрода	Плавящийся	Плавящийся	Неплавящийся	Неплавящийся	Плавящийся	Плавящийся
Способ подачи присадочной проволоки	Аксиальный	Аксиальный	Боковой	Боковой	Несоосный	Несоосный
Количество брызг металла	Много	Очень мало	Нет	Нет	-	-
Производительность наплавки, кг/ч	2-8	1-3	1-5	2-12	-	6-8
Вероятность наличия остаточной пористости	Средняя	Высокая	Очень низкая	Очень низкая	-	Низкая
Оборудование для наплавки	Серийное	Специальное	Серийное	Специальное	Специальное	Специальное

Сравнивая способы, указанные в таблице 2, можно сделать следующие выводы:

- Способы дуговой наплавки плавящимся электродом обеспечивают большую производительность процесса, по сравнению со способами наплавки неплавящимся электродом.
- Способы наплавки неплавящимся электродом позволяют наплавленный металл высокого качества. При наплавке плавящимся электродом существует вероятность наличия внутренней пористости металла, а также разбрызгивания присадочного металла.
- Применение специальных способов наплавки позволяет повысить производительность и обеспечить гибкость процесса. Однако для реализации

процесса требуется специальное оборудование и достоверные технологические рекомендации.

- Аксиальная подача присадочной проволоки является предпочтительной, т.к. упрощается система подачи проволоки и не требуется точная настройка и ориентация подачи относительно траектории наплавки.

Таким образом, существует проблема выбора: использовать производительные способы наплавки с риском образования дефектов в наплавленном металле или применять низко производительные способы, обеспечивающие высокое качество наплавки. Разработка способа наплавки, обеспечивающего одновременно высокое качество наплавленного металла и производительность процесса, является актуальной задачей для WAAM.

Применение комбинации нескольких способов наплавки или гибридных технологий (DE-GMAW, тандем МИГ/МАГ, SuperMIG, лазерно-дуговая наплавка и др.) может стать прогрессивным путем повышения производительности и качества наплавки. Преимущество таких технологий заключается в том, что сочетание разных процессов позволяет получать эффекты, которые невозможно достичь по отдельности. Следует учитывать, что комбинированные процессы усложняют технологию наплавки, а специализированное оборудование имеет высокую стоимость.

1.3. Плазменная наплавка плавящимся электродом

Плазменная наплавка плавящимся электродом (плазма-МИГ) является перспективным процессом для послойного формирования металлических изделий. Этот гибридный процесс сочетает в себе два дуговых процесса: наплавку плавящимся электродом и плазменную наплавку. Одновременное соосное горение двух дуг: плазменной дуги и дуги с плавящегося электрода (МИГ дуги) (см. рисунок 7) является особенностью плазма-МИГ. При этом каждая дуга питается от собственного сварочного источника.



Рисунок 7. Горение дуг при плазма-МИГ процессе [118]

Способ плазма-МИГ применяется для сварки и наплавки углеродистых и легированных сталей, цветных металлов и сплавов, разнородных материалов [119-127]. Данный способ используется для сварки корпусов и ёмкостей, восстановительной и упрочняющей наплавки пресс-форм и клапанов и т.д. [119, 121, 123-127]. В качестве присадочных материалов применяют проволоки как сплошного сечения, так и порошковые [119, 128].

Способ плазма-МИГ был разработан в 1972 году в Philips Research Laboratory Center (Нидерланды) [128, 129]. Исследование плазма-МИГ осуществляются во многих университетах и предприятиях: ИЭС им. Патона (Украина), Технический университет Хемниц (Германия), Китайско-украинский институт сварки (КНР), фирма ТВi (Германия), Томский политехнический университет (Россия), НПЦ «ПЛАЗЕР» (Украина), Приазовский технический университет (Украина) IMC Soldagem (Бразилия), Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет (Пермь) и другие [118, 129, 130].

На данный момент существует большое количество разновидностей способов плазменной наплавки плавящимся электродом [128-130].

Плазменная наплавка плавящимся электродом, по способу генерации плазменной дуги имеет разновидности, представленные на рисунке 8.

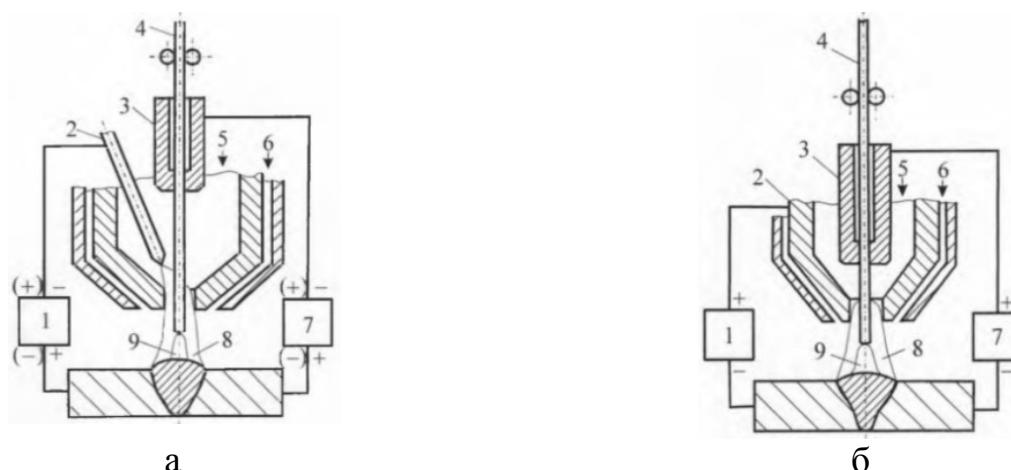


Рисунок 8. Схемы плазменно-дуговой наплавки плавящимся электродом: а – с неплавящимся вольфрамовым электродом; б – с кольцевым анодом;

1 – источник питания плазменной дуги; 2 – неплавящийся электрод; 3 – токоподводящий наконечник; 4 – плавящийся электрод; 5 – плазмообразующий газ; 6 – защитный газ; 7 – источник питания дуги плавящегося электрода; 8 – плазменная дуга; 9 – дуга плавящегося электрода [128-130]

Процесс плазма-МИГ со стержневым неплавящимся электродом отличается возможностью использования плазменной дуги прямой и обратной полярности, а также косвенной дуги. Процесс начинают с зажигания плазменной дуги с последующей подачей плавящегося электрода. При этом дуга с плавящегося электрода возбуждается самопроизвольно. Недостатками данной схемы плазма-МИГ являются: необходимость точной ориентации вольфрамового электрода для обеспечения соосного горения дуг, перегрев вольфрамового электрода при работе на токе обратной полярности, сложность изготовления и обслуживания плазмотрона, большие габаритные размеры.

Разновидности способа плазма-МИГ со стержневым неплавящимся электродом показаны на рисунке 9 [128].

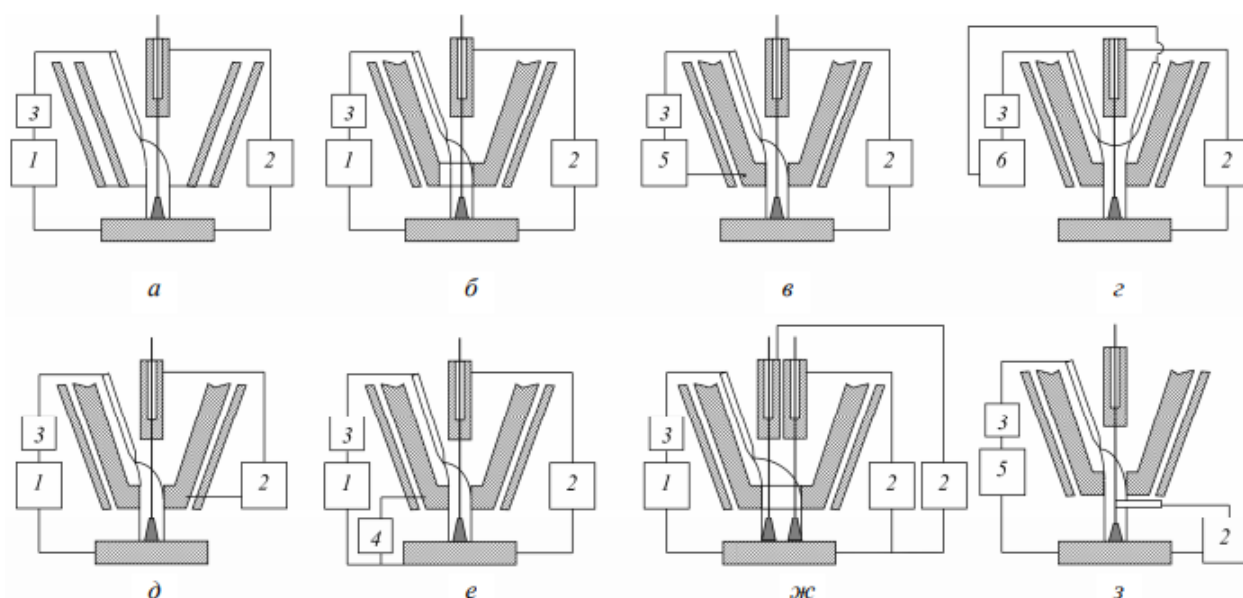


Рисунок 9. Схемы плазма-МИГ с неплавящимся стержневым электродом:
а – с широким соплом; *б* – с ассиметричным соплом; *в* – с косвенной плазменной дугой; *г* – с плазменной струей переменного тока; *д* – с косвенной дугой плавящегося электрода; *е* – с дополнительным током с сопла; *жс* – с двумя плавящимися электродами; *з* – с нижним расположением токоподвода к плавящемуся электроду; 1 – источник питания сжатой дуги «электрод-изделие»; 2 – источник питания дуги плавящегося электрода; 3 – осциллятор; 4 – источник питания сжатой дуги «сопло-изделие»; 5 – источник питания сжатой дуги «электрод-сопло»; 6 – источник питания «электрод-электрод»; [128]

Использование медного кольцевого анода с водяным охлаждением является прогрессивным путем развития технологии плазма-МИГ (рисунок 8, б). При этом увеличивается допустимая мощность плазменной дуги, повышается стабильность плазменной дуги, уменьшается вылет проволочного электрода, упрощается конструкция и повышается надежность плазмотрона. Плазменная дуга обратной полярности позволяет реализовать эффект катодной очистки зоны наплавки [128, 130].

Данный способ плазма-МИГ имеет две разновидности: без стабилизирующего сопла и со стабилизирующим соплом (см. рисунок 10).

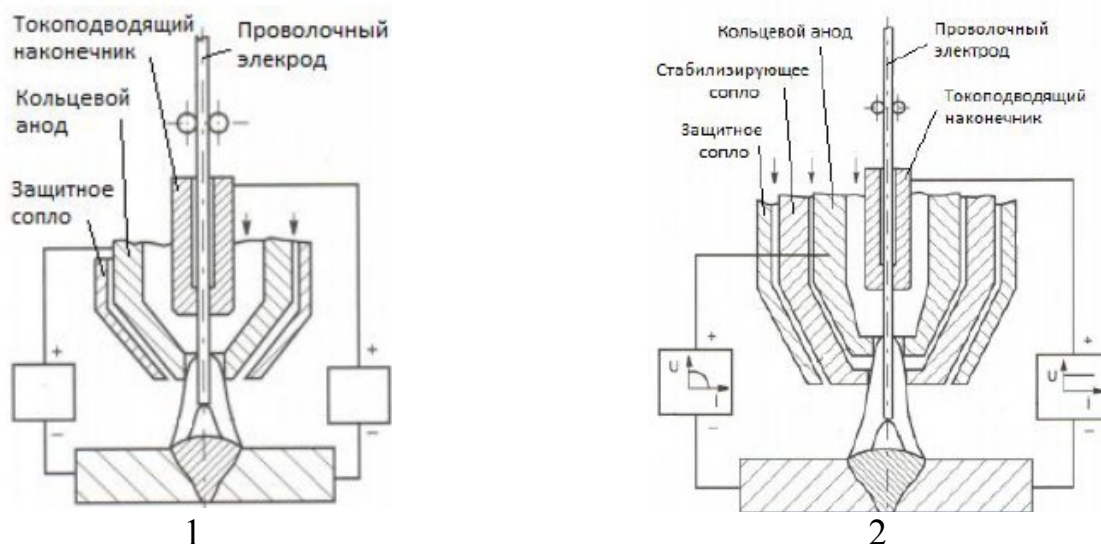


Рисунок 10. Схемы процесса плазма-МИГ с кольцевым анодом: 1 - без стабилизирующего сопла, 2 - со стабилизирующим соплом [130]

Работу плазма-МИГ наплавки без стабилизирующего сопла обычно начинают с возбуждения МИГ дуги путем короткого замыкания присадочной проволоки на изделие. Плазменная дуга между кольцевым анодом и изделием загорается самопроизвольно через 0,1 с. Недостатками данного процесса являются: возможное разбрызгивание электродного металла в момент зажигания дуги с плавящегося электрода и отсутствие стабилизации плазменной дуги [128, 130]. Метод «мягкого старта», показанный на рисунке 11, позволяет избежать разбрызгивания металла [131]. Очевидно, что реализация данного способа требует наличие системы управления.

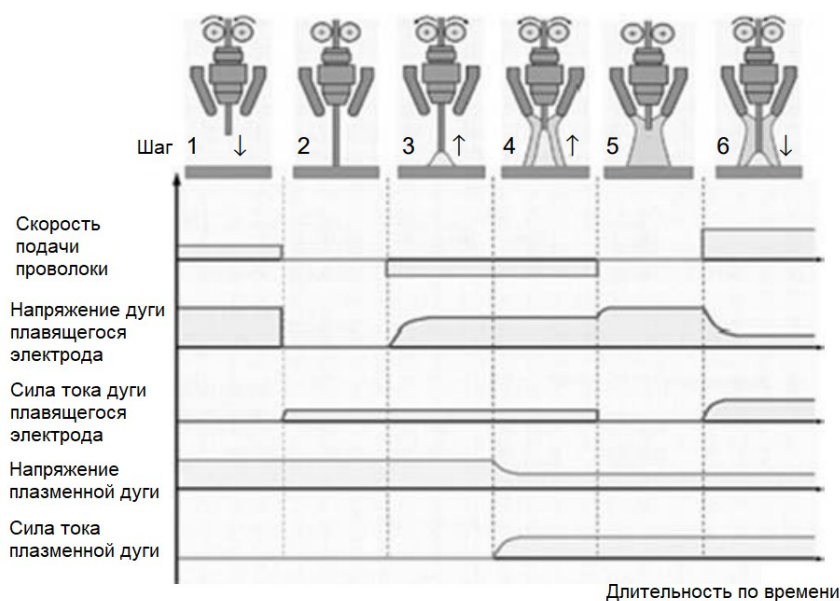


Рисунок 11. Схема «мягкого старта» плазма-МИГ процесса [131]

Введение в конструкцию плазмотрона стабилизирующего сопла создает ряд преимуществ:

1. Возможность возбуждения плазменной дуги высокочастотным разрядом между кольцевым анодом и стабилизирующим соплом. Во избежание двойного дугообразования, сначала подается стабилизирующий газ (в качестве пускового), а после выдувания дуги – плазмообразующий [130, 132]. Применение высокочастотного разряда требует наличия соответствующей системы защиты электронного оборудования [131].

2. Повышение тепловой мощности и стабильности горения плазменной дуги за счет дополнительного обжата стенками канала сопла и потоком стабилизирующего газа [121, 130].

3. Варьируя сочетания подачи плазмообразующего и стабилизирующего газов возможно воздействовать на характер переноса электродного металла, а изменением состава газов можно активно управлять металлургическими процессами в зоне наплавки [128-130].

4. Увеличение вылета проволочного электрода приводит к его дополнительному нагреву и повышению производительности наплавки (до 35 кг/ч) [121, 128, 133]. Присоединение дополнительного сварочного источника между кольцевым анодом и стабилизирующим соплом позволяет повысить производительность наплавки до 45 кг/ч [134].

Однако при этом усложняется конструкция плазмотрона, увеличиваются его габаритные размеры и масса.

Плазменная наплавка плавящимся электродом характеризуется гибкостью процесса. Это обусловлено большим количеством параметров режима и простотой их регулирования. Параметры процесса условно подразделяются на конструктивные и технологические [128]. К первой группе относятся параметры, связанные с конструкцией плазмотрона (см. рисунок 12): длина плазмообразующего канала кольцевого анода (h_a), длина канала стабилизирующего сопла (h_c), диаметры кольцевого анода (d_a) и стабилизирующего сопла (d_c), отношение диаметров

кольцевого анода и стабилизирующего сопла ($\psi=d_a/d_c$), расстояние между кольцевым анодом и стабилизирующим соплом (h_{ac}). Длина вылета электрода ($l_э$) зависит от конструктивных параметров и определяется как:

$$l_э = h_{си} + h_c + h_{ac} + h_a + h_{вн} \quad (1)$$

где, $h_{си}$ – расстояние от среза кольцевого анода до поверхности изделия; $h_{вн}$ – расстояние от токосъемного наконечника до канала кольцевого анода [128].

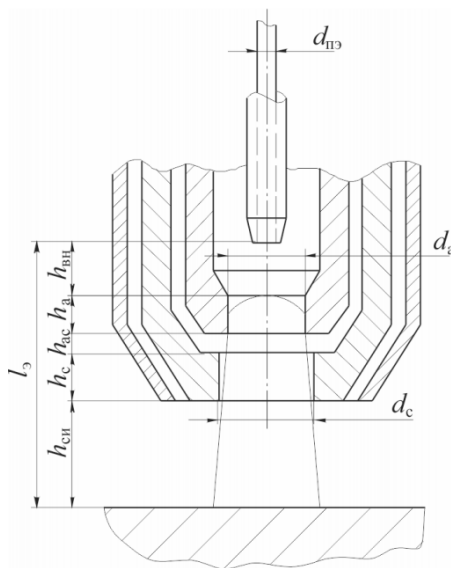


Рисунок 12. Схема плазмотрона для плазма-МИГ процесса: $d_{пэ}$ – диаметр плавящегося электрода, d_a – диаметр кольцевого анода, d_c – диаметр стабилизирующего сопла, $l_э$ – вылет плавящегося электрода, $h_{си}$ – расстояние между срезом стабилизирующего сопла и изделием, h_c – длина канала стабилизирующего сопла, h_{ac} – расстояние между стабилизирующим соплом и кольцевым анодом, h_a – длина канала кольцевого анода, $h_{вн}$ – расстояние от токосъемного наконечника до кольцевого анода [128]

К основным технологическим параметрам относятся: сила тока плазменной дуги ($I_{пд}$) и дуги плавящегося электрода ($I_{пэ}$), диаметр плавящегося электрода ($d_{пэ}$), скорость подачи плавящегося электрода ($V_{пэ}$), состав и способ подачи технологических газов, расход плазмообразующего ($Q_{пг}$) и стабилизирующего газа ($Q_{сг}$) [128].

Стабильная и надежная работа плазмотрона обеспечивается при: $h_a = 4-8$ мм, $h_c = 4-6$ мм, $d_a = 6-12$ мм, $d_c > d_a = 8-20$ мм, $h_{ac} = 2-5$ мм, $d_{пэ} = 1-2$ мм [128].

Стабильность плазма-МИГ процесса наблюдается в широком диапазоне технологических параметров режима. О процессе устойчивого горения можно судить как визуально, так и по ширине зоны катодной очистки. При установившемся стабильном горении плазменная дуга имеет столб, примерно равный диаметру отверстия анода, при $I_{\text{пд}} = 100\text{-}250 \text{ А}$ ($d_a = 8 \text{ мм}$). При меньших токах, при $d_a = 8 \text{ мм}$, стабильность горения плазменной дуги нарушается. Предполагается, что активные пятна дуги занимают только часть кольцевого канала анода. При $I_{\text{пд}} < 80 \text{ А}$ ширина зоны катодной очистки становится непостоянной (изменяется в пределах 5-10мм) [119, 125].

В определенных случаях возможно шунтирование всего тока плазменной дуги на плавящийся электрод (рисунок 13). При этом возникает режим двойного дугообразования, что может привести к аварийной ситуации. Стабильный процесс плазма-МИГ протекает при условии [135]:

$$E_{\text{ст}} L_{\text{п}} < U_{\text{к}} + U_{\text{а}} + U_{\text{в}} \quad (2)$$

где, $E_{\text{ст}}$ – градиент потенциала столба плазменной дуги, $L_{\text{п}}$ – участок вылета электрода, находящегося в контакте с плазмой, $U_{\text{к}}$ – катодное падение напряжения от тока плазменной дуги, $U_{\text{а}}$ – анодное падение напряжения на торце плавящегося электрода, $U_{\text{в}}$ – падение напряжения на вылете плавящегося электрода.

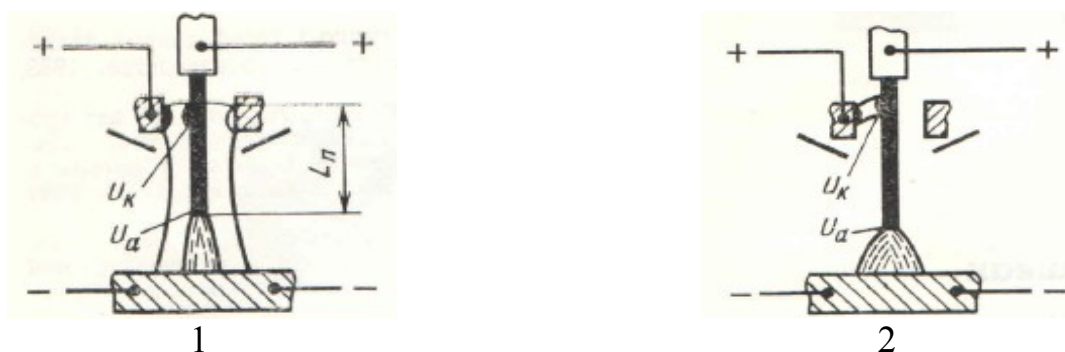


Рисунок 13. Схема плазма-МИГ: 1 - стабильный процесс, 2 – нарушение процесса (возникновение второй дуги). $E_{\text{ст}}$ – градиент потенциала столба плазменной дуги; $L_{\text{п}}$ – участок вылета электрода, находящегося в контакте с плазмой; $U_{\text{к}}$ – катодное падение напряжения от тока плазменной дуги; $U_{\text{а}}$ – анодное падение напряжения на торце плавящегося электрода; $U_{\text{в}}$ – падение напряжения на вылете плавящегося электрода [135]

Отмечается, что при $Q_{\text{пр}} > 5$ л/мин ($I_{\text{пд}} = 80$ А) происходит нарушение устойчивого горения плазменной дуги из-за неравномерной ионизации газового потока [136].

Несмотря на преимущества, процесс плазменной наплавки плавящимся электродом не получил широкого применения из-за отсутствия надежного серийного оборудования [128, 130].

Анализируя представленную информацию, можно сделать вывод, что способ плазменной наплавки плавящимся электродом имеет преимущества по производительности и качеству наплавляемого металла, по сравнению со способами, применяемыми при WAAM. Имеющиеся технологические рекомендации для плазменной наплавки плавящимся электродом в большей степени подходят для сварки и традиционной наплавки на форсированных режимах (высокие значения сварочных токов и скоростей). Применение таких режимов для аддитивного формирования мало- и среднегабаритных изделий неизбежно повлечет перегрев изделия и образование дефектов. Поиск режимов плазма-МИГ наплавки, при которых обеспечивается высокая производительность послойного формирования изделий, и оптимальное качество наплавленного металла является актуальной задачей.

Таким образом, **целью** диссертационной работы является повышение производительности и качества аддитивного производства металлических изделий применением плазменной наплавки плавящимся электродом.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Определить влияние технологических параметров на граничные условия устойчивости процесса и закономерности формообразования наплавленного валика при плазменной наплавке плавящимся электродом.

2. Разработать математическую модель расчета геометрических параметров одиночного валика при плазменной наплавке плавящимся электродом применительно к условиям аддитивного формирования металлических изделий.

3. Установить особенности теплопередачи в плазмотрон и изделие при плазменной наплавке плавящимся электродом и разработать оборудование, обеспечивающее работу в условиях аддитивного производства металлических изделий.

4. Исследовать процесс послойной плазменной наплавки плавящимся электродом и разработать технологические рекомендации для аддитивного формирования металлических изделий из высоколегированных сталей аустенитного класса.

5. Исследовать структуру и свойства высоколегированной стали, полученной послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом.

Глава 2. Исследование особенностей формирования металлических изделий послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом

Способ плазменной наплавки плавящимся электродом для аддитивного формирования металлических изделий в настоящее время не используется (мало исследован). Это связано как с особенностями самого процесса, так и со специфичными условиями послойного формирования металлических заготовок. Процесс плазма-МИГ весьма устойчив в диапазонах «форсированных» режимов со струйным и пароструйным переносом металла плавящегося электрода. Эти режимы характеризуются высокими мощностями дуг, большой производительностью и теплопередачей в изделие. Такие режимы не всегда приемлемы для послойного формирования заготовок с заданным профилем и малой толщиной стенок. Образуется ванна жидкого металла значительных габаритов и массы. Это влечет за собой проблемы с удержанием ванны, защитой её хвостовой части, формированием качественного бездефектного металла и др. Наплавка на режимах с минимальным значением погонной энергии и на малых плотностях токов приводит к дестабилизации процесса.

Стабильность плазменной наплавки плавящимся электродом характеризуется:

1. пространственной и временной устойчивостью горения двух дуг;
2. неизменностью скорости плавления и формы переноса металла плавящегося электрода;
3. безотказной длительной работой плазмотрона в заданном режиме;
4. постоянством формирования наплавляемого валика заданных размеров при высоком качестве наплавляемого материала.

Целью настоящего раздела является определение граничных условий устойчивости процесса плазменной наплавки плавящимся электродом применительно к условиям аддитивного формирования металлических изделий и установление закономерностей формообразования наплавленного валика при плазменной наплавке плавящимся электродом.

2.1. Исследование условий устойчивого процесса плазменной наплавки плавящимся электродом для аддитивного формирования металлических изделий

Работа проводилась на экспериментальном оборудовании с использованием плазмотрона, разработанного на кафедре СПМиТМ ПНИПУ (см. рисунок 14).



Рисунок 14. Экспериментальный плазмотрон

Сварочный аппарат Foxweld INVERMIG 350E применялся для питания МИГ дуги, сварочный аппарат Кедр ARC-319 – для плазменной дуги. Основные параметры оборудования приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Основные характеристики сварочных аппаратов

Сварочный аппарат	FoxWeld 5706 Invermig 500E	Кедр ARC-319
Напряжение холостого хода, В	70	70
Сварочный ток, А	до 320 (100% ПВ)	40-250 (100% ПВ)
Сварочное напряжение, В	15,5-39,0	-

В качестве плавящегося электрода использовалась проволока ОК Autrod 308LSi (ESAB). Выбор материала обоснован в главе 4. Плазмообразующим и защитным газом являлся аргон первого сорта по ГОСТ 10157-2016.

Схема исследуемого процесса плазменной наплавки плавящимся электродом без стабилизирующего сопла показана на рисунке 15.

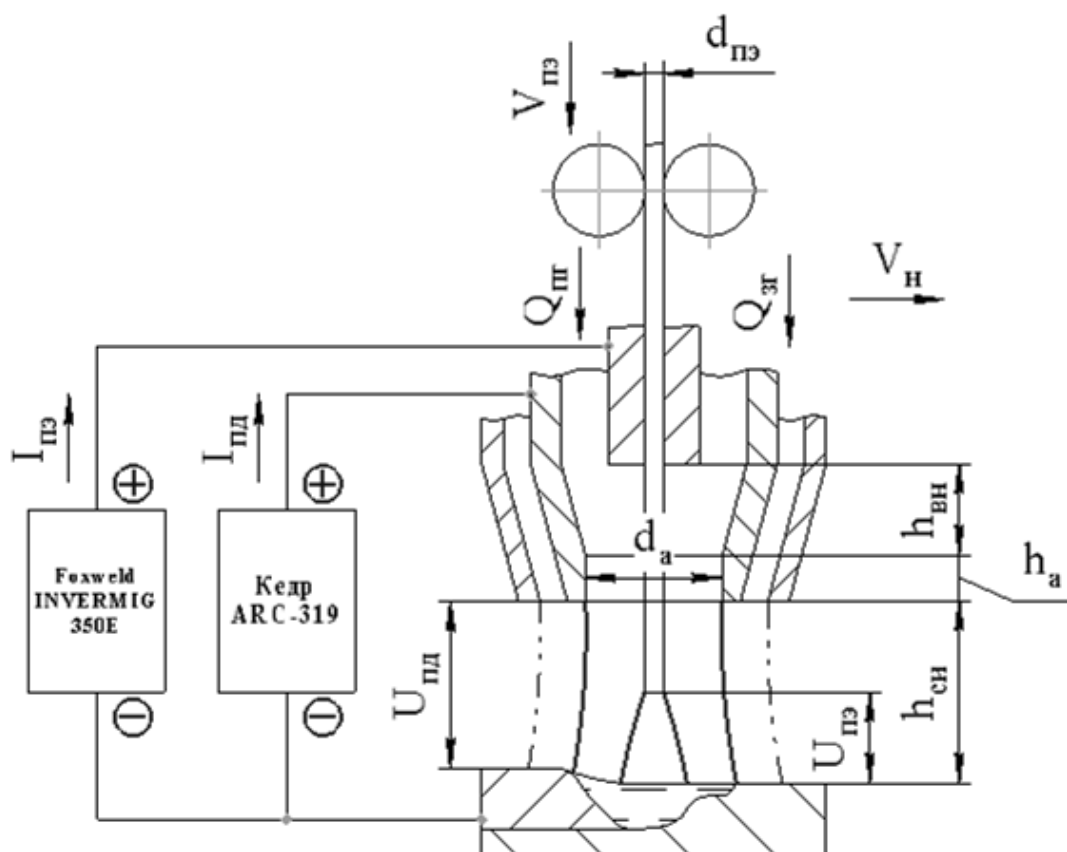


Рисунок 15. Схема процесса плазменной наплавки плавящимся электродом: $I_{пэ}$ – сила тока МИГ дуги, $U_{пэ}$ – напряжение МИГ дуги, $I_{пд}$ – сила тока плазменной дуги, $U_{пд}$ – напряжение плазменной дуги, $V_{пэ}$ – скорость подачи плавящегося электрода, $V_н$ – скорость наплавки, $Q_{пг}$ – расход плазмообразующего газа, $Q_{зг}$ – расход защитного газ, $d_{пэ}$ – диаметр плавящегося электрода, d_a – диаметр кольцевого анода, h_a – высота канала кольцевого анода, $h_{си}$ – расстояние от среза кольцевого анода до изделия, $h_{вн}$ – расстояние от торца контактного наконечника до кольцевого анода

Фиксированными параметрами были: $d_{пэ} = 1,2$ мм, $h_a = 3$ мм, $h_{си} = 10-12$ мм, $h_{вн} = 6-8$ мм, $Q_{зг} = 12-15$ л/мин. Варьируемыми параметрами процесса являются: $U_{пэ}$, $I_{пд}$, $V_{пэ}$, $Q_{пг}$, $V_н$, d_a . Значения $I_{пэ}$ и $U_{пд}$ измеряли в процессе экспериментов.

Скорость подачи проволоки приводится в качестве варьируемого параметра вместо тока МИГ дуги в связи с тем, что эти два параметра пропорционально взаимосвязаны. Увеличение скорости подачи плавящегося электрода соответственно приводит к возрастанию тока МИГ дуги. Помимо этого, скорость подачи присадочной проволоки является основным параметром управления режимом наплавки в серийно выпускаемых сварочных аппаратах.

Экспериментальный поиск граничных режимов устойчивого плазма-МИГ процесса выявил закономерности, представленные на рисунках 16-18.

При диаметре канала кольцевого анода $d_a = 6$ мм минимальный $I_{\text{пд}}$ составляет 80 А, а при $d_a = 8$ мм - минимальный $I_{\text{пд}} = 100$ А (см. рисунок 16). При меньших значениях $I_{\text{пд}}$ плазменная дуга не возбуждалась. При $d_a < 8$ мм повышается риск контакта присадочной проволоки и капле расплавленного металла с кольцевым анодом, вследствие чего происходит нарушение процесса наплавки и выход из строя плазмотрона.

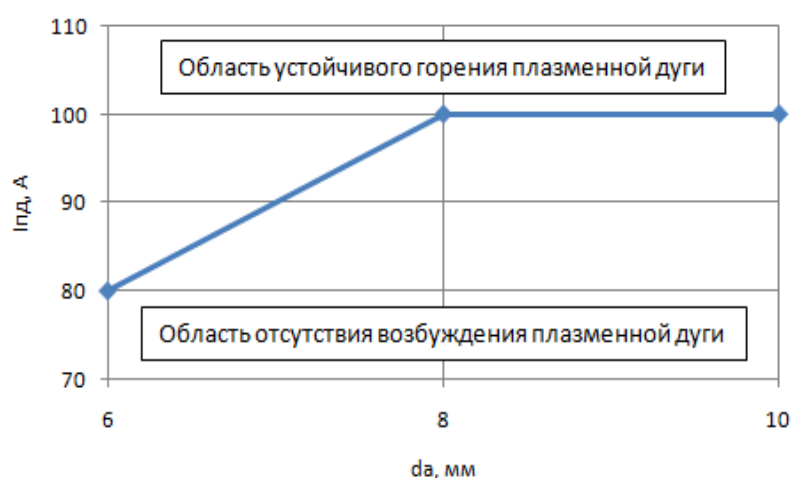


Рисунок 16. Зависимость величины минимального $I_{\text{пд}}$ от d_a ($U_{\text{пэ}} = 25$ В, $V_{\text{пэ}} = 6$ м/мин, $Q_{\text{пг}} = 5$ л/мин)

Увеличению d_a более 10 мм требует повышения расхода плазмообразующего газа $Q_{\text{пг}}$, что не желательно. Рационально увеличивать $d_a > 8$ мм для присадочных проволок большего сечения, чтобы не допустить контакта капле электродного металла с кольцевым анодом.

Влияние расхода плазмообразующего газа на устойчивость горения плазменной дуги при $V_{\text{пэ}} = 4$ м/мин представлено на рисунке 17. При $Q_{\text{пг}}$ менее 3,5 л/мин возбуждение плазменной дуги не происходит вне зависимости от параметров режима плазменной наплавки плавящимся электродом.

Расход плазмообразующего газа $Q_{\text{пг}}$ не влияет на стабильность возбуждения и горения плазменной дуги при увеличении $V_{\text{пэ}}$ более 5 м/мин.

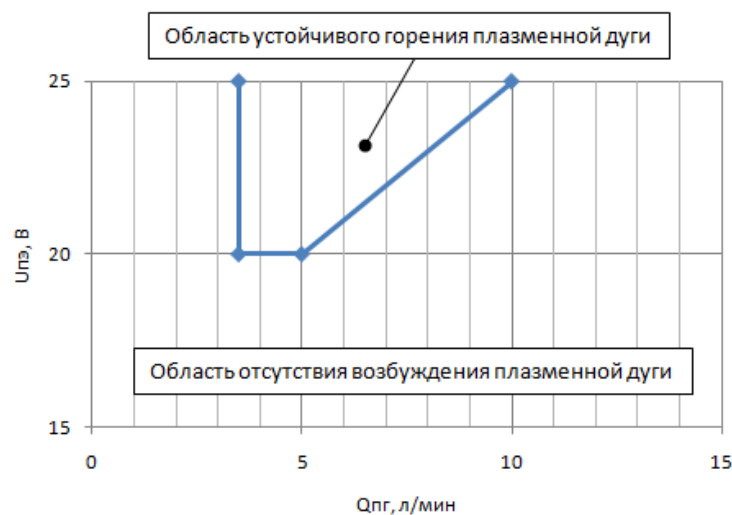


Рисунок 17. Влияние $Q_{пг}$ на стабильность горения плазменной дуги ($I_{пд} = 100$ А, $d_a = 8$ мм, $V_{пэ} = 4$ м/мин)

Влияние напряжения дуги плавящегося электрода на устойчивость процесса показано на рисунке 18. Для ведения стабильного процесса требуется $U_{пэ}$ не менее 20 В. При скорости подачи плавящегося электрода менее 5 м/мин для ведения устойчивого плазма-МИГ процесса требуется большее $U_{пэ}$ (не менее 30 В).

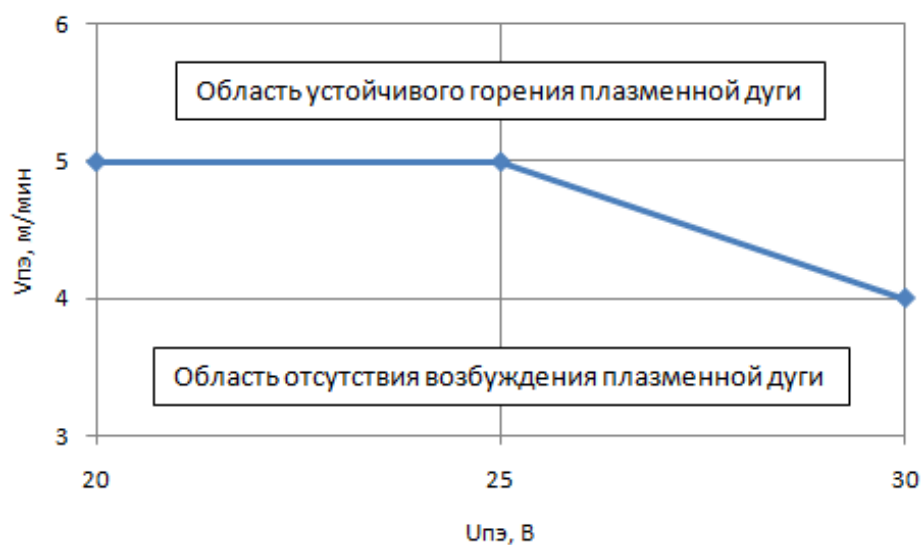


Рис.18. Влияние $U_{пэ}$ на стабильность горения плазменной дуги ($I_{пд} = 100$ А, $d_a = 8$ мм, $Q_{пг} = 5$ л/мин)

2.2. Исследование плавления электродной проволоки при плазменной наплавке плавящимся электродом

При плазменной наплавке плавящимся электродом возможны разные виды переноса электродного металла (см. рисунок 19). Эксперименты, проведенные по исследованию влиянию параметров режима плазменной наплавки проволокой ОК Autrod 308LSi (ESAB) диаметром $d_{\text{пэ}} = 1,2$ мм показали принципиальную возможность различных форм переноса электродного металла, что согласуется с результатами известных исследований [121, 128, 133, 136].

При низком напряжении МИГ дуги (до 22В) при $V_{\text{пэ}}$ до 5 м/мин имеет место крупнокапельный перенос электродного металла с коротким замыканием или без него (рисунок 19, а). Поверхность наплавленного валика имеет грубую чешуйчатость.

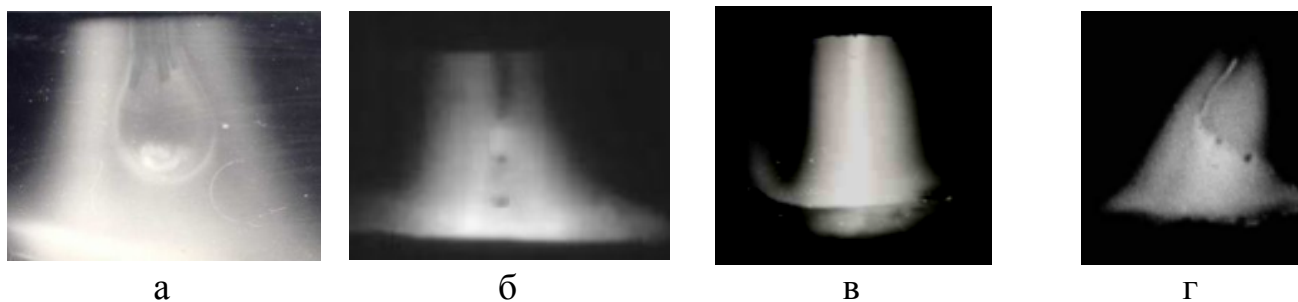


Рисунок 19. Виды переноса электродного металла: а – крупнокапельный, б – мелкокапельный, в - струйный, г - вращательный [128, 132, 136]

При напряжении МИГ дуги 28 В и $V_{\text{пэ}}$ более 5 м/мин наблюдается мелкокапельный перенос (рисунок 19, б). При увеличении $I_{\text{пд}}$ со 100 до 200 А размер капель уменьшается до 0,3-0,5 мм [125, 132, 137]. Использование импульсного тока плавящегося электрода упрощает переход к мелкокапельному переносу [120].

При дальнейшем увеличении $V_{\text{пэ}}$ ($I_{\text{пэ}}$) происходит переход к струйному переносу (рисунок 19 в). При этом капли переносятся строго вдоль оси плазматрона [128].

С увеличением вылета электрода при дальнейшем росте $V_{\text{пэ}}$ ($I_{\text{пэ}}$) происходит переход к вращательному переносу электродного металла (рисунок 19, г). Капли жидкого металла перемещаются по спирали в пределах диаметра плазменной дуги.

При этом разбрызгивания металла не происходит. Ширина наплавленного валика может достигать 40 мм при минимальной глубине проплавления [128, 130, 136].

Дуга с плавящегося электрода является основным источником проплавления основного металла при токе МИГ дуги менее 250А. Установлено, что частота переноса капель влияет на глубину проплавления. Управление параметрами процесса наплавки позволяет получать различные формы проплавления (см. рисунок 20) [120, 128, 137].

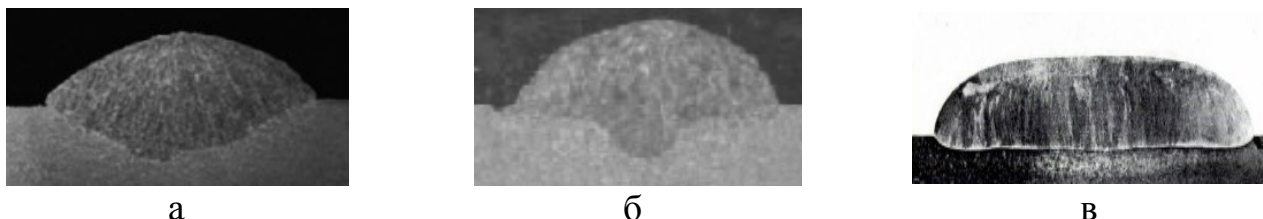


Рисунок 20. Виды проплавления при плазма-МИГ наплавке; обозначения: а – при крупнокапельном переносе; б – при мелкокапельном и струйном переносе; в – при вращающейся дуге [120, 128, 137, 138]

При способе плазма-МИГ возможны разные схемы горения МИГ дуги (см. рисунок 21). В зависимости от разницы потенциалов между точками К (анодная область МИГ дуги; торец плавящегося электрода) и С (анодная область плазменной дуги; канал кольцевого анода), на которую влияет вылет плавящегося электрода, дуга может гореть между торцом плавящегося электрода и изделием (рисунок 21, а) или между торцом плавящегося электрода и плазменной дугой (рисунок 21, б). Дуга с плавящегося электрода горит: при $U_K < U_C$ – между торцом электрода и плазменной дугой, при $U_K > U_C$ – между торцом электрод и изделием [128].

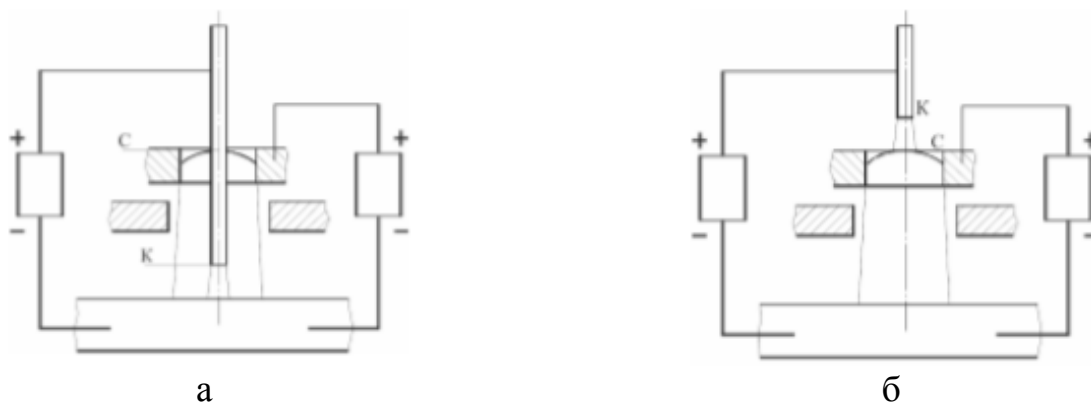


Рисунок 21. Схемы горения дуг при плазменной наплавке плавящимся электродом: а – дуга плавящегося электрода горит между торцом плавящегося электрода и изделием; б - дуга плавящегося электрода горит между торцом плавящегося электрода и плазменной дугой [128]

Из рисунков 19, 20 видно, что для уменьшения проплавления и снижения доли основного металла в наплавленном валике предпочтительно проводить наплавку при крупнокапельном и мелкокапельном переносе электродного металла. С другой стороны, мелкокапельный перенос характеризуется высокими значениями скорости подачи присадочной проволоки и тока МИГ дуги. При этом увеличиваются размеры ванны жидкого металла, что создает проблемы качественного формирования стенок изделия.

Изменение вида горения МИГ дуги и способа переноса электродного металла определяет возможность наплавки с минимальным проплавлением основного металла.

Для определения границ изменения схемы взаимного горения дуг проводили серию экспериментов. Режимы плазма-МИГ и результаты наблюдения приведены в таблице 4. Изменение схемы горения МИГ дуги регистрировали визуально.

Таблица 4 - Влияние режима плазма-МИГ наплавки на схему горения дуг

$V_{пз}$, м/мин	$I_{пд}$, А	$U_{пд}$, В	$I_{пз}$, А	$U_{пз}$, В	Схема горения дуг (рисунок 21)
4	100	25	115	20	а
		26	130	25	б
	120	25	110	20	а
		25	120	25	б
	140	26	110	20	а
		26	120	25	б
5	100	26	160	25	а
		23	170	27,5	а
		26	190	30	б
	120	32	125	25	а
		28	150	27,5	а
		30	160	30	б
	140	32	140	25	а
		30	150	27,5	а
		32	140	30	б

Таблица 4 - Продолжение

$V_{пэ}, \text{ м/мин}$	$I_{пд}, \text{ А}$	$U_{пд}, \text{ В}$	$I_{пэ}, \text{ А}$	$U_{пэ}, \text{ В}$	Схема горения дуг (рисунок 21)
6	100	32	160	25	а
		29	180	27,5	а
		29	200	30	б
	120	28	175	25	а
		28	190	27,5	а
		28	190	30	б
	140	28	170	25	а
		29	185	27,5	а
		29	200	30	б
7	100	30	200	25	а
		30	205	27,5	а
		30	215	30	б
	120	29	195	25	а
		29	205	27,5	а
		29	215	30	б
	140	34	180	25	а
		30	205	27,5	а
		28	220	30	б
8	100	32	205	25	а
		32	220	27,5	а
		32	240	30	б
	120	32	210	25	а
		30	225	27,5	а
		28	240	30	б
	140	34	200	25	а
		28	205	27,5	а
		28	230	30	б

На рисунке 22 представлен график, отображающий границы изменения схемы горения МИГ дуги при плазменной наплавке плавящимся электродом.

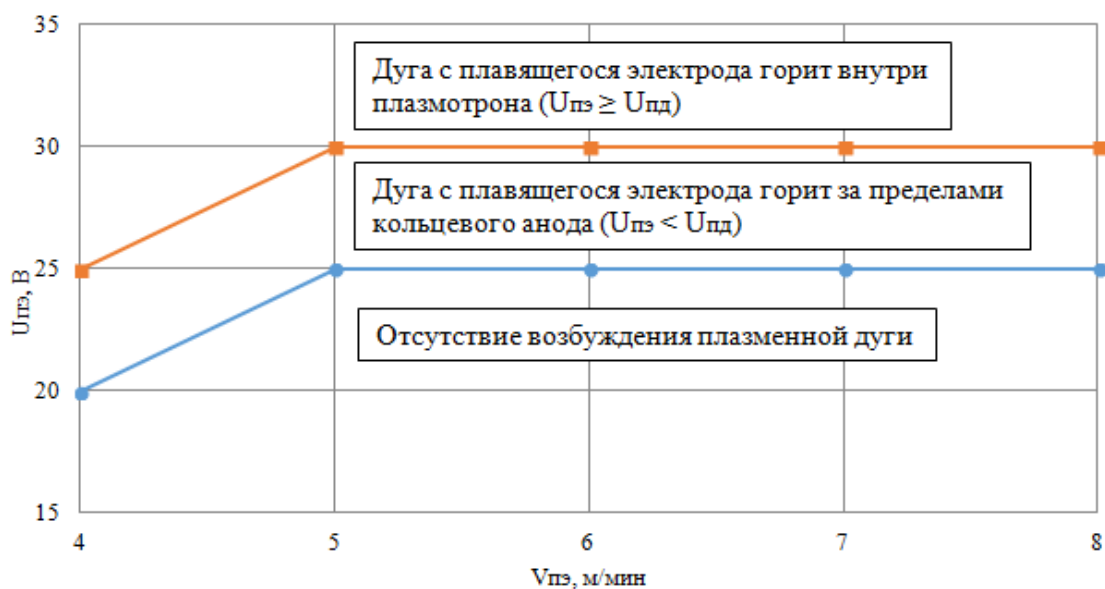


Рисунок 22. Влияние параметров плазма-МИГ наплавки на схему горения дуг

Полученный график позволяет определять не только схему горения дуги, но и характер переноса электродного металла. При $U_{пз} = 20-25 \text{ В}$ (нижняя граница возбуждения плазменной дуги) наблюдается крупнокапельный перенос. Для интервала $U_{пз} = 20-25 \text{ В}$ ($U_{пз} < U_{пд}$) характерным является мелкокапельный перенос. При $U_{пз} \geq 25 \text{ В}$ ($U_{пз} \geq U_{пд}$) имеет место преимущественно струйный перенос электродного металла.

2.3. Исследование тепловых процессов при плазменной наплавке плавящимся электродом

Качество и стабильность формирования наплавленного валика определяется рядом процессов: тепловой обстановкой в зоне наплавки, переносом электродного металла, параметрами процесса и др.

При плазменной наплавке плавящимся электродом тепловая мощность поступает в изделие за счет выделения в катодной области - $41\pm 3\%$, посредством излучения и конвекции - $34\pm 3\%$, путем переноса каплями электродного металла - $25\pm 5\%$. Предполагается, что тепло плазменной дуги составляет около 75% от общего тепла передаваемого заготовке. При этом плазменная дуга не оказывает существенного влияния на глубину проплавления [119, 125, 134, 137].

Известно, что средняя температура плазменной аргоновой дуги ($\approx 13000\text{ }^{\circ}\text{C}$) в 2 раза выше, чем температура МИГ дуги ($\approx 6500\text{ }^{\circ}\text{C}$) [122, 124].

Предполагается, что тепловой поток в изделие от плазменной дуги с кольцевого анода имеет минимум по оси дуги, с чем трудно согласиться. Одновременное воздействие плазменной дуги и МИГ дуги создают сложный профиль теплового потока, показанные на рисунке 23 [139].

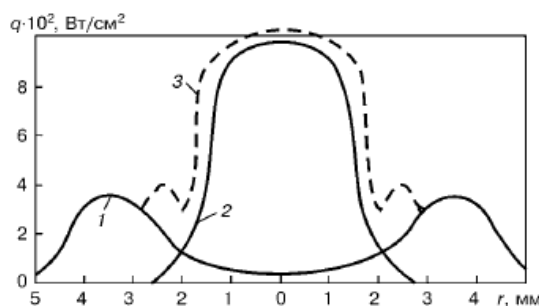


Рисунок 23. Распределение теплового потока в изделии при процессе плазма-МИГ:

1 – профиль теплового потока плазменной дуги прямой полярности (кольцевой электрод – катод), 2 – профиль теплового потока МИГ дуги, 3 – суммарный профиль теплового потока, q – тепловой поток, r – расстояние от оси плазматрона [139]

Термический цикл при плазменной наплавке плавящимся электродом отличается от традиционных сварочных процессов (рисунок 24). Изменение скорости нагрева обусловлено подогревом зоны наплавки передним фронтом плазменной дуги. Пик нагрева связан с воздействием МИГ дуги и перегретых капель электродного металла [134].

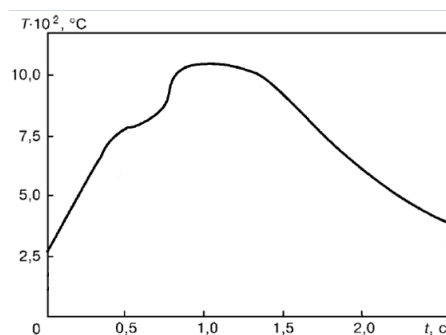


Рисунок 24. Термический цикл при плазменной наплавке плавящимся электродом [134]

Глубина проплавления металла подложки, размер ванны жидкого металла, форма и размеры наплавляемого валика определяются тепловой обстановкой в зоне наплавки. Непосредственное измерение теплопередачи в изделие при плазменной наплавке плавящимся электродом технически трудно реализуемо. Однако можно выполнить сравнительную оценку теплопередачи в изделие при плазменной обработке током обратной полярности в одно дуговом режиме и при плазменной обработке двумя дугами обратной полярности (см. рисунок 25).

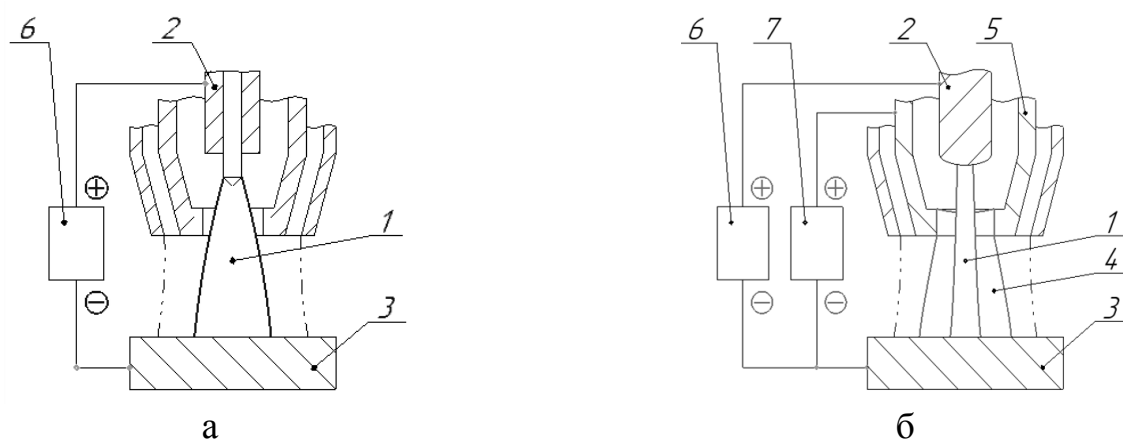


Рисунок 25. Схемы работы плазмотрона в одно дуговом (а) и двух дуговом (б) режимах; 1-электрод-анод, 2-плазмообразующее сопло (кольцевой анод), 3-изделие, 4-источник питания дуги сопло-изделие, 5-источник питания электрод-изделие, 6-плазменная дуга, горящая с сопла (кольцевого анода) на изделие, 7-плазменная дуга, горящая с электрода-анода на изделие

Плазменная дуга прямого действия обратной полярности 1 горит между медным водоохлаждаемым анодом 2 и изделием 3. Плазменная дуга прямого действия обратной полярности 4 горит между соплом (кольцевым анодом) 5 и изделием 3. Питание дуг 1 и 4 производится от источников 6 и 7 соответственно. Схема работы плазмотрона в двух дуговом режиме близка к схеме горения дуг при

плазменной наплавке плавящимся электродом с расположением торца плавящегося электрода внутри плазмотрона. Используя медный водоохлаждаемый имитатор изделия калориметрированием можно определить теплопередачу в изделие при двух дуговом режиме работы. Методика калориметрирования подробно описана в главе 3.

Режимные параметры проведения экспериментов представлены в таблице 5. I_1 - сила тока сжатой дуги горящей с электрода-анода плазмотрона на изделие, I_2 - сила тока сжатой дуги горящей с сопла - кольцевого анода плазмотрона на изделие, d_c - диаметр плазмообразующего сопла, $Q_{\text{п}} = 5,0$ л/мин, расход плазмообразующего газа, $Q_3 = 6,0$ л/мин расход защитного газа, $h_{\text{с-и}}$ - расстояние от среза сопла до изделия.

Таблица 5 - Параметры режима работы плазмотрона в одно и двухдуговом режиме

Режим работы плазмотрона	$h_{\text{с-и}}$, мм	d_c , мм	I_1 , А	I_2 , А
Одно дуговой режим	8,0	6,0	50-200	-
Двух дуговой режим	8,0	6,0	60-150	50-180

Результаты экспериментов представлены в табл. 6. $U_{\text{эс}}$ – падение напряжений плазменной дуги участке электрод – сопло $U_{\text{си}}$ - падение напряжений плазменной дуги участке сопло – изделие, $U_{\text{эи}}$ - падение напряжений плазменной дуги участке электрод – изделие; $P_{\text{из}}$ - измеренная теплопередача в изделие; P_1 , P_2 - мощность первой и второй дуги; P_a - измеренная теплопередача в электрод – анод; P_c - измеренная теплопередача в плазмообразующее сопло; $P_{\text{ас}}$ - часть теплопередачи в плазмообразующее сопло от второй дуги (при работе сопла в качестве кольцевого анода).

Таблица 6 – Результаты экспериментов при работе плазмотрона на токе обратной полярности

I_1 , А	I_2 , А	$U_{\text{эс}}$, В	$U_{\text{си}}$, В	$U_{\text{эи}}$, В	$P_{\text{из}}$, Дж	P_1 , Вт	P_2 Вт	P_a Вт	P_c Дж	$P_{\text{ас}}$ Дж
Одно дуговой режим										
50	-	8	16	24	271	1200	-	175	77	-
100	-	11	18	29	1490	2900	-	342	498	-
150	-	15	18	34	2845	5100	-	525	1071	-
200	-	19	17	36	4471	7200	-	976	1712	-

Таблица 6 - продолжение

I_1, A	I_2, A	$U_{эс}, B$	$U_{си}, B$	$U_{эи}, B$	$P_{из}, Дж$	$P_1, Вт$	$P_2, Вт$	$P_a, Вт$	$P_c, Дж$	$P_{ас}, Дж$
Двух дуговой										
50	50	4	22	24	1084	1440	1100	204	665	588
50	100	5	22	26	1626	1560	2200	204	1085	1008
50	150	5	23	27	3252	1620	3450	204	1505	1428
150	100	9	26	35	4065	5250	2600	525	1743	672
150	150	10	26	37	4877	5100	3975	525	2247	1176
150	180	11	27	38	5690	5250	4860	525	2751	1680

На рисунке 26 представлены зависимости теплопередачи в изделие при двух дуговом режиме работы плазмотрона на токе обратной полярности.

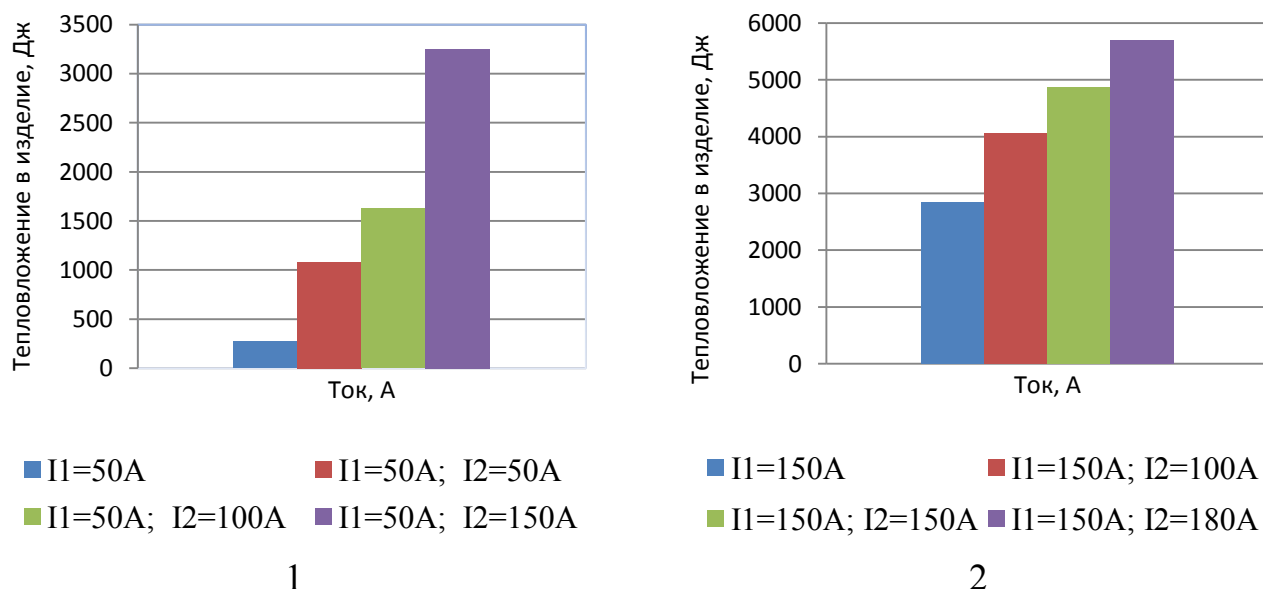


Рисунок 26. Теплопередача в изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности: 1 - $I_1 = 50A$; 2 - $I_1 = 150A$

Проведенные эксперименты показывают, что использование двух дугового режима работы плазмотрона позволяет значительно увеличить теплопередачу в изделие. При этом увеличение теплопередачи практически пропорционально росту тока дуги с плазмобразующего сопла (кольцевого анода) на изделие. При одинаковом токе теплопередача от каждой дуги приблизительно равна. Установлена доля в теплопередаче в плазмобразующее сопло от тока плазменной дуги плазмобразующее сопло (кольцевой анод) – изделие (результаты будут использованы в главе 3).

2.4. Исследование влияния параметров плазменной наплавки плавящимся электродом на геометрические размеры наплавленного валика

Большое количество параметров процесса позволяет гибко управлять формой наплавленного валика. Гибридное воздействие дуг создают своеобразные условия процесса наплавки (рисунок 27) [125].

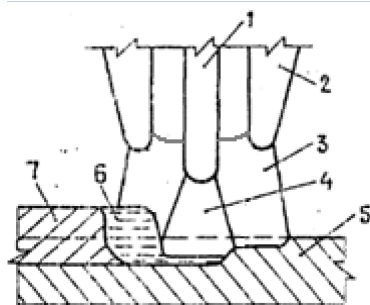


Рисунок 27 Схема зоны плазменной наплавки плавящимся электродом: 1 - плавящийся электрод, 2 - кольцевой анод, 3 - плазменная дуга, 4 - дуга плавящегося электрода, 5 - основной металл, 6 - ванна жидкого металла, 7 - наплавленный валик [125]

Передний фронт плазменной дуги подогревает и очищает, за счет явления катодной очистки, зону наплавки. Высокая плотность тока и энергии в катодных пятнах обеспечивает поверхностное расплавление зоны наплавки на глубину 0,1-0,3 мм. При этом улучшается смачиваемость наплавляемой поверхности металлом плавящегося электрода и увеличивается ширина наплавленного валика. Ширина зоны воздействия превышает диаметр канала кольцевого анода на 1-2 мм и зависит от тока, напряжения и скорости перемещения [125, 134].

Большой диаметр плазменной дуги обеспечивает катодную очистку поверхности расплавленного металла и хорошую защиту под дугой, но при этом увеличивается ширина и длина жидкой ванны, что требует качественной защиты зоны наплавки [125].

С увеличением тока плазменной дуги растет ширина валика, а высота валика и его выпуклость уменьшаются, поверхность валика выравнивается (рисунок 20, г) [119, 140]. Однако при увеличении тока $I_{\text{пл}}$ более 200А может происходить формирование асимметричного валика (рисунок 28). Ассиметричное формирование создается воздействием электромагнитных сил в ванне расплавленного металла и

магнитным дутьем. Увеличение диаметра кольцевого анода с 9 до 12 мм снижает эффект динамического воздействия на жидкий металл ванны и улучшает качество наплавленного валика [122].

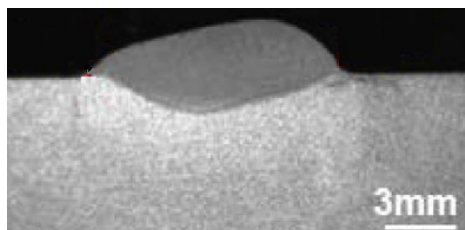
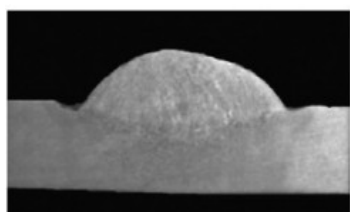
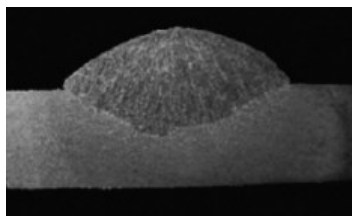


Рисунок 28. Ассиметричный профиль наплавленного валика [138]

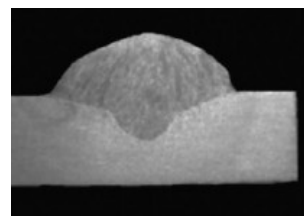
Изменение угла наклона плазмотрона влияет на профиль валика, как показано на рисунке 29 [138].



1



2



3

Рисунок 29. Формы валиков при наплавке: 1 - углом вперед, 2 - перпендикулярно линии наплавки, 3 - углом назад [138]

Дисперсионный анализ воздействия параметров плазма-МИГ процесса на геометрию валика показал, что наиболее значимыми факторами, влияющими на ширину валика (по мере уменьшения значимости) являются: скорость подачи проволоки, скорость перемещения и напряжение МИГ дуги. На высоту валика влияют (по мере уменьшения значимости) скорость подачи проволоки, напряжение МИГ дуги, скорость наплавки и ток плазменной дуги [138].

Плазменная наплавка плавящимся электродом является гибким многофакторным процессом. Нерациональная комбинация параметров режима может привести к формированию неблагоприятной формы валика или к разнообразным дефектам. Подробное изучение влияния режимных параметров при послойной наплавке на геометрические размеры валика, а также определение границ стабильного формирования валика, необходимо для прогнозирования процесса плазменной наплавки плавящимся электродом.

Геометрические параметры валиков: ширину (e), высоту (g) и глубину проплавления (b), а также качество наплавленного металла определяли на макрошлифах. Значимыми режимными параметрами плазма-МИГ являются: скорость подачи плавящегося электрода ($V_{пэ}$), напряжение МИГ дуги ($U_{пэ}$), скорость наплавки (V_n) и ток плазменной дуги ($I_{пд}$). Эти параметры целенаправленно изменялись с заданным шагом. Другие режимные параметры были зафиксированы на одном уровне: $d_a = 8$ мм, $Q_{пг} = 5$ л/мин (100% аргон), $Q_{зг} = 15$ л/мин (100% аргон), $h_{си} = 8-12$ мм. Результаты экспериментов показаны на рисунках 30-33 [141].

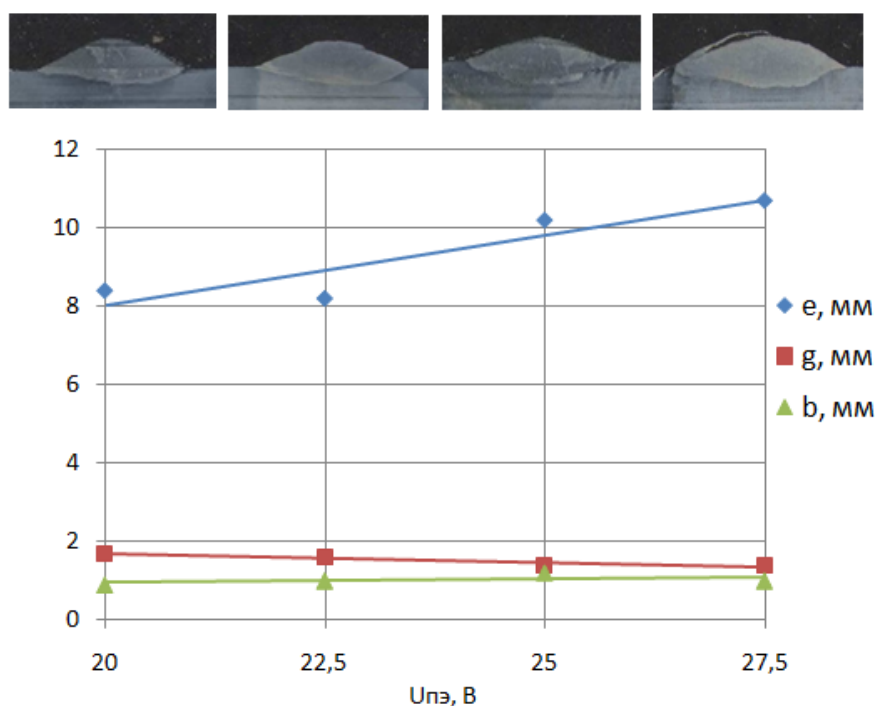


Рисунок 30. Влияние $U_{пэ}$ на форму (сверху) и размеры валика ($I_{пд} = 100А$, $V_{пэ} = 4$ м/мин, $V_n = 0,6$ м/мин)

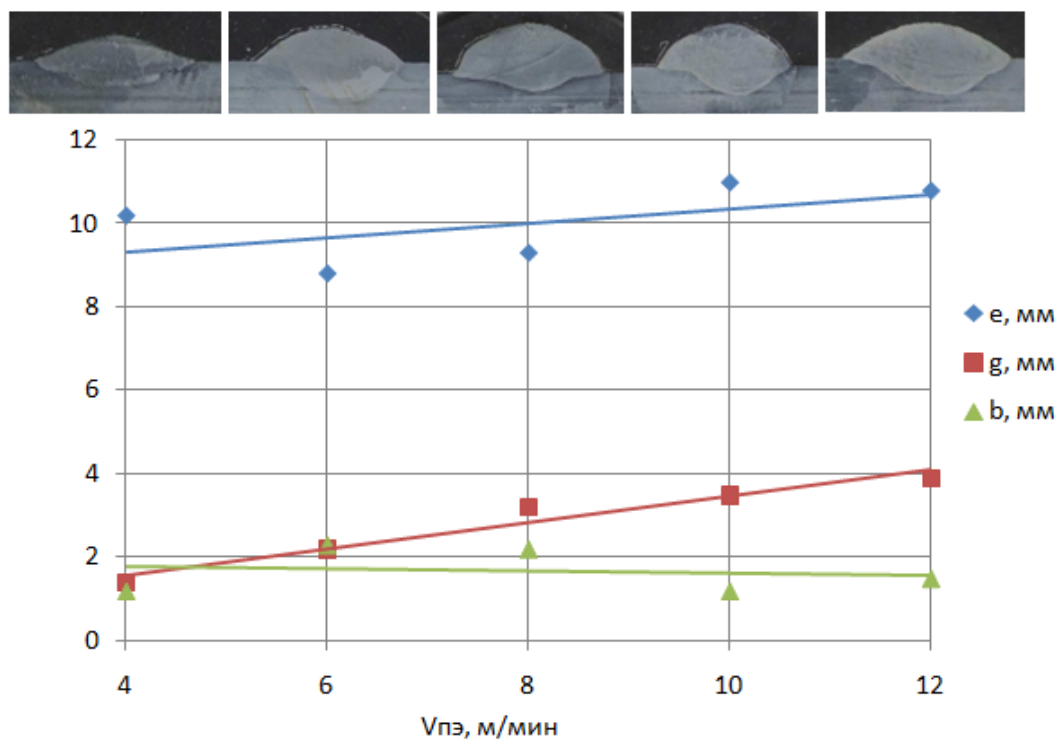


Рисунок 31. Влияние $V_{пэ}$, на форму (сверху) и размеры валика ($I_{пд} = 100A$, $U_{пэ} = 25 В$, $V_n = 0,6 м/мин$)

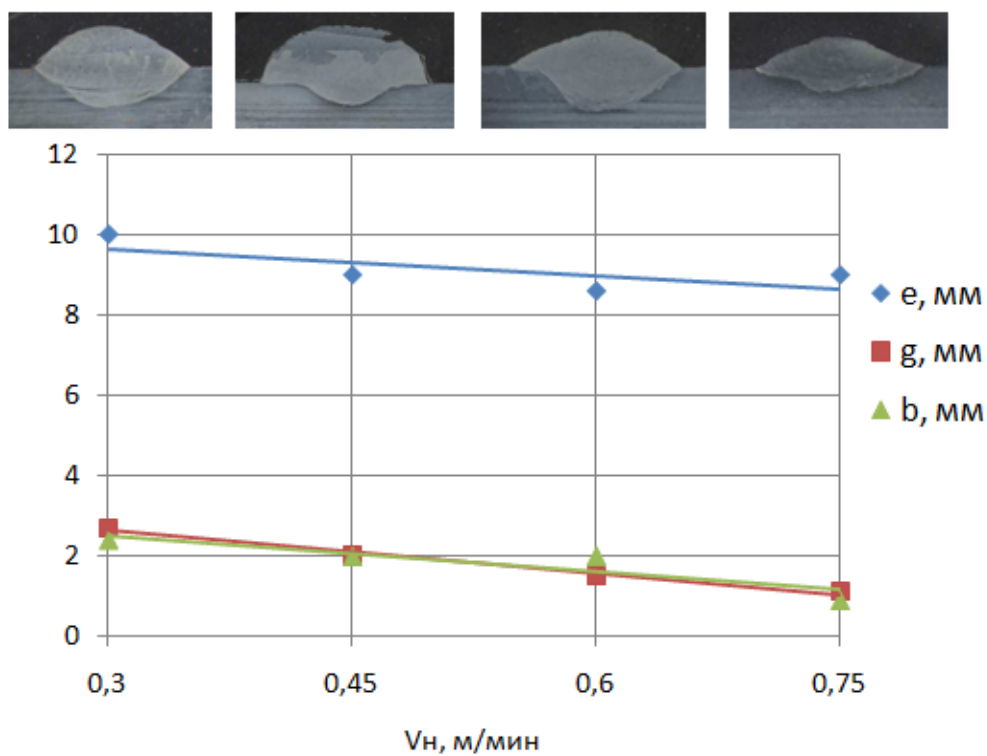


Рисунок 32. Влияние V_n , на форму (сверху) и размеры валика ($I_{пд} = 100A$, $U_{пэ} = 25 В$, $V_{пэ} = 4 м/мин$)

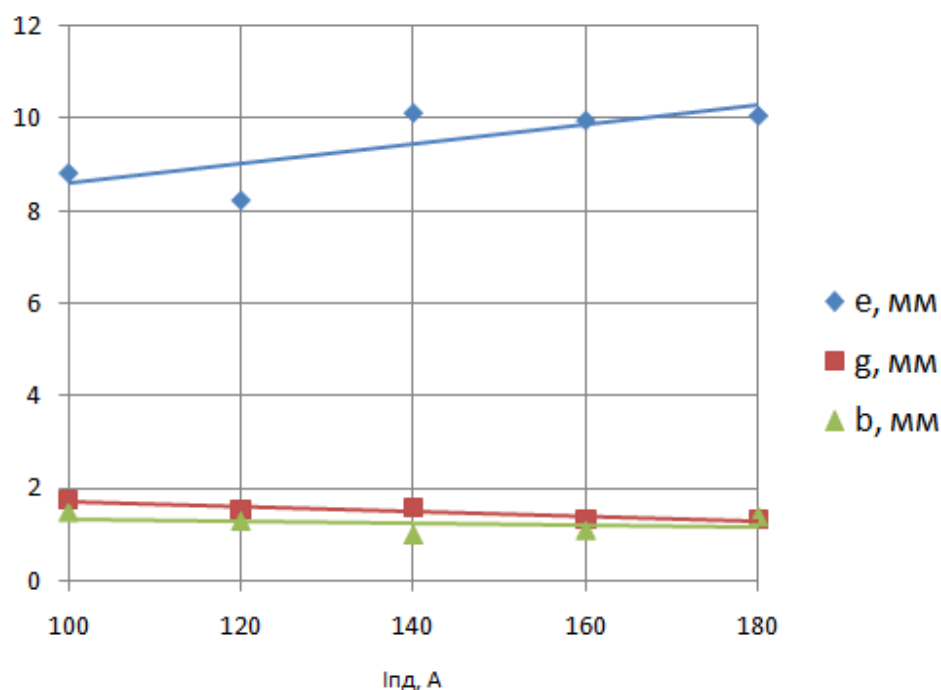


Рисунок 33. Влияние $V_{\text{н}}$ на размеры валика ($U_{\text{пэ}} = 25 \text{ В}$, $V_{\text{пэ}} = 4 \text{ м/мин}$, $V_{\text{н}} = 0,6 \text{ м/мин}$)

При подборе граничных значений параметров режима плазма-МИГ наплавки руководствовались следующими соображениями:

1. Максимальная ширина валика не превышает диаметр кольцевого анода более чем на 2 мм (для $d_{\text{а}} = 8 \text{ мм}$ максимальная допустимая ширина валика должна быть не более 10 мм). В противном случае, не гарантируется качественное сплавление металла валика с подложкой [125, 134].

2. Наплавленный валик не должен иметь наружных и внутренних дефектов. Валик должен наплавляться равномерно и непрерывно.

Анализ полученных зависимостей позволяет сформировать диапазоны параметров режима наплавки (см. таблицу 7). Стоит отметить, что увеличение $V_{\text{пэ}}$ и $V_{\text{н}}$ выше определенных пределов ведет к формированию ассиметричного профиля валика. Определение максимальной скорости наплавки, при которой устойчиво формируется валик, требует исследования с учетом влияния всех значимых параметров процесса.

Таблица 7 - Значения параметров плазма-МИГ наплавки

Параметр	Интервал
$I_{\text{пд}}, \text{ А}$	100-160
$V_{\text{н}}, \text{ м/мин}$	min 0,5
$V_{\text{пэ}}, \text{ м/мин}$	4-8
$U_{\text{пэ}}, \text{ В}$	20-25 (при $V_{\text{пэ}} = 4-5 \text{ м/мин}$) 25-30 (при $V_{\text{пэ}} = 5-8 \text{ м/мин}$)

Интервалы основных параметров приняты согласно таблице 7. Зависимость влияния скорости наплавки на процесс формирования валика представлена на рисунке 34.

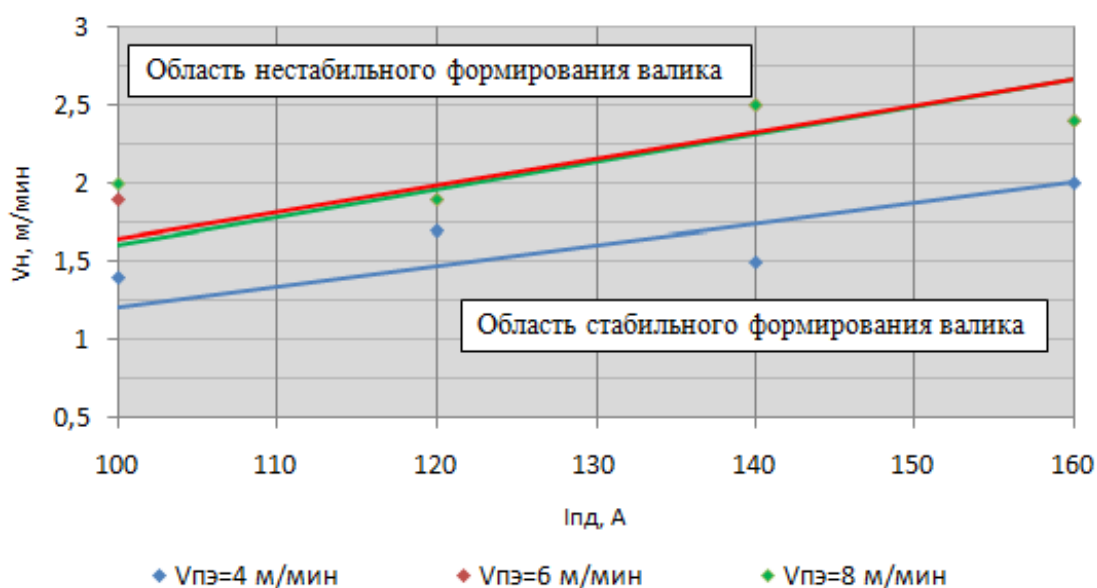


Рисунок 34. Влияние параметров плазма-МИГ наплавки на процесс формирования валика

Рисунок 34 показывает, что определенному сочетанию параметров процесса соответствует конкретная предельная скорость наплавки. Максимальная скорость наплавки ($V_{\text{н}} = 2,3-2,5 \text{ м/мин}$) достигается при $I_{\text{пд}} = 140-160 \text{ А}$ и $V_{\text{пэ}} \geq 6 \text{ м/мин}$. Превышение этого значения скорости наплавки приводит к отсутствию сплавления присадочного металла с подложкой. Повышение $V_{\text{пэ}} > 6 \text{ м/мин}$ увеличивает ширину наплавленного валика и длину жидкой ванны, при этом снижается эффективность защиты расплава.

В работе [28] отмечено, что для управления процессом наплавки удобнее управлять скоростью наплавки и скоростью подачи присадочной проволоки. В связи с этим были построены зависимости геометрических размеров валика от V_n и $V_{пз}$ (см. рисунок 35).

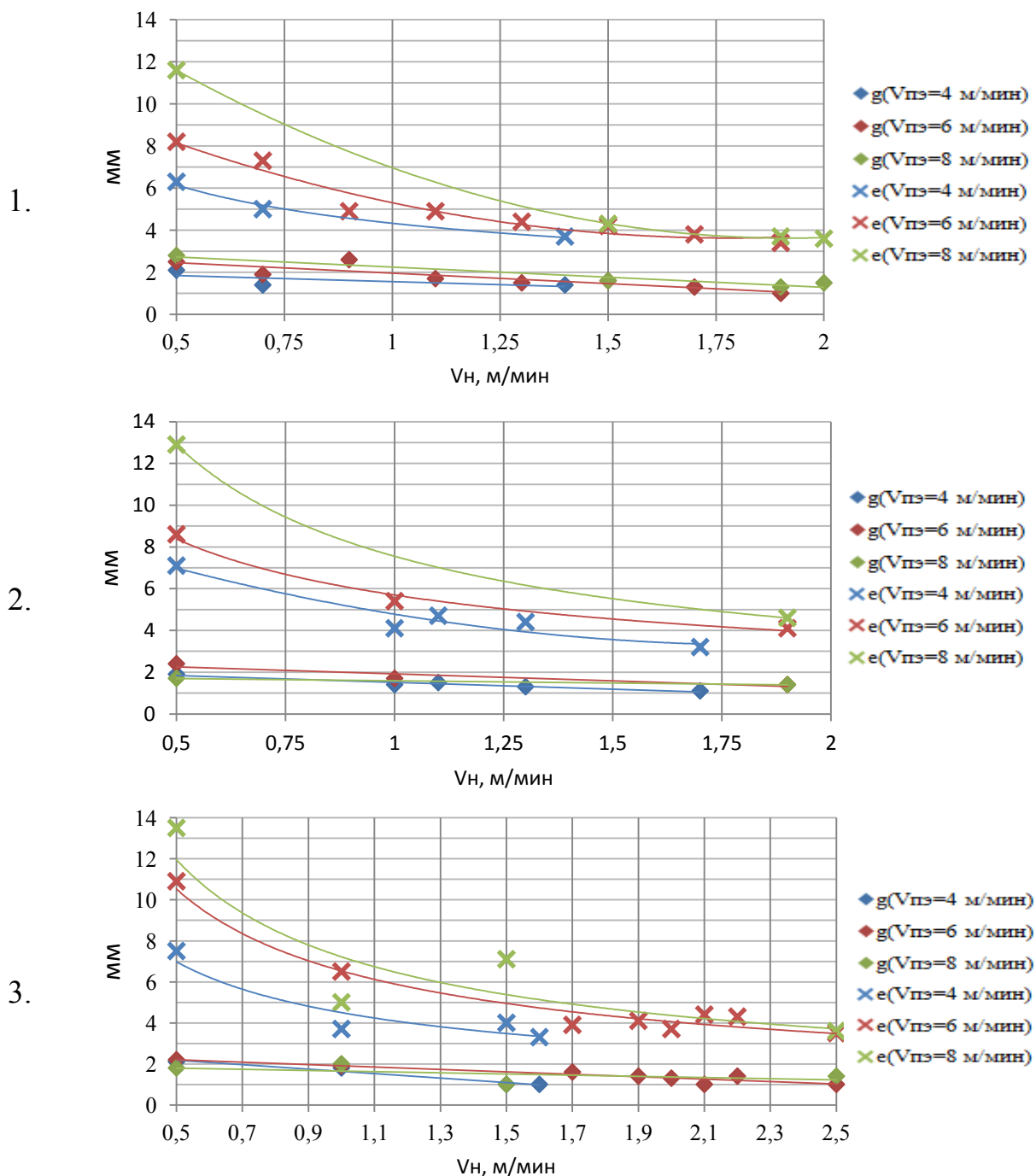


Рис. 35. Влияние скорости наплавки (V_n), скорости подачи плавящегося электрода ($V_{пз}$) на высоту (g) и ширину (e) валика, при: 1 – $I_{пд} = 100\text{A}$, 2 – $I_{пд} = 120\text{A}$, 3 – $I_{пд} = 140\text{A}$

Из рисунка 35 видно, что при изменении V_n и $V_{пз}$ высота валика изменяется линейно, а ширина - имеет выраженную нелинейную зависимость.

2.5. Разработка математической модели формирования валика при плазменной наплавке плавящимся электродом

Полученные результаты позволяют перейти к разработке математической модели формирования наплавленного валика применительно к аддитивному производству. Создание модели для плазменной наплавки плавящимся электродом позволит прогнозировать геометрические размеры наплавленного валика и качественное формирование изделий послойной наплавкой [142].

Геометрия валика зависит от большого количества факторов: физических воздействий, свойств материала, типа и количества подводимой энергии, температуры подложки, технологических параметров наплавки и др. Комплексный характер взаимодействий перечисленных факторов затрудняет понимание протекающих процессов и осложняет создание математической модели наплавленного валика [16, 42, 55, 63, 88, 92-94, 143].

Математическая модель, разрабатываемая для прогнозирования геометрии одиночного валика, должна удовлетворять основным требованиям: обеспечивать высокую точность и производительность вычислений.

На сегодняшний момент предложено два основных подхода к реализации моделирования процесса:

1. Построение модели профиля одиночного валика с применением метода аппроксимации заданной функции полинома [16, 46, 85, 93, 144].
2. Численное моделирование профиля валика, путем установления взаимосвязи параметров процесса и физических явлений с прогнозируемой геометрией одиночного валика [88, 94, 143].

Построение профиля одиночного валика с использованием метода аппроксимации относительно простой путь, который не требует сложных и длительных вычислений. Однако при этом не учитывается форма краев наплавленного валика. Это ведет к увеличению погрешности модели [46].

Алгоритм моделирования показан на рисунке 36.



Рисунок 36. Схема вычисления профиля валика методом аппроксимации [144]

В качестве аппроксимирующих полиномов были исследованы функции параболы, косинуса, дуги, гауссова распределения, логистическая [16, 46, 85, 93]. Погрешность прогнозирования площади сечения валика функциями параболы, косинуса и окружности составляет 4%. Для остальных функций – 15-20% [16].

Для упрощения моделирования применяются следующие допущения:

- профиль валика симметричен относительно вертикальной оси;
- каждый набор параметров процесса создает однородный профиль по всей длине наплавленного валика.

Дисперсионный анализ, метод Тагути, метод поверхности отклика и другие применяются для вычисления математических зависимостей [16, 46, 85, 93, 144]. Методы численного моделирования (метод конечных элементов, термическое моделирование и др.) позволяют не только вычислять профиль сечения одиночного валика, а также учитывают влияние большого числа воздействующих факторов и их взаимосвязи. Разработка модели для параметров геометрии валика основывается на

анализе взаимодействия границы ванны жидкого металла с твердой подложкой, используя принципы сохранения энергии, тепло- и массопереноса. В качестве источника нагрева применяется модель Голдака. Погрешность моделей профиля валика, составляет 2-6%. Несмотря на высокую точность и гибкость данных моделей, их применение требует значительных временных затрат, корректировки поправочных коэффициентов, точных значений ряда физических величин. Существующие модели применимы только для создания изделий из однородных анизотропных материалов [82, 90].

Метод аппроксимации заданной функции полинома для создания модели одиночного валика, позволит успешно рассчитывать необходимые параметры процесса плазма-МИГ наплавки. При этом не требуются длительные расчеты, как в численных методах [141, 145, 146].

Согласно схеме показанной рисунке 36, первым этапом является выбор значимых параметров режима наплавки. Основными параметрами процесса выбраны $I_{\text{пд}}$, $V_{\text{пэ}}$, $V_{\text{н}}$. Другие параметры были фиксированными: $U_{\text{пэ}} = 25$ В, $Q_{\text{пг}} = 5$ л/мин, $Q_{\text{зг}} = 12-16$ л/мин, $d_a = 8$ мм, $h_{\text{си}} = 10$ мм. Значения факторов, их уровни и интервал варьирования представлены в таблице 8. Наиболее простым методом получения функции зависимости искомой переменной при влиянии нескольких факторов является построение регрессионной модели.

Таблица 8 – Основные факторы плазма-МИГ наплавки

Наименование уровня фактора	Факторы		
	X_1	X_2	X_3
	$I_{\text{пд}}, \text{А}$	$V_{\text{пэ}}, \text{м/мин}$	$V_{\text{н}}, \text{м/мин}$
Основной	120	6	1,0
Интервал варьирования	40	4	1
Верхний уровень (+1)	140	8	1,5
Нижний уровень (-1)	100	4	0,5

Для этого используется планирование факторного эксперимента. Применение данного метода дополнительно позволит оценить величину влияния каждого фактора на высоту валика. Исходя из предварительных экспериментов (рисунок 35),

предполагаем, что математическая модель высоты валика выражается линейной функцией:

$$g(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (3)$$

где x_1, x_2, x_3 , - факторы, $x_1x_2, x_2x_3, x_1x_3, x_1x_2x_3$ – эффекты взаимодействия факторов, $b_0, b_1, b_2, b_3 \dots b_{123}$ - регрессионные коэффициенты.

Матрица планирования представлена в таблице 9.

Таблица 9 - Матрица планирования и результатов экспериментов

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_2x_3	x_1x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,001
2	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	0,0016
3	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	0,001
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,001
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,0018
6	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	0,0028
7	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	0,0021
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,0021
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0017
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0018
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0019
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0019

Регрессионные коэффициенты определяли по формулам:

$$b_0 = 1/N \quad (4)$$

$$b_i = \sum(x_i y_i) / N \quad (5)$$

где N – количество опытов, i – номер фактора, y_i – фактическое значение параметра оптимизации для i -го опыта (высота валика).

Значения коэффициентов регрессии приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Значения коэффициентов регрессии

b_0	b_1	b_2	b_3	b_1b_2	b_2b_3	b_1b_3	$b_1b_2b_3$
0,00168	-0,00020	0,00013	-0,00053	-0,00020	0,00003	0,00005	0,00005

Значимость коэффициентов определялась путем сравнения с доверительным интервалом (Δb). Коэффициент значим при условии $b_i > (\Delta b)$. Доверительный интервал определяется по формуле:

$$\Delta b = \pm t S_b^2 \quad (6)$$

где, t – коэффициент Стьюдента, S_b^2 – дисперсия коэффициентов регрессии.

Коэффициент Стьюдента является табличным значением. Для его определения необходимо определить число степеней свободы и уровень значимости. Число степеней свободы определяется по формуле:

$$f = n_0 - 1 \quad (7)$$

Принимая уровень значимости в 5% и, определив число степеней свободы $f = 3$, получаем табличное значение $t = 2,353$.

Дисперсия коэффициентов регрессии рассчитывается по формуле:

$$S_b^2 = \sqrt{S_y^2 / N} \quad (8)$$

где S_y^2 - дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum (y_i - y_{cp})^2}{n_0 - 1} \quad (9)$$

где, y_{cp} – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в n_0 параллельных опытах, n_0 – количество параллельных опытов на нулевом уровне.

Определив значимость коэффициентов регрессии (см. таблицу 11), получаем искомое уравнение регрессии для высоты валика:

$$g(x) = 1,675 \cdot 10^{-3} - 0,2 \cdot 10^{-3}x_1 + 0,125 \cdot 10^{-3}x_2 - 0,525 \cdot 10^{-3}x_3 - 0,2 \cdot 10^{-3}x_1x_2 \quad (10)$$

Для значения факторов в натуральном виде:

$$g = 0,02 \cdot 10^{-3}I_{\text{пд}} + 63,1 \cdot 10^{-3}V_{\text{пэ}} - 1,05V_{\text{н}} - 5 \cdot 10^{-3}I_{\text{пд}}V_{\text{пэ}} - 0,05 \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

Таблица 11 - Значимость коэффициентов регрессии

Коэффициент	b_0	b_1	b_2	b_3	b_1b_2	b_2b_3	b_1b_3	$b_1b_2b_3$
Значение	0,00168	-0,00020	0,00013	-0,00053	-0,00020	0,00003	0,00005	0,00005
S_y^2	9×10^{-9}							
S_b^2	48×10^{-6}							
Доверительный интервал	0,00011							
Значимость	значим	значим	значим	значим	значим	не значим	не значим	не значим

Проверка адекватности модели проводилась по F-критерию Фишера. Для этого определялась дисперсия адекватности:

$$S_a^2 = \frac{\sum (y_j - y_{\text{срj}})^2}{k} \quad (12)$$

где, y_j – значение параметра оптимизации в j-го опыте, $y_{\text{срj}}$ – значение параметра оптимизации для условий j-го опыта, k – число степеней свободы, которое определяется по формуле:

$$k = 1/(N - (d + 1)) \quad (13)$$

где, d – число факторов.

Далее определяется значение расчетного критерия Фишера:

$$F_p = S_a^2 / S_y^2 \quad (14)$$

После этого полученное значение $F_p = 1,23$ сравнивали с соответствующим табличным значением критерия Фишера $F_t = 6,59$ для уровня значимости 5%. На основании того, что $F_p < F_t$, полученная модель признается адекватной.

Для построения профиля валика, расчета его ширины и площади используется метод аппроксимации. Функция параболы применялась для аппроксимации профиля валика. Расчетная схема показана на рисунке 37.

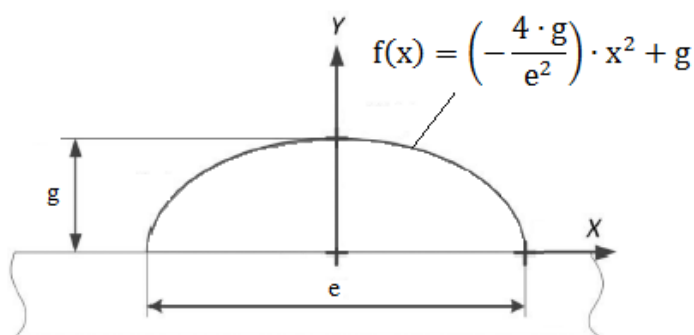


Рисунок 37. Расчетная схема для построения профиля валика

Функция параболы имеет общий вид:

$$f(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (15)$$

Для симметричной относительно оси параболы с ветвями, направленными вниз, уравнение (15) примет вид:

$$f(x) = -\frac{4 \cdot g}{e^2} \cdot x^2 + g \quad (16)$$

Площадь параболы вычисляется по формуле:

$$A = \frac{2}{3} \cdot g \cdot e \quad (17)$$

Площадь наплавленного валика на единицу длины можно рассчитать по формуле:

$$A = A_{\text{пэ}} \cdot \frac{V_{\text{пэ}}}{V_{\text{н}}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{пэ}}^2 \cdot V_{\text{пэ}}}{4 \cdot V_{\text{н}}} \quad (18)$$

где, $d_{\text{пэ}}$ - диаметр присадочной проволоки, м.

Приравнивая уравнения 17 и 18, получаем уравнение ширины валика:

$$e = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_{\text{пэ}}^2 \cdot V_{\text{пэ}}}{8 \cdot g \cdot V_{\text{н}}} \quad (19)$$

Подставив уравнение 11 в уравнение 19, получаем:

$$e = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_{\text{пэ}}^2 \cdot V_{\text{пэ}}}{V_{\text{н}} (9,2 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot I_{\text{а}} + 0,17 \cdot 10^{-3} \cdot V_{\text{пэ}} - 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot V_{\text{н}})} \quad (20)$$

Таким образом, уравнение (20) позволяет рассчитать параметры одиночного валика и построить его профиль, исходя из основных параметров режима наплавки. С целью проверки полученных уравнений, была выполнена наплавка одиночного валика проволокой ОК Autrod 308LSi $\phi 1,2$ мм на стальную пластину толщиной 20 мм. Параметры режима наплавки были произвольно выбраны в пределах интервала варьирования (см. таблицу 8), и составляли: $I_{\text{пд}} = 120$ А, $V_{\text{пэ}} = 7$ м/мин, $V_{\text{н}} = 0,5$ м/мин. Данный режим является характерным для исследуемой области наплавки.

Фактические и расчетные размеры валика представлены в таблице 12. Погрешность модели составляет не более 10%.

Таблица 12 - Геометрические размеры одиночного валика

Размер	Фактический, мм	Расчетный, мм	Погрешность, %
Высота (g)	2	1,87	6,5
Ширина (e)	1,2	1,3	8,3

Сравнение профиля валика с функцией модели представлено на рисунке 38.

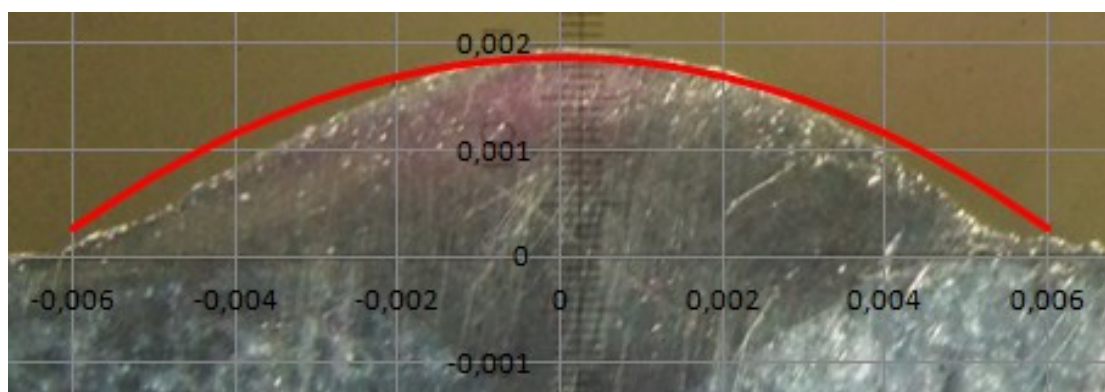


Рисунок 38. Фото макрошлифа поперечного сечения валика с наложенным графиком функции параболы (Значения шагов размерной сетки указаны в метрах)

Из рисунка 38 видно, что профиль валика соответствует профилю аппроксимирующей функции осесимметричной параболы. Наблюдаемые отклонения геометрии валика от расчетной связаны с допущениями при построении модели и физическими особенностями процесса плазменной наплавки плавящимся электродом.

Таким образом, получена математическая модель, позволяющая рассчитывать размеры валика и прогнозировать его профиль при плазменной наплавке плавящимся электродом, используя только основные режимные параметры ($I_{\text{пд}}$, $V_{\text{пэ}}$, $V_{\text{н}}$). В связи с отсутствием учета теплофизических параметров (например, температура подложки) и геометрической формы нижележащего слоя, основное применение модели – расчет траектории наплавки плоского слоя.

2.6. Выводы по Главе 2.

В результате исследования процесса плазменной наплавки плавящимся электродом в области малых значений производительности и теплообразования были получены следующие результаты:

1. Определены граничные условия устойчивости процесса плазменной наплавки плавящимся электродом. Высокая стабильность процесса плазма-МИГ наплавки, при соблюдении условий послойной наплавки, обеспечивается при $U_{пэ} = 20-30$ В, $I_{пд} = 100-140$ А, $d_a = 8-10$ мм, $Q_{пг} = 5-10$ л/мин, $Q_{зг} \geq 10$ л/мин, $V_{пэ} = 4-8$ м/мин, $V_n = 0,5-1,5$ м/мин. Данные параметры обеспечивают стабильность процесса наплавки и формирования бездефектного наплавленного валика.

2. Установлена связь особенностей плавления плавящегося электрода и формы переноса электродного металла с качеством формирования наплавленного валика. Предпочтительно производить наплавку при $I_{пд} = 100-140$ А; $U_{пэ} = 25-30$ В, $V_{пэ} = 4-8$ м/мин. Данные режимы обеспечивают мелкокапельный перенос присадочного металла и бездефектное формирование наплавленного валика с минимальным проплавлением подложки.

3. Установлено, что при двух дуговом режиме работы плазмотрона теплопередача в изделие увеличивается практически пропорционально росту тока дуги плазмообразующее сопло (кольцевой анод) – изделие. При одинаковом токе теплопередача от каждой дуги приблизительно равна.

4. Получены эмпирические зависимости высоты и ширины наплавленного валика при изменении основных параметров плазма-МИГ наплавки ($I_{пд}$, V_n , $V_{пэ}$).

5. Разработана математическая модель расчета высоты и ширины одиночного валика при плазменной наплавке плавящимся электродом. Математическая модель позволяет прогнозировать профиль валика на основании аппроксимирующей функции параболы. Точность модели составляет не менее 90%.

Глава 3. Разработка оборудования для аддитивного производства металлических заготовок плазменной наплавкой плавящимся электродом

Оборудование для аддитивного производства представляет собой сложный многофункциональный комплекс. Установки для WAAM могут иметь разное исполнение: порталная установка, роботизированный комплекс, гибридный многофункциональный комплекс и т.д. [40, 53, 56, 68].

Для обеспечения требуемых технологических операций в состав оборудования для WAAM может входить [40, 77, 79, 93]:

1. Оборудование для наплавки. Специфика и комплектация оборудования зависит от применяемого способа наплавки (ТИГ, МИГ/МАГ, СМТ и т.д.). Наплавочное оборудование должно отвечать жестким требованиям по надежности и обеспечивать работу при 100% ПВ на всех режимах послойного формирования изделий.

2. Системы позиционирования и перемещения изделия и наплавочной головки. Назначением данного оборудования является пространственное расположение заготовки и наплавочной головки и их взаимного перемещения по заданной траектории для выполнения наплавочных работ в удобном положении (как правило – нижнем).

3. При необходимости, оборудование для послойного упрочнения наплавленного металла. Для снижения тепловых деформаций и остаточных напряжений, повышения механических свойств, измельчения зернистости и получения изотропной структуры наплавленного металла применяют прокатку, проковку и ультразвуковое воздействие.

4. Оборудование для обеспечения необходимого температурного режима. При формировании заготовок из различных сталей и сплавов цветных металлов, а также геометрически сложных изделий необходимо соблюдать определенные температуры предварительного и сопутствующего подогрева. С другой стороны, требуется эффективно отводить избытки тепла при наплавке, чтобы избежать перегрева

металла, роста сварочной ванны и снижения (или устранения) времени охлаждения заготовки между нанесением слоев. Для этого применяются охлаждаемые столы, обдувка формируемой заготовки и др.

5. Измерительное и контрольное оборудование. Измерительное оборудование (3D сканеры) применяется для определения высоты наплавки, волнистости слоя и размеров конечного изделия. Контроль полученной заготовки на наличие внутренних дефектов проводится с помощью томографии.

6. Оборудования для механической обработки заготовки. Конечное изделие получают после удаления припусков механической обработкой.

Среди всего набора перечисленного оборудования, ключевым элементом комплекса для послойного формирования заготовок является наплавочное оборудование. Отсутствие надежного и доступного оборудования ставит под сомнение возможность получения качественного изделия послойной наплавкой. Для реализации технологии плазменной наплавки центральным звеном является плазмотрон.

На сегодняшний день существует большое разнообразие плазмотронов для плазменной наплавки плавящимся электродом с кольцевым анодом и аксиальной подачей проволоочного электрода. Большинство конструкции плазмотронов рассчитаны на реализацию способа плазменной наплавки плавящимся электродом со стабилизирующим соплом. Однако часть плазмотронов имеют сложную конструкцию и состоят из большого количества деталей (см. рисунок 39) [128, 129, 131, 132, 147, 148].

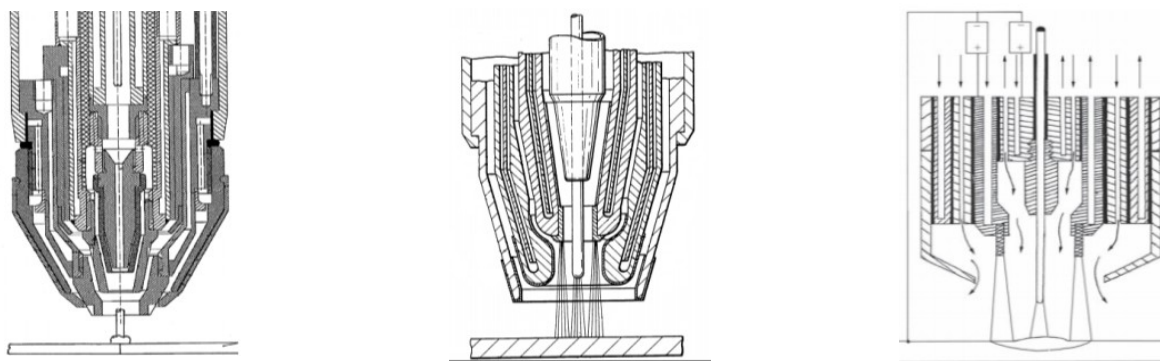


Рисунок 39. Схемы компоновки плазмотронов для плазменной наплавки плавящимся электродом [128, 129, 131, 132, 147, 148]

Разработкой плазмотронов для плазменной сварки и наплавки плавящимся электродом по индивидуальному заказу занимаются фирмы ТВІ (Германия) и ООО НПЦ «ПЛАЗЕР» (Украина) (см. рисунок 40). Данные плазмотроны представляют собой габаритные конструкции и предназначены для реализации способа плазменной сварки плавящимся электродом со стабилизирующим соплом. Применение данных плазмотронов для аддитивного производства сдерживается сложностью конструкции, обслуживания и эксплуатации. Кроме того, такие плазмотроны имеют повышенные габариты, что сужает возможности применения их для аддитивного производства.

Отсутствие серийно выпускаемых плазмотронов для плазменной наплавки плавящимся электродом, дефицитность и высокая стоимость запасных частей для имеющихся плазмотронов - все это сдерживает внедрение этого прогрессивного процесса в аддитивном производстве металлических изделий.

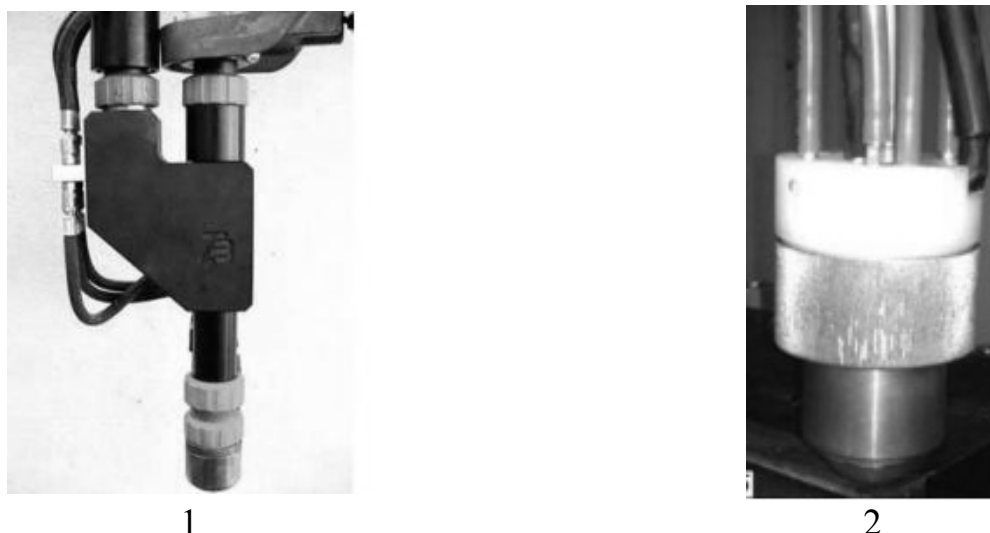


Рисунок 40. Плазмотроны для реализации процессов плазма-МИГ: 1 – производства фирмы ТВІ, 2 – производства фирмы ООО НПЦ «ПЛАЗЕР» [128, 129, 131, 132]

Таким образом, целью данной главы является разработка плазмотрона и создание на его основе комплексного оборудования для реализации плазменной наплавки плавящимся электродом в области аддитивного производства металлических изделий.

3.1. Исследование особенностей теплопередачи в кольцевой анод плазмотрона

Плазмотрон должен обеспечивать возможность длительной работы в требуемом режиме. Ресурс работы плазменной горелки определяется длительностью эксплуатации его основных теплонагруженных узлов. Электрод-анод испытывает значительно большие нагрузки, чем электрод-катод. Ресурс работы анодного узла определяется конструктивными особенностями и эффективностью системы охлаждения, и, в свою очередь, определяет надежность плазмотрона. Конструкция анода определяет схему компоновки плазмотрона и его размеры. Схема работы кольцевого анода существенно отличается от работы стержневого анода. Анодное пятно на стержневом аноде стационарно и сосредоточено на рабочем торце вблизи оси электрода, площадь его не больше площади канала плазмообразующего сопла. При использовании кольцевого анода анодные пятна располагаются на внутренней цилиндрической поверхности. Принципиальные схемы электрода-анода показаны на рисунке 41 [131, 149].

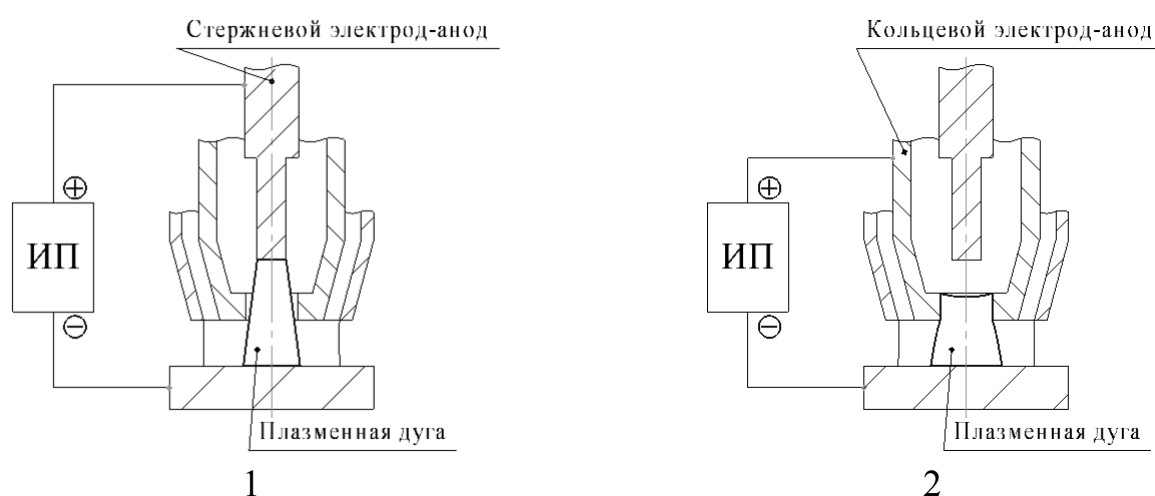


Рисунок 41. Схема работы электрода-анода: 1 – стержневой, 2 – кольцевой

Наилучший вариант, при котором обеспечивается длительная безаварийная работа кольцевого анода, это равномерное распределение анодного пятна по всей площади кольцевой поверхности. Однако при диаметре цилиндрического отверстия более 6 мм добиться этого сложно. Поэтому обеспечивают принудительное перемещение анодного пятна дуги по внутренней цилиндрической поверхности кольцевого анода тангенциальной подачей плазмообразующего газа и (или)

наложением внешнего магнитного поля (приводит к усложнению конструкции плазмотрона и увеличению поперечных габаритов). Локальная привязка анодного пятна приводит к подплавлению анода и преждевременному выходу его из строя (Рисунок 42) [128, 131, 143, 147-153].

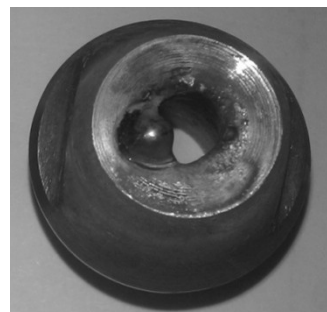


Рисунок 42. Локальное разрушение плазмообразующего канала кольцевого анода

Кроме того на тепловую нагрузку на кольцевой анод оказывает влияние вторая дуга с плавящегося электрода.

Для создания надежного плазмотрона, обеспечивающего длительную непрерывную работу, необходимо знать теплопередачу в кольцевой анод в широком диапазоне изменения параметров режима при одновременной работе двух дуг, что позволит установить требования к мощности системы охлаждения анода и плазмотрона в целом и разработать, по возможности, надежную конструкцию с минимальными габаритами.

Изучению теплопередачи в стержневые аноды плазмотронов и разработке посвящено достаточное количество исследований [128, 131, 143, 147-153]. Знание теплового баланса на стержневом электроде–аноде плазмотрона позволяет установить необходимую мощность системы охлаждения анода для требуемой мощности плазменной дуги.

Необходимо провести сравнительные исследования теплопередачи в стержневой и кольцевой электрод–анод плазмотрона для одно и двух дугового режимов работы плазмотрона.

Исследование теплопередачи проводили в следующей последовательности: вначале определяли теплопередачу в плазмообразующее сопло при работе плазмотрона в режиме непереносной дуги (сопло в этом случае является кольцевым анодом); далее определяли теплопередачу в стержневой анод при работе

плазмотрона в режиме обратной полярности тока; затем - в двух дуговом режиме при работе дуг на обратной полярности тока (дуга со стержневого анода и с кольцевого) и при работе плазмотрона в режиме плазма-МИГ. Тепловложение определяли методом калориметрирования [149, 154]. Подвод тепла в узлы плазмотрона определяется по известной формуле:

$$P = c \cdot q \cdot \Delta T \quad (21)$$

где, P – отводимая тепловая мощность, Вт; c – теплоемкость охлаждающей жидкости, Дж/(кг×град) (для воды $c = 4183$ Дж/(кг×град), при $T = 20^\circ\text{C}$); q – расход воды, кг/с; ΔT – разница температуры охлаждающей жидкости на выходе и входе соответствующего контура плазмотрона.

Схема измерения тепловложения в стержневой анод показана на рисунке 43.

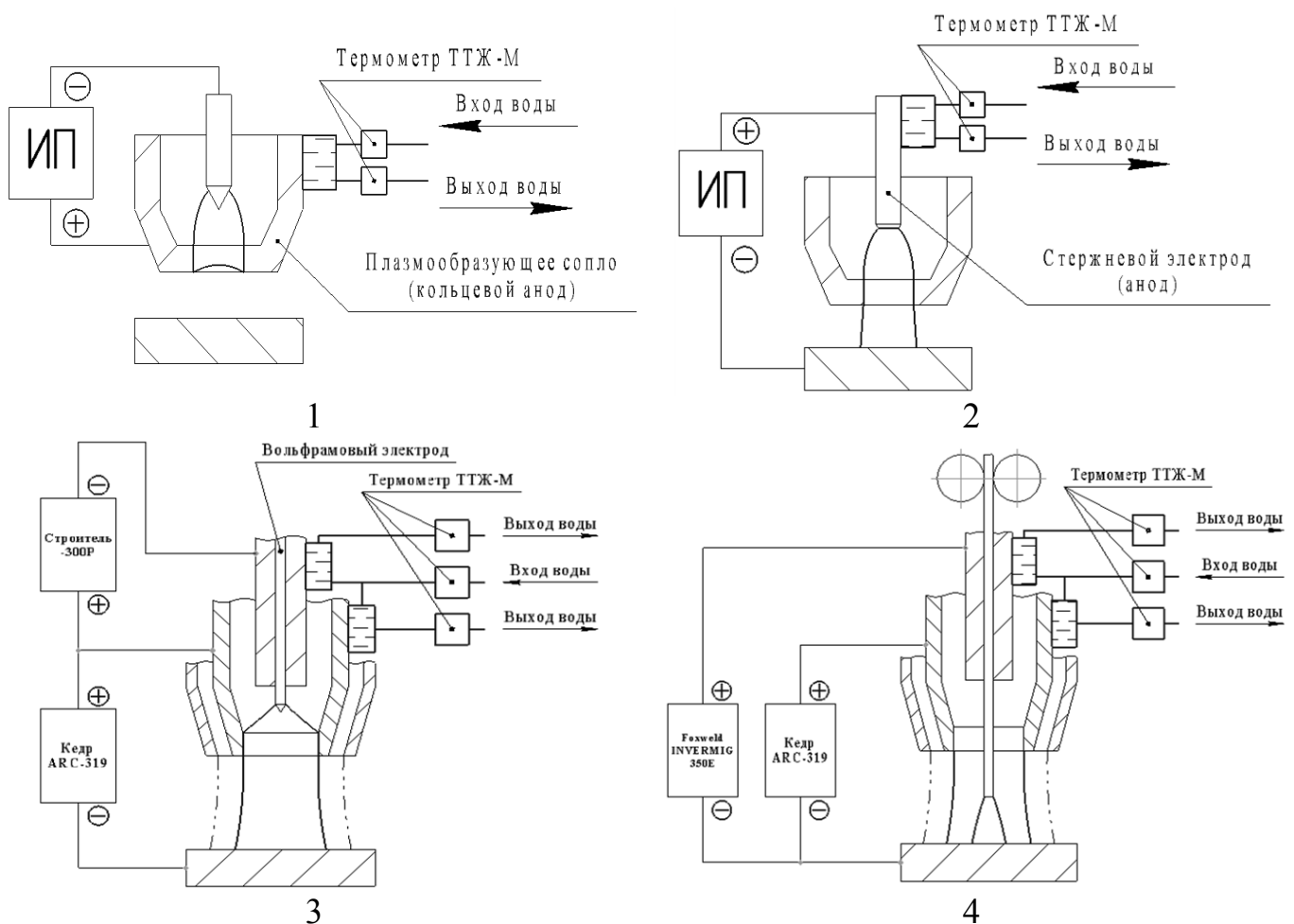


Рисунок 43. Схема измерения тепловложения в анод при работе плазмотрона:
1- в режиме косвенной дуги; 2 – в режиме горения дуги обратной полярности;
3 – в двух дуговом режиме; 4 – в режиме плазма-МИГ

Диаметр медного стержневого анода - 10 мм, расход плазмообразующего газа, $Q_{\text{пг}} = 4-5$ л/мин, диаметр плазмообразующего сопла, $d_c = 6$ мм. Постоянными параметрами процесса при исследовании тепловложения в кольцевой анод при плазменной наплавке плавящимся электродом были: $Q_{\text{пг}} = 5$ л/мин, $Q_{\text{зг}} = 10$ л/мин, $V_{\text{пэ}} = 4$ м/мин.

Результаты измерения тепловложения в анод представлены на рисунке 44.

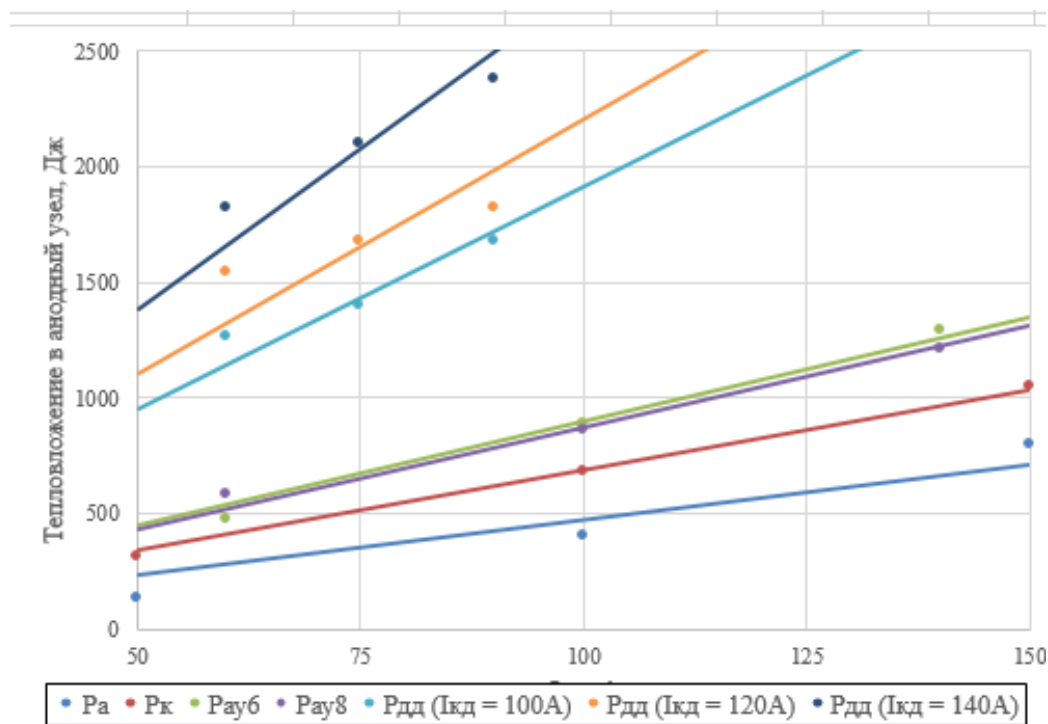


Рисунок 44. Тепловложение в анодный узел:

- R_a – тепловложение в стержневой анод;
- R_k – тепловложение в плазмообразующее сопло-анод (режим косвенной дуги);
- R_{ay6} – тепловложение в кольцевой анод диаметром канала 6 мм;
- R_{ay8} – тепловложение в кольцевой анод с диаметром канала 8 мм;
- $R_{dd}(I_{kd}=100A)$ – тепловложение в кольцевой анод (сила тока косвенной дуги 100А);
- $R_{dd}(I_{kd}=120A)$ – тепловложение в кольцевой анод (сила тока косвенной дуги 120А);
- $R_{dd}(I_{kd}=140A)$ – тепловложение в кольцевой анод (сила тока косвенной дуги 140А);

Выявлено, что кольцевой анод воспринимает в 1,5-2 раза больше тепловой нагрузки, чем стержневой анод при одинаковых токах плазменной дуги обратной полярности. Причиной такого расхождения могут служить несколько факторов:

1. При работе плазмотрона в режимах косвенной дуги и плазма-МИГ кольцевой анод испытывает дополнительный нагрев от излучения столба дуги и от нагретого изделия.

2. Плазмообразующий газ, при прохождении вдоль стержневого электрода, дополнительно охлаждает его.

Принимая во внимание действие этих факторов, можно предположить, что форма анода не существенно влияет на величину тепловложения в него.

Форма анода влияет на распределение плотности тока плазменной дуги. На стержневом электроде - анодная область локализуется на его торце, что вызывает интенсивную эрозию электрода. При использовании кольцевого электрода – анодная область плазменной дуги равномерно распределяется по всей поверхности кольцевого канала. При этом снижается плотность тока, уменьшается износ электрода и повышается ресурс работы плазмотрона.

Установлено, что предельная тепловая нагрузка на кольцевой анод составляет 2200-2400 Дж. При этом происходит локальное расплавление плазмообразующего канала. При плазменной наплавке плавящимся электродом тепловая нагрузка на кольцевой анод при $I_{\text{плд}} = 140$ А составляет $P_{\text{ау}} = 1200-1300$ Дж. Предельная нагрузка $P_{\text{ау}} = 2200-2400$ Дж при которой разрушается анод на 83-85% выше, чем при плазма-МИГ наплавке.

Исследование тепловых процессов при различных вариантах горения дуг (рисунок 45) также показывает, что плазмообразующее сопло плазмотрона разрушается при больших тепловых нагрузках, чем при плазменной наплавке плавящимся электродом [149-153].

Таким образом, можно судить о наличии достаточного запаса прочности плазмотрона. А при токах плазменной дуги до 140А возможно производить плазменную наплавку плавящимся электродом при 100% ПВ.

Для безаварийной работы в режиме ПВ = 100% мощность системы охлаждения кольцевого анода составлять не менее 2 кДж.

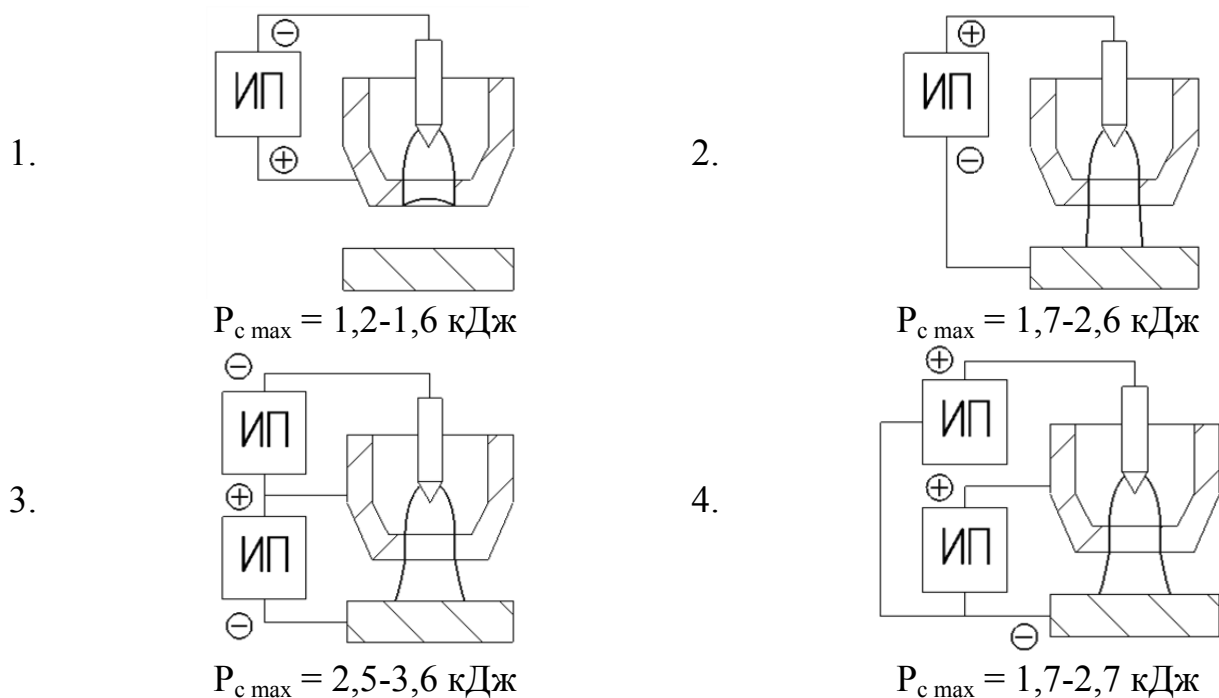


Рисунок 45. Схемы процессов плазменной наплавки: 1 – косвенной дугой прямой полярности, 2 – дугой обратной полярности, 3 – комбинированный, с косвенной дугой прямой полярности и плазменной дугой обратной полярности, 4 – комбинированный с двумя плазменными дугами обратной полярности; ИП – источник питания, $P_{c \max}$ – предельная допустимая нагрузка на плазмобразующее сопло

Таким образом, при проектировании плазмотрона с кольцевым анодом для плазменной наплавки плавящимся электродом система охлаждения кольцевого анода должна соответствовать установленным требованиям. Кроме того, должно быть обеспечено надежное охлаждение токоподвода плавящегося электрода и плазмобразующего сопла, при надежной электрической изоляции всех узлов плазмотрона.

3.2. Разработка плазмотрона для плазменной наплавки плавящимся электродом

Проектирование плазмотрона является сложной задачей. Необходимо учитывать множество разных, а порой и взаимно противоположных требований. При этом конструкция плазмотрона должна быть простой, надежной и обеспечивать легкость замены быстро изнашиваемых деталей (кольцевой анод и контактный наконечник). Все детали должны быть максимально простой геометрической формы, а их изготовление не должно иметь сложных и трудоемких технологических операций, таких как сварка, пайка, склеивание и т.д. [128, 147, 148].

Плазмотрон должен иметь надежную систему охлаждения, которая способна эффективно отводить тепло от наиболее подверженных нагреву деталей (кольцевой анод, контактный наконечник, защитное сопло). Следует использовать отдельную систему охлаждения для кольцевого анода и токоподводящему наконечнику. Это позволит исключить шунтирование тока через охлаждающую жидкость. Необходимо учитывать, что в процессе эксплуатации каналы системы охлаждения подвержены риску засорения. Это связано с использованием технической воды, содержащей большое количество примесей [128]. Эти примеси склонны к осаждению на стенках каналов и могут вступать в химическую реакцию с материалом деталей. При этом образуются оксидные отложения, которые снижают эффективность охлаждения и, со временем, могут полностью перекрывать каналы. Поэтому необходимо обеспечить доступ к ревизии всех каналов охлаждения с возможностью их прочистки.

Схема рабочей части плазмотрона с основными конструктивными параметрами представлена на рисунке 46.

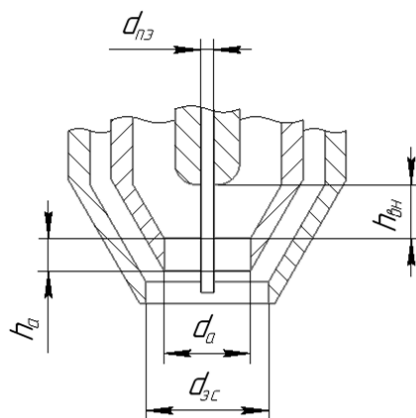


Рисунок 46. Схема плазмотрона: $d_{пэ}$ – диаметр плавящегося электрода, d_a – диаметр кольцевого анода, $d_{зс}$ – диаметр защитного сопла, h_a – длина канала кольцевого анода, $h_{вн}$ – расстояние между контактным наконечником и кольцевым анодом

Диаметр плавящегося электрода ($d_{пэ}$) определяется диаметром стандартной сварочной (наплавочной) проволоки, применяемой для МИГ наплавки, - 1,0-1,6 мм. Указанные диаметры проволоки применяются со стандартными токоведущими наконечниками, которые имеют наименьший размер резьбы - М6. Проволоки меньшего диаметра имеют малую жесткость при аналогичном вылете, что может отрицательно отразиться на точности наплавки. Малое сечение проволоки негативно сказывается на производительности наплавки и стабильность плавления. Проволоки диаметром более 1,6 мм требуют ведение процесса наплавки на больших значениях тока. При этом возрастает тепловложение в изделие.

Диаметр кольцевого анода (d_a) устанавливается в пределах 6-10 мм (см. Главу 1, раздел 1.2). При d_a менее 6 мм повышается риск касания стенки канала анода присадочной проволокой. При d_a более 10 мм необходимо увеличивать расход плазмообразующего газа. Также необходимо использовать большее значение тока плазменной дуги для обеспечения необходимой плотности тока.

Диаметр защитного сопла ($d_{зс}$) должен быть больше ширины наплавляемого валика и зоны термического воздействия. Исходя из данных, полученных в главе 2, диаметр защитного сопла должен быть не менее 18 мм.

Длина канала кольцевого анода (h_a) как правило имеет размер 4-6 мм (см. глава 1, раздел 1.2).

Расстояние между контактным наконечником и кольцевым анодом (h_{BH}) выбирается исходя из условия безаварийной работы плазмотрона. К аварийной ситуации может привести расплавление и приваривание присадочной проволоки на торце наконечника, расплавление контактного наконечника, чрезмерный разогрев контактного наконечника из-за чего происходит закусывание присадочной проволоки.

Классическим материалом для изготовления токопроводящих деталей горелок (сопла, электродные узлы и т.д.) является техническая медь марки М0, М1 [128, 147, 148]. Чистая медь обладает высокой электропроводностью ($59,5 \times 10^6$ См/м) и теплопроводностью ($\approx 390 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$). К недостаткам меди можно отнести высокую плотность ($8,9 \text{ кг/м}^3$) и сложность обработки резанием (из-за высокой вязкости). Исходя из свойств материала, решено изготавливать из меди только теплонагруженные и/или токопроводящие детали (контактный наконечник, кольцевой анод, защитное сопло). Другие токопроводящие детали принято изготавливать из латуни, которая легче обрабатывается резанием и в среднем на 10% дешевле меди М1.

В качестве материала для диэлектрического изолятора применяются такие пластмассы как Фторопласт-4 и Полиамид-6 [128, 147, 148]. Однако эти материалы имеют небольшой температурный диапазон эксплуатации, а при нагреве теряют жесткость, и склонны к деформации под нагрузкой. Также данные пластмассы не стойки к воздействию ультрафиолетового излучения.

В качестве альтернативы вышеуказанным материалам был выбран Zedex-410. Zedex обладает следующими свойствами [155]:

- Рабочая температура: от -70°C до $+180^\circ\text{C}$ ($+200^\circ\text{C}$).
- Высокая стабильность размеров (до $+180^\circ\text{C}$ твёрдый, жёсткий, прочный).
- Максимальное водопоглощение составляет 0,6%, изменение размеров при этом - не более 0,25%.
- Высокая устойчивость к УФ излучению.

Для изоляции полостей и каналов плазмотрона используются кольца по ГОСТ 9833-73 из термостойкого фторкаучука (ИРП-1287) с рабочим интервалом температур от -20...+200°С.

В качестве комплектующих материалов и деталей для подвода коммуникаций (токоподвод, водяное охлаждение, подача защитного и плазмообразующего газов) принято максимально использовать стандартные элементы. Токоподвод осуществляется по шлейфам со стандартными разъемами для ручных водоохлаждаемых горелок для МИГ и ТИГ сварки. Подача воды и газов производится по пластиковым трубкам и/или резиновым шлангам сечением не менее 2,5 мм². Все коммуникации уложены в единый рукав, защищающий их от ультрафиолетового излучения и соприкосновения с горячими предметами.

В общем виде конструкция плазмотрона для плазменной наплавки плавящимся электродом представляет собой совокупность ряда узлов и деталей: электродный узел, анодный узел, защитное сопло и др. Электродный и анодный узлы разделяются диэлектрическим изолятором во избежание аварийной ситуации (двойное дугообразование, высокочастотный пробой и др.) и разрушения плазмотрона. Использование нескольких изоляторов для разделения каждого элемента плазмотрона увеличивает общее количество деталей и, неизбежно, приводит к увеличению габаритных размеров. Поэтому было принято решение использовать один общий изолятор, на котором будут монтироваться основные узлы плазмотрона.

Входные и выходные коммуникаций располагаются на верхнем торце плазмотрона. Данное решение способствует уменьшению габаритных размеров горелки, при этом шланги не подвергаются тепловому воздействию от нагретого металла и ультрафиолетовому излучению от сварочных дуг, обеспечивается простота монтажа плазмотрона к кронштейну, а также возможность крепления дополнительного оборудования к его корпусу.

В результате опытно-конструкторских изысканий был спроектирован и изготовлен плазмотрон, показанный на рисунок 47.



1



2

Рисунок 47. Плазмотрон для процесса плазма-МИГ без стабилизирующего сопла:
1 - в сборе; 2 – в разобранном виде

Плазмотрон состоит из простых в изготовлении деталей, соединенных между собой преимущественно за счет резьбовых соединений. Сварка и пайка при изготовлении горелки не применяются. Несущим элементом является изолятор, к которому присоединяются входные и выходные штуцера, электродный узел, анодный узел и другие детали. Токоподвод для плавящегося электрода и кольцевой анод имеют независимое прямое водяное охлаждение, выполненное в виде кольцевых каналов. Отвод тепла с защитного сопла осуществляется за счет косвенного водяного охлаждения. Подвод тока к плавящемуся электроду обеспечивается через контактный наконечник для МИГ сварки с присоединительной резьбой М6. При этом возможна замена контактного наконечника без полной разборки плазмотрона.

3.3. Исследование тепловых нагрузок в узлы плазмотрона при плазменной наплавке плавящимся электродом

Для подтверждения соответствия разработанной плазменной горелки требованиям технического задания, а также оценки технологических возможностей, необходимо выполнить исследование тепловых нагрузок на основные узлы – электродный узел и кольцевой анод. Исследование тепловых нагрузок производилось по методике калориметрии, предложенной ранее.

Исследование тепловложения в узлы плазмотрона является сложной задачей из-за одновременного горения двух дуг. Для проведения оценки тепловложения каждой дуги применялась следующая методика исследования:

1. Измерение теплопередачи в узлы при работе плазмотрона в режиме МИГ.
2. Измерение теплопередачи в узлы при работе плазмотрона в режиме плазма-МИГ.
3. Анализ влияния каждой из электрических дуг.

Основными варьируемыми параметрами режима были $U_{пэ}$, I_a , $V_{пэ}$. Фиксированными параметрами являлись: расстояние от торца кольцевого анода до наплавляемой поверхности составляло 10-12 мм, $Q_{пг} = 5$ л/мин (аргон), $Q_{зг} = 15$ л/мин (аргон), $d_a = 8$ мм, $d_{пэ} = 1,2$ мм.

Из-за того, что электродный узел и защитное сопло имеют общую систему охлаждения, то истинные данные о получаемой электродным узлом тепловой мощности могут отличаться от измеренных. Помимо косвенного водяного охлаждения, защитное сопло дополнительно охлаждается потоком защитного газа. В связи с этим было принято допущение, что тепловые нагрузки, воспринимаемые защитным соплом, компенсируются охлаждением потоком газа и не оказывают существенного влияния на тепловложение в электродный узел.

Рассмотрим распределения тепла, поступающего в плазмотрон при работе в режиме МИГ (см. рисунок 48). Общий тепловой поток в электродный узел зависит от количества тепла, передаваемого за счет теплопередачи (q_1) и излучения (q_2). Тепловой поток q_1 включает тепло, образующееся при прохождении тока через

проволочный электрод, и тепло, выделяющегося в анодной области дуги. Анодный узел испытывает тепловую нагрузку от излучения дуги q_3 . В зависимости от параметров процесса, которые определяют мощность и длину дуги, будет изменяться интенсивность тепловложения в узлы плазмотрона.

При МИГ процессе возможны два варианта наплавки: короткой дугой (дуга горит за пределами кольцевого анода) (рисунок 48, а) и длинной дугой (дуга горит на срезе или внутри кольцевого анода) (рисунок 48, б). При этом режимы, мощность дуги и, следовательно, значения тепловых потоков будут разными.



Рисунок 48. Схема теплового баланса при работе плазмотрона в режиме МИГ: а - дуга горит за пределами плазмотрона; б - дуга горит на срезе кольцевого анода

Зависимость тепловложения в узлы плазмотрона от параметров наплавки показана на рисунках 49 и 50.

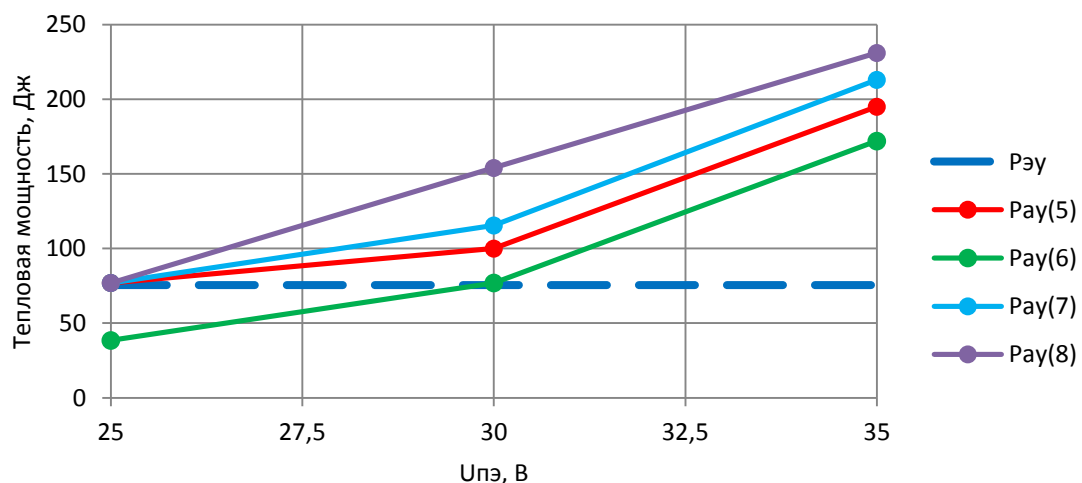


Рисунок 49. Изменение тепловой мощности в токоподвод ($P_{эу}$) и кольцевой анода (P_{ay}) в зависимости от напряжения дуги плавящегося электрода:

$P_{ay}(5)$ – тепловая мощность поступающая в кольцевой анод при $V_{пэ} = 5$ м/мин;
 $P_{ay}(6)$ – тепловая мощность поступающая в кольцевой анод при $V_{пэ} = 6$ м/мин;
 $P_{ay}(7)$ – тепловая мощность поступающая в кольцевой анод при $V_{пэ} = 7$ м/мин;
 $P_{ay}(8)$ – тепловая мощность поступающая в кольцевой анод при $V_{пэ} = 8$ м/мин.

Из рисунка 49 видно, что тепловая мощность, передаваемая в токоподвод плавящегося электрода постоянна ($P_{\text{эу}} = 76 \text{ Дж}$) и существенно не зависит от параметров режима. Можно предположить, что тепло от дуги в электродный узел поступает преимущественно за счет теплопроводности плавящегося электрода.

При $U_{\text{пэ}} \geq 35 \text{ В}$ дуга с плавящегося электрода горит на уровне торца кольцевого анода. При этом повышается тепловложение в кольцевой анод в 2-3 раза. Это объясняется увеличением доли тепловой энергии, получаемой от дуги кольцевым анодом посредством конвекции и излучения.

При малом напряжении ($U_{\text{пэ}} < 30 \text{ В}$), когда дуга горит за пределами кольцевого анода, увеличение мощности дуги не оказывает теплового воздействия на кольцевой анод. При $U_{\text{пэ}} = 30 \text{ В}$, ($V_{\text{пэ}} = 6-7 \text{ м/мин}$) фиксируется влияние электрической дуги на нагрев кольцевого анода. При $U_{\text{пэ}} = 35 \text{ В}$ (дуга горит на срезе кольцевого анода), зафиксировано максимальное значение тепловой мощности, поступающей в анодный узел, $P_{\text{ау}} \approx 231 \text{ Дж}$. Стоит отметить, что при возрастании $I_{\text{пэ}}$ со 175 до 215 А величина $P_{\text{ау}}$ остается относительно неизменной.

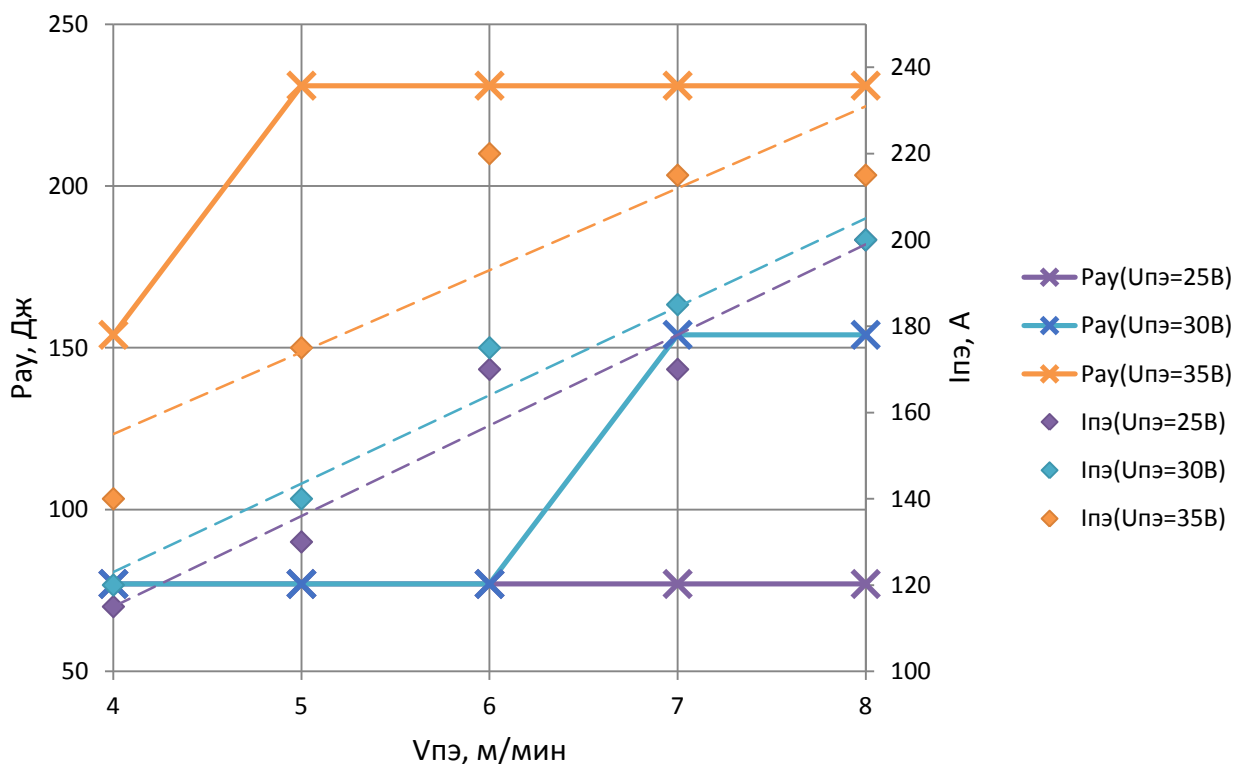


Рисунок 50. Влияние тока дуги плавящегося электрода на теплопередачу в кольцевой анод

Результаты исследования свидетельствуют о том, что длина МИГ дуги существенно влияет на тепловложение в кольцевой анод.

Рассмотрим распределение тепловой мощности в узлы плазмотрона при плазма-МИГ процессе (рисунок 51). Электродный узел испытывает дополнительное тепловое воздействия за счет излучения плазменной дуги и выделения тепла в присадочной проволоке из-за шунтирования тока плазменной дуги. Анодный узел испытывает тепловую нагрузку от излучения плазменной дуги и от тепла, выделяемого в анодной области. При плазма-МИГ наплавке, также как и при МИГ процессе возможно растягивание дуги с соответствующим изменением величины тепловых потоков.

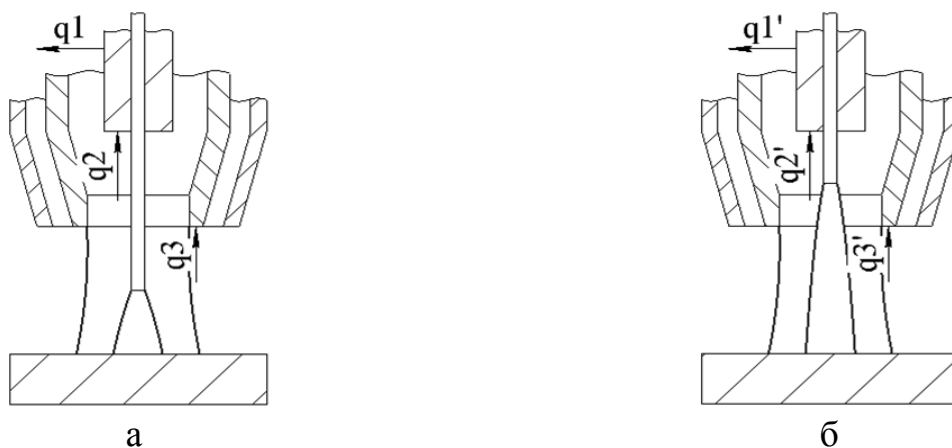


Рисунок 51. Схема теплового баланса при работе плазмотрона в режиме плазма-МИГ: а - дуга с плавящегося электрода горит за пределами плазмотрона; б – дуга с плавящегося электрода горит на срезе кольцевого анод.

q_1, q_1' - тепловой поток в электродный узел, определяемый теплопроводностью;
 q_2, q_2' - тепловой поток в электродный узел, определяемый излучением;
 q_3, q_3' - тепловой поток в анодный узел, определяемый излучением и тепловыделением в анодной области плазменной дуги

Параметры режимов при работе плазмотрона в режиме плазма-МИГ и результаты измерений тепловой мощности приведены в таблице 13.

Теплопередача в токоподвод плавящегося электрода при изменении параметров дуги с плавящегося электрода и плазменной дуги изменяется не значительно. Максимальная тепловая мощность в электродный узел составила не более 438 Дж. Это можно объяснить отсутствием конвективной теплопередачи от обеих дуг за счет обдува плазмообразующим газом.

Роль теплопередачи излучением от дуг так же не велика. Это, возможно, связано с малыми размерами источника излучения.

Таблица 13 - Результаты измерения тепловой мощности, передаваемой в узлы плазмотрона при работе в режиме плазма-МИГ

$V_{пз}$, м/мин	$I_{пз}$, А	$U_{пз}$, В	$I_{пд}$, А	$U_{пд}$, В	$T_{вх}$, °С	$T_{эу}$, °С	T_{ay} , °С	$P_{эу}$, Дж	P_{ay} , Дж
5	150	25	100	30	16	20	27	280	1050
5	150	27,5	100	32	16	20	27	280	1050
5	170	30	100	28	16	20	28	280	1145
5	160	25	120	28	16	18	28	140	1145
5	160	27,5	120	28	16	18	28	140	1145
5	160	30	120	32	16	18	29	140	1241
5	155	25	140	28	16	19	28	210	1145
5	165	27,5	140	27	16	19	29	210	1241
5	170	30	140	27	16	19	30	210	1336
6	190	25	100	27	16	18	25	140	859
6	195	27,5	100	27	16	18	25	140	859
6	200	30	100	25	16	18	26	140	955
6	190	25	120	25	16	19	27	210	1050
6	200	27,5	120	25	16	19	28	210	1145
6	200	30	120	25	16	19	28	210	1145
6	190	25	140	25	16	19	28	210	1145
6	200	27,5	140	24	16	19	29	210	1241
6	200	30	140	26	16	19	30	210	1336
7	190	25	100	32	14	18	25	350	797
7	205	27,5	100	34	14	18	25	350	797
7	215	30	100	30	14	18	26	350	869
7	200	25	120	30	14	18	28	350	1014
7	210	27,5	120	30	14	18	28	350	1014
7	210	30	120	34	14	18	28	350	1014
7	190	25	140	28	14	18	29	350	1086
7	200	27,5	140	30	14	18	30	350	1159
7	230	30	140	28	14	18	32	350	1303
8	215	25	100	30	14	18	24	350	724
8	225	27,5	100	32	14	18	24	350	724
8	250	30	100	32	14	18	25	350	797
8	210	25	120	31	14	18	27	350	941
8	220	27,5	120	31	14	18	27	350	941
8	235	30	120	31	14	18	27	350	941
8	200	25	140	32	14	18	28	350	1014
8	215	27,5	140	28	14	19	29	438	1086
8	240	30	140	30	14	19	29	438	1086

Влияние параметров режимов на тепловложение в кольцевой анод (P_{ay}) показано на рисунке 52.

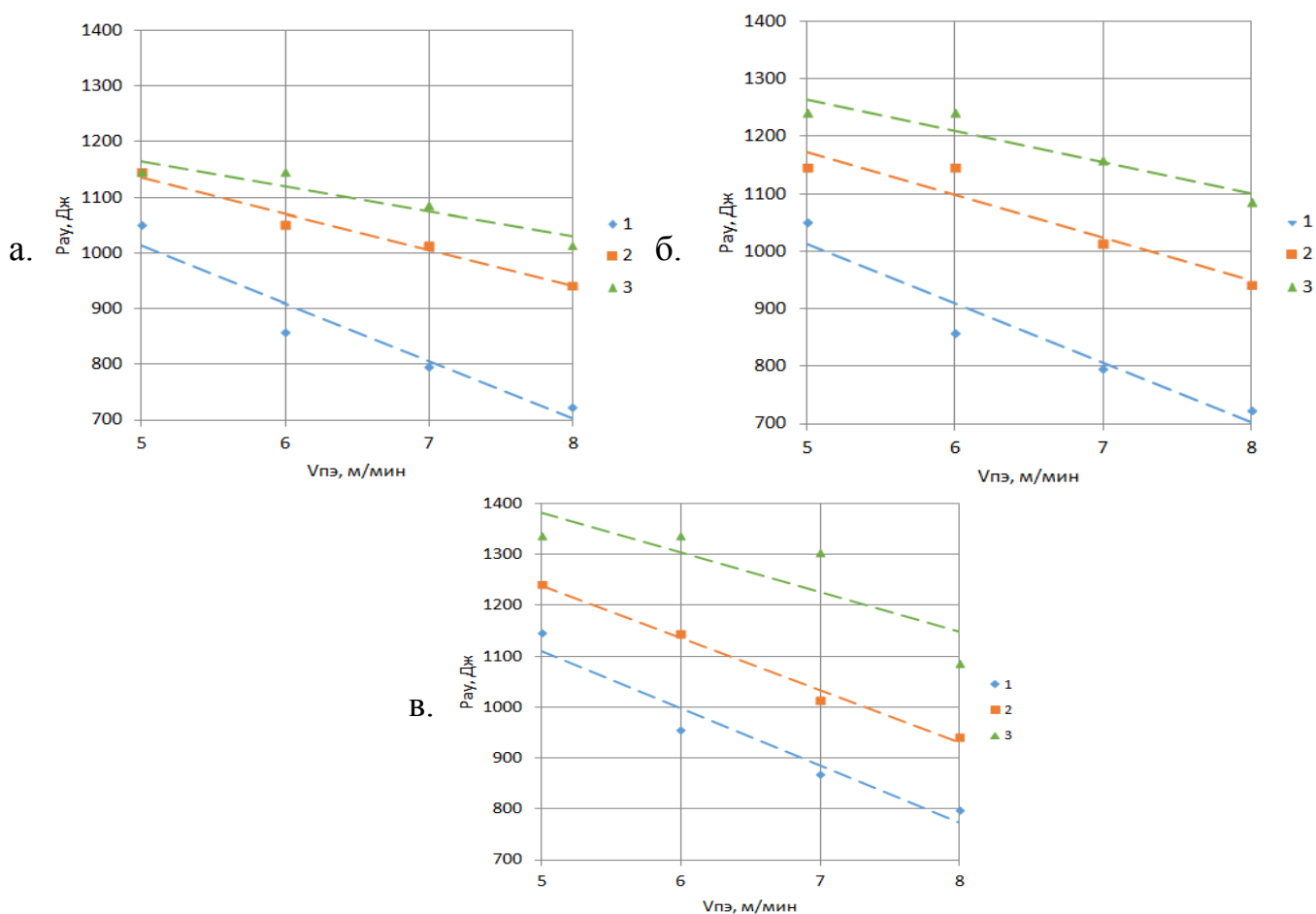


Рисунок 52. Влияние параметров плазма-МИГ наплавки на теплопередачу в кольцевой анод (P_{ay}): а – при $U_{пэ} = 25$ В, б– при $U_{пэ} = 27,5$ В, в – при $U_{пэ} = 30$ В; 1 – $I_{пд} = 100$ А, 2 – $I_{пд} = 120$ А, 3 – $I_{пд} = 140$ А

Увеличение $U_{пэ}$ в интервале 25-30 В приводит к росту P_{ay} на 10%, а увеличение $I_{пд}$ в интервале 100-140 А – на 5-15%. Уменьшение P_{ay} с увеличением $V_{пэ}$, вероятно, связано с изменением вида переноса электродного металла.

Максимальное тепловложение в анодный узел составляет не более 1400 Дж, что ниже предельного допустимого значения (см. рисунок 44). Таким образом, конструкция нового плазмотрона способна обеспечивать длительную работу на оптимальных параметрах режима (установленных в главе 1) плазменной наплавки плавящимся электродом.

Анализ данных экспериментов показывает, что доля воздействия плазменной дуги на теплопередачу в кольцевой анод при плазменной наплавке плавящимся электродом составляет около 90%.

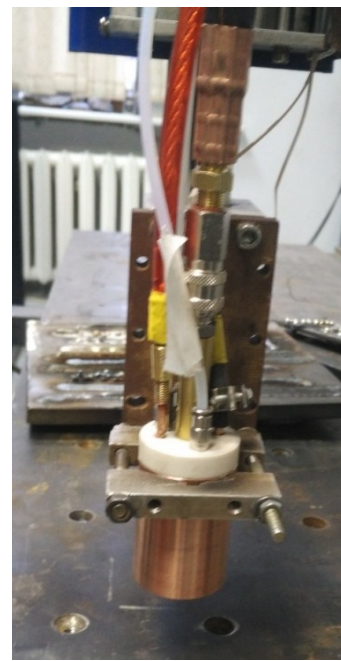
3.4. Оборудование для послойного формирования изделий плазменной наплавкой плавящимся электродом

Установки для аддитивного производства могут компоноваться на базе различных составляющих. Оборудование для плазменной наплавки должно отвечать требованиям совместимости с любым типом комплексов для аддитивного производства металлических изделий. Простота конструкции и малые габариты разработанного плазмотрона позволяют использовать его на различном оборудовании, как для WAAM, так и для обычной наплавки. Разработанный плазмотрон для плазменной наплавки плавящимся электродом использован при создании различных типов оборудования для аддитивного производства металлических изделий и прошел опытно-производственные испытания в их составе:

1. Консольная установка показана на рисунке 53.



а



б

Рисунок 53. Портальная установка для послойной наплавки: а – общий вид, б – прототип плазмотрона для плазменной наплавки плавящимся электродом

За основу была взята специализированная консольно-сварочная установка с числовым управлением СКСУ-1500. Технические характеристики установки приведены в таблице 14.

Таблица 14 - Технические характеристики

Параметр	Значение
Рабочее пространство (ДхШхВ), м	2,0х1,0х0,3
Скорость перемещения, м/мин	до 8,0
Наличие поворотной оси	да
Частота вращения планшайбы	0,12-2,5 об/мин
Максимальная нагрузка на рабочий стол, кг	до 1000
Грузоподъемность вращателя (ном/макс), кг	300/600

Сварочные аппараты FoxWeld 5706 Invermig 500E и Строитель-300P использовались для питания МИГ дуги и плазменной дуги соответственно. Технические характеристики сварочных аппаратов показаны в таблице 15.

Таблица 15 - Основные характеристики сварочных аппаратов

Сварочный аппарат	FoxWeld 5706 Invermig 500E	Строитель-300P
Напряжение холостого хода, В	70	85
Сварочный ток, А	до 320 (100% ПВ)	40-250 (100% ПВ)
Сварочное напряжение, В	15,5-39,0	-

Наплавка осуществляется на базе управляющей команды, для написания которой используется G-code. Контроль установкой выполняется с помощью программного пакета Mach3.

Данный тип установки предназначен для формирования изделий большой протяженности (более 1 м). Комплектование установки вращателем обеспечивает возможность выращивания тел вращения сложного профиля.

На рисунке 54 показана деталь, полученная на консольной (после механической обработки).

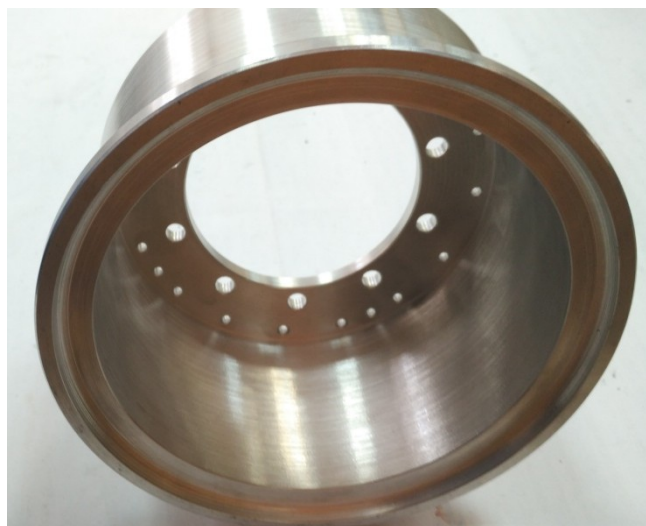


Рисунок 54. Обечайка, полученная послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом

2. Роботизированный комплекс на базе манипулятора Fanuc Arc Mate 100iC/12 и позиционера Arc Positioner B-82535RU01 (см. рисунок 55). Разработанный комплекс позволяет получать изделия сложной формы с расположением элементов в разных пространственных положениях.



Рисунок 55. Компонировка оборудования для WAAM на базе роботизированного комплекса

Манипулятор имеет технические характеристики, представленные в таблице 16.

Таблица 16 - Технические характеристики манипулятора Fanuc Arc Mate 100iC/12

Параметр	Значение
Количество управляемых осей	6
Повторяемость, мм	±0,03
Максимальная нагрузка на кисть, кг	12
Дотягаемость, мм	1420
Угол поворота, ° / максимальная скорость, °/с	
ось J1	340(360)/230
ось J2	250/225
ось J3	447/230
ось J4	380/430
ось J5	280(380)/430
ось J6	540(720)/630
Момент силы, Нм / Момент инерции, кгм ²	
ось J4	7,7/0,24
ось J5	7,7/0,25
ось J6	0,22/0,0027
Максимальный вес выращиваемой заготовки, кг	500
Угол поворота стола, ° / максимальная скорость, °/с	
ось J7	270 (от -135 до +135)/120
ось J8	480 (от -240 до +240)/190
Момент силы, Нм / Момент инерции, кгм ²	
ось J7	1764/300
ось J8	686/100

Конструкция плазмотрона позволяет использовать вспомогательное оборудование и источники питания для дуги плавящегося электрода, разработанные для роботизированной МИГ сварки. В представленном варианте, используется оборудование для СМТ наплавки фирмы Fronius. В качестве наплавочного оборудования применяется сварочный аппарат TPS 4000 СМТ с блоком подачи VR 7000 СМТ (МИГ дуга) и Строитель-300Р (плазменная дуга). Технические характеристики сварочных аппаратов показаны в таблице 17.

Управление комплексом осуществляется контроллером R-30iB Plus. Программный комплекс Roboguide и специально разработанная программа-ретранслятор используются для управления робота.

Таблица 17 - Основные характеристики сварочных аппаратов

Сварочный аппарат	TPS 4000 CMT	Строитель-300P
Напряжение холостого хода, В	70	85
Сварочный ток, А	до 320 (100% ПВ)	40-250 (100% ПВ)
Сварочное напряжение, В	14,2-34,0	-

На рисунке 56 показаны примеры деталей полученных послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом.



Рисунок 56. Заготовки деталей (сердечник - слева, импеллер - справа), созданные на роботизированном комплексе

3. Многофункциональный гибридный центр для аддитивного изготовления деталей (см рисунок 57) создан в результате совместной работы объединения "Гибридное аддитивное производство". В состав объединения входят: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ООО "Центр ЭЛТ", ПАО "Протон-ПМ", ООО "ИНКОР" и ООО "МИП "КАТ".

Оборудование собрано на базе универсального трехосевого вертикального обрабатывающего центра JETJMD-48.

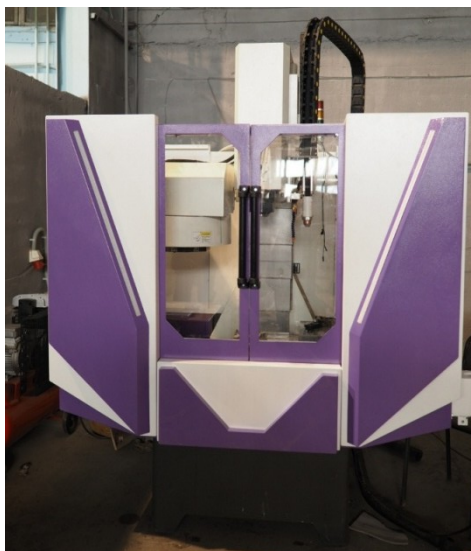


Рисунок 57. Многофункциональный комплекс АТ-300 (внешний вид)

Общие характеристики обрабатывающего центра приведены в таблице 18. Управление центром осуществляется встроенной системой ЧПУ на базе контроллера Siemens 808DAdvance.

Таблица 18 – Характеристики обрабатывающего центра JETJMD-48

Модель с ЧПУ Siemens 808D Advance	JMD-48STA CNC
Размеры стола, мм	600 x 300
Максимальные перемещения по осям XxYxZ, мм	400 x 300 x 500
Мощность шпинделя, кВт	3,7
Частота вращения шпинделя, об/мин	8000
Точность позиционирования, мм	0,005
Повторяемость, мм	0,005
Максимальная нагрузка на стол, кг	80
Расстояние шпиндель-стол, мм	80-580
Расстояние шпиндель-стойка, мм	260
Габаритные размеры ДхШхВ, мм	2068 x 2361 x 2140
Масса, кг	1840

Компоновка комплекса включает в себя оборудование для плазменной наплавки плавящимся электродом, оборудование для ударной обработки

(упрочнения) наплавленного металла, фрезерное оборудование для механической обработки заготовок. Виды рабочей зоны и размещения оборудования показаны на рисунке 58.



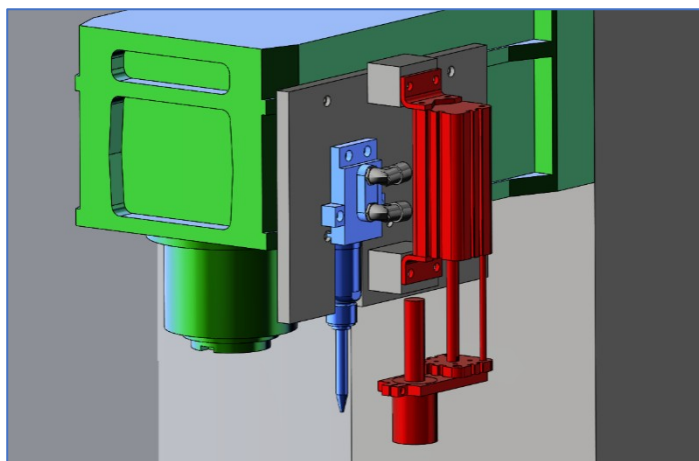
а



б

Рисунок 58. Рабочая зона (а) и навесное оборудование (б)

Для осуществления функции послойного упрочнения наплавленной заготовки на колонну станка был установлен пневматический молоток, конструкция которого была доработана соответствующим образом для обеспечения монтажа. Пневматический молоток подключается к общей пневматической магистрали обрабатывающего центра с использованием электрического клапана, управление которым осуществляется с использованием имеющихся цифровых выходов контроллера Siemens 808D. Управление включением и выключением молотка выполняется непосредственно из управляющей программы. Точка крепления молотка к обрабатывающему центру выбрана таким образом, чтобы в выключенном состоянии рабочий узел молотка (зубило) находился ниже плоскости шпинделя, но выше плоскости стандартной оправки. Это позволяет избавиться от необходимости подъема (при деактивации) и опускания (при активации) молотка в процессе работы установки. Монтаж пневматического молотка и плазмотрона осуществлен таким образом, чтобы их рабочие узлы находились на одной оси по отношению к шпинделю. Для обеспечения функции подъема и опускания плазмотрона на высоту, требуемую для осуществления процесса наплавки с заданными параметрами, используется стандартный пневмоцилиндр (см. рисунок 59).



а

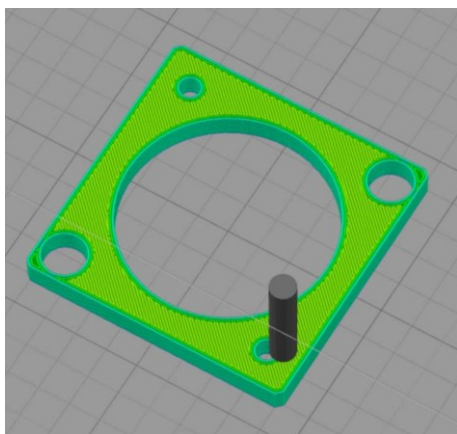


б

Рисунок 59. Расположение навесного оборудования: схема (а) и общий вид (б)

В рамках проекта для генерации управляющих программ используются стандартные программные продукты (слайсеры), применяющиеся для 3D принтеров. Наиболее подходящим для задач трехмерной наплавки слайсером по итогам проведенного анализа был определен слайсер Simplify3D, обладающий наибольшим числом необходимых настраиваемых параметров, а также большим количеством стратегий заполнения и скоростью работы для больших исходных моделей. Исходным файлом для работы слайсера является STL-модель формируемого объекта. Результирующим файлом, получаемым по итогам работы, является готовая управляющая программа послойной наплавки на языке G-code. Пример такой траектории для одного из слоев наплавляемого изделия, а также корреспондирующего ему кода управляющей программы приведены на рисунке 60.

Генерация управляющих программ для этапов механической обработки изделия осуществляется с использованием любой доступной САМ-системы, поддерживающей вывод управляющей программы в формате, пригодном для контроллеров Siemens 808D. В проекте использовалась САМ-система Autodesk Power mill. При необходимости генерация управляющей программы для этапа механической обработки может быть осуществлена непосредственно из интерфейса контроллера установки.



а

```

83 G1 X111.996 Y148.881 E2.2178
84 G1 X111.802 Y148.432 E2.23163
85 G1 X111.665 Y147.84 E2.24881
86 G1 X111.526 Y146.731 E2.2804
87 G1 X111.503 Y146.358 E2.29097
88 G1 X111.503 Y135.777 E2.59011
89 G1 X111.526 Y135.404 E2.60067
90 G1 X111.665 Y134.294 E2.6323
91 G1 X111.765 Y133.815 E2.64613
92 G1 X111.942 Y133.359 E2.65996
93 G1 X112.257 Y132.847 E2.67695
94 G1 X112.415 Y132.64 E2.68432
95 M204 S5000
96 G0 F4050 X112.733 Y132.882
97 M204 S3000
98 G1 F1800 X113.04 Y132.546 E2.69718

```

б

Рисунок 60. Пример построения траектории наплавки слоя: модель (а) и фрагмент текста управляющей программы (б)

В качестве источников питания дуг использовались сварочные аппараты Кедр-319 (плазменная дуга) и FoxWeld 5706 Invermig 500E. Основные технические характеристики сварочных аппаратов приведены в таблице 3.

На рисунке 61. представлены фото этапов получения изделия на созданном гибридном комплексе.



1



2



3

Рисунок 61. Фото процесса изготовления детали: 1 - послойная плазма-МИГ наплавка, 2 - послойная проковка, 3 - финишная механическая обработка

3.5. Выводы по Главе 3.

1. Проведены сравнительные исследования теплопередачи в стержневой и кольцевой анод плазмотрона. Установлены особенности теплопередачи в кольцевой анод плазмотрона в двухдуговом режиме, определены требования к мощности системы охлаждения кольцевого анода и плазмотрона в целом. Показано, что при плазменной наплавке плавящимся электродом теплопередача в кольцевой анод при различных вариантах горения дуги с плавящегося электрода определяется мощностью плазменной дуги (порядка 90% от суммарного теплового воздействия на кольцевой анод).

2. Разработан плазмотрон для реализации плазменной наплавки плавящимся электродом. Конструкция плазмотрона обладает достаточной надежностью, простотой, удобством эксплуатации, а также совместимостью с широким спектром серийно выпускаемого сварочного оборудования. Плазмотрон обеспечивает режим работы при 100% ПВ в следующем диапазоне параметров: $I_{\text{пд}} = 100-160 \text{ А}$, $U_{\text{пз}} = 25-30 \text{ В}$, $V_{\text{пз}} = 5-12 \text{ м/мин}$, $Q_{\text{пг}} = 5-15 \text{ л/мин}$.

3. Созданы образцы оборудования для аддитивного формирования металлических изделий путем послойной плазменной наплавки плавящимся электродом. Комплексы для WAAM могут быть выполнены на базе серийно выпускаемого промышленного оборудования: порталные установки, промышленные роботы.

4. Разработанный плазмотрон и технология плазменной наплавки плавящимся электродом вошли в состав оборудования для аддитивного производства полного цикла АТ 300.

Глава 4. Исследование свойств и структуры металла, полученного послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом

В диссертационной работе показана возможность формирования изделий на примере высоколегированной стали аустенитного класса. Данные стали имеют широкую область применения: химическое и нефтехимическое машиностроение, пищевая промышленность, судостроение, криогенная техника и т.д. Аустенитные стали, помимо высоких прочностных свойств, обладают высокой коррозионной стойкостью и жаростойкостью.

Целью данной главы является исследование структуры и свойств материала, полученного послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом. Для объективной оценки проводились сравнения свойств аналогичных материалов, полученных способами плазменной наплавки неплавящимся электродом на токах прямой и обратной полярности, а также свойств материала, полученного традиционными методами (литье,ковка и др.).

В качестве материала для исследования возможности применения способа плазменной наплавки плавящимся электродом для послойного формирования металлических изделий была использована высоколегированная сталь аустенитного класса марок 12X18H10T и 04X19H9. Сталь 12X18H10T применяется для производства изделий, работающих в разбавленных растворах азотной, уксусной, фосфорной кислот, растворах щелочей и солей, под давлением и при температуре от -196 °С до + 600 °С, а при наличии агрессивных сред до +350 °С. Сталь 04X19H9 рекомендуется использовать для изготовления сварных конструкций работающих в контакте с азотной кислотой или в азотнокислых средах при повышенных температурах, а также изделий, работающих в средах с более высокой агрессивностью, чем стали 12X18H10T и 12X18H12T, и изделий, подвергаемых термической обработке [156].

В качестве исходного материала для наплавки использовалась проволока марки 12X18H10T и сварочная проволока ОК Autrod 308LSi (ESAB) диаметром 1,2

мм. Данная проволока является зарубежным аналогом отечественной проволоки Св-04Х19Н9 ГОСТ 2246-70. Проволока предназначена для сварки деталей из сталей марок 04Х18Н10 (зарубежный аналог - AISI 304), 08Х18Н10, AISI 321 и им подобных.

Наплавочные работы выполнялись с применением разработанного плазмотрона. Параметры режима были выбраны из условия стабильного формирования одиночного валика (см. Главу 2): $I_a = 100\text{А}$, $U_{пэ} = 25\text{ В}$, $V_{пэ} = 6\text{ м/мин}$, $V_n = 1\text{ м/мин}$, $d_a = 8\text{ мм}$, $Q_{пг} = 5\text{ л/мин}$, $Q_{зг} = 15\text{ л/мин}$. При построении траектории наплавки использовались значения геометрических размеров валика, определенных с помощью полученной математической модели профиля валика (см. глава 2). После наплавки, поверхность каждого слоя очищалась до металлического блеска, а заготовка охлаждалась до температуры не более 100°С .

Для исследования полученного металла методами неразрушающего контроля был изготовлен образец с размерами $200 \times 15 \times 20\text{ мм}$ (25 слоев). Заготовки для проведения разрушающего контроля и определения коррозионных свойств имели вид вертикальных стенок с размерами $150 \times 20 \times 90\text{ мм}$ (115 слоев).

Фото заготовок показано на рисунке 62.



а



б

Рисунок 62. Фото заготовок для исследования методами неразрушающего контроля (а) и определения структуры и свойств металла (б)

4.1. Исследование заготовки, полученной послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом, методами неразрушающего контроля

Для проведения контроля наплавленного образца, его верхнюю и боковые стороны фрезеровали (рисунок 62, а). Наплавленный образец исследовали следующими способами неразрушающего контроля: визуальный осмотр, рентгенографический и ультразвуковой контроль и контроль поверхности проникающими веществами (пенетрантами).

При визуальном осмотре обработанных поверхностей видимых поверхностных дефектов (поры, неметаллические включения, несплавления и др.) обнаружены не были.

Далее, проводилось исследование поверхности металла цветной дефектоскопией с целью выявления горячих и холодных трещин, расслоений. В качестве реактивов использовались: пенетрант SHERWIN DP-55, очиститель SHERWIN DR-60, проявитель SHERWIN D-100. По итогам контроля дефектов не обнаружено. На рисунке 63 показана поверхность образца после нанесения проявителя.

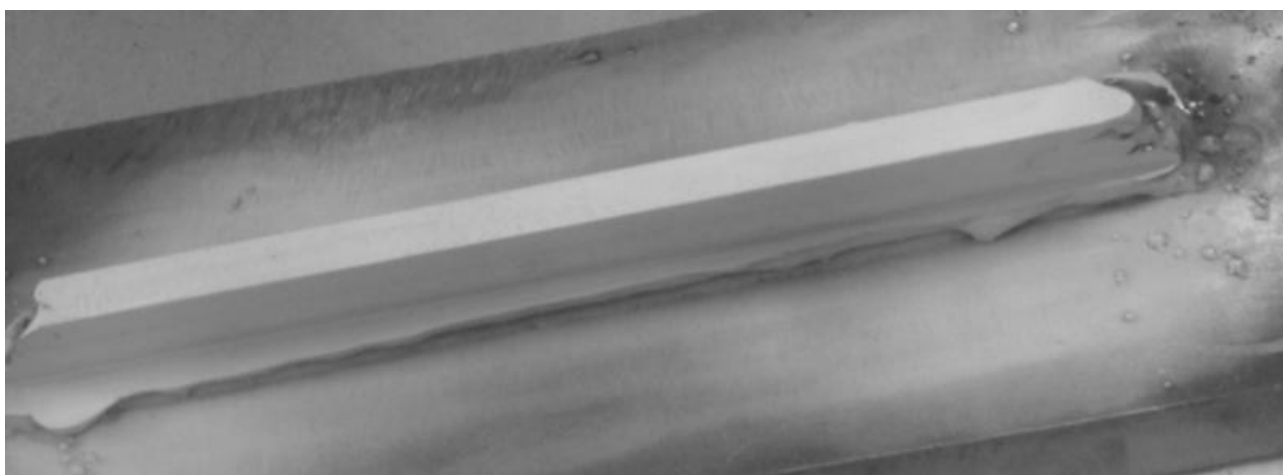


Рисунок 63. Контроль образца цветной дефектоскопией

Рентгенографическое исследование образца производили с применением импульсного рентгеновского аппарата МОНОСКАНTM3. Для просмотра снимка применялся комплекс анализа рентгенографических изображений «СКРИНТЕСТ 35». Рентгенографический контроль (см. рисунок 64) показал отсутствие

внутренних дефектов типа пор, несплавлений и шлаковых включений в полученном металле.



Рисунок 64. Рентгенографический снимок наплавленного металла

Для проведения контроля применялся ультразвуковой дефектоскоп А1214-Эксперт (переносной), ультразвуковой толщиномер А-1210, набор аттестованных пьезоэлектрических преобразователей, набор образцов для настройки дефектоскопа и набор стандартных образцов для настройки чувствительности. В качестве контактной жидкости использовался «Аквагель» для ультразвуковой диагностики. В результате исследования трещин, несплавлений, расслоений обнаружено не было.

При проведении ультразвукового контроля был выявлен эффект сильного рассеивания и затухания ультразвуковых волн. Причиной этого может служить наличие в наплавленном металле анизотропной крупнозернистой структуры [157].

4.2. Исследование химического состава наплавленного металла

Химический состав наплавленного металла определяли с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра ALPHA SERIESTM Альфа-2000. Замеры производили по высоте наплавленного образца в трех местах: верхняя часть, средняя часть и нижняя часть (2-5 мм от зоны сплавления с подложкой). Химический состав металла, определенный в результате исследования, представлен в табл. 19.

Таблица 19 - Содержание основных легирующих элементов в металле

Образец	Содержание основных химических элементов, %				Примечание
	Fe	Cr	Ni	Mn	
Проволока OK Autrod 308LSi	Основа	19,5	9,6	2,0	Согласно сертификату (см. приложение 1)
Сталь 04X19H9	Основа	17,0-19,0	9,0-11,0	≤ 2,0	ГОСТ 5632
Плазма-МИГ наплавка	67,6	19,6	10,6	1,8	Верх
	67,6	19,8	10,5	1,8	Центр
	67,7	19,5	10,7	1,6	Низ
Плазменная наплавка на токе прямой полярности	67,8	20,1	10,3	1,7	Верх
	68,2	19,9	10,0	1,7	Центр
	71,9	17,8	8,8	1,1	Низ

Металл, полученный способом послойной плазменной наплавки, по химическому составу удовлетворяет требованиям ГОСТ 5632-72 для металлов, полученных традиционными металлургическими способами. Процентное содержание химических элементов в наплавленном металле примерно одинаковое по всей высоте образца. Состав наплавленного металла, полученного плазменной наплавкой плавящимся электродом обеспечивает более равномерное распределение по слоям легирующих элементов в сравнении с плазменной наплавкой на токе прямой полярности, и соответствует химическому составу присадочной проволоки. Данный результат свидетельствует о том, что значительного выгорания легирующих элементов не происходит.

4.3. Исследование структуры металла, полученного многослойной плазменной наплавкой плавящимся электродом

Формирование изделий способом послойной наплавки сопровождаются высокими скоростями нагрева и охлаждения. Кроме того, скорости нагрева и охлаждения могут меняться из-за аккумуляирования тепла в ходе послойной наплавки, а повторный нагрев наплавленного металла может оказывать существенное влияние на структуру ниже лежащих слоев металла.

После подготовки шлифов поверхность обрабатывали реактивом Васильева. Исследование микроструктуры производилось на микроскопе OLYMPUS PME3

Макроструктура наплавленного металла показана на рисунке 65.

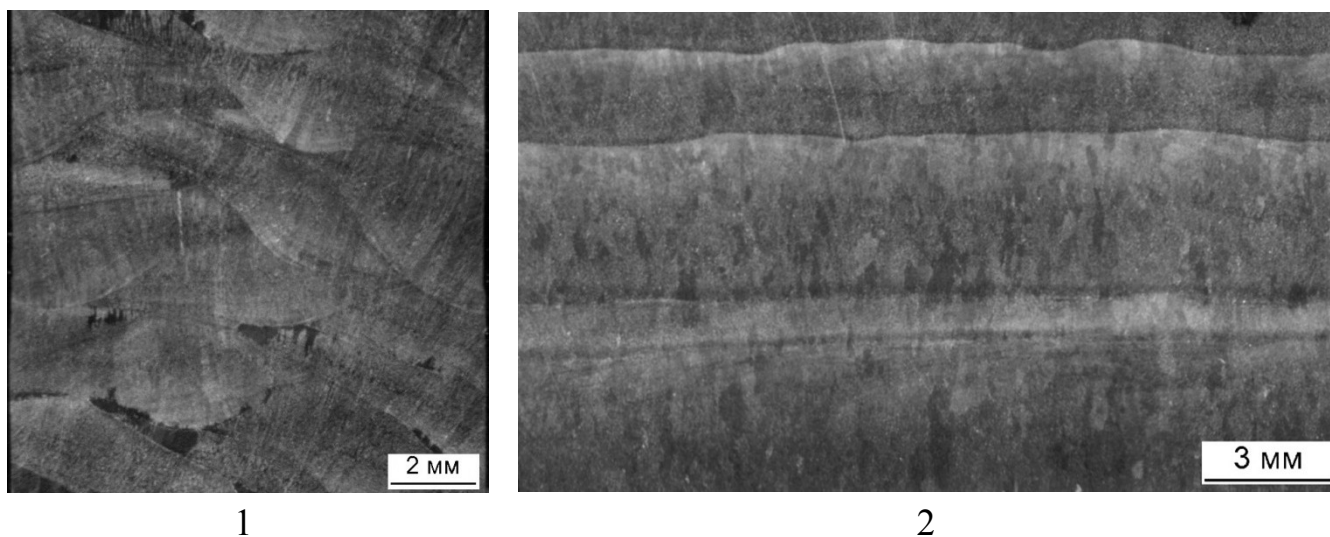


Рисунок 65. Макроструктура металла, полученного плазменной наплавкой плавящимся электродом: 1 – поперечное сечение, 2 – продольное сечение

Структура наплавленного металла типична для многослойной дуговой наплавки стали аустенитного класса [154, 158-161]. Отчетливо прослеживаются границы сплавления валиков. Наблюдается транскристаллитная кристаллизация во всем объеме металла. Внутренние дефекты (трещины, несплавления, неметаллические включения) не обнаружены. Объем остаточной пористости не превышает 0,75%. Поры имеют размеры от 10 до 54 мкм [158-161].

Микроструктурное исследование показало наличие преимущественно аустенитно-ферритной структуры (ферритная фаза - 3-4,5%) (см. рисунок 66). Загрязненность точечными оксидами составляет менее 1,0 балла по ГОСТ 1778-70. Выявлена слоистая неоднородность, характерная для заготовок, полученных послойной наплавкой.

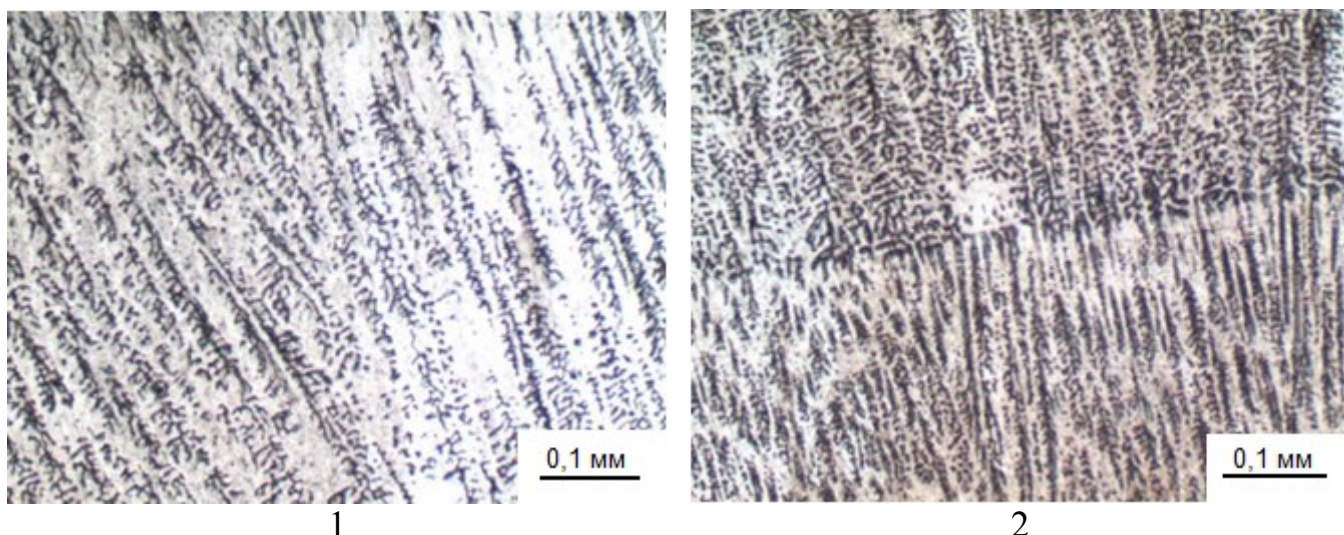


Рисунок 66. Микроструктура наплавленного металла: 1 – область наплавленного валика; 2 – участок сплавления смежных валиков

При исследовании выявлены четкие границы сплавления смежных валиков, которые характеризуются изменением дисперсности кристаллической структуры (см. рисунок 67). Основной причиной дисперсионной неоднородности структуры может является большая разность скоростей охлаждения наплавленного металла. Нижний слой валика имеет большую скорость отвода тепла в тело заготовки за счет механизма теплопередачи. Верхняя же часть имеет большую температуру за счет интенсивного нагрева дугой плавящегося электрода и дополнительного подогрева хвостовой части ванны плазменной дугой. Таким образом, нижняя часть металла валика имеет структуру меньшей дисперсности, чем верхняя.

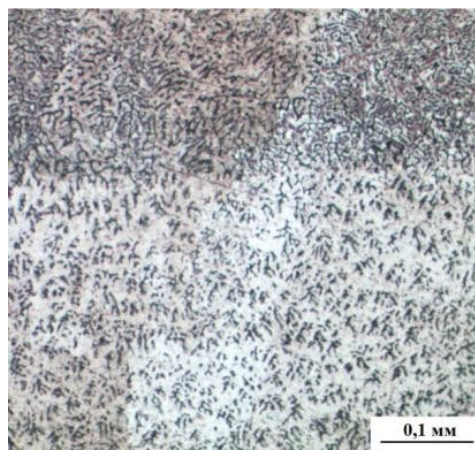


Рисунок 67. Структура наплавленного металла с разной дисперсностью

Были обнаружены участки с изотропной структурой по границам сплавления смежных валиков (см. рисунок 68). Было сделано предположение, что эти места имеют аустенитную структуру.

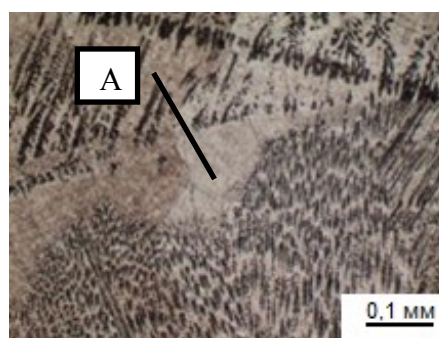
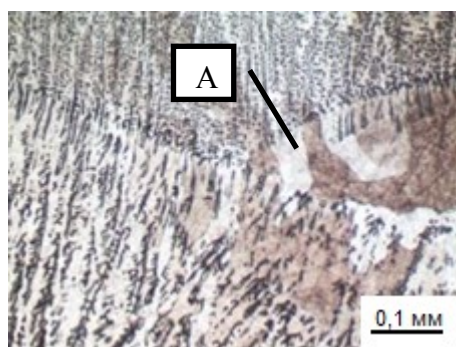


Рисунок 68. Участки наплавленного металла с аустенитной структурой (А)

Предполагаемой причиной образования двух типов структур может служить наличие разных механизмов кристаллизации расплавленного металла. В зависимости от значения хромоникелевого эквивалента (Cr_3/Ni_3) кристаллизация может иметь разные механизмы: выделение чистого аустенита, выделение аустенита и междендритного эвтектического феррита и выделение феррита с последующим образованием аустенита [162]. Для наплавленного металла, полученного из присадочной проволоки ОК Autrod 308LSi, значение Cr_3/Ni_3 рассчитывается по формуле 22. Содержание химических элементов приведено указано в сертификате на проволоку (см. Приложение 1).

$$\frac{Cr_3}{Ni_3} = \frac{Cr+1,37 \cdot Mo+1,5 \cdot Si+2 \cdot Nb+3 \cdot Ti}{Ni+22 \cdot C+0,31 \cdot Mn+14,2 \cdot N+Cu} = \frac{19,5+1,37 \cdot 0,1+1,5 \cdot 0,93+2 \cdot 0+3 \cdot 0}{9,6+22 \cdot 0,02+0,31 \cdot 2+14,2 \cdot 0,07+0,13} = 1,78 \quad (22)$$

Исходя из условия $Cr_3/Ni_3=1,78 > 1,3$, процесс кристаллизации протекает путем образования вермикулярного феррита с последующим образованием аустенита и остаточного феррита. Остаточный феррит способен преобразовываться в аустенит при последующей аустенизации. Таким образом, появление участков с чистой аустенитной структурой может быть вызвано твердофазным превращением остаточного δ -феррита при охлаждении. [162]

Структура образцов из стали 12X18H10T до и после термической обработки показана на рисунке 69.

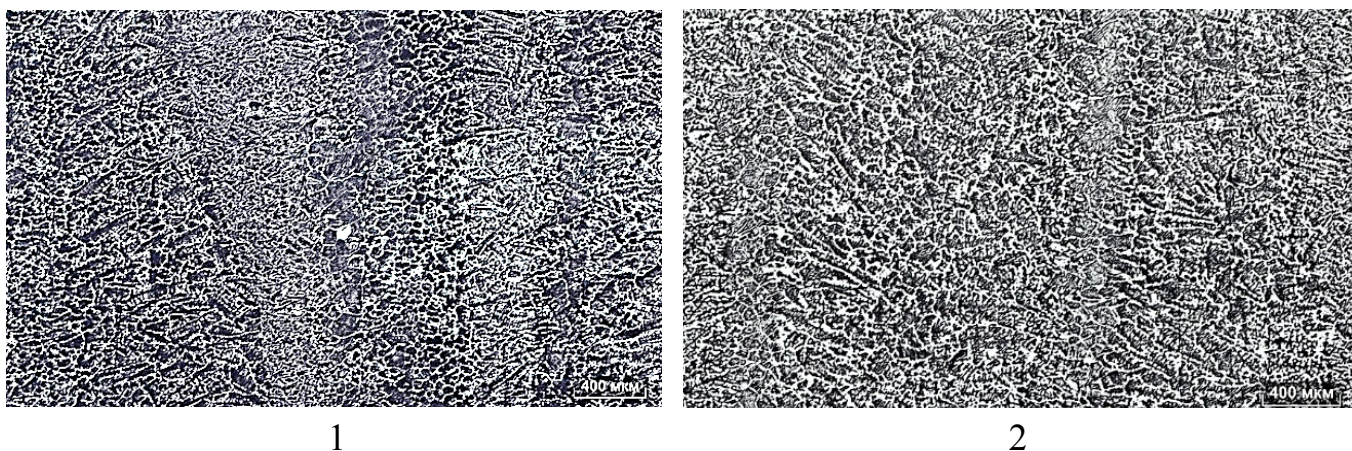


Рисунок 69. Микроструктура образцов из сплава 12X18H10T: 1 - без термообработки; 2 - после термообработки (закалка)

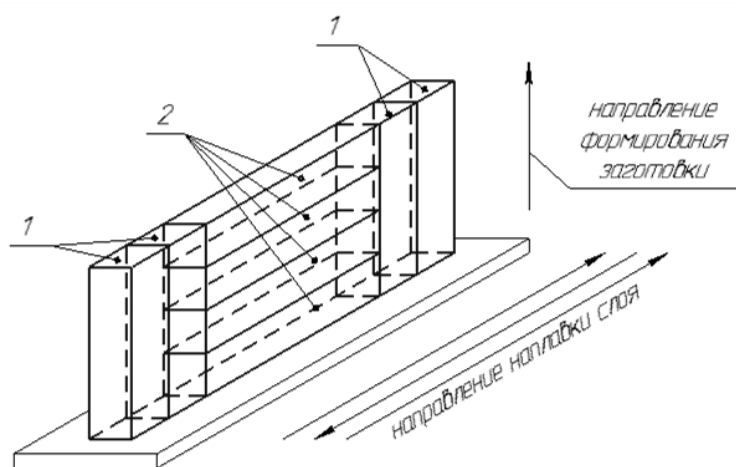
Исходя из рисунка 69, можно сделать заключение, что термическая обработка аустенитной стали, полученной послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом, способствует получению однородной по дисперсности структуры.

На образце из 12X18H10T без термической обработки выявлены несплошности, размером до 62,9 мкм и объемной долей 0,12%. На образце из 12X18H10T (после закалки) выявлена пористость с максимальным размером пор до 27,2 мкм, объемной долей 0,13%. Причиной несплошностей могут являться несплавления, обусловленные наличием оксидных пленок.

4.4. Исследование механических свойств наплавленного металла

При аддитивном формировании изделий полученный металл должен соответствовать требуемым прочностным характеристикам. Как правило, они должны быть не ниже свойств материала, полученного традиционными способами (литье,ковка и т.д.).

Образцы для проведения механических испытаний материала вырезались по схеме, показанной на рисунке 70.

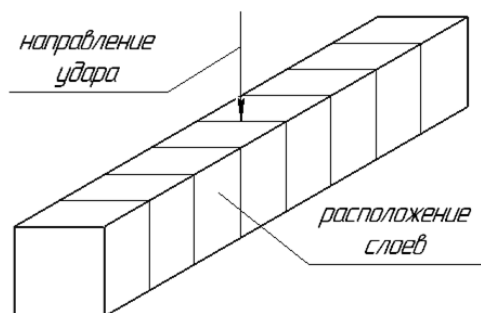


а

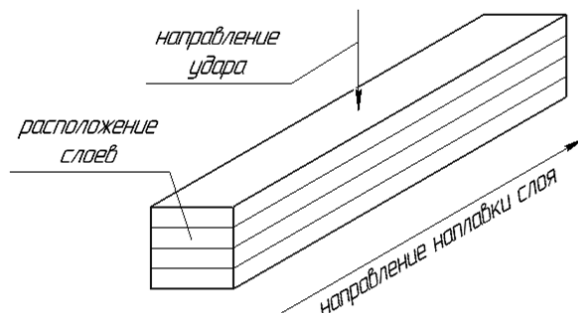
б

Рисунок 70. Схема вырезки образцов для проведения исследования механических характеристик материала: а – схема вырезки образцов (1 – поперек слоев, 2 – вдоль слоев), б – фото образца

Подготовка и испытания образцов на растяжение выполнялась согласно ГОСТ 1497-84. Схемы испытания образцов на ударную вязкость представлены на рисунке 71.



1



2

Рисунок 71. Схемы испытания образцов на ударный изгиб: 1 – вдоль наплавленных слоев, 2 – поперек наплавленных слоев

Результаты механических испытаний для материала ОК Autrod 308LSi (04X19H9) приведены в таблице 20 [158-160]. Для сравнения механических свойств были взяты данные из соответствующих ГОСТ при температуре 20°C.

Таблица 20 - Механические свойства стали 04X18H9

Материал	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	KCU , кДж/м ²
Плазма-МИГ наплавка (вдоль слоев)	520	234	42,4	251
Плазма-МИГ наплавка (поперек слоев)	503	222	45,6	164
Сталь 04X18H10 ГОСТ 25054-81	≥ 441	≥ 157	38-40	-
Сталь 04X18H10 ГОСТ 5949-75 (закалка $T = 1020-1100$ °C)	≥ 440	≥ 155	≥ 40	-

Материал, полученный послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом, удовлетворяет требованиям стандартов для стали 04X18H10.

Образцы после испытания на ударный изгиб показано на рисунке 72.



Рисунок 72. Образцы после испытания на ударный изгиб

Излом образцов свидетельствует о пластическом разрушении. Анизотропия механических свойств наплавленного металла в продольном и поперечном

направлении наплавки составляет не более 10%. Однако металл заготовки имеет различную ударную вязкость относительно расположения слоев. Ударная вязкость металла в продольном направлении слоев в 1,5 раза больше, чем в поперечном.

Для сталей аустенитного класса рекомендуется выполнять термообработку (закалку/аустенизацию) для снятия остаточных напряжений, повышения пластичности и улучшению стойкости к коррозии (общей, межкристаллитной, ножевой). Закалку производили по следующему режиму: нагрев до 1050-1100 °С; выдержка – 30 мин; охлаждение на воздухе.

В таблице 21 приведены результаты механических испытаний заготовок из стали 12Х18Н10Т, полученные послойной наплавкой до и после термической обработки. Для наглядности результаты отображены на рисунках 73-75.

Таблица 21 - Механические свойства стали 12Х18Н10Т

Материал	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Плазма-МИГ наплавка (без термообработки)	525	218	49
Плазма-МИГ наплавка (закалка)	539	221	47
Плазменная наплавка, прямая полярность (без термообработки)	552	326	54
Плазменная наплавка, прямая полярность (закалка)	555	300	50
Плазменная наплавка, обратная полярность (без термообработки)	541	320	54
Плазменная наплавка, обратная полярность (закалка)	550	300	49
Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 25054-81 (закалка)	≥ 510	≥ 196	35-38
Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-75 (закалка)	≥ 510	≥ 196	≥ 40

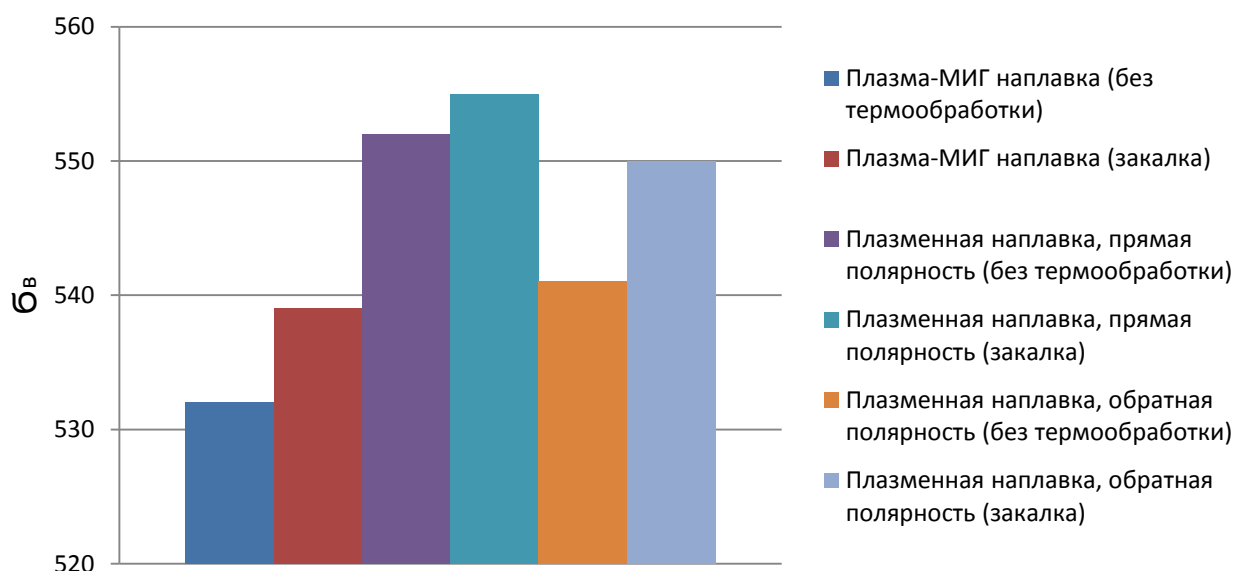


Рисунок 73. Влияние закалки на предел прочности материала 12X18H10T

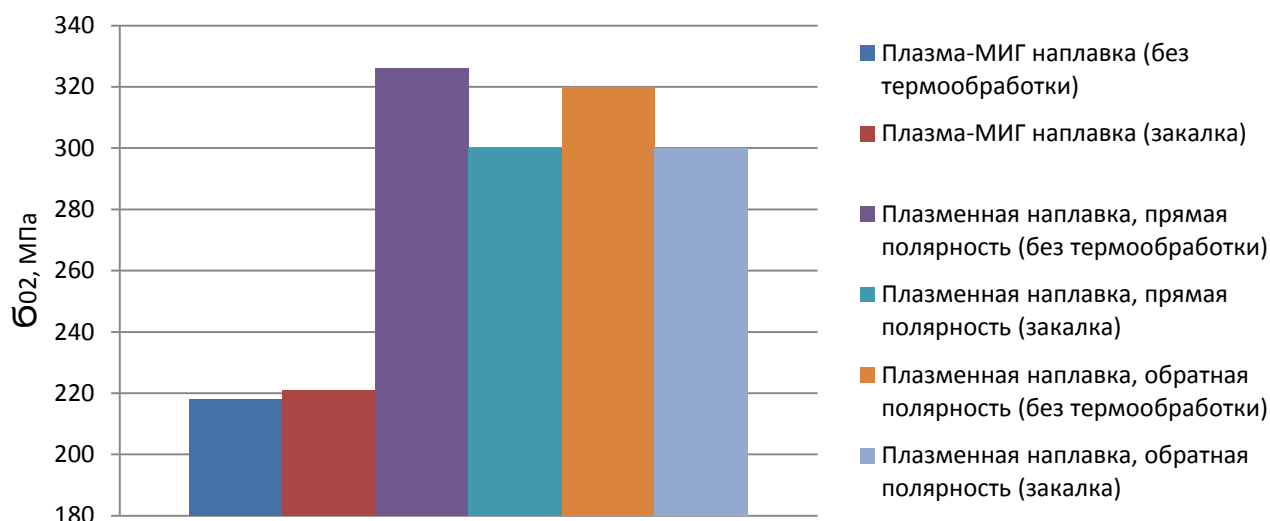


Рисунок 74. Влияние закалки на предел текучести материала 12X18H10T

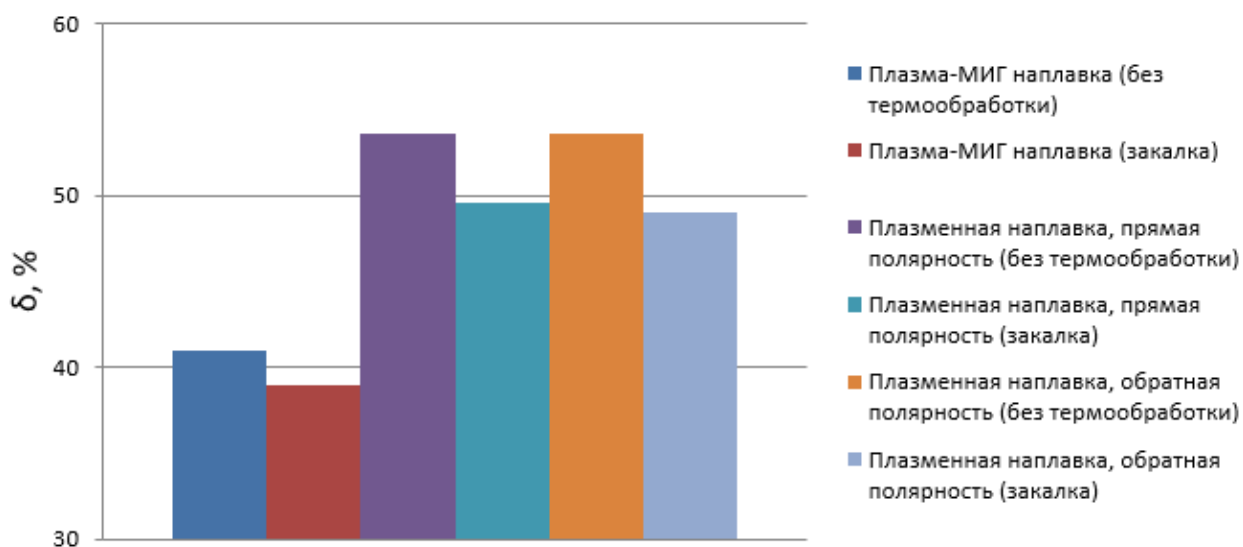


Рисунок 75. Влияние закалки на пластичность материала 12X18H10T

Проведение аустенизации после формирования заготовки из 12X18H10T способствует небольшому повышению прочности и пластичности. Прочностные характеристики металла, полученного послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом, ниже, чем у аналогичного материала, полученного послойной плазменной наплавкой неплавящимся электродом на токах прямой и обратной полярности

Испытуемые стали относятся к жаропрочным жаростойким сталям. Для оценки возможности применения изделий из материалов, полученных послойной плазма-МИГ наплавкой, проводились испытания при повышенной температуре. Механические свойства материала при температуре 500 °С приведены в таблице 22.

Таблица 22 - Механические свойства образцов из 12X18H10T при T = 500 °С

Образец	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Плазма-МИГ наплавка (без термообработки)	278	147	36	67
Плазма-МИГ наплавка (закалка)	272	129	36	67

Результаты исследования длительной прочности стали 12X18H10T, полученной многослойной плазменной наплавкой плавящимся электродом представлены в таблице 23.

Таблица 23 - Длительная прочность образцов из 12X18H10T

Образец	Напряжение, МПа	Наработка, час/мин	Примечание
Наплавка + закалка	200	100/05:00	Образцы сняты по достижении базы по долговечности
	160	500/05:00	
Наплавка без закалки	200	100/02:00	
	160	500/05:00	
Наплавка + закалка	420	10:46	Критерий прекращения испытания – разрушение образца
	320	133/32:00	
Наплавка без закалки	420	02:26	
	320	143/36:00	

Согласно таблицам 20-23, изделия из аустенитных сталей (04X19H9 и 12X18H10T), полученные послойной гибридной плазменной наплавкой плавящимся электродом, отвечают всем требованиям по механическим характеристикам, предъявляемым к данной стали, полученной традиционными способами. Термическая обработка (закалка) не оказывает существенного влияния на механические свойства наплавленного металла. Выявлено, что аустенитная сталь полученная способом плазма-МИГ обладает большей пластичностью (примерно в 1,5 раза), но имеет меньший предел текучести (примерно в 1,5 раза), чем аналогичный материал, полученный многослойной плазменной наплавкой неплавящимся электродом на токах прямой и обратной полярности.

4.5. Исследование коррозионных свойств наплавленного металла

Коррозионное разрушение является сложным процессом, на характер развития которого влияет большое количество факторов. Структура металла, химическая неоднородность, внутренние напряжения и т.д. – значительно сказываются на коррозионной стойкости металла. Аддитивное формирование изделий дуговой наплавкой влечет за собой наличие дополнительных негативных факторов за счет сложного термического воздействия, деформаций и напряжений от нагрева и кристаллизации металла и др.

Одним из количественных способов определения коррозионной стойкости является вычисление скорости коррозии материала в определенных условиях. Для сравнения коррозионной стойкости материала, полученного разными способами наплавки, а также материала присадочной проволоки и подложки были выполнены коррозионные исследования.

Методика испытаний включала в себя подготовку образцов с последующим взвешиванием и на аналитических весах HR-250AG. Затем образцы опускали в концентрированную соляную кислоту при температуре 65°C на 4 часа. По истечении времени, образцы промывали, сушили и вновь взвешивали на аналитических весах. После этого рассчитывали изменение массы.

В ходе проведенного исследования были получены результаты, представленные в таблице 23. Образец №1 – подложка из стали 04X19H9; образец №2 – наплавленный металл, полученный способом плазма-МИГ; образец №3 – металл, полученный многослойной плазменной наплавкой на токе прямой полярности; образец №4 – металл, полученный многослойной плазменной наплавкой на токе обратной полярности [154]. Рисунок 76 иллюстрирует скорость коррозии исследуемых образцов.

Таблица 23 – Параметры образцов и результаты коррозионных испытаний

№ образца	Размеры образца (ДхШхВ), мм			$S_{\text{общ}}, \text{м}^2$	Масса до, г	Масса после, г	$\Delta m, \text{г}$	$V, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{г})$
1	6,0	6,0	6,0	0,000216	4,83	3,20	1,626	1881,9
2	11,0	11,0	11,0	0,000726	10,16	8,06	2,099	722,8
3	13,8	8,8	7,6	0,000585	7,20	5,27	1,93	824,8
4	11,0	9,9	11,5	0,000699	7,51	5,75	1,755	627,4

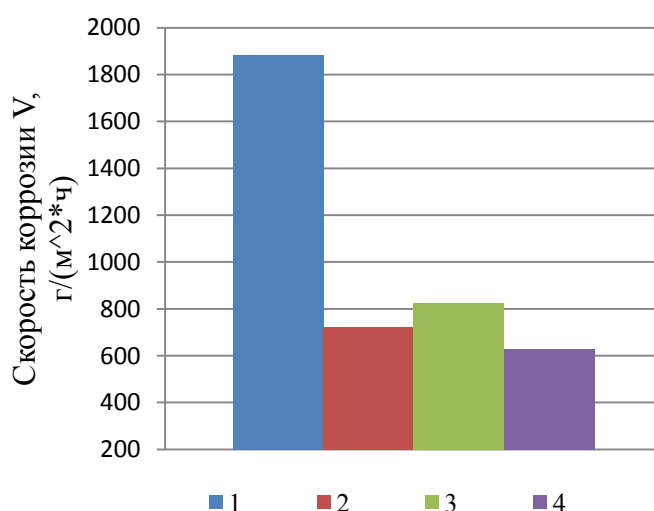


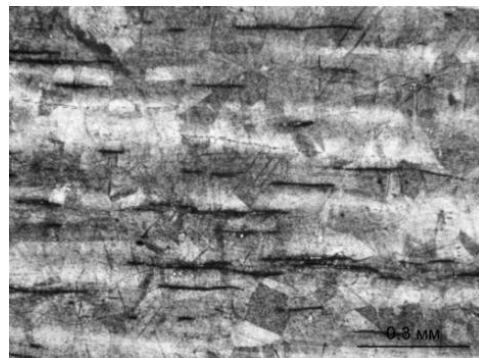
Рисунок 76. Скорости коррозии испытуемых образцов (см. табл. 18.): 1 – подложка из стали 04Х19Н9; 2 – наплавленный металл, полученный способом Плазма-МИГ; 3 – металл, полученный многослойной плазменной наплавкой на токе прямой полярности; 4 – металл, полученный многослойной плазменной наплавкой на токе обратной полярности

Из рассчитанной скорости коррозии следует, что стойкость наплавленного металла полученного плазменной наплавкой плавящимся электродом (образец №2) примерно соответствует аналогичному металлу, полученному послойной наплавкой аналогичной присадочной проволоки плазменной дугой на токах прямой (образец №3) и обратной полярности (образец №4). Аномально высокая скорость коррозии металла, полученного традиционным способом (образец №1) связана с наличием внутренних дефектов в металле (см. рисунок 77). Области скопления неметаллических включений после травления образца образуют линейные неслошности, что негативно сказывается на коррозионной стойкости материала.

Появление данных дефектов свидетельствует о риске применения металлопроката, при производстве которого была нарушена технология изготовления.



а



б

Рисунок 77. Дефекты металла образца №1 (подложка из стали 04X19H9): а – до травления, б – после травления

4.6. Выводы по Главе 4

1. Способ послойной плазменной наплавки плавящимся электродом позволяет получать заготовки из аустенитной стали без дефектов: трещин, несплавлений, неметаллических включений. Объемная доля пористости не превышает 0,15%.

2. Химический состав наплавленного металла однороден по высоте образца и соответствует химическому составу металла присадочной проволоки. Ликваций и выгорания основных легирующих элементов (Cr, Ni) не выявлено.

3. Структура аустенитной стали, полученная послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом аустенитно-ферритная. Во всем объеме наплавленного металла наблюдается транскристаллитный характер кристаллизации. В пределах каждого слоя дисперсность структуры монотонно увеличиваются по высоте валика.

4. Механические свойства металла 04X19N9 и 12X18H10T, полученного Плазма-МИГ наплавкой, находятся на уровне свойств аналогичных сталей, полученных традиционными способами (литье, ковка, штамповка и т.д.). Наплавленный металл 04X18H9, имеет предел прочности $\sigma_B = 600-620$ МПа, предел текучести $\sigma_{0.2} = 420-435$ МПа, относительное удлинение $\delta = 42-46\%$, 18X18H10T - $\sigma_B = 505-539$ МПа, $\sigma_{0.2} = 218-221$ МПа, $\delta = 79-87\%$. Анизотропия свойств в продольном и поперечном направлении составляет не более 3-7%. Последующая термическая обработка (закалка) способствует незначительному повышению механических свойств.

5. Коррозионная стойкость металл заготовки, полученной плазменной наплавкой плавящимся электродом, на 10% ниже выше чем у аналогичного металла, полученного послойной плазменной наплавкой неплавящимся электродом на токах прямой и обратной полярности. В полученном металле отсутствуют дефекты, встречающиеся у сортового проката, отливок и т.д.

Основные выводы и результаты работы

1. Определены оптимальные режимы плазменной наплавки плавящимся электродом для послойного формирования металлических изделий ($U_{пэ} = 20-30$ В, $I_{пд} = 100-140$ А, $d_a = 8-10$ мм, $Q_{пг} = 5-10$ л/мин, $V_{пэ} = 4-8$ м/мин, $V_n = 0,5-1,5$ м/мин), а также выявлены закономерности формообразования наплавленного валика от режимных параметров.

2. Установлено влияние технологических параметров на характер взаимного горения дуг и перенос электродного металла при плазменной наплавке плавящимся электродом. При $U_{пэ} = 20-25$ В (нижняя граница возбуждения плазменной дуги) характерен крупнокапельный перенос электродного металла; при $U_{пэ} = 20-25$ В ($U_{пэ} < U_{пд}$) - мелкокапельный; при $U_{пэ} \geq 25$ В ($U_{пэ} \geq U_{пд}$) – струйный.

3. Разработана математическая модель профиля одиночного валика при плазменной наплавке плавящимся электродом для расчета траектории наплавки при аддитивном формировании заготовок, позволяющая прогнозировать форму валика с точностью не менее 90%.

4. Установлены особенности теплопередачи в плазмотрон и изделие при плазменной наплавке плавящимся электродом. Доля тепловложения в кольцевой анод от плазменной дуги $\approx 90\%$, МИГ дуги $\approx 10\%$.

5. Разработан плазмотрон для плазменной наплавки плавящимся электродом, обеспечивающий надежность работы в условиях аддитивного производства металлических изделий. На базе разработанного плазмотрона возможна компоновка оборудования для аддитивного производства с различными функциональными возможностями.

6. Показана возможность применения плазменной наплавки плавящимся электродом для аддитивного формирования металлических изделий на примере высоколегированной аустенитной стали (04X19H9, 12X18H10T). Металл, по прочностным и коррозионным свойствам, а также химическому составу соответствует требованию соответствующей нормативной документации. Материал имеет характерную для послойной наплавки аустенитно-ферритную структуру.

Список литературы

1. Louvis, E. Selective laser melting of aluminum components [Текст] / E. Louvis, P. Fox, C.J. Sutcliffe // Journal of Materials Processing Technology. - 2011. - Vol. 211.- pp. 275-284.
2. Campanelli, S.L. Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process [Текст] / S.L. Campanelli, et al. // New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems. – 2010. – pp. 233-252. - Режим доступа: <https://www.intechopen.com/books/new-trends-in-technologies--devices--computer--communication-and-industrial-systems/capabilities-and-performances-of-the-selective-laser-melting-process>.
3. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // Пособие для инженеров. – М. ГИЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. - 220 с.
4. Qiu, C. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting [Текст] / C. Qui [et al.] // Acta Materialia. – 2015. – Vol. 96. – pp. 72-79.
5. Kapil, S. Hybrid Layered Manufacturing using Tungsten Inert Gas Cladding [Текст] / S. Kapil, [et al.] // Progress in Additive Manufacturing. - 2016. - Vol. 1. - №1. - pp. 79-91.
6. Zhang, Y. Build Orientation Optimization for Multi-Part Production in Additive Manufacturing [Текст] / Y. Zhang [et al.] // Journal of Intelligent Manufacturing. - 2017. - Vol.28. - №6. - pp. 1393-1407.
7. Ding, D. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests [Текст] / D. Ding [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2015. - Vol. 81. - pp. 465-481.
8. Martina, F. Investigation of the Benefits of Plasma Deposition for Additive Layer Manufacture of Ti-6Al-4V [Текст] / F. Martina [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. - 2012. - Vol.212. - pp. 1377-1386.

9. Yilmaz, O. Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review [Текст] / O. Yilmaz, A.A. Uglu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. - 2016. - Vol.230. - pp. 1781–1798.
10. Осокин, Е.Н. Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: курс лекций / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Электрон. дан. (5 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. Режим доступа - http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/63/u_lectures.pdf.
11. Безобразов, Ю.А. Анализ структуры образцов, полученных DMLS- и SLM- методами быстрого прототипирования [Текст] / Ю. А. Безобразов, [и др.] // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина», [г. Екатеринбург, 29 октября - 1 ноября 2012 г.]. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 154-157.
12. Song, Y.A. 3D welding and milling: part II—optimization of the 3D welding process using an experimental design approach [Текст] / Y.A. Song, S. Park , S.W. Chae // Int. J. Mach. Tools Manuf. - 2005. - Vol. 45. - pp. 1063-1069.
13. Szost, B.A. A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components [Текст] / B.A. Szost [et al.] // Mater. Des. - 2016. – Vol. 89. – pp. 559-567.
14. Cao, Y. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process [Текст] / Y. Cao [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. - 2011. - Vol. 27. - № 3. - pp. 641–645.
15. Alberti, E.A. Additive manufacturing: the role of welding in this window of opportunity [Текст] / E.A. Alberti , L.J. Silva, A.S.C.M. D'Oliveira // Weld. Int. - 2016. - Vol. 30. - № 6. - pp. 413–422.
16. Ding, D. Bead modeling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing [Текст] / D. Ding [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. - 2016. - Vol. 36. - pp. 32-42.

17. Somashekara, M.A. Investigations into effect of weld-deposition pattern on residual stress evolution for metallic additive manufacturing [Текст] / M.A. Somashekara [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2017. - Vol. 90. - № 5–8. - pp. 2009–2025.
18. Jhavar, S. Enhancement of Deposition Quality in Micro-plasma Transferred Arc Deposition Process [Текст] / S. Jhavar, N.K. Jain, C.P. Paul // Mater. Manuf. Process. - 2014. - Vol. 29. - № 8. - pp. 1017–1023.
19. Kovacevic, R. Process Control of 3D Welding as a Droplet-Based Rapid Prototyping Technique [Электронный ресурс] / R. Kovacevic, H. Beardsley. – Электрон. дан. (4.1 Мб). - Int. Solid Free. Fabr. Symp. - 1998. - pp. 57–64. Режим доступа - <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/581>.
20. Zhou, X. Three-dimensional numerical simulation of arc and metal transport in arc welding based additive manufacturing [Текст] / X. Zhou [et al.] // Int. J. Heat Mass Transf. - 2016. - Vol. 103. - pp. 521-537.
21. Jhavar, S. Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications [Текст] / S. Jhavar, N.K. Jain, C.P. Paul // J. Mater. Process. Technol. - 2014. - Vol. 214. - №. 5. – pp. 1102-1110.
22. Xiong, J. Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition [Текст] / J. Xiong [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2016. – Vol. 240. – pp. 397–403.
23. Liberini, M. Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing [Текст] / M. Liberini [et al.] // Procedia CIRP. - 2017. - Vol. 62. - pp. 470–474.
24. Wu, Y. Mechanically assisted droplet transfer process in gas metal arc welding [Текст] / Y. Wu, R. Kovacevic // Proc. Instn. Mech. Engrs. Part B: J. E. Manuf. - 2001. - Vol. 216. - pp. 555–565.
25. Ding, D. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures [Текст] / D. Ding [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. - 2015. - Vol. 34. - pp. 8-19.

26. Gu, J. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys [Текст] / J. Gu [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2016. - Vol. 230. – pp. 26-34.
27. Colegrove, P.A. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling [Текст] / P.A. Colegrove [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2013. - Vol. 213. - pp. 1782-1791.
28. Xiong, J. Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding [Текст] / J. Xiong [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2018. - Vol. 251. - pp. 12-19.
29. Wang, H. Solid Freeform Fabrication Based on Micro-Plasma Powder Deposition [Электронный ресурс] / H. Wang, W. Jiang, R.K.M. Valant – Электрон. дан. (471 Кб). - Res. Cent. Adv. Manuf. South. Methodist Univ. - 2003. - pp. 6–8. Режим доступа
- <https://pdfs.semanticscholar.org/e843/81a31dc4cf5f1ea2c1b3eb0b3f146528f9de.pdf>
30. Wang, H. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW [Текст] / H. Wang [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2004. - Vol. 148. - № 1. - pp. 93–102.
31. Yang, D. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing [Текст] / D. Yang, C. He, G. Zhang // J. Mater. Process. Technol. - 2016. - Vol. 227. - pp. 153–160.
32. Nikam, S.H. Thermal modeling of geometry of single-track deposition in micro-plasma transferred arc deposition process [Текст] / S.H. Nikam, N.K. Jain, S. Jhavar // J. Mater. Process. Technol. - 2016. - Vol. 230. - pp. 121-130.
33. Suryakumar, S. Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing [Текст] / S. Suryakumar [et al.] // CAD Comput. Aided Des. - 2011. - Vol. 43. - pp. 331-344.
34. Montevecchi, F. Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process [Текст] / F. Montevecchi [et al.] // Procedia CIRP. - 2016. - Vol. 55. - pp. 109–114.

35. Zhang, Y.M. Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study [Текст] / Y.M. Zhang [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2003. - Vol. 135. - pp. 347-357.
36. Bai, X. Modeling of the moving induction heating used as secondary heat source in weld-based additive manufacturing [Текст] / X. Bai, H. Zhang, G. Wang // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2015. - Vol. 77. - № 1–4. - pp. 717–727.
37. Youheng, F. Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel [Текст] / F. Youheng [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2017. - Vol. 91. - № 1–4. - pp. 301–313.
38. Xiong, X. A new method of direct metal prototyping: hybrid plasma deposition and milling [Текст] / X. Xiong, Z. Haiou, W. Guilan // Rapid Prototyp. J. - 2008. - Vol. 14. - № 1. - pp. 53–56.
39. Gu, J. Wire+Arc Additive Manufacturing of Aluminum [Электронный ресурс] / J. Gua [et al.]. – Электрон. дан. (853 Кб). - SFF Symp. Austin Texas. - 2014. - pp. 451–458. Режим доступа - <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-038-Gu.pdf>.
40. Ding, J. Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture [Текст] / D. Ding [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2015. - Vol. 226. - pp. 99-105.
41. Karunakaran, K.P. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing [Текст] / K.P. Karunakaran [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. - 2010. - Vol. 26. - pp. 490-499.
42. Jhavar, S. Experimental investigation on geometrical aspects of micro-plasma deposited tool steel for repair applications [Текст] / S. Jhavar, C.P. Paul, N.K. Jain // Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. - 2014. - Vol. 32. - P. 1460347 (9 pages).
43. Ding, D. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) [Текст] / D. Ding [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. - 2015. - Vol. 31. - pp. 101-110.

44. Shi, X. Selective laser melting-wire arc additive manufacturing hybrid fabrication of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties [Текст] / X. Shi [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. - 2017. - Vol. 684. - pp. 196–204.
45. Toshihide, H. Freeform Fabrication Method of Alloys and Intermetallic Compounds by 3D Micro Welding [Текст] / H. Toshihide, K. Soshu // Trans. JWRI. - 2008. - Vol. 37. - № 2. - pp. 63–68.
46. Spencer, J.D. Rapid prototyping of metal parts by three dimensional welding [Текст] / J.D. Spencer, P.M. Dickens, W.C. Wykes // Mech. E. J. Eng. Manuf. - 1998. - Vol. 212. - pp. 175–182.
47. Zhang, Y.M. Automated system for welding-based rapid prototyping [Текст] / Y.M. Zhang [et al.] // Mechatronics. – 2002. – Vol. 12. - pp. 37-57.
48. Song, Y.A. 3D welding and milling: Part I-a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes [Текст] / Y.A. Song [et al.] // Int. J. Mach. Tools Manuf. - 2005. - Vol.45. - № 9. - pp. 1057-1062.
49. Abe, T. Dissimilar metal deposition with a stainless steel and nickel-based alloy using wire and arc-based additive manufacturing [Текст] / T. Abe, H. Sasahara // Precis. Eng. - 2016. - Vol. 45. - pp. 387–395.
50. Chen, X. Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing [Текст] / X. Chen [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. - 2017. – Vol. 703. – pp. 567-577.
51. Xiong, J. Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: Material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing [Текст] / J. Xiong [et al.] // J. Clean. Prod. - 2013. – Vol. 41. - pp. 82-88.
52. Xiong, J. Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing [Текст] / J. Xiong, G. Zhang // Meas. Sci. Technol. - 2013. - Vol. 24. - P. 115103 (7pp).
53. Cong, B. A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process / B. Cong [et al.]. – Электрон. дан. (10.14 Мб). - Appl. Sci. - 2017. - Vol. 7. - № 3. - P. 275. - Режим доступа

https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/11665/additively_manufactured_tin_wall_and_block_structure-2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

54. Aiyiti, W. Investigation of the overlapping parameters of MPAW- based rapid prototyping [Текст] / W. Aiyiti [et al.] // Rapid Prototyp. J. - 2006. - Vol. 12. - № 3. - pp. 165–172.
55. Ribeiro, A.F. Rapid prototyping process using metal directly / A.F. Ribeiro, J. Norrish // In Proceedings of the Seventh Annual Solid Free. Fabr. Symp. Austin. -1996. – Vol. 10. - pp. 249-256.
56. Xiong, J. Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing [Текст] / J. Xiong, G. Zhang // J. Mater. Process. Technol. - 2014. - Vol. 214. - № 4. - pp. 962-968.
57. Bai, X.W. Electromagnetically confined weld-based Additive Manufacturing [Текст] / X.W. Bai, H.O. Zhang, G.L. Wang // Procedia CIRP. - 2013. - Vol. 6. - pp. 515–520.
58. Haselhuhn, A.S. In situ formation of substrate release mechanisms for gas metal arc weld metal 3-D printing [Текст] / A.S. Haselhuhn [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2015. - Vol. 226. - pp. 50–59.
59. Venturini, G. Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features [Текст] / G. Venturini [et al.] // Procedia CIRP. - 2016. – Vol. 55. - pp. 95–100.
60. Haden, C.V. Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties [Текст] / C.V. Haden [et al.] // Addit. Manuf. - 2017. - Vol. 16. - pp. 115–123.
61. Ding, D. Fabricating superior Ni-Al bronze components through wire arc additive manufacturing [Текст] / D. Ding [et al.]. – – Электрон. дан. (5.6 Мб). - Materials (Basel). - 2016. - Vol. 9. - № 8. – P. 652 (9 pages). Режим доступа - <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/8/652/pdf>.
62. Li, Y. Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts [Текст] / Y. Lee [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2018. - Vol. 252. - pp. 838–848.

63. Almeida, P. Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT) [Текст] / P. Almeida, S. Williams // Solid Free. Fabr. Symp. - 2010. - pp. 25–36.
64. Dwivedi, R. Automated torch path planning using polygon subdivision for solid freeform fabrication based on welding [Текст] / R. Dwivedi, R. Kovacevic // J. Manuf. Syst. - 2004. - Vol. 23. - № 4. - pp. 278–291.
65. Xiong, J. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing [Текст] / J. Xiong [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. - 2013. - Vol. 29. - pp. 417-423.
66. Ding, D. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation [Текст] / D. Ding [et al.] // J. Clean. Prod. - 2016. - Vol. 133. - pp. 942-952.
67. Xiong, J. Forecasting process parameters for GMAW-based rapid manufacturing using closed-loop iteration based on neural network [Текст] / J. Xiong [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2013. – Vol. 69. - №1-4. – pp. 743-751.
68. Panchagnula, J.S. Manufacture of complex thin-walled metallic objects using weld-deposition based additive manufacturing [Текст] / J.S. Panchagnula, S. Simhambhatla // Robot. Comput. Integr. Manuf. - 2018. - Vol. 49. - pp. 194–203.
69. Xiong, J. Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis [Текст] / J. Xiong [et al.] // J. Intell. Manuf. - 2014. - Vol. 25. - № 1. - pp. 157–163.
70. Xu, X. Oxide accumulation effects on wire + arc layer-by-layer additive manufacture process [Текст] / X. Xu [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2018. - Vol. 252. - pp. 739–750.
71. Suryakumar, S. A study of the mechanical properties of objects built through weld-deposition [Текст] / S. Suryakumar [et al.] // Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf. - 2013. - Vol. 227. - № 8. - pp. 1138–1147.
72. Kapil, S. Hybrid-layered manufacturing using tungsten inert gas cladding [Текст] / S. Kapil [et al.] // Prog. Addit. Manuf. - 2016. - Vol. 1. - № 1–2. - pp. 79–91.

73. Ma, Y. Effect of interpass temperature on in-situ alloying and additive manufacturing of titanium aluminides using gas tungsten arc welding [Текст] / Y. Ma [et al.] // Addit. Manuf. - 2015. - Vol. 8. - pp. 71-77.
74. Shen, C. Fabrication of Fe-FeAl Functionally Graded Material Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process [Текст] / C. Shen [et al.] // Metall. Mater. Trans. B. - 2016. - Vol. 47. - № 1. - pp. 763–772.
75. Shen, C. Fabrication of iron-rich Fe-Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process [Текст] / C. Shen [et al.] // Addit. Manuf. - 2015. - Vol. 7. - pp. 20–26.
76. Bermingham, M.J. Controlling the microstructure and properties of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V with trace boron additions [Текст] / M.J. Bermingham [et al.] // Acta. Mater. - 2015. - Vol. 91. - pp. 289–303.
77. Yin, B. Effect of CaF₂ addition on macro/microstructures and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V components [Текст] / B. Yin [et al.] // Mater. Lett. - 2017. - Vol. 190. - pp. 64–66.
78. Wang, F. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V [Текст] / F. Wang [et al.] // Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. - 2013. - Vol. 44. - №2. – pp. 968-977.
79. Wang, F. Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding [Текст] / F. Wang [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. - 2016. - Vol. 676. - pp. 395–405.
80. Mereddy, S. Grain refinement of wire arc additively manufactured titanium by the addition of silicon [Текст] / S. Mereddy [et al.] // J. Alloys Compd. - 2017. - Vol. 695. - pp. 2097–2103.
81. Shen, C. In-depth study of the mechanical properties for Fe₃Al based iron aluminide fabricated using the wire-arc additive manufacturing process [Текст] / C. Shen [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. - 2016. - Vol. 669. - pp. 118–126.
82. Ma, Y. The effect of postproduction heat treatment on g-TiAl alloys produced by the GTAW-based additive manufacturing process [Текст] / Y. Ma [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. - 2016. - Vol. 657. - pp. 86–95.

83. Ma, Y. The effect of location on the microstructure and mechanical properties of titanium aluminides produced by additive layer manufacturing using in-situ alloying and gas tungsten arc welding [Текст] / Y. Ma [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. - 2015. - Vol. 631. - pp. 230-240.
84. Zhan, Q. A wire deflection detection method based on image processing in wire + arc additive manufacturing [Текст] / Q. Zhan [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2017. - Vol. 89. - № 1–4. - pp. 755–763.
85. Baufeld, B. Manufacturing Ti-6Al-4V components by Shaped Metal Deposition: Microstructure and mechanical properties [Текст] / B. Baufeld [et al.] // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. - 2011. - Vol. 26. - № 1. - pp. S106–S111.
86. Shen, C. Influences of deposition current and interpass temperature to the Fe3Al-based iron aluminide fabricated using wire-arc additive manufacturing process [Текст] / C. Shen [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2017. - Vol. 88. - № 5–8. - pp. 2009–2018.
87. Tian, Y. Effect of heat treatment on microstructure evolution and mechanical properties of Inconel 625 with 0.4 wt% boron modification fabricated by gas tungsten arc deposition [Текст] / Y. Tian [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. - 2017. - Vol. 684. - pp. 275–283.
88. Xiong, J. Forming appearance control of arc striking and extinguishing area in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing [Текст] / J. Xiong, Z. Yin, W. Zhang // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2016. - Vol. 87. - № 1–4. - pp. 579–586.
89. Geng, H. A prediction model of layer geometrical size in wire and arc additive manufacture using response surface methodology [Текст] / H. Geng [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2017. – Vol. 93. - № 1-4. – pp. 175-186.
90. Donoghue, J. The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on b-grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V [Текст] / J. Donoghue [et al.] // Mater. Charact. - 2016. - Vol. 114. - pp. 103–114.
91. Martina, F. Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components // Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.- 2015. – Vol. 46. - № 12. – pp. 6103-6118.

92. Wu, Q. Obtaining fine microstructure and unsupported overhangs by low heat input pulse arc additive manufacturing [Текст] / Q. Wu [et al.] // J. Manuf. Process. - 2017. - Vol. 27. - pp. 198–206.
93. Geng, H. Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing [Текст] / H. Geng [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2017. - Vol. 243. - pp. 40–47.
94. Colegrove, P.A. High Pressure Interpass Rolling of Wire + Arc Additively Manufactured Titanium Components [Текст] / P.A. Colegrove [et al.] // Adv. Mater. Res. - 2014. - Vol. 996. - pp. 694–700.
95. Martina, F. Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti–6Al–4V components [Текст] / F. Martina [et al.] // Mater. Sci. Technol. - 2016. - Vol. 32. - № 14. - pp. 1439–1448.
96. Wu, B. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V [Текст] / B. Wu [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2017. - Vol. 250. - pp. 304–312.
97. Ouyang, J. Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: process control and microstructure [Текст] / J. Ouyang, H. Wang, R. Kovacevic // Mater. Manuf. Process. - 2002. - Vol. 17. - № 1. - pp. 103–124.
98. Martina, F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V [Текст] / F. Martina [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2012. - Vol. 212. - № 6. - pp. 1377–1386.
99. Xu, F. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of inconel 625 alloy fabricated by pulsed plasma arc deposition [Текст] / F. Xu [et al.] // Phys. Procedia. - 2013. - Vol. 50. - pp. 48–54.
100. Zhang, J. Fatigue crack propagation behavior in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V: Effects of microstructure and residual stress [Текст] / J. Zhang [et al.] // Mater. Des. - 2016. - Vol. 90. - pp. 551–561.
101. Zhang, J. Crack path selection at the interface of wrought and wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V [Текст] / J. Zhang [et al.] // Mater. Des. - 2016. - Vol. 104. - pp. 365–375.

102. Lin, J. Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing [Текст] / J. Lin [et al.] // Mater. Des. - 2016. - Vol. 102. - pp. 30–40.
103. Lin, J. Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment [Текст] / J. Lin [et al.] // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. - 2017. - Vol. 69. - pp. 19-29.
104. Cong, B. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy [Текст] / B. Cong, J. Ding, S. Williams // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2014. - Vol. 76. - pp. 1593-1606.
105. Щицын, Ю.Д. Использование плазменной наплавки для аддитивного формирования заготовок из алюминиевых сплавов / Ю. Д. Щицын [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. - 2019. - Т. 21. - № 2. - С. 63-72.
106. Щицын, Ю.Д. Создание слоистых материалов на основе высоконикелевых сплавов с использованием плазменной дуги на токе обратной полярности / Ю. Д. Щицын [и др.] // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2016. - Т. 18. - № 2. - С. 7-20.
107. Баталов, Н.Г. Технология и оборудование для аддитивного цифрового изготовления металлических деталей управляемой дуговой наплавкой [Текст] / Н.Г. Баталов [и др.] // Сварка и диагностика. - 2017. - №2. - С. 49-51.
108. Song, Y.A. Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process [Текст] / Y.A. Song, S. Park // J. Mater. Process. Technol. - 2006. - Vol. 171. - № 1. - pp. 35–40.
109. Akula, S. Hybrid adaptive layer manufacturing: An Intelligent art of direct metal rapid tooling process [Текст] / S. Akula, K.P. Karunakaran // Robot. Comput. Integr. Manuf. - 2006. - Vol. 22. - № 2. - pp. 113–123.
110. Xiong, J. Forming appearance analysis in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing [Текст] / J. Xiong, G. Zhang, W. Zhang // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2015. - Vol. 80. - № 9-12. - pp. 1767-1776.

111. Xiong, J. Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing [Текст] / J. Xiong [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2018. - Vol. 252. - pp. 128–136.
112. Ding, D. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing [Текст] / D. Ding [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2014. - Vol. 73. - pp. 173-183.
113. Ding, J. A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture [Текст] / J. Ding [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2014. - Vol. 70. - pp. 227-236.
114. Adebayo, A. Limiting Travel Speed in Additive Layer Manufacturing [Текст] / A. Adebayo, J. Mehnen, X. Tonnellier // Trends Weld. Res. Proc. 9th Int. Conf. - 2013. - Vol. 3. - pp. 1038–1044.
115. Geng, H. Geometric Limitation and Tensile Properties of Wire and Arc Additive Manufacturing 5A06 Aluminum Alloy Parts [Текст] / H. Geng [et al.] // J. Mater. Eng. Perform. - 2017. - Vol. 26. - № 2. - pp. 621–629.
116. Jandric, Z. Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition [Текст] / Z. Jandric, M. Labudovic, R. Kovacevic // Int. J. Mach. Tools Manuf. - 2004. - Vol. 44. - № 7–8. – pp. 785–796.
117. Щицын, Ю.Д. Использование плазменной наплавки для аддитивного формирования заготовок из алюминиевых сплавов [Текст] / Ю. Д. Щицын [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. - 2019. - Т. 21. - № 2. - С. 63-72.
118. Гринюк, А.А. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов [Текст] / А.А. Гринюк [и др.] // Автоматическая сварка. - 2015. - № 11. - С. 39-50.
119. Чигарев, В.В. Исследование плавления электродного металла и формирования валика при плазма-МИГ наплавке порошковой проволоки [Текст] / В.В. Чигарев, К.А. Кондрашов, Н.А. Макаренко // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. - 2011. - № 11. - С. 172-174.

120. Чигарев, В.В. Разработка установок для плазменных способов нанесения покрытий на массивные стальные и чугунные детали [Текст] / В.В. Чигарев [и др.] // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. - 2003. - № 13. - С. 180-184.
121. Агеев, А.О. Разработка технологии плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом емкости из нержавеющей стали [Электронный ресурс] / А.О. Агеев, Р.И. Дедюх. – Электрон. дан. (490 Кб). - Режим доступа. - <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C36/V2/015.pdf>.
122. Lee, H. Effect of plasma current on surface defects of plasma-VIG welding in cryogenic aluminum alloys [Текст] / H. Lee, S. Park, C. Kang // Journal of Materials Processing Technology. - 2015. - Vol. 223. - pp. 203-215.
123. Blakhyna, I. Investigation of surfaced press molds made its working resource [Текст] / I. Blakhyna // Technology audit and production reserves. - 2017. - Vol. 3. - № 1(35). - pp. 34-38.
124. Lee, H. Control of surface defects on plasma-MIG hybrid welds in cryogenic aluminum alloys [Текст] / H. Lee [et al.] // Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. - 2015. - № 7. - pp. 770-783.
125. Корниенко, А.Н. Плавление электродного металла и формирование валика при плазменной наплавке с аксиальной подачей порошковой проволоки [Текст] / А.Н. Корниенко, В.М. Корпенко, Н.А. Макаренко // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. - 1999. - № 8. - С. 166-169.
126. Asai, S. Application of Plasma-MIG Hybrid Welding to Dissimilar Joint between Copper and Steel [Текст] / S. Asai [et al.] // Welding in the World. - 2012. - Vol. - 56. - № 1-2. - pp. 37-42.
127. Макаренко, Н.А. Восстановление штоков гидропрессов с помощью плазма-MIG наплавки [Текст] / Н. А. Макаренко [и др.] // Машиностроение и инженерное образование. — 2010. — № 2. — С. 9–14.
128. Щицын, Ю.Д. Плазменные технологии и оборудование: учеб. пособие [Текст] / Ю.Д. Щицын. - Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. - 76 с.

129. Гринюк, А.А. Гибридные технологии сварки алюминиевых сплавов на основе дуги с плавящимся электродом и сжатой дуги [Текст] / А.А. Гринюк [и др.] // Автоматическая сварка. - 2016. - № 5-6. - С. 107-113.
130. Дедюх, Р.И. Особенности процесса плазменной сварки плавящимся электродом (обзор) [Текст] / Р.И. Дедюх // Сварочное производство. - 2014. - №5. - С. 34-39.
131. De Resende, A.A. Influence of welding current in plasma-MIG weld process on the bead weld geometry and wire fusion rate [Текст] / A.A. De Resende [et al.] // Welding International. - 2011. - Vol. 25. - №12. - pp. 910-916.
132. Демидов, Д.И. Исследование стабильности процесса плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом в непрерывном режиме [Текст]. Магистерская дис. - 15.04.01 - Машиностроение. Томск, 2017. - 94 с.
133. Акулов, А.И. Нагрев электродного металла при плазменно-дуговой сварке плавящимся электродом в аргоне [Текст] / А.И. Акулов, Б.Л. Боженко, В.Л. Ронский // Сварочное производство. - 1983. - № 2. - С. 8-10.
134. Чигарев, В.В. Разработка способа плазма-миг наплавки, обеспечивающего увеличение несущей способности деталей и узлов металлургического оборудования [Текст] / В.В. Чигарев [и др.] // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. - ПДТУ. - 2002. - №. 6. - С. 212-214.
135. Акулов, А.И. Причины нарушения процесса совместного горения плазменной дуги и дугового разряда при плазменно-дуговой сварке [Текст] / А.И. Акулов, В.Л. Ронский // Сварочное производство. - 1988. - №1. - С. 38-40.
136. Essers, W.G. Plasma-MIG welding [Текст] / W.G. Essers, G. Jelmorini, G.N. Tichelaar // Philips tech. - 1973. - Vol. 33. - № 1. - pp. 21-24.
137. Макаренко, Н.А. Термические циклы при плазма-МИГ наплавке [Текст] / Н.А. Макаренко, В.А. Невидомский // Автоматическая сварка. - 2003. - №. 1. - С. 45-47.
138. De resende, A.A. Influence of current levels, the tilt angle of the torch and the distance between the torch and the part on the geometry of the weld bead using 'Plasma-

MIG' with concentric arcs [Текст] / A.A. De resende, A. Scotti // Welding International. - 2017. - Vol. 20. - pp. 501-514.

139. Yang, T. The Study on Plasma-MIG Hybrid Arc Behavior and Droplet Transfer for Mild Steel Welding [Текст] / T. Yang [et al.] // Rev. Adv. Mater. Sci. - 2013. - Vol. 33. - pp. 459-464.

140. Essers, W.G. Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding [Текст] / W.G. Essers, R. Walter // Welding Research Supplement. - 1981. - Vol. 60. - № 2. - pp. 37-42.

141. Терентьев, С.А. Влияние параметров режима наплавки методом Плазма-МИГ на геометрию валика [Текст] / С.А. Терентьев, Т.Э. Ефремов, Ю.Д. Щицын // Высокие технологии в современной науке и технике. ВТСНТ-2018 [Электронный ресурс] : сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, [г. Томск], 2630 нояб. 2018 г. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Нац. исслед. Томс. политехн. ун-т, Инж. шк. новых произв. технологий, Рос. фонд фундам. исслед. - Томск : Изд-во ТПУ, 2018. - С. 220-221. Режим доступа: Ссылка - http://portal.tpu.ru/files/conferences/hightech/2018/proceedings_2018.pdf. - Загл. с экрана.

142. Макаренко, Н.А. Применение импульсного режима при плазма-МИГ наплавке [Текст] / Н. А. Макаренко, А. А. Богуцкий, А. М. Куций // Захист металургійних машин від поломок : Міжвуз. темат. зб. наук. праць. – Маріуполь : ПДТУ. - 2008. – № 10. – С. 249–250.

143. Hertel, M. Numerical simulation of the plasma-MIG process - interaction of the arcs, droplet detachment and weld pool formation [Текст] / M. Hertel, U. Fussel, M. Schnick // Weld World. - 2014. - Vol. 58. - pp. 85-92.

144. Rios, S. Analytical process model for Wire + Arc Additive Manufacture [Текст] / S. Rios [et al.] // Additive Manuf. - 2018. - Vol. 21. - pp. 651-657.

145. Korzhik, V.N. Development of a robotic complex for hybrid plasma-arc welding of thin-walled structures [Текст] / V.N. Korzhik [et al.] // The Paton Welding Journal. - 2017. - № 5-6. - pp. 62-70.

146. Sudorets, V. On the Thermal and Electrical Characteristics of the Hybrid Plasma-MIG Welding Process [Текст] / V. Sudorets [et al.] // Material Science Forum. - 2017. - Vol. 906. - pp. 63-71.
147. Курочко, Р.С. Горелка для плазменно-дуговой сварки и наплавки [Текст] / Р.С. Курочко [и др.] // Сварочное производство. - 1980. - № 10. - С. 40-41.
148. Коротеев, А.С. Плазмотроны. Конструкции, характеристики, расчет / А.С. Коротеев, В.М. Миронов, Ю.С. Свирчук. - М.: Машиностроение, 1993. - 296 с.
149. Щицын, В.Ю. Совершенствование конструкций плазмотронов и технологии плазменной обработки металлов на обратной полярности [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 - Технологии и машины сварочного производства / В.Ю. Щицын, Перм. гос. техн. ун-т. - Пермь, 2005. - 161 с.
150. Шилов, А.Ю. Исследование энергетических параметров плазменной дуги при работе двухдугового плазмотрона [Текст] / А.Ю. Шилов [и др.] // Master's Journal. - 2012. - № 2. - С. 84-90.
151. Гилев, И.А. Исследование работы двухдугового плазматрона на токе обратной полярности [Текст] / И.А. Гилев, С.Д. Неулыбин, Ю.Д. Щицын // Техника и технологии машиностроения : материалы IV междунар. студен. науч.-практ. конф. (Омск, 25-30 марта 2015 г.). / Минобрнауки России, Омск. гос. техн. ун-т. - Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. - С. 286-290.
152. Щицын, Ю.Д. Плазменная сварка алюминиевых сплавов при работе двухдугового плазмотрона на токе обратной полярности [Текст] / Ю.Д. Щицын [и др.] // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2015. - Т.17. - №3. - С.61-68
153. Щицын, Ю.Д. Распределение энергии сжатой дуги при работе плазмотрона на токе обратной полярности [Текст] / Ю.Д. Щицын, О.А. Косолапов, Н.Н. Струков // Сварка и диагностика. -2010. - №3. - С.13-16.
154. Неулыбин, С.Д. Влияние полярности тока на свойства слоистых материалов, получаемых многослойной плазменной наплавкой [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.02.10 / С.Д. Неулыбин, Перм. нац. иссл. политехн. ун-т. - Пермь, 2017. - 135 с.

155. ZX-410 Базовый тип [Электронный ресурс] / Официальный сайт производителя. URL: <https://www.plastmass-group.net/zedex-zx-410-pe1?lang=ru>. Дата обращения: 13.11.18.
156. Марочник сталей и сплавов: справочник [Текст] / под общ. ред. А. С. Зубченко. - 2-е изд., доп. и испр. - Москва : Машиностроение, 2003. - 784 с.
157. Выборнов, Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия [Текст] / Б.И. Выборнов. - 2-е изд. перераб и доп. - М.: Металлургия, 1985. - 256 с.
158. Щицын, Ю.Д. Формирование структуры и свойств стали 04X18H9 при аддитивном производстве заготовок [Текст] / Ю.Д. Щицын [и др.] // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2018. - Т. 20. - № 3. - С. 55-61.
159. Щицын, Ю.Д. Разработка технологии послойного выращивания заготовки из высоколегированной стали методом плазменной наплавки [Текст] / Ю.Д. Щицын [и др.] // Metallurg. - 2017. - № 5. - С. 73-77.
160. Shchitsyn, Y.D. Development of Layered Growth Technology for a Workpiece of Highly Alloyed Steel by Plasma Surfacing / Y. D. Shchitsyn [et al.] // Metallurgist. - 2017. - Vol. 61. - № 5-6. - pp. 418-423.
161. Shchitsyn, Y.D. Formation of 04Cr18Ni9 steel structure and properties during additive manufacturing of blanks [Текст] / Y.D. Shchitsyn [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2019. - Vol. 102. - № 9-12. - pp. 3719-3723.
162. Волченко, В.Н. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т.1. Свариваемость материалов. Под ред. Э.Л. Макарова / В.Н. Волченко, Э.Л. Макаров, В.В. Шип и др. - М.: Металлургия, 1991. - 528 с.

Сертификат качества проволоки OK Autrod 308LSi



СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА (3.1) - Химический состав
ОТЧЕТ ПО ИСПЫТАНИЯМ(2.2) - Механические свойства/
INSPECTION CERTIFICATE (3.1) - Chemical analysis
TEST REPORT (2.2) - Mechanical properties

Дата/Data:	2018-03-19	Сертификат номер/Cert.no:	EC25085358 rev. 0
Заказ ESAB/Our order:		Заказ/Your order:	
Ссылка на заказ/Our ref:		Ссылка на заказ/Your ref:	
Код заказчика/Client no:	NA	Номер факса/Your fax:	
Дата заказа/Your date:		e-mail/Your e-mail:	

Адрес/Invoice address:	Получатель сертификата/Cert.receiver:	Адрес заказчика/Client address:
ООО ESAB RU		

ПОСТАВКА/DELIVERY	Партия №/Lot no:	Р/З0607734401	Количество/Quantity:
--------------------------	-------------------------	----------------------	-----------------------------

ПРОДУКЦИЯ/PRODUCT

Марка/Brand: ESAB
Описание/Desc: OK Autrod 308LSi 1.2mm 15kg
Позиция №/Item no: 1812129820

КЛАССИФИКАЦИЯ/CLASSIFICATIONS

EN ISO 14343-A: G 19 9 L Si
 SFA/AWS A5.9: ER308LSi
 Werkstoffnummer: T1.4316

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА/MECHANICAL PROPS

Типичные значения/Typical data: согласно/acc to EN 10204 - 2.2

Стандарт/Standard:
Доп. материалы/Auxiliary:
Состояние/Condition:

ПРОЧНОСТЬ/TENSILE

R_m0.2	R_m	A_{4-5.5}
450 MPa	620 MPa	36 %

УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ/IMPACT

Temp	-60 °C
KV	85 J

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ/
CHEMICAL COMPOSITION**

Испытания/Actual results: согласно/acc to EN 10204 - 3.1

Wire/strip

Доп. материалы/Auxiliary:

C	0.02%
Si	0.93%
Mn	2.0%
P	0.01%
S	0.01%
Cr	19.5%
Ni	9.6%
Mo	0.10%
Cu	0.13%
N	0.07%
Ferrite FN	8

КОММЕНТАРИИ/COMMENTS

Продукция поставляется согласно нормам EN ISO 9001.
 Сертификат выписывается в электронном виде и действителен без подписи.
 По всем вопросам обращайтесь:

10, Vozdvizhenka str, Moscow, 125009, Russia. tel +7(495) 663-20-08 fax :+7(495) 663-20-09

Product supplied under a QA Programme fulfilling the EN ISO 9001 standard.
 This certificate is produced electronically and is valid without signature.
 Please refer any queries to: (see above)

Химический состав - утверждено/Validation - Chemical Analysis

Josef Moravak

Quality Manager

Другие свойства - утверждено/Validation - Others

Jay Coubrough

Product Manager



Госкорпорация «Роскосмос»
Публичное акционерное общество
«Протон-Пермские моторы»
(ПАО «Протон-ПМ»)

Комсомольский проспект, д. 93, г. Пермь, 614010
Тел.: (342) 244-02-94; факс: (342) 241-34-10;
E-mail: gd_secret@protonpm.ru; http://www.protonpm.ru
ОКПО 24050764; ОГРН 1025900893622
ИНН/КПП 5904006044/590401001

Акт использования
№490/2-01А от 27.11.2019 г.

Результаты диссертационной работы Терентьева С.А. «Разработка технологии и оборудования аддитивного производства металлических изделий плазменной наплавкой плавящимся электродом», а именно оборудование и технология плазменной наплавки плавящимся электродом использованы ПАО «Протон-ПМ» при создании Оборудования для аддитивного производства полного цикла (обрабатывающий центр) АТ-300.

Обрабатывающий центр АТ-300 предназначен для получения готовых металлических изделий методом аддитивной 3D плазменной наплавки с последующей механической обработкой в условиях единичного и мелкосерийного производства сложных конструкций из высоколегированных сталей и сплавов цветных металлов.

Заместитель исполнительного директора
по коммерческой деятельности



В.А. Голдобин