

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт Машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

15.03.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Технология сварочного производства и инженерия поверхностей

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на Исследование технологической возможности аддитивного
тему выращивания металла при ЧПУ плазменной наплавки

Обучающийся

И.А. Никитин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.Э. Советкин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), И.О. Фамилия)

Консультанты

А.Н. Кирюшкина, ст. преподаватель

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), И.О. Фамилия)

к.ф.-м.н., доцент Д.А. Романов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), И.О. Фамилия)

Аннотация

В выпускной квалификационной работе, исследована возможность использования ЧПУ плазменной наплавки для аддитивного наращивания металла.

В выпускной квалификационной работе проведен анализ способов наплавки, представлены результаты полученных экспериментальных данных по распределению температур в наплавленных слоях. Разработаны меры обеспечения безопасности персонала при внедрении технологии, учитывающие воздействие вредных производственных факторов.

Выпускная квалификационная работа объемом 54 страницы включает графическую часть (6 листов А1) и состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка источников.

Annotation

In the final qualifying work, the thermal state of the plasma torch during welding with a reverse polarity current was investigated.

The thesis is made on 44 sheets and consists of an introduction, 4 sections, a conclusion and a list of sources used and a graphic part made on 7 sheets of A1 format.

The thesis examines the process of studying the thermal state for compressed arc welding. Various methods of welding aluminum alloys are described. The results of the calculated and experimental data are shown. The purpose of the final qualification work is to study the thermal state of the plasma torch during welding with reverse polarity current. The methods of ensuring the safety of personnel during the implementation of the developed technological process in the presence of dangerous and harmful production factors were also presented.

Содержание

Введение	6
1 Анализ исходных данных и решений по изготовлению деталей с помощью аддитивных технологий из алюминиевых сплавов	8
1.1 Анализ свариваемости алюминиевых сплавов	8
1.2 Анализ известных способов аддитивной наплавки	8
1.3 Анализ технологических особенностей плазменной наплавки алюминиевых сплавов	16
2 Исследование технологической возможности аддитивного выращивания металла при ЧПУ плазменной наплавки	23
2.1 Методика проведения эксперимента	23
2.2 План экспериментов	31
2.3 Проведение серии экспериментов	33
3 Экологичность и безопасность объекта исследования	42
3.1 Описание процесса экспериментов	42
3.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов	43
3.3 Уменьшения влияния опасных факторов	44
4 Оценка экономической эффективности предлагаемых решений	45
4.1 Анализ затрат на проведение экспериментов	45
Заключение	52
Список используемых источников	53

Введение

Современное промышленное производство сталкивается с рядом технологических вызовов, связанных с производством алюминиевых деталей.

«Алюминий обладает значительно меньшей плотностью ($\sim 2,7$ г/см³) по сравнению со сталью ($\sim 7,8$ г/см³), при правильной термической обработке алюминия, можно добиться высоких значений удельной прочности при меньшем весе в сравнении со сталью, данное свойство делает алюминиевые сплавы предпочтительным конструкционным материалом в отраслях, где критически важны массогабаритные характеристики, таких как авиа- и ракетостроение [34]. Однако его обработка традиционными методами изготовления деталей (точение, фрезерование), осложняет процесс и делает его более трудоемким из-за мягкости и склонности к налипанию на режущий инструмент» [9]. «Эту проблему призваны решить аддитивные технологии» [9].

«Аддитивные технологии становятся ключевым направлением в современном производстве, позволяя создавать сложные металлические изделия с минимальными отходами материала» [9].

Аддитивное производство является практически безотходным, в то время как для изготовления некоторых деталей традиционными методами требуются большие материальные затраты. Экономия средств и материального ресурса не единственные преимущества данного способа изготовления деталей. «Аддитивный метод дает возможность изготавливать детали очень сложной формы, а также сборочные единицы за одну технологическую операцию. Но у этого способа есть проблема, разница тепловложений в наплавленных слоях, что ведет за собой ряд дефектов вплоть до отсутствия возможности создания изделия. Практическая значимость полученных результатов состоит в использовании передовых

технологий, с помощью которых можно добиться снижения затрат на производство и повысить качество продукции» [9].

Для аддитивного создания и модификации поверхностей алюминиевых сплавов, особую перспективу демонстрирует плазменная наплавка, обеспечивающая высокую скорость переноса материала и качественную управляемость процесса [30].

Исследование возможности использования ЧПУ плазменной наплавки для аддитивного наращивания металла открывает новые перспективы для повышения эффективности и снижения затрат в промышленности.

Целью данной выпускной квалификационной работы является повышение стабильности аддитивного выращивания алюминиевых сплавов, путем исследования способа ЧПУ плазменной наплавки.

1 Анализ исходных данных и решений по изготовлению деталей с помощью аддитивных технологий из алюминиевых сплавов

1.1 Анализ свариваемости алюминиевых сплавов

«Наплавка алюминиевых сплавов является одним из наиболее сложных технологических процессов в современной металлургии и машиностроении. Это связано с уникальными физико-химическими свойствами алюминия и его сплавов, которые включают высокую теплопроводность, низкую температуру плавления (около 660 °С для чистого алюминия), а также склонность к образованию тугоплавкой оксидной пленки (Al_2O_3) на поверхности. Эти факторы существенно осложняют процесс наплавки, требуя тщательного подбора технологических параметров и использования специализированного оборудования» [11] [15].

«Основной проблемой при наплавке алюминиевых сплавов является предотвращение окисления материала в зоне наплавки. Оксидная пленка, образующаяся на поверхности алюминия, имеет температуру плавления около 2050 °С, что значительно превышает температуру плавления самого алюминия» [1].

«Для устранения этой проблемы применяют комплекс мер, включающий механическую и химическую очистку поверхности, использование защитных флюсов на основе фторидов и хлоридов, а также сварку в среде инертных газов (аргон, гелий) с применением катодной очистки сварочной ванны, так же импульсные режимы сварки позволяют снизить тепловложение и минимизировать негативное влияние оксидной пленки» [1].

1.2 Анализ известных способов аддитивной наплавки

«Существует два принципиально разных метода производства конструкций с помощью аддитивных технологий, первый – послойное

осаждение материала (Bed deposition), заключается в спекании или сплавлении последовательно по одному слою материала, который находится в специальной ванне» [26].

«Второй способ аддитивного создания конструкций, отличается совмещением источника энергии и устройства, подающего рабочий материал (порошок или проволока) в единый исполнительный механизм (прямое осаждение – Direct deposition)» [25].

«Производство алюминиевых изделий аддитивным методом, как правило осуществляются вторым способом» [1].

«Лазерная наплавка характеризуется высокой точностью и минимальной зоной термического влияния, что позволяет получать качественные наплавленные слои с минимальными деформациями» [5] [23].

«Также лазерная наплавка имеет возможность наплавления различных износостойких материалов (медь, латунь, пластмасса). При традиционной лазерной наплавке размеры зоны обработки определяются размерами пятна лазерного луча на поверхности детали. Для увеличения зоны обработки используют расфокусировку лазерного луча, однако эти размеры ограничены из-за падения плотности мощности излучения, что приводит к необходимости использования лазеров большей мощности» [17] [23]. «При этом лазерный луч активизирует гидродинамические процессы в зоне расплава, позволяет регулировать распределение энергии по траектории сканирования, что сказывается на скоростях нагрева и охлаждения и приводит к получению качественного слоя без пор, трещин, раковин и других дефектов [35]. Однако данный метод требует значительных энергозатрат и дорогостоящего оборудования, что ограничивает его применение в промышленных масштабах» [10] [31].

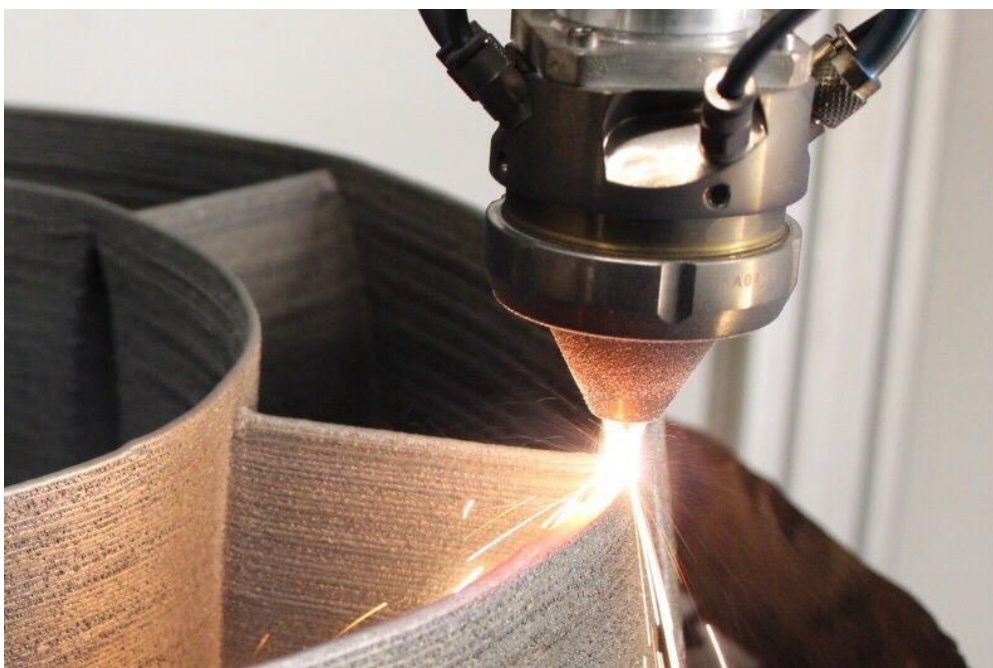


Рисунок 1 – Схема аддитивной лазерной наплавки

Электронно-лучевое сплавление, принцип работы данного способа заключается в расплавлении металлического порошка с помощью электронного луча в вакуумной среде, материалом для сплавления может быть титан, никель, кобальт-хромовые сплавы, применяется в аэрокосмической отрасли, и медицине (импланты), характеризуется высокой скоростью создания изделий, и минимальными остаточными напряжениями в изделии, однако необходимость работы в вакууме увеличивает сложности работы и стоимость оборудования для данного способа [8] [18].

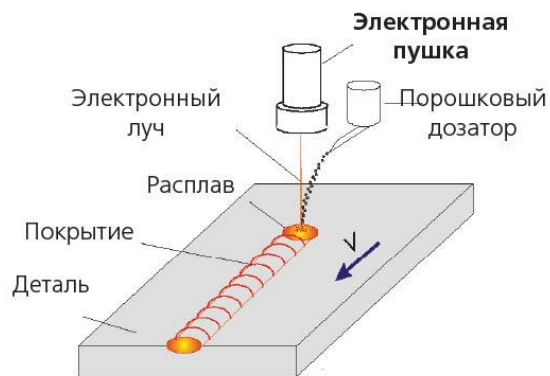


Рисунок 2 – Схема электронно-лучевого сплавления

Дуговые методы наплавки включает в себя методы MIG (Metal Inert Gas), TIG (Tungsten Inert Gas) и плазменную наплавку.

Известно, что метод наплавки MIG, является одним из наиболее распространенных методов дуговой наплавки. Этот процесс использует электрическую дугу, которая образуется между проволокой и заготовкой. В качестве защитной среды используются инертные газы, например аргон или гелий, также может использоваться смесь газов, которая предотвращает окисление и загрязнение наплавленного слоя.

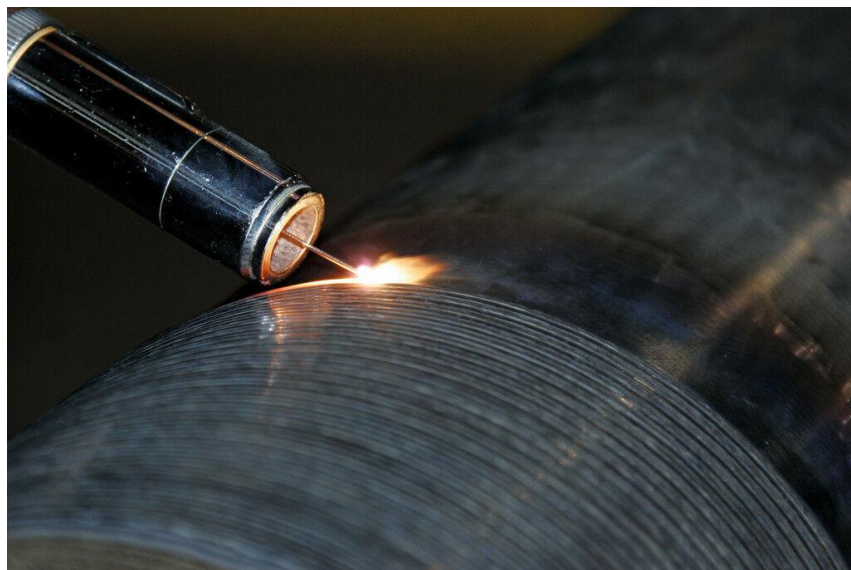


Рисунок 3 – Схема наплавки MIG

«Метод наплавки MIG, позволяет работать с широким спектром материалов, включая сталь, алюминий и другие материалы. Процесс характеризуется простотой использования и возможностью автоматизации, так же процесс позволяет использовать осевую подачу присадочной проволоки, что обеспечивает высокую точность наплавки, малое количество параметров режима способствуют простоте управления и автоматизации процесса, доступность и низкая стоимость оборудования, наличие эффекта катодной очистки зоны наплавки в силу использования тока обратной полярности, минимальная зона структурного изменения металла являются преимуществами данного способа. Проволока подается автоматически через механизм подачи проволочного электрода, что обеспечивает стабильность процесса. Однако процесс имеет ряд недостатков: большое тепловложение, высокое разбрызгивание присадочного металла, использование активных газов требует наличие раскислителей в присадочных материалах. Отсутствие раскислителей, в свою очередь, ведет к разбрызгиванию металла и образованию дефектов (поры, трещины)» [30].

Известно, что метод наплавки TIG – это метод наплавки, в котором используется неплавящийся электрод и инертный газ для защиты зоны наплавки [15]. Этот метод широко распространен в промышленности благодаря, своей универсальности. Наплавка TIG, позволяет работать с широким спектром материалов, включая алюминий, нержавеющей сталь, титан, магний и другие сплавы [15]. Плюсами данного метода 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 [15].

«Однако, метод TIG наплавки имеет ряд недостатков, 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), зависимость процесса наплавки от настройки подачи проволоки. Присадочная проволока должна подаваться в сварочную ванну строго под определенными углами относительно столба дуги и наплавляемой поверхности [30]». «В противном случае снижается точность наплавки. Кроме того, процесс требует дополнительной постобработки, включая удаление оксидов и загрязнений [15]».

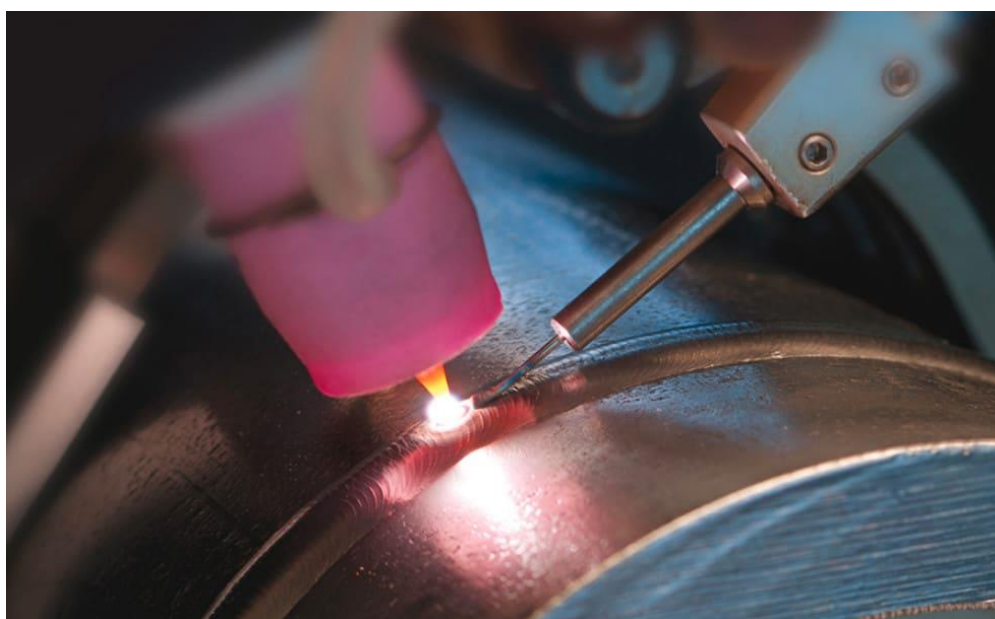


Рисунок 4 – Схема наплавки TIG

«Так же процессы MIG и TIG характеризуются низкой пространственной устойчивостью дуги, тепловая энергия электрической дуги передается электроду и свариваемому изделию в основном активными пятнами и газовыми потоками» [3] [7] [33]. «Блуждание активных пятен по поверхности электрода и изделия, а также отклонение столба дуги от оси электрода приводит к рассредоточению тепловых потоков, что является причиной нарушения стабильности плавления свариваемого металла» [21].

«Существуют две основные причины, вызывающие блуждание катодного пятна дуги при сварке алюминия и его сплавов» [3] [7]. «Первая из них связана непосредственно с особенностями протекания катодных процессов на легкоплавких материалах, а именно, охлаждением прикатодного слоя плазмы за счет активного испарения металла, а вторая обусловлена наличием на поверхности алюминия тугоплавкой окисной пленки, условия эмиссии электронов с которой под действием электростатического поля более благоприятны. В результате катодное пятно интенсивно перемещается не только по поверхности сварочной ванны, но и по примыкающим к ней участкам свариваемого металла, образуя, так называемую, зону катодного распыления. При сварке тонколистового алюминия дугой постоянного тока обратной полярности блуждание катодного пятна приводит к образованию сварных швов, ширина которых значительно превосходит толщину свариваемого металла, что отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах получаемых соединений» [11].

Одним из перспективных способов аддитивного создания изделий, является плазменная наплавка.

«Использование плазменной наплавки обеспечивает ряд преимуществ как с технологической, так и с экономической точки зрения. К ним можно отнести высокую производительность, регулирование в широких пределах теплопередачи в основной и наплавляемый материалы и, как следствие, управление глубиной и шириной проплавления, структурой, составом и свойствами формируемого материала» [17] [27].

«Превосходство плазменной наплавки по сравнению с другими дуговыми методами обусловлено возможностью точного управления энергетическими параметрами процесса за счет отдельной регулировки силы тока плазмообразующей дуги и тока переносной дуги. Ключевым фактором является стабилизация плазменного потока, что обеспечивает высокую концентрацию тепловой энергии при минимальном рассеивании.

Это позволяет добиться оптимального тепловложения с КПД до 85–90 %, что в 1.5 раза выше, чем при MIG/TIG наплавке. Дополнительным преимуществом выступает возможность независимого управления скоростью подачи присадочного материала и расходом плазмообразующего газа, что обеспечивает стабильный перенос электродного металла без разбрызгивания. Так же процесс плазменной наплавки относится к сложным многопараметрическим системам, так как свойства большинства показателей качества зависят от множества различных параметров режима плазменной наплавки, а также и от применяемого оборудования, сварочных и свариваемых материалов» [22].

«Однако, учитывая многопараметрический характер процесса, где взаимосвязаны ток дуги, расход газа, скорость наплавки, состав плазмообразующей среды и геометрия сопла, даже незначительные отклонения в настройках могут привести к дестабилизации процесса.

Основные проблемы включают: чувствительность к колебаниям напряжения питания, необходимость точного позиционирования относительно поверхности из-за малого диаметра плазменного пятна (3–6 мм). Кроме того, высокая температура плазмы требует применения специализированных охлаждаемых сопел и систем подачи присадочной проволоки, что усложняет технологическую оснастку» [6] [22].

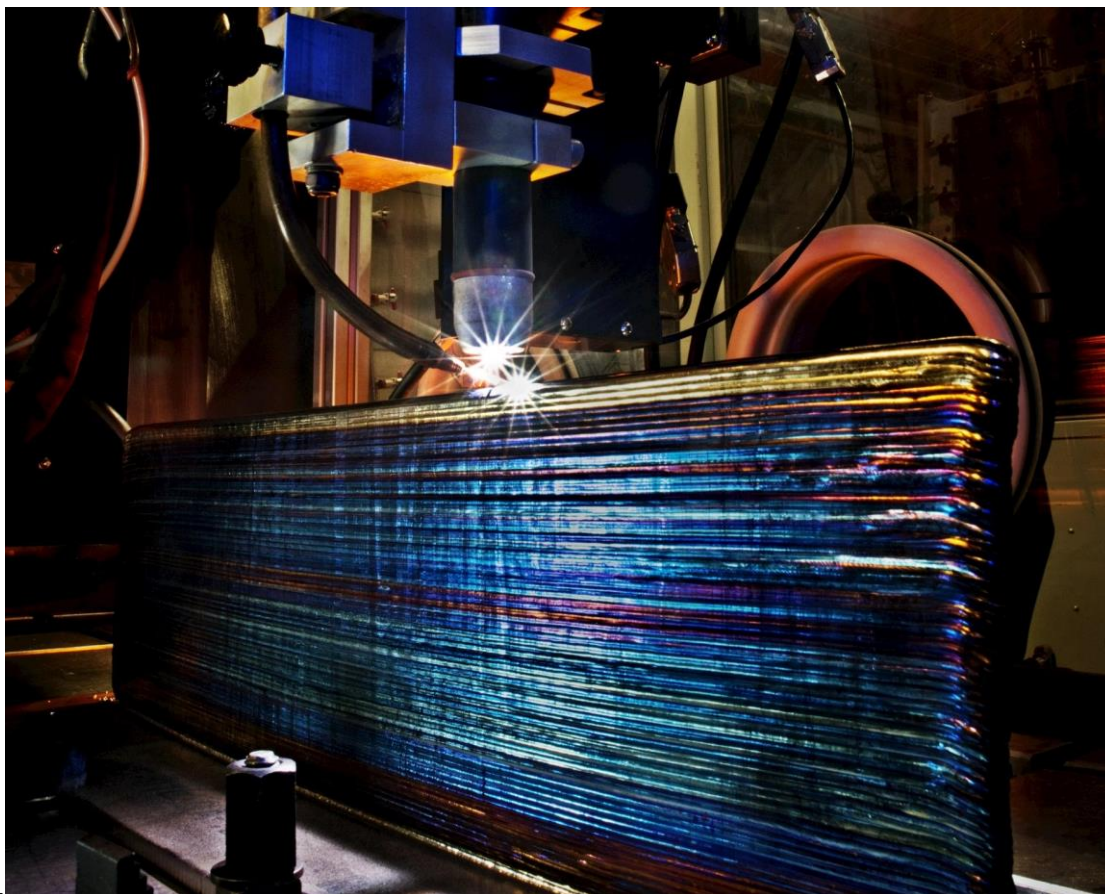


Рисунок 5 – Схема плазменной наплавки

«Для достижения качественного результата требуется тщательный контроль параметров процесса, таких как сила тока, скорость подачи присадочного материала контроль расстояние между плазмотроном и поверхностью, расход плазмообразующего и защитного газов, параметры сжимающего канала сопла» [13] [29].

1.3 Анализ технологических особенностей плазменной наплавки алюминиевых сплавов

Основными проблемами при наплавка дугой являются, оксидная пленка алюминия и разница тепловложений в наплавленных слоях изделия [32].

При плазменной наплавке на прямой полярности существуют недостатки: повышенная степень загрязнения металла наплавки окислами и грязью, образующимися во время наплавки. Однако использование обратной полярности обеспечивает дополнительные преимущества плазменных технологий.

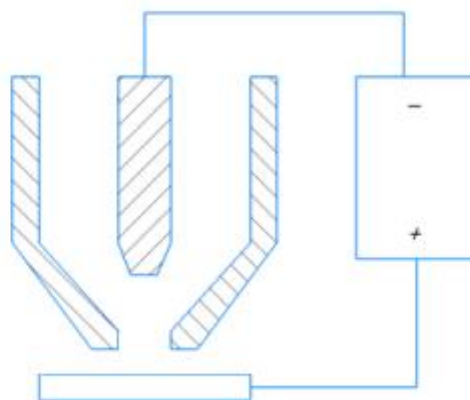


Рисунок 6 – Наплавка на токе прямой полярности

«Решить проблемы наплавки алюминиевых сплавов, повысить производительность при высоком качестве позволяет плазменная наплавка постоянным током обратной полярности. Плазменная наплавка током обратной полярности обеспечивает очистку поверхности предыдущего слоя от загрязнений за счет эффекта катодного распыления, хорошее смачивание и растекание жидкого металла при минимальном нагреве поверхности. При этом обеспечивается получение слоистых материалов с благоприятной структурой без внутренних дефектов» [17].

«Так, явление катодного распыления позволяет производить очистку поверхностей металлических заготовок, решает проблему качественной сварки алюминиевых сплавов. Применение плазмотронов с кольцевым

анодом делает возможным использование высокопроизводительной плазменной сварки и наплавки для соединения различных металлов. Ведение процессов на обратной полярности позволяет в широких пределах регулировать тепловое и силовое воздействие на зону обработки» [17]. «Однако при наплавке на постоянном токе обратной полярности, наблюдается резкое снижение тепловложения в изделие, что ведет к необходимости увеличения тока плазменной дуги, при этом тепловая нагрузка в электрод плазматрона возрастает, и он быстро разрушается» [28]. «Усложняется и конструкция плазматрона» [28].

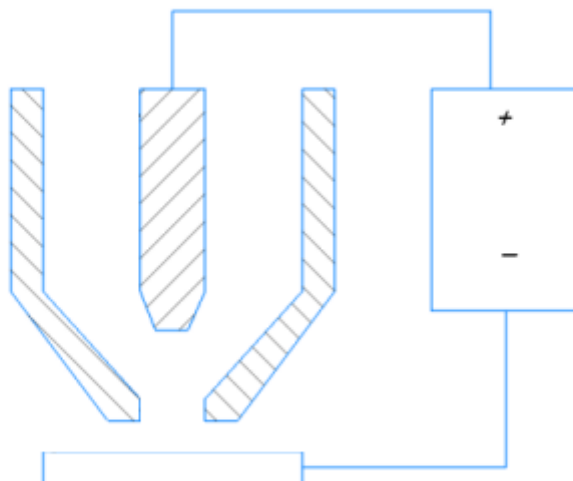


Рисунок 7 – Наплавка на токе обратной полярности

«Компромиссным вариантом наплавки является применение плазменной наплавки на переменном токе [14]. Однако из-за больших естественных перерывов в горении дуги синусоидального переменного тока, стабильность процесса наплавки, оказывается недостаточной, что ухудшает качество наплавки. Однако переменный ток прямоугольной формы позволяет решить эту проблему, ключевое технологическое преимущество

прямоугольного переменного тока заключается в резком характере перехода через нулевое значение, что обеспечивает критически важное для сварки алюминиевых сплавов быстрое восстановление катодного пятна при смене полярности [20]. В отличие от плавного перехода синусоидального сигнала, где скорость изменения тока в нулевой точке не превышает 20–30 А/мкс, прямоугольная форма обеспечивает крутизну фронта до 100–150 А/мкс. Это минимизирует время нестабильности дугового разряда и предотвращает дестабилизацию сварочного процесса [20]. При наплавке изделий из алюминия нашел применение способ питания плазменной дуги разнополярным импульсным током, при котором в периоды прямой полярности обеспечивается необходимое тепловложение, а в периоды обратной полярности, катодная очистка поверхности» [4] [14].

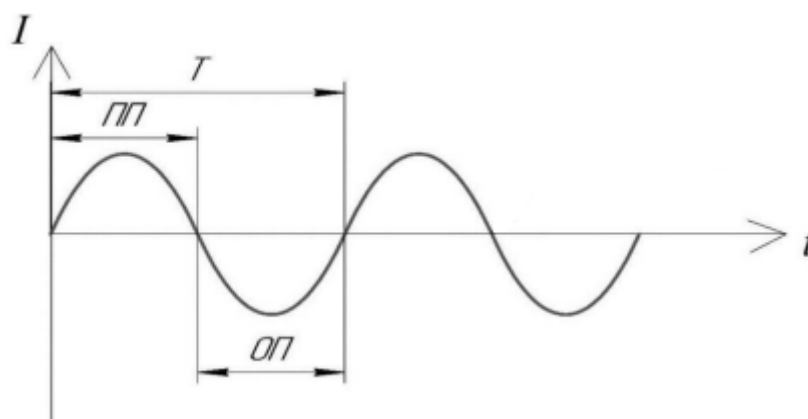


Рисунок 8 – Синусоидальный переменный ток

«Напряжение дуги выбирают, исходя из следующих соображений. При повышении напряжения увеличивается длина дуги, соответственно возрастает путь капельного переноса металла через дуговой промежуток. Это способствует интенсификации его окисления, разбрызгивания и выгорания легирующих элементов. Низкое напряжение дуги вызывает усиление наплавленных валиков и образования подрезов. Сила тока и другие

параметры процесса наплавки определяются размерами наплавляемых деталей. Наплавку в среде защитного газа производят на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе. Тип и марку электродной проволоки выбирают в зависимости от материала детали и требуемых физикомеханических свойств наплавленного металла. Скорость подачи проволоки зависит от силы тока, устанавливаемой с таким расчётом, чтобы в процессе наплавки не было коротких замыканий и обрывов дуги, так же скорость подачи проволоки зависит от толщины наплавляемого слоя [4] [16]. Расход защитного газа зависит от диаметра электродной проволоки, на расход газа также оказывает влияние скорость наплавки, конфигурация изделия и наличие движения воздуха» [8] [18].

«Наиболее эффективными средствами улучшения механических характеристик наплавленных слоев является оптимальный подбор химического состава металл, обеспечивающего, как показывает практика, относительное выравнивание его свойств со свойствами основного металла, обычно улучшаемого путем использования (при конкретном способе восстановления) правильно подобранных сварочных материалов (присадочной или электродной проволоки, плавящихся электродов и пр.), а также за счет введения в сварочную ванну легирующих добавок (через флюс, электродные покрытия и др.) и последующей обработки, активно воздействующих на прочность изделий» [2]. Так же немаловажным параметром является подбор защитного газа и его расход.

Как правило, аддитивное плазменное производство, осуществляется с помощью ЧПУ (числовое программное управление) установок.

«Процесс позволяет уточнить разделение функций и обязанностей между человеком – инженером и вычислительной техникой в системе проектирования. Так, в зависимости от математического обеспечения проектных процедур в ЭВМ (электронно-вычислительная машина), техника может предоставлять проектные решения в удобном представлении для

человека виде. Но даже при таких условиях на человека все равно налагаются важнейшие функции – ввод исходных данных, окончательная оценка и утверждение проектных решений» [24]. Реализация автоматизированного процесса осложняется совокупностью взаимосвязанных факторов, обусловленных как термодинамическими особенностями, так и конструктивными ограничениями. Существенное влияние оказывает краевой эффект теплоотдачи, приводящий к нелинейному распределению температурных градиентов в зоне обработки. Геометрические ограничения рабочей области в сочетании с нижней схемой подачи присадочной проволоки создают технологические барьеры для формирования изделий сложной пространственной конфигурации [25].

Особую проблему представляет вариабельность геометрических параметров наплавляемого валика, возникающая при необходимости изменения направления подачи проволоки. Это приводит к нестабильности как морфологических характеристик (ширина, высота), так и структурно-механических свойств наплавленного слоя.

Анализ исходных данных показывает, что ключевым фактором успешной наплавки алюминиевых сплавов является выбор оптимального сочетания технологических параметров. К ним относятся мощность источника нагрева, скорость подачи присадочного материала, тип и расход защитного газа, а также предварительная подготовка поверхности. Например, использование импульсного режима для дуговых процессов наплавки позволяет снизить тепловложение и минимизировать деформации [26].

Кроме того, предварительная механическая обработка поверхности, включающая шлифовку и обезжиривание, способствует улучшению адгезии наплавляемого материала и снижению вероятности образования дефектов.

Важным аспектом является также выбор присадочного материала, который должен соответствовать химическому составу основного металла и обеспечивать требуемые механические свойства наплавленного слоя. Для

алюминиевых сплавов часто используются присадочные проволоки на основе алюминиево-кремниевых (Al-Si) или алюминиево-магниевого (Al-Mg) сплавов, которые обеспечивают хорошую свариваемость и высокую коррозионную стойкость.

Таким образом, на основе анализа известных решений можно сделать вывод о необходимости дальнейших исследований для оптимизации процесса наплавки алюминиевых сплавов. Это включает разработку новых режимов наплавки, совершенствование оборудования и внедрение современных методов контроля качества, так же требуется определить факторы, которые оказывают влияние на качество и геометрию наплавляемых слоев при ЧПУ плазменной наплавки.

Следующим шагом, является постановка задач, для достижения цели выпускной квалификационной работы:

1. Провести анализ влияние способа подачи проволоки на геометрию слоев
2. Разработать методику проведения эксперимента
3. Провести реальный эксперимент по наплавке алюминиевого сплава плазменной дугой.

2 Исследование технологической возможности аддитивного выращивания металла при ЧПУ плазменной наплавки

2.1 Методика проведения эксперимента

Исследование возможности аддитивного выращивания металла при ЧПУ плазменной наплавки проводилось на установке представленной схематично на рисунке 8.



1 –Источник питания, 2 -механизм подачи проволоки, 3 – плазматрон,
4 –болон с защитным и плазмообразующим газами, 5 – рабочая платформа, 6 – узлы
согласования движения плазматрона

Рисунок 8 – Установка для плазменной наплавки

На стенде установлен плазматрон для плазменной резки металлов FY-A200H. В плазматроне для резки основные конструктивные изменения в

первую очередь затрагивают сопло, так как именно этот элемент непосредственно влияет на формирование и стабилизацию плазменной дуги.

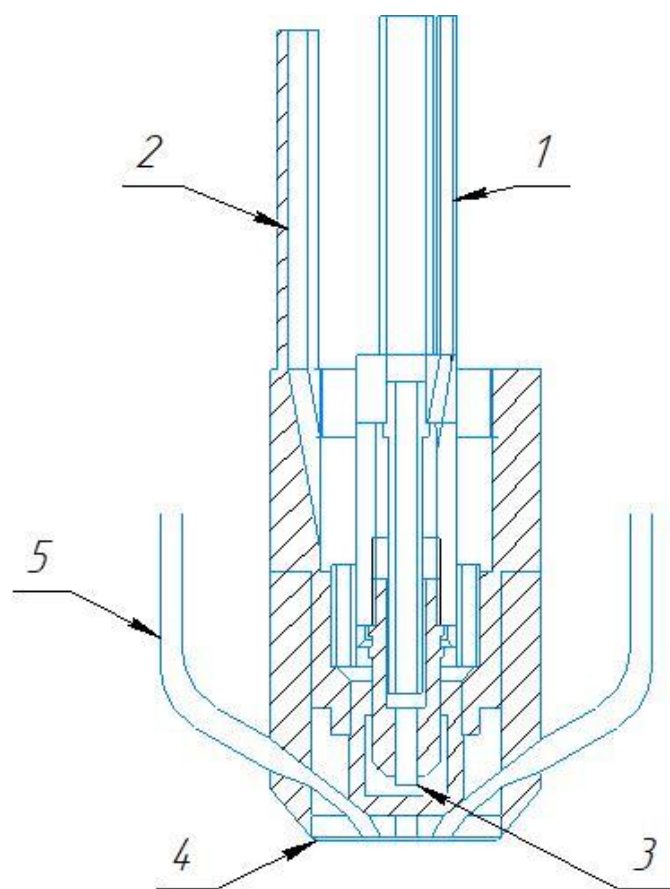
Геометрия сопла определяет скорость истечения плазмообразующего газа, степень сжатия дуги и, как следствие, качество наплавки. Первоначальный вариант конструкции плазматрона предполагал использование бронзового сопла небольшой толщины 1 мм, что не обеспечивало его стойкость в процессе сварки и наплавки.

С целью повышения износостойкости сжимающего сопла внедрен материал с повышенными эксплуатационными характеристиками – технически чистая медь марки М1т, обеспечивающая интенсивный теплоотвод и устойчивость к термоциклированию.

Дополнительно оптимизированы геометрические параметры конструкции: толщина стенок увеличена с 1 мм до 3 мм, что позволило существенно повысить механическую прочность и долговечность элемента при работе в условиях интенсивного теплового и эрозионного воздействия. Рассматриваемая модификация плазматрона характеризуется комбинированной системой газоснабжения, где плазмообразующий и защитный газы поступают через единую магистраль. Формирование ионизированного потока осуществляется посредством керамического завихрителя, создающего спиралевидное движение газовой среды вблизи катодного узла. Экранирующий газовый поток распределяется через радиально расположенные каналы и фокусируется сопловым блоком для обеспечения стабильности дугового разряда.

Главной конструктивной особенностью аппарата выступает система непосредственного жидкостного охлаждения электродной группы. Такое техническое решение обеспечивает эффективный теплоотвод от зоны максимальных тепловых нагрузок, что способствует повышению стабильности рабочих параметров и продлению ресурса оборудования.

Система охлаждения представляет собой циркуляционную водяную систему, подключенную к центральному водоснабжению университета. Основное назначение системы охлаждения плазматрона, предотвращения перегрева и обеспечения стабильной работы оборудования. Подача охлаждающей воды осуществляется через закрепленные рукава, которые подключены к плазматрону. Так же была модифицирована система подачи защитного газа, в модифицированной конструктивной версии плазматрона, защитный газ подается непосредственно в сопловую часть (рисунок 9).



1 – Плазмообразующий газ, 2 – водяное охлаждение, 3 – неплавящийся электрод, 4 – медное сопло, 5 – защитный газ

Рисунок 9 - Схема плазматрона после усовершенствования

Характеристики источника питания приведены в таблице 1. Общий вид источника представлен на рисунке 9.

Таблица 1 – Характеристики источника питания

Параметры источника питания	ANDELI “TIG-250 PAC”
Напряжение сети, В	220
Частота сети, Гц	50/60
Максимальный сварочный ток, А	250
Диаметр электродов (min-max), мм	1,6-6
Напряжение холостого хода, В	56
Частота импульса, Гц	0,5-300
Потребляемая мощность, кВт	7,8
КПД, %	85
Тип охлаждения	Воздушное



Рисунок 9 - Сварочный аппарат “TIG-250 PAC”

Для питания процесса применялся сварочный аппарат TIG-250 PAC, поддерживающий технологии аргонодуговой (TIG) и ручной дуговой сварки плавящимся электродом (MMA). В режиме TIG данный источник обеспечивает генерацию прямоугольных импульсов тока с возможностью регулировки их параметров, особенностью этого аппарата является возможность точной настройки баланса полярностей, как было сказано ранее, регулировка временного соотношения между полупериодами прямой и обратной полярности особенно важна при сварке и наплавке алюминиевых сплавов.

Таблица 2 - Характеристики механизма подачи проволоки “Сварог WF-21”

Диаметр сварочной проволоки, мм	0,8 мм-1,9
Максимальная масса катушки, кг	15
Скорость подачи проволоки, м/мин	1,5-17,5



Рисунок 10 - Механизм подачи проволоки “Сварог WF-21”

В качестве механизма подачи проволоки используется специализированное устройство – подающий механизм модели "Сварог WF-21". Данное оборудование предназначено для автоматизированной подачи присадочной проволоки в зону сварки или наплавки. В качестве присадочной проволоки была выбрана алюминиевая проволока Амг, оптимальная совместимость в маркой пластины и стабильное горение дуги, благодаря присутствию магния в сплаве, стали основными причинами выбора данной проволоки.

Присадочная проволока подавалась по тангенциальной траектории в переднюю зону сварочной ванны, синхронно с поступательным перемещением плазмотрона. Такая схема подачи обеспечивает, оптимальное смешение присадочного материала с расплавом основного металла, минимизацию растекания наплавляемых слоев и стабильное формирование шва (рисунок 11).



Рисунок 11 – Схема подачи присадочной проволоки в оголовок сварочной ванны

Контроль скорости подачи присадочной проволоки осуществлялся при помощи регулирующего механизма, включенного в состав подающего присадочную проволоку устройства.

В качестве защитного и плазмообразующих газов был использован аргон технической чистоты. Использование аргона технической чистоты в качестве защитного и плазменного газа обусловлено его оптимальными физико-химическими и технологическими характеристиками. Будучи инертным газом, аргон эффективно защищает зону наплавки от окислительных процессов, что особенно важно при работе с алюминиевыми сплавами. Высокий потенциал ионизации аргона обеспечивает стабильное горение плазменной дуги с предсказуемыми энергетическими параметрами, что гарантирует воспроизводимость технологического процесса.

С точки зрения технологичности, аргон демонстрирует превосходные характеристики катодного распыления, способствуя разрушению оксидных пленок на поверхности алюминиевых сплавов без дополнительного флюсования. При этом его низкая теплопроводность позволяет концентрировать тепловую энергию в зоне обработки, минимизируя тепловые потери и снижая вероятность деформаций обрабатываемой детали.

Контроль защитного и плазмообразующих газов, осуществлялся с помощью ротаметра РМ-3А представленного на рисунке 12.



Рисунок 12 – Ротаметр РМ-3А

Рабочая платформа представляет собой металлический стол, обеспечивающий устойчивую фиксацию установки для плазменной наплавки. На платформе закреплены узлы согласования, которые обеспечивают перемещение плазматрона по двум осям: X (горизонтальная ось) и Y (вертикальная ось).

Плазматрон установлен под фиксированным углом наклона 90 градусов, что обеспечивает оптимальное направление плазменной дуги на обрабатываемую поверхность.

Пульт управления установлен на отдельно стоящем столе и представляет собой компьютерную систему на базе операционной системы Windows XP, оснащенную специализированным программным обеспечением. Данная система обеспечивает управление движением плазматрона, инициализацию зажигания дуги и контроль параметров процесса наплавки.

Оснастка и вспомогательное оборудование: Зажимы для заготовок, направляющие и рельсовые механизмы.

Зажимы для заготовок представляют собой металлическую платформу, на которой изделие закрепляется с помощью болтов.

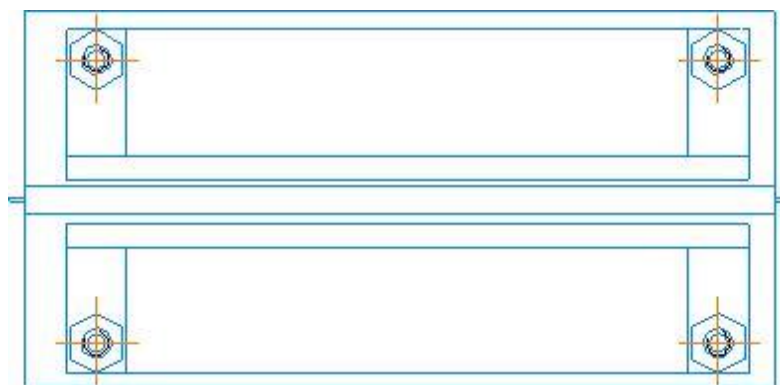


Рисунок 12 – Прижимная пластина

Эксперименты по наплавке проводились на пластинах марки АМц, из-за их подходящих физико-механических свойств, включая пластичность и хорошую свариваемость.

Таблица 3 – Состав и механические свойства сплавов АМц и АМг [36].

Марка сплава	Содержание элементов, %		Свойства	
	Mn	Mg	σ_b , МПа	δ , %
АМц	1,0-1,6	-	130 (170)	23 (10)
АМг	0,2-0,6	1,8-2,8	200 (250)	23 10)

2.2 План экспериментов

Первым этапом плана проведения экспериментов было определение оптимальных переменных параметров.

Эмпирическим методом были подобраны оптимальные параметры для проведения наплавки и указаны в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные параметры

Параметр	Показатель
Сила тока, А	100
Скорость подачи присадочной проволоки, мм/сек	15
Расход защитного газа	21
Расход плазмобразующего газа	9
Полярность, % Обратная/прямая	20/80

Эксперименты проводились на токе обратной полярности, обратная полярность была выбрана вследствие своих физических особенностей, описанных в предыдущей главе.

Первые эксперименты проводились на образцах, закрепленных в позиции горизонтально, проволока подавалась сбоку относительно движения плазмотрона.



Рисунок 13 – Схема подачи проволоки

2.3 Проведение серии экспериментов

В ходе работы основное внимание уделялось анализу влияния технологических условий на формирование структуры и свойств наплавленного слоя. Полученные результаты позволили не только оценить качество получаемых покрытий, но и выявить закономерности, значимые для дальнейшей оптимизации процесса.



Рисунок 14 – Первый слой наплавки при подаче проволоки сбоку

Как видно из представленных данных (рис. 14), качество наплавленного слоя не соответствует ожидаемым показателям, что свидетельствует о наличии неконтролируемых факторов, влияющих на процесс кристаллизации. Наблюдаемые дефекты, такие как неоднородность структуры и наличие пор, могут быть обусловлены как нестабильностью теплового режима, так и особенностями массопереноса в расплаве. Подобные

отклонения требуют более глубокого анализа с целью установления причинно-следственных связей между режимами наплавки и формированием дефектов.

Следующий проводимый эксперимент был с установленными ранее параметрами, разница лишь в том, что наплавка проводилась поверх существующего слоя.



Рисунок 15 – Второй слой наплавки при подаче проволоки сбоку

Как демонстрируют результаты, представленные на рисунке 15, качество последующих наплавленных валиков оказалось неудовлетворительным, что указывает на наличие существенных технологических ограничений при выбранной схеме подачи проволоки.

Наблюдаемое ухудшение качества наплавки может быть обусловлено рядом факторов, связанных с особенностями тепломассопереноса в зоне плавления. Боковое расположение присадочного материала относительно

направления движения плазмотрона, вероятно, приводит к асимметричному распределению теплового потока, что негативно сказывается на процессах кристаллизации металла. Кроме того, нестабильность плавления проволоки при таком способе подачи может вызывать неравномерное смешивание компонентов расплава, способствуя образованию дефектов структуры.

Проведенный анализ результатов первых двух экспериментов выявил существенное влияние пространственной ориентации подачи присадочной проволоки на качество формируемого наплавленного слоя. Наблюдаемые дефекты структуры, включая неравномерность проплавления и нестабильность геометрии валика, позволили сделать вывод о недостаточной эффективности применяемой схемы боковой подачи проволоки.

На основании проведенного анализа было принято решение о модификации экспериментальной методики с переходом на схему подачи проволоки по направлению движения плазмотрона. Предполагается, что такая конфигурация позволит обеспечить более равномерное распределение теплового воздействия и улучшит условия взаимодействия плазменной дуги с присадочным материалом. Теоретически это должно способствовать формированию более однородной структуры наплавленного слоя с улучшенными физико-механическими характеристиками.

Последующие эксперименты по наплавке проводились с подачей присадочной проволоки, показанной на рисунке 16.

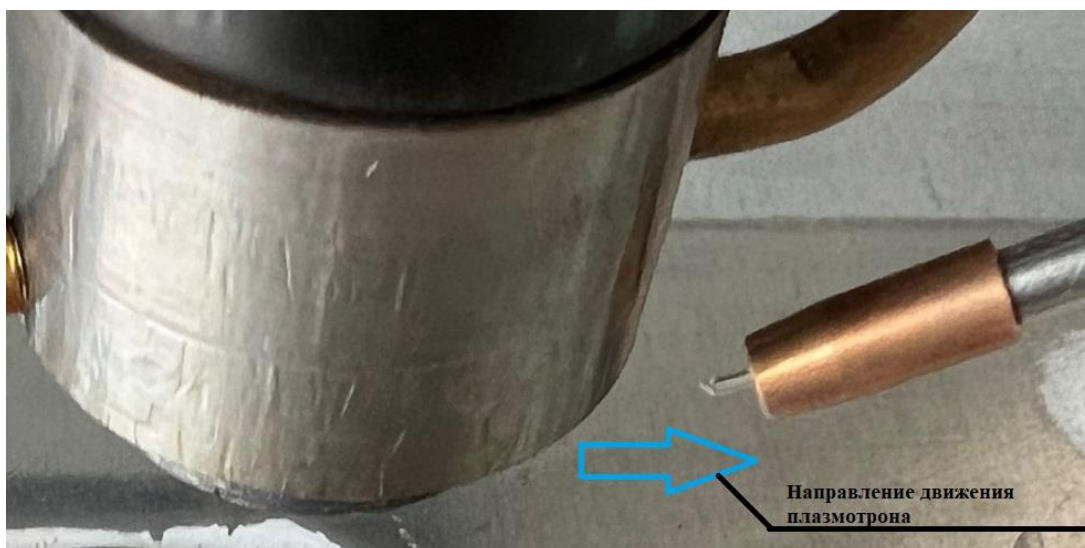


Рисунок 16 – Схема подачи проволоки по направлению движения плазматрона

Применение сонаправленной схемы подачи проволоки должно обеспечить более равномерное распределение теплового потока вдоль оси наплавки, что минимизирует вероятность возникновения локальных перегревов и связанных с ними структурных неоднородностей. Кроме того, такая конфигурация способствует оптимизации процесса плавления присадочного материала за счет согласованного движения расплава с направлением формирования наплавленного валика.

Далее будут приведены результаты проведенных экспериментов с подачей проволоки по движению плазматрона (рис.17).



Рисунок 17 – Первый слой наплавки при подаче проволоки сонаправленно движению плазматрона

Как видно из данных, представленных на рисунке 17, модификация схемы подачи проволоки позволила добиться существенного улучшения структурной однородности наплавленного слоя. Однако при увеличении количества наплаваемых слоев проявляется негативный эффект, связанный с аккумуляцией тепловой энергии в основном материале. Это приводит к возникновению градиента тепловложений, обусловленного неравномерным распределением температуры по площади пластины.

Физическая сущность данной проблемы заключается в особенностях теплопереноса при горизонтальном положении подложки. В этом случае тепло распространяется радиально от зоны наплавки, создавая неконтролируемые температурные поля, которые негативно влияют на процесс кристаллизации в последующих слоях. Особенно выражено это проявляется в межслойных областях, где наблюдается перегрев ранее нанесенного материала.

Наглядно эта проблема показана на рисунке 18.



Рисунок 18 – Второй слой наплавки при подаче проволоки сонаправленно движению плазматрона

Как видно из результатов, представленных на рисунке 18, несмотря на принятые технологические меры, при нанесении двух и более слоев наплавки сохраняется ряд структурных дефектов, существенно влияющих на качество покрытия. Наблюдаемое растекание металла свидетельствует о нарушении баланса между силами поверхностного натяжения и гидродинамическими процессами в расплаве, что характерно для условий избыточного тепловложения.

Сравнительный анализ с предыдущими результатами (рисунок 17) показывает, что, несмотря на улучшение структурной однородности в пределах одного слоя, проблема дефектообразования при многослойной наплавке требует дальнейшего изучения.

Для устранения указанного технологического ограничения предлагается изменить пространственную ориентацию подложки, расположив ее вертикально. Такое решение основано на принципах направленного теплопереноса - в вертикальной плоскости основная составляющая теплового потока будет ориентирована строго вниз, что минимизирует радиальную составляющую. Это создает условия для более равномерного охлаждения и формирования стабильной термической истории при многослойной наплавке.



Рисунок 19 – Первый слой наплавки при положении пластины в позиции вертикально

Как демонстрируют результаты, представленные на рисунке 19, изменение пространственной ориентации подложки на вертикальную позволило существенно улучшить тепловой режим процесса наплавки.

Проведенный анализ показывает, что направленный теплоперенос в вертикальной плоскости создает более стабильные условия кристаллизации, минимизируя радиальную составляющую теплового потока, которая ранее приводила к неконтролируемому перегреву материала.

Сравнительный анализ микроструктурных характеристик (рисунок 20) подтверждает эффективность данного технологического решения при многослойной наплавке. Нанесение второго слоя в таких условиях не вызывает характерных дефектов, наблюдавшихся при горизонтальной ориентации подложки.



Рисунок 20 – Второй слой наплавки при положении пластины в позиции вертикально

Экспериментальные исследования подтвердили возможность успешного нанесения трех последовательных слоев (рис.21), при вертикальной ориентации подложки, что свидетельствует об эффективности предложенного метода регулирования теплового режима.



Рисунок 21 – Три слоя наплавки при положении пластины в позиции вертикально

Однако дальнейший анализ выявил существенное технологическое ограничение данного подхода, связанное с обработкой изделий сложной геометрии.

Как следует из проведенных исследований, при изменении пространственной конфигурации обрабатываемой поверхности возникает проблема обеспечения стабильного качества наплавки. Это обусловлено необходимостью постоянного изменения направления подачи присадочной проволоки относительно плазматрона, что нарушает оптимальные условия тепломассопереноса, достигнутые при обработке плоских поверхностей. В частности, изменяющийся угол взаимодействия между проволокой и плазменной дугой приводит к нестабильности процессов плавления и кристаллизации.

Полученные результаты указывают на необходимость разработки принципиально нового способа подачи присадочного материала, который позволил бы сохранять оптимальные условия взаимодействия проволоки с плазменной дугой независимо от пространственной ориентации обрабатываемой поверхности, обеспечивать стабильность теплового режима при изменении направления наплавки, минимизировать влияние геометрических факторов на качество формируемого покрытия.

Полученные экспериментальные данные по исследованию технологической возможности аддитивного выращивания металла при ЧПУ плазменной наплавки, свидетельствуют о том, что применение сонаправленной схемы подачи проволоки и использование вертикальной пространственной ориентации подложки, действительно являются способами решения многих технологических проблем, и являются фактором улучшения стабильности аддитивного выращивания конструкций сжатой дугой, однако для достижения более подходящего результата, требуется разработка принципиально новой системы подачи проволоки, которая будет учитывать все пространственные положения плазматрона. Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск оптимальных параметров взаимодействия плазменной дуги с присадочным материалом в условиях переменной пространственной конфигурации, что является важным шагом на пути создания универсальной технологии наплавки сложно профильных изделий.

3 Экологичность и безопасность объекта исследование

Опыты по исследованию возможности аддитивного наращивания металла при ЧПУ плазменной наплавки, проводились на кафедре “Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы” Тольяттинского государственного университета, схема стенда для наплавки представлена на рисунке 8.

3.1 Описание процесса экспериментов

В представленной выпускной квалификационной работе детально изложена методика проведения экспериментальных исследований, включающая полный технологический цикл работ. Исследование проводилось на алюминиевых заготовках марки АМц толщиной 5 мм с использованием модифицированного плазмотрона.

На подготовительном этапе осуществлялась комплексная настройка оборудования: источник питания переводился в режим обратной полярности, подключались системы подачи плазмообразующего и защитного газов, а также активировалась система жидкостного охлаждения. Особое внимание уделялось точной настройке параметров подачи присадочной проволоки и программированию траектории движения плазмотрона с помощью ЧПУ-установки.

В процессе наплавки строго соблюдались меры безопасности, направленные на минимизацию воздействия вредных факторов - ультрафиолетового излучения и теплового воздействия плазменной дуги на персонал. После завершения технологической операции наплавленные образцы подвергались естественному охлаждению с последующим проведением визуального и инструментального контроля для оценки качества полученных слоев.

3.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

При проведении научных исследований важно осознавать потенциальные риски, связанные с воздействием опасных производственных факторов на персонал. В процессе экспериментальной работы сотрудники могут подвергаться различным угрозам здоровью, обусловленным спецификой технологических операций.

Особую опасность представляют физические факторы рабочей среды, такие как воздействие электрического тока высокого напряжения, термическое влияние нагретых поверхностей и оборудования, а также интенсивное ультрафиолетовое излучение. Кроме того, определенный риск создает использование технологических газов, которые при определенных условиях могут оказывать вредное воздействие на организм человека.

Опасные источники, операции и факторы входящие в состав процесса приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Анализ опасных и вредных факторов

Операции	Источник опасности	Факторы
Резка пластин	- УШМ Nocord - диск 125 мм	- Высокая температура нагрева пластины - Механические движения диска
Наплавка на пластину	-Плазмотрон - Источник питания ANDELI TIG 250 PAC - Баллон с плазмообразующим газом	-Ультрафиолетовое излучение -Инфракрасное излучение – Повышенная концентрация газов -Высокая температура металла

Описание опасных и вредных факторов возможно при анализе следующих операций, которые входят в технологическую карту процесса

Резка пластин, наплавка пластин

3.3 Уменьшения влияния опасных факторов

Анализ опасных факторов позволил разработать меры защиты, представленные в таблице 6, для безопасного проведения исследований.

Таблица 6 - Снижение вредных и опасных факторов

Операции	Факторы	Мероприятия
Резка пластин	- УШМ Nocord - диск 125 мм	-Проведение вводного инструктажа -Выдачи СИЗ, спецодежды
Наплавка на пластину	-Плазмотрон - Источник питания ANDELI TIG 250 PAC - Баллон с плазмообразующим газом	-Проведение вводного инструктажа -Выдачи СИЗ, спецодежды -Вентиляция помещения во время проведения работ

В разделе «Экологичность и безопасность исследования» дипломной работы проанализированы вредные и опасные факторы, возникающие при выполнении экспериментальных операций.

Результаты анализа позволили разработать эффективные методы защиты персонала без дополнительных финансовых затрат, так как необходимые средства индивидуальной защиты имеются в наличии на кафедре.

4 Оценка экономической эффективности предлагаемых решений

Выпускная квалификационная работа носит научно-исследовательский характер и не предполагает коммерческой выгоды, однако требует экономического обоснования.

4.1 Анализ затрат на проведение экспериментов

Для выполнения анализа затрат на проведение экспериментов необходимо задать данные для расчета.

Исходные данные указаны в таблице 7.

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Проектный вариант
Цена основного материала	Цм	р/кг	450
Дневная ставка участника НИР	См	р	900
Коэффициент премиальных доплат	Кпр	-	1,5
Норма отчислений на социальные нужды	Нсоц	%	30
Суммарная стоимость предоставленного оборудования	Цоб	р	183000

Продолжение таблицы 7.

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Проектный вариант
Норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию	На	%	24
Мощность оборудования	Моб	кВт	14
Коэффициент полезного действия	КПД	-	0,85
Стоимость электроэнергии	Цэ-э	р	30
Норма отчислений на текущий ремонт оборудования	Н.тр	%	22,9

«Производиться расчет экономической эффективности с учетом производственных затрат. Поскольку работа является научно-исследовательской, производственные затраты будут текущими. Формула для расчета взяты из методических указаний» [12].

«Расчет текущих затрат производится по следующей формуле» [12].

$$З_{тек} = ЗМ + ФЗП + Ос.н + Зэ-э + Зоб + Зпр + НР \quad (1)$$

«где ЗМ - затраты на основные и вспомогательные материалы» [12].

«ФЗП - фонд заработной платы (основная и дополнительная заработная плата научно– технического персонала» [12].

«Ос.н - отчисления на социальные нужды» [12].

«Зэ-э - затраты на электроэнергию для выполнения исследований» [12].

«Зоб - затраты, связанные с эксплуатацией оборудования» [12].

«Зпр - прочие затраты, в которые входит аренда помещений, приобретение образцов или макетов» [12].

«НР - накладные расходы (расходы на оплату работы управленческого персонала и охрану труда)» [12].

«Затраты на основной и вспомогательный материал вычисляются по следующей формуле:» [12].

$$ЗМ = ЗМосн + ЗМвсп \quad (2)$$

«ЗМосн - затраты на основной материал» [12].

«ЗМвсп - затраты на вспомогательный материал» [12].

«Затраты на основной материал рассчитываются по формуле:» [12].

$$ЗМосн = Нр + Цм + U, \quad (3)$$

«где Нр - норма расхода основного материала на 1 образец для испытаний» [12].

«Цм - оптовая цена 1 кг основного материала» [12].

«U - количество образцов, шт» [12].

«Затраты на вспомогательный материал принимаем равными 20% от затрат на основной материал:» [12].

$$ЗМвсп = 0,2 \cdot ЗМосн \quad (4)$$

В процессе написания экономической части дипломной работы, был проведен анализ интернет-источников, где была взята информация по цене за 1 пластину алюминия марки АМц равную 425 рублей.

Так же цена одной катушки присадочной проволоки марки Амг равняется 809 рублей.

$$ЗМосн = 0,5 \cdot 1234 \cdot 6 = 3702 \text{ руб.}$$

$$ЗМвсп = 0,2 \cdot 3702 = 740 \text{ руб.}$$

$$ЗМ = 3702 + 740 = 4442 \text{ руб.}$$

«Затраты на заработную плату научно– технического персонала:» [12].

$$\Phi ЗП = ЗПЛосн + ЗПЛдоп \quad (5)$$

«ЗПЛосн - основная заработная плата научно-технического персонала» [12].

«ЗПЛдоп - дополнительная заработанная плата научно - технического персонала» [12].

«Основная заработная плата вычисляется по формуле:» [12].

$$ЗПЛосн = \Sigma \text{Траб} \cdot Сд \cdot Кпр \cdot И \quad (6)$$

« $\Sigma \text{Траб}$ – суммарное время работы каждого участника НИР по всем этапам (в днях)» [12].

«Сд – дневная ставка каждого участника НИР, руб.» [12].

«Кпр – коэффициент премиальных доплат (можно принять =1,5)» [12].

«И – количество исполнителей на каждом этапе, чел» [12].

$$ЗПЛосн = 5 \cdot 900 \cdot 1,5 \cdot 1 = 6750 \text{ руб.}$$

«Дополнительная заработная плата определяется по формуле:» [12].

$$ЗПЛдоп = 0,1 \cdot ЗПЛосн \quad (7)$$

$$ЗПЛдоп = 0,1 \cdot 6750 = 675 \text{ руб.}$$

$$\Phi ЗП = 6750 + 675 = 7425 \text{ руб.}$$

«Отчисления на социальные нужды вычисляем по формуле:» [12].

$$Ос.н = Нсоц \cdot \Phi ЗП / 100 \quad (8)$$

«где Нсоц - норма отчислений на социальные нужды = 30%» [12].

$$Ос.н = 30 \cdot 7425 / 100 = 2227,5 \text{ руб}$$

«Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний:» [12].

$$Зэ - э = \frac{Моб \cdot t_{исп}}{\eta} Цэ - э \quad (9)$$

«где Моб - мощность оборудования (14 кВт)» [12].

« $t_{исп}$ - время проведения испытаний, час» [12].

« η - коэффициент полезного действия оборудования (0,85)» [12].

«Цэ-э - цена 1 кВт·часа электроэнергии = 5,04 руб.» [12].

$$Зэ-э = 14 \cdot 10,85 \cdot 5,04 = 166 \text{ руб.}$$

«Затраты, связанные с эксплуатацией оборудования:» [12].

$$Зоб = Аоб + Рт.р (10)$$

«где Аоб - амортизационные отчисления, связанные с эксплуатацией оборудования» [12].

«Рт.р - расходы на текущий ремонт оборудования» [12].

«Затраты на амортизацию оборудования определяем по формуле:» [12].

$$Аоб = \Sigma Цоб \cdot \frac{На \cdot тисп}{Фэф \cdot 100} (11)$$

«где На - норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию, 24 %» [12].

« $\Sigma Цоб$ - суммарная цена оборудования, необходимого для проведения испытаний, руб.» [12].

«Фэф - эффективный фонд времени работы оборудования (можно принять равным 1984 часа)» [12].

«тисп - время проведения испытаний, час» [12].

«Стоимость оборудования, которое использовалось приведены в таблице 8» [12].

«Таблица 8 - Наименование и цены предоставленного оборудования» [12].

Наименование оборудования	Цена (руб.)
Плазматрон для резки металлов в FY-A200H	7500
Источник питания ANDELI TIG 250 PAC	110000
Механизм подачи проволоки Сварог WF-21	60000

$$Аоб = 177500 \cdot \frac{24 \cdot 2}{1984 \cdot 100} = 42,9 \text{ руб.}$$

«Расходы на ремонт оборудования:» [5].

$$Ртр = \Sigma Цоб \cdot Нт.р \cdot кзФэф \cdot 100 (12)$$

«где Нр – норма отчислений на текущий ремонт оборудования (принимая равной 35%)» [12].

«Кз – коэффициент загрузки оборудования» [12].

$$K_z = \frac{\text{поб.расчет}}{\text{поб.прин}} \quad (13)$$

$$K_z = \frac{1}{1}$$

$$P_{\text{тр}} = \frac{177500 \cdot 35 \cdot 1}{1984 \cdot 100} = 31,3 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{об}} = 42,9 + 31,3 = 72,4 \text{ руб.}$$

«Прочие затраты, в которые входит аренда помещений, приобретение образцов, принимаем в размере 5% от величины фонда заработной платы научно – технического персонала:» [12].

$$З_{\text{пр}} = 0,05 \cdot \text{ФЗП} \quad (14)$$

$$З_{\text{пр}} = 0,05 \cdot 7425 = 371,25 \text{ руб}$$

«Накладные расходы (расходы на оплату работы управленческого персонала и на охрану труда) принимаем в размере 55% от величины фонда заработной платы научно – технического персонала:» [12].

$$\text{НР} = 0,55 \cdot \text{ФЗП} \quad (15)$$

$$\text{НР} = 0,55 \cdot 7425 = 4083,7 \text{ руб.}$$

На кафедре в лаборатории уже имеется всё необходимое оборудование и инструменты, поэтому дополнительные средства на их приобретение не нужны.

Проведён расчёт экономических затрат на исследование возможности аддитивного выращивания конструкция при ЧПУ плазменной наплавки.

Итоговые данные по расходу ресурсов представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Необходимые затраты на проведение исследования

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Затраты на материал	4442
Фонд заработной платы	7425
Отчисления на социальные нужды	2227,5
Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний	166
Затраты на оборудование	42,9
Прочие затраты	371,25
Накладные расходы	4083,7
Общие затраты на проведение работы	18758,35

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы, было проведено исследование, направленное на повышение стабильности аддитивного выращивания металла при ЧПУ плазменной наплавки. В ходе работы решены ключевые задачи, выполнен сравнительный анализ альтернативных способов создания изделий аддитивным методом, проведен реальный эксперимент по аддитивному наращиванию металла при помощи плазменной сварки, а также разработаны рекомендации по оптимизации процесса позволяющие повысить его устойчивость.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение влияния дополнительных факторов (например, предварительного подогрева подложки, применения гибридных технологий), а также на интеграцию систем машинного обучения для прогнозирования и коррекции параметров в режиме реального времени.

Развитием данного проекта будет разработка принципиального нового способа подачи присадочной проволоки, которая будет учитывать все пространственные положения плазматрона для создания изделий исключающих наличие дефектов.

Список используемых источников

1. Антипов В. В., Серебренникова Н. Ю., Нефедова Ю. Н., Козлова О. Ю., Пантелеев М. Д., Осипов Н. Н., Клычев А. В. Технологические особенности изготовления деталей из алюминий-литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ. 2018. №10 (70).
2. Безобразов Ю.А., Зотов О.Г. Анализ структуры образцов, полученных DMLS и SLM-методами быстрого прототипирования // 6-я Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». – Екатеринбург: Урал. – 2012. – С. 154-157.
3. Блудов А. Н., Минасова В. Е. ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПЛАВКОЙ //Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. ВГ Шухова. – 2018. – С. 1987-1994.
4. Веселовский Н. И., Маврутенков А. А. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЁВ ПРИ ПЛАЗМЕННО-Порошковой наплавке на токе обратной полярности //Мир транспорта и технологических машин. – 2010. – №. 4. – С. 7-11.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. Пособие для вузов. – М.: МГТУ, 2006. – 664с.
5. Гуденко А. В., Слива А. П., Шишкин Д. В. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗВЕРТОК НА ФОРМИРОВАНИЕ ВАЛИКОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2021. №3.
6. Дедюх Р. И. Особенности процесса плазменной сварки плавящимся электродом (обзор) //Сварочное производство. - 2014. - №. 5. - С. 34 - 39.
7. Залесский В. Г. и др. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий //Известия

Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2018. – Т. 63. – №. 2. – С. 169-180.

8. Зленко М.А., Нагайцев М.В. Аддитивные технологии в машиностроении. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

9. Зябрев И. А., Порошин В. В. Разработка оборудования для аддитивной лазерной технологии //ПРОФЕССИОНАЛ ГОДА 2017. – 2017. – С. 42-47.

10. Киселев А. С., Гордынец А. С. Влияние параметров режима на пространственную устойчивость дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в среде аргона //Векторы благополучия: экономика и социум. – 2013. – №. 4 (10). – С. 61-66.

11. Краснопевцева И.В. Методическое пособие по выполнению экономической части дипломного проекта производственно технологического характера для студентов специальности 150700.02.65 и направления подготовки 15.03.01 / И. В. Краснопевцева. –Тольятти: ТГУ, 2015. –С.3– 22

12. Кусков Ю. М., Куприн И. Н., Сарычев И. С. Тепловые процессы при электрошлаковой наплавке в токоподводящем кристаллизаторе прокатных валков // Сварочное производство. - 2006. - № 10. - С. 29-32.

13. Макаренко Н. А. и др. ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА РАЗНОПОЛЯРНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ //ВІСНИК. – 2008. – С. 200896.

14. Мышковец В. Н. и др. Особенности формирования покрытий из алюминиевых сплавов при импульсном лазерном воздействии. – 2011.

15. Неулыбин С. Д. и др. Использование тока обратной полярности для плазменной наплавки //Молодёжь и наука. – 2013. – С. 78.

16. Новиков А. Н. Ремонт деталей из алюминия и его сплавов. – 1997.

17. Нурлубеков, А. Б. Особенности формирования покрытий при наплавке в среде углекислого газа / А. Б. Нурлубеков // Перспективы

развития технологий обработки и оборудования в машиностроении : сборник научных статей 4-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Курск, 18–19 февраля 2019 года. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2019. – С. 188-190. – EDN MWYZXQ.

18. Поникаров А. В., Романова А. М. Лазерные аддитивные технологии в космическом и авиационном производстве //Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. ВГ Шухова. – 2018. – С. 1302-1306.

19. Савинов А. В. и др. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА Волгоградский государственный технический университет //Июнь. – С. 79.

20. Сидоров В. П. и др. Эффективная мощность сварочной дуги обратной полярности при наплавке алюминия плавящимся электродом //Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2020. – №. 4. – С. 34-42. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-34-42

21. Спиридонов Н. В. и др. Влияние режимов и способов введения порошковой присадки на качество наплавленного слоя в среде углекислого газа //Наука и техника. – 2007. – №. 6. – С. 24-27.

22. Федорова П. С. Перспективы применения аддитивных технологий в машиностроении (аналитический обзор) //Аллея науки. – 2017. – Т. 1. – №. 8. – С. 447-454.

23. Чабаненко А. В., Белова М. Ю. АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРОЧНОГО ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА //ВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. – 2021. – С. 324-329.

24. Чуркин В. А., Вальтер А. И. Процесс плазменной наплавки как объект для системы управления качеством // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012.
25. Шахов В. А. и др. Результаты лабораторных испытаний покрытий, нанесенных плазменной наплавкой // Известия Международной академии аграрного образования. – 2018. – Т. 40. – С. 30.
26. Щицын Ю. Д. Разработка технологии и оборудования аддитивного производства металлических изделий плазменной наплавкой плавящимся электродом.
27. Щицын Ю. Д., Косолапов О. А., Щицын В. Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка и диагностика. – 2009. – №. 2. – С. 42-44.
28. Щицын Ю. Д., Кривоносова Е. А., Неулыбин С. Д., Ольшанская Т. В., Никулин Р. Г., Федосеева Е. М., Терентьев С. А. Использование плазменной наплавки для аддитивного формирования заготовок из алюминиевых сплавов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2019. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-plazmennoy-naplavki-dlya-additivnogo-formirovaniya-zagotovok-iz-alyuminievyh-splavov> (дата обращения: 04.04.2025).
29. Fagerström M. Implementing WAAM into welding automation and comparing it with traditional manufacturing methods. – 2025.
30. Kumar P. J. R., Baskaran A., Kannan T. D. B. Parameter optimization in DP-TIG welding of SMO 254 using TOPSIS // Materials Today: Proceedings. – 2023.
31. Rizvi S. A., Ali W. Multi attribute decision making parametric optimization in weld bead by gas metal arc welding through grey relation analysis: A case study // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2020. – Т. 12. – №. 2. – С. 59-66.

32. Sattar A. et al. Optimization of TIG welding parameters for Ti-6Al-4V titanium alloy using the Taguchi design of experiment //NUST Journal of Engineering Sciences. – 2022. – T. 15. – №. 2. – C. 65-77.

33. Ślęzak T. Welding of S960QL High-Strength Steel by the Manual–Automated MAG Technique—A Study of Mechanical Properties, Residual Stresses and Fracture Mechanisms in the Heat-Affected Zone //Materials. – 2024. – T. 17. – №. 23. – C. 5792.

34. Tian W., Hu P., Zhang C. Optimization framework of laser oscillation welding based on a deep predictive reward reinforcement learning net //Journal of Intelligent Manufacturing. – 2024. – C. 1-20.

36.

https://pstu.ru/files/2/file/adm/dissertacii/terentev/dissertacia_terentev_sa.pdf