

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля

Направление подготовки: машины и технологии сварочного производства (15.04.01)

Кафедра оборудования и технологии сварочного производства

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование влияния импульсного изменения тока на физические и технологические свойства плазменной дуги

УДК 621.791.755.5:621.3.014.333

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1BM51	Монич Павел Викторович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дедюх Р.И.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко В.С.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусельников М.Э.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОТСП	Киселев А.С.	к.т.н.		

Томск – 2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля

Направление подготовки: машины и технологии сварочного производства (15.04.01)

Кафедра оборудования и технологии сварочного производства

Период выполнения: (осенний / весенний семестр 2016/2017 учебного года)

Форма предоставления работы:

магистерская диссертация <small>(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)</small>

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ – ПЛАН
Выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом работы:	
------------------------------	--

Дата контроля	Название раздела(модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
03.03.2017	1. Литературный обзор состояния вопроса исследование влияния импульсного изменения тока на физические и технологические свойства плазменной дуги.	15
15.03.2017	2. Подготовка оборудования к проведению экспериментов.	10
29.03.2017	3. Подготовка материалов к проведению экспериментов.	11
06.04.2017	4. Проведение экспериментов	17
12.04.2017	5. Анализ результатов экспериментов	20
20.04.2017	6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и Ресурсосбережение.	12
27.04.2017	7. Социальная ответственность	9
03.05.2017	8. Заключение	6

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дедюх Р.И.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОТСП	Киселев А.С.	к.т.н.		

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля

Направление подготовки: машины и технологии сварочного производства (15.04.01)

Кафедра оборудования и технологии сварочного производства

Утверждаю:

Зав. Кафедрой ОТСП

Киселев А.С.

(Подпись) _____
(Дата)

ЗАДАНИЕ

На выполнение выпускной квалификационной работы

В форме: _____ магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ51	Монич Павел Викторович

Тема работы:

Исследование влияния импульсного изменения тока на физические и технологические свойства плазменной дуги.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	18.10.2016 №8895/с

Срок сдачи студентом выполненной работы: _____

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Сварочная плазменная дуга при различных режимах работы и ее влияние на физические и технологические свойства дуги.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Изучение влияния импульсного изменения тока на физические и технологические свойства плазменной дуги, оценка полученных результатов. 2. Финансовый менеджмент, ресурсо-эффективность и ресурсосбережение. 3. Социальная ответственность 4. Заключение и выводы

Перечень графического материала

1. Схема плазменной дуговой сварки в замочную скважину.
2. Схема силовой части модулятора сварочного тока
3. Схема установки для исследования импульсной сжатой дуги
4. График зависимости степени контрагирования столба плазменной дуги и его диаметра от длительности импульсов тока
5. График зависимости степени контрагирования активного анодного пятна и плотности тока в нем от величины тока импульса
6. График зависимости плотности тока в анодном пятне и его диаметра от расстояния между нижним срезом сопла плазмотрона и анодом при различных длительностях импульсов тока
7. График зависимости напряжения плазменной дуги от длительности импульсов тока при различных длительностях паузы
8. График зависимости напряженности электрического поля столба плазменной дуги и изменения ее анодного падения напряжения от длительности импульсов тока
9. График зависимости коэффициента «уровня технологичности» от среднего значения сварочного тока
10. Кинокадры скоростной киносъемки процесса периодического образования «замочной скважины» при сварке плазменной проникающей дугой в импульсном режиме
11. График условия обеспечения удовлетворительного формирования проплава

	<p>при плазменной сварке модулированным током</p> <p>12. График изменения ширины и высоты проплава в зависимости от величины тока импульса</p> <p>13. Микроструктура металла шва при плазменной сварке проникающей дугой</p> <p>14. Внешний вид сварного шва, выполненного плазменной импульсной дугой с подачей присадочной проволоки в хвостовую часть сварочной ванны</p> <p>15. Макрошлиф сварного соединения из стали 09Г2С толщиной 5 мм</p>
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
1. Литературный обзор; 2. Материалы и методы исследования; 3. Экспериментальная часть; 4. Заключение.	Дедюх Ростислав Иванович
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	Николаенко Валентин Сергеевич
6. Социальная ответственность.	Гусельников Михаил Эдуардович

Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

1.5. Плазменная дуговая сварка: процесс, зондирование, управление и моделирование

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дедюх Р.И.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Монич П.В.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1BM51	Монич Павел Викторович

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	ОТСП
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Машины и технологии сварочного производства

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

<i>1.Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и технологических</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; наблюдение.
<i>2.Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>3.Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчисления, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1.Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Определение потенциалов потребителя результатов исследования, SWOT-анализ, определение возможных альтернатив проведения научных исследований.
<i>2.Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Планирование этапов работы, определение календарного графика трудоёмкости работы, расчет бюджета.
<i>3.Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Оценка сравнительной эффективности проекта

Перечень графического материала:

1.Оценка конкурентоспособности технических решений 2.Матрица SWOT 3.Альтернативы проведения НИ 4.График проведения и бюджет НИ 5.Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ
--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко В.С.	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1BM51	Монич П.В.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ51	Монич Павел Викторович

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	ОТСП
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Машины и технологии сварочного производства

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</i> – <i>опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</i> – <i>негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</i> – <i>чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</i> 	<p>Рабочим местом является отдельное помещение (научная лаборатория). Поскольку данное помещение находится внутри здания, на проектировщика возможны действия следующих факторов:</p> <p>Вредные факторы: монотонный режим работы, отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность, превышение уровня шума, повышенный уровень электромагнитных излучений.</p> <p>Опасные факторы: повышенный уровень ультрафиолетовой радиации, повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека, повышенная температура поверхностей оборудования, материалов.</p>
<p>2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<p>1. Техника пожарной безопасности на производстве (ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ).</p> <p>2. Техника безопасности при работе с электро- и радиотехническими устройствами (ГОСТ 12.1.006-84).</p> <p>3. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны ГОСТ 12.1.005-88 (с изм. №1 от 2000 г.) ССБТ.</p> <p>4. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2009 ССБТ.</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</i> – <i>действие фактора на организм человека;</i> – <i>приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</i> – <i>предлагаемые средства защиты</i> 	<ul style="list-style-type: none"> – Повышенный уровень ультрафиолетовой радиации; – Воздействие ионизирующего излучения при проведении рентгеноскопии; – Превышение уровня шума; – Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; – Анализ показателей микроклимата; – Воздействие инфракрасного излучения.
---	---

<i>(сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</i>	
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения) 	<p>При работе со сварочной установкой, которая соединена с сетью напряжения, возможны электрические замыкания (удары) для персонала и пожары.</p> <p>Согласно нормам, установлены средства пожаротушения.</p> <p>Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов и воздуха в рабочей зоне (РЗ).</p>
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>Воздействие на окружающую среду сводиться к минимуму, за счет отсутствия загрязняющих веществ.</p>
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий 	<p>Возможные ЧС на объекте: пожары, землетрясения.</p> <p>К мерам по предупреждению будут относиться:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Планирование защиты населения и территории от ЧС на уровне предприятия (организации); 2. Создание запасов средств индивидуальной защиты и поддержание их в готовности; 3. Выявление угроз пожара и оповещение персонала; 4. Подготовка работающих к действию условиях ЧС; 5. Подготовка и поддержание в постоянной готовности сил и средств для ликвидации ЧС.
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 	<p>Соблюдение законов (налоговое законодательство, трудовой и гражданский кодексы). Руководитель (ответственный) принимает обязательства выполнения и организации правил эвакуации и соблюдение требования безопасности в помещении, а также контроль за исправностью работы в помещении.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусельников М.Э.	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Монич П.В.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 128 страниц, 15 рисунков, 58 источников, одна презентация.

Ключевые слова: Сварка в замочную скважину. Сжатая дуга. Физические свойства, технологические свойства. Модуляция тока. Импульсное управление, импульсное изменение тока, контрагирование дуги.

Объектом исследования является нестационарная (импульсная) сжатая сварочная дуга.

Цель работы - выявить взаимосвязи между импульсным изменением тока и физическими и технологическими свойствами сжатой дуги, и опираясь на исследования создать научные основы импульсного управления ее технологическими и физическими свойствами.

На данном этапе исследований изучали механизм формирования сжатого дугового разряда в условиях импульсного изменения тока и его влияние на физические и технологические свойства дуги. Исследования проводили на специально разработанном стенде. «Уровень технологичности» процесса плазменной сварки проникающей дугой можно повысить, применяя модуляцию сварочного тока. Удовлетворительное формирование проплава при заданной величине скважности импульсов, их длительности и скорости сварки определяется величиной тока импульсов. Косвенным критерием оценки характера проплавления может служить поведение факела ионизированных газов, выходящих с обратной стороны стыкового соединения.

При плазменной сварке модулированным током проникающей дугой геометрические параметры проплава (высота и ширина) при заданном среднем значении сварочного тока, длительности импульсов тока и скорости сварки определяются величиной тока импульсов.

Модуляция сварочного тока при сварке плазменной проникающей дугой, создавая тепловые и силовые возмущения сварочной ванны в процессе ее кристаллизации, благоприятно сказывается на формировании первичной

структуры металла шва, который имеет мелкодендритное разориентированное строение.

Abstract

The final qualifying work contains 128 pages, 15 drawings, 58 sources, one presentation.

Key words: Keyhole welding. Compressed arc. Physical properties, technological properties. Current modulation. Pulse control, impulse current change, arc contraction.

The object of investigation is a non-stationary (pulse) compression welding arc.

The purposeful work is to reveal the interrelations between the impulse change and the physical and technological properties of the compressed arc, and relying on research to create the scientific foundations of impulse control of its technological and physical properties.

At this stage, the research studies the mechanisms in which they can be applied. The research was carried out on a specially designed stand. The "level of manufacturability" of plasma arc welding by a penetrating arc can be increased by applying modulation of the welding current. The satisfactory formation of the melts at a given value of the squares, their duration and the welding speed is determined by the value of the impulse current. An indirect criterion for evaluating the nature of penetration can be the behavior of the torch of ionized gases emerging from the back of the butt joint.

When plasma welding modulated current penetrating the arc geometric parameters of the melting (height and width) for a given average value of the welding current, the duration of the current pulses and the welding speed to the value of the current pulses.

Modulation of the welding current in welding by a plasma penetrating arc, which creates thermal and force perturbations of the weld pool during its crystallization, favorably affects the formation of the structure of the primary structure of the weld metal, which has a shallowly disoriented disoriented structure.

Содержание:

Реферат	10
Содержание:	13
Введение	15
1. Состояние вопроса	17
1.1. Общие представления о процессах в сварочной дуге, ее строении	17
1.2. Плазменная сварка и ее преимущества	21
1.3. Способы получения сжатой дуги, ее особенности и применение	22
1.4. Модуляция сварочного тока как метод импульсного управления технологическими свойствами дуги	29
1.5. Плазменная дуговая сварка: процесс, зондирование, управление и моделирование	33
1.6. Задачи исследования	47
2. Исследование физических особенностей сжатой сварочной дуги	49
2.1. Методы исследования, материалы и оборудование	49
2.2. Влияние импульсного изменения тока на степень контрагирования плазменной дуги	52
2.3. Исследование электрических характеристик контрагированной импульсной дуги	57
2.4. Исследование технологических особенностей плазменной импульсной дуги	59
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	72
3.1. Потенциальные потребители результатов исследования.	72
3.2. Планирование научно-исследовательских работ.	77
3.3. Бюджет научно-технического исследования (НТИ).	82
4. Социальная ответственность	89
4.1. Техногенная безопасность	89
4.2. Региональная безопасность	97
4.3. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	99
4.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	101
	13

Заключение	107
Список публикаций	109
Список используемых источников	110
Приложение	116
CD-диск	128

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроение характеризуется широкой гаммой применяемых методов обработки материалов, в том числе и плазменных (сварки, резки, наплавки, напыления, поверхностного упрочнения, легирования и т.п.). Постоянно повышающиеся требования к качеству обработки и другим ее показателям требуют активного управления процессами плазменной обработки с целью оптимального с точки зрения качества, ресурсо- и энергосбережения использования сжатой сварочной дуги, как основного инструмента технологического процесса. Это возможно лишь на базе разработки теоретических основ управления технологическими свойствами дуги.

В настоящее время традиционные стационарные процессы плазменной обработки материалов практически исчерпали свои технологические возможности. Создание новых технологических процессов, способов управления ими и существенное совершенствование существующих возможно лишь на основе изучения и использования физических свойств сжатой дуги и присущих ей закономерностей.

Результаты исследования различных свойств стационарной сжатой дуги достаточно полно представлены в литературе. Они широко использовались при разработке и совершенствовании плазменных установок для различных технологических процессов, работающих в стационарном режиме. Значительно менее изученными являются физические и технологические свойства нестационарных (импульсных) сжатых дуг. Поэтому одним из перспективных направлений решения указанной выше фундаментальной проблемы плазменной обработки материалов являются исследования, направленные на выявление взаимосвязей между импульсным изменением тока и физическими и технологическими свойствами импульсных сжатых сварочных дуг. Эти исследования могут послужить теоретической базой для создания новых и совершенствования традиционных плазменных процессов, а также открыть широкие возможности для их управления.

На основании изложенного можно констатировать, что дальнейшие исследования и разработки в указанном направлении с целью разработки научных основ импульсного управления технологическими свойствами сжатой сварочной дуги представляются важными и актуальными.

1. Состояние вопроса

1.1. Общие представления о процессах в сварочной дуге, ее строении

Дуговой разряд является одним из видов электрических разрядов в газах. От других видов он отличается относительно низким падением напряжения - порядка десятков вольт, сравнительно большой плотностью тока, составляющей сотни А/мм и высокой температурой в разрядной области при атмосферном давлении $T = 5000 \dots 50000 \text{ К}$ [1,3].

Впервые дуговой разряд наблюдался и описан В.В.Петровым в 1802 г. Название "дуга" он получил за форму ярко светящегося шнура (столба) разряда, который в первых опытах вследствие малой величины тока изгибался между горизонтальными электродами вверх серповидной дужкой под действием восходящих конвективных потоков нагретого разрядом воздуха [2].

В технике дуговой разряд применяется для различных целей. Однако наиболее широко электрическая дуга используется в качестве источника питания для сварки.

С процессами в сварочной дуге непосредственно связаны процессы образования сварного соединения и формирования его свойств. Поэтому, с целью совершенствования существующих методов дуговой сварки и разработки новых, процессы в сварочной дуге и способы управления ими глубоко изучаются исследователями [4].

В последние годы исследованиям сварочной дуги посвящено большое количество работ как у нас в стране, так и за рубежом. Они тесно связаны с физическими исследованиями электрических газовых разрядов, выполненными В.В. Грановским, Н.А. Капцовым, И.Г. Кесаевым, А.Энгелем, и М. Штеенбеком, В. Финкельбургом и Г. Меккером, Дж.М. Самервиллом, М.ф. Жуковым и др. [6,7].

Первая монография, посвященная сварочной дуге, была подготовлена К. К.Хреновым и издана в 1949 г. В последствии были опубликованы монографии А.Я.Брауна и Г.И.Погодина-Алексеева, Г.М. Тиходеева, А.Г. Мазеля,

Г.И.Лескова, В.А. Ленивкина и др.[8] Кроме того, новейшие исследования сварочной дуги описаны в статьях В.В.Гвоздецкого, В.С. Мечева, А.В. Петрова, Н.Н. Рыкалина, А.В, Николаева, В.М. Ямпольского и многих других [5].

Накопленные многочисленные экспериментальные данные и их обобщение позволяют представить общую картину протекания процессов в дуге и ее строение в следующем виде.

В возбужденной сварочной дуге, как и во всяком самостоятельном дуговом разряде, имеет место резко неравномерное распределение электрического поля в межэлектродном пространстве, состоящем из трех зон: катодной, анодной и столба разряда [8]. На электродах часто наблюдаются активные пятна - анодные и катодные. Скачки потенциала в катодной и анодной областях обусловлены скоплениями объемных пространственных зарядов и повышенным сопротивлением этих зон в связи с особыми условиями протекания тока на границе металл – газ [9].

Столб любой электрической дуги, в том числе и сварочной, находится в состоянии плазмы. т.е. наряду с нейтральными атомами содержит свободные электроны и ионы. Благодаря этому он способен пропускать электрический ток с катода на анод.

В столбе непрерывно происходят процессы ионизации и рекомбинации заряженных частиц. Причем, в установившейся сварочной дуге эти процессы появления и исчезновения заряженных частиц сбалансированы, и их концентрация не изменяется со временем. Энергия, необходимая для ионизации газа, затрачивается источником сварочного тока и уравнивается потерями энергии поверхностностью столба на амбиполярную диффузию заряженных частиц и конвекцию, а также потерями на излучение [10,11].

В объеме плазмы дуги возможны флуктуации, приводящие к временному разделению электронов и ионов. Однако, как показывают расчеты, таким разделением разрядов можно пренебречь и плазму дуги можно считать почти

нейтральной - квазинейтральной. В такой плазме средние концентрации ионов и электронов в ее объеме практически равны между собой [12,15].

В области квазинейтральной плазмы со слабым электрическим полем, называемой столбом дуги и занимающей практически весь разрядный промежуток, ток создается направленным движением частиц обоих знаков (электронами и ионами). Однако так как концентрации их практически равны, а дрейфовая (направленная) скорость электронов под действием электрического поля значительно больше скорости ионов, то ток в столбе дуги практически переносится одними электронами. Направленная скорость электронов зависит от напряженности электрического поля и температуры плазмы, а также рода газа и давления. Температура столба обуславливает ряд различных явлений в плазме и поэтому является одним из основных ее параметров. Средняя тепловая энергия электронов в плазме обычно недостаточна для ионизации. Тем не менее имеется большое количество высокоскоростных электронов, соответствующих "хвосту" максвелловского распределения, энергия которых достаточна как для возбуждения, так и для ионизации газа[12,13,14].

Приэлектродные области сварочной дуги - катодная и анодная - представляют собой переходные зоны между поверхностями электродов и плазмой разряда. Это участки резких изменений электрических, термических и других свойств по длине дугового разряда. Здесь существует переход от металлического проводника к газообразному, переход от холодного электрода к горячей плазме и т.д. [16]

Протяженность приэлектродных областей дуги достоверно не установлена, но по ряду признаков считается соизмеримой с несколькими свободными пробегами ионов у катода и электронов у анода, т.е. $1(10^{-3} \dots 10^{-5})$ см. [18].

Ток в катодной области переносится как потоками положительных ионов, поступающих из плазмы на катод, так и потоками электронов, эмитированных катодом. При этом вследствие относительно большой (по сравнению со столбом) доли ионного тока и малой подвижности ионов в этом слое возникает

избыточный положительный пространственный заряд, приводящий к появлению скачка потенциала у катода. Катодное падение напряжения ускоряет ионы, движущиеся к катоду, обеспечивая температурные условия для эмиссии электронов, не позволяет электронам диффундировать из плазмы на катод и ускоряет эмитированные электроны до уровней энергии, необходимой для ионизации нейтральных атомов в прикатодной области. Заметим, что механизм эмиссии электронов с катода на протяжении многих десятилетий был и остается одним из наиболее сложных вопросов теории электрической дуги. В настоящее время в литературе еще не утвердилась единая точка зрения на механизм эмиссии [17,19,20].

За исключением специальных случаев (например, угольный анод с введенными в его состав солями легкоионизируемых металлов), анод не эмитирует положительных ионов и ток в анодной области переносится исключительно электронами [21]. Вблизи анода оказывается избыток отрицательного пространственного заряда и появляется анодное падение напряжения. Его значение определяется в основном энергией, потребляемой для образования положительных ионов в анодной области [22].

Иногда различают два типа ионизации, осуществляемой электронами в зоне анодного падения напряжения: ионизацию полем и термическую ионизацию. В первом случае образование ионов может осуществляться электронами, ускоренными полем при достаточной длине их свободного пробега и значении анодного падения напряжения [24]. Последнее должно быть соизмеримым с потенциалом ионизации газа или паров материала анода и лишь при ступенчатой ионизации (столкновение электронов с возбужденными атомами) оно может быть меньше и соответствовать потенциалу возбуждения [25]. В случае термической ионизации участие в ней принимают быстрые электроны "хвоста" максвелловского распределения. Поэтому средняя энергия электронов может быть значительно ниже потенциала ионизации и требуемое анодное падение напряжения снижается [26].

С увеличением плотности тока (переходе маломощной дуги в мощную) длина свободного пробега электрона уменьшается, и он не может приобрести энергию, достаточную для ионизации. В этом случае вступает в действие механизм термической ионизации. В соответствии с этим маломощная дуга с малой плотностью тока и контрагированная (сжатая) мощная дуга отличаются друг от друга переходом соответственно от ионизации полем или ударной ионизации к термической ионизации.

1.2. Плазменная сварка и ее преимущества

Плазма – это полностью или частично ионизированный газ, который состоит из электрически заряженных электронов и ионов, а также из нейтральных молекул и атомов, которые заряжены большим количеством энергии и высокой температурой [27].

Сам же процесс плазменной сварки происходит при сжатии электрической дуги и принудительном вдувании в нее плазмообразующего газа. Сжатие электрической дуги происходит при помощи специального устройства плазматрона, который значительно увеличивает мощность дуги и температуру горения. Температура в плазме составляет $30\ 000^{\circ}\text{C}$, что в 5-6 превышает температуру обычной сварочной дуги в среде аргона. Газ, подаваемый в зону сварки, ионизируется и в результате теплового расширения увеличивается в объеме в 50-100 раз. Такое расширение заставляет вытекать газ из плазматрона с высокой скоростью, а также передавать тепловую энергию свариваемым материалам [28].

В свою очередь при помощи плазменной сварки можно качественно сваривать большие толщины металла без разделки кромок под заварку и само сварное соединение будет глубоким и надежным. Длину дуги, из-за своей цилиндрической формы, можно значительно увеличивать, тем самым производить сварку в труднодоступных местах [29].

Газом, образующим плазму при сварке обычно является аргон, иногда с добавлением гелия, водорода или углекислого газа, это зависит от вида свариваемого металла. Материалом электрода служит вольфрам, активированный лантаном, иттрием или торием.

В плазменной сварке возможны следующие разновидности горения дуги:

-сварка плазменной дугой, горящей между не плавящимся электродом и изделием (дуга прямого действия).

-сварка плазменной струей, горящей между не плавящимся электродом и соплом плазмотрона. Плазма выдувается газовой струей. (косвенная дуга).

Сварка плазменной дугой в отличие от дуговой электрической имеет следующие преимущества:

- 1.) В плазменной сварке процесс сварки менее чувствителен к изменению длины электрической дуги;
- 2.) Процесс протекает с большей температурой;
- 3.) Имеет меньший диаметр дуги, которая имеет цилиндрическую форму;
- 4.) Дуга горит на малых токах - от 0,2 до 30 А.

Недостатки:

- 1.) Часть энергии при плазменной сварке рассеивается в окружающее пространство и на нагрев электродов;
- 2.) Необходимость подвода плазмообразующего газа и воды.

1.3. Способы получения сжатой дуги, ее особенности и применение

Известно, что интенсивное охлаждение столба повышает его энергетические параметры и приводит к сжатию дуги. Это явление было установлено еще в 1922 г. работой Гердиена и Лотца [30].

Гердиен и Лотц добились значительного повышения плотности тока в столбе дуги, пропустив его через узкое отверстие в керамической пластине. Поверхность канала при этом непрерывно омывалась водой, пленка которой

защищала материал от разрушения. Снижение температуры соприкасающихся со стенками канала слоев столба приводило к его сжатию и к увеличению потребления мощности столбом от источника питания. Если столб свободной дуги с увеличением величины тока может расширяться, в связи с чем заметных изменений температуры и степени ионизации в нем не наблюдается, то столб сжатой дуги с увеличением тока не имеет возможности расширяться. В результате температура газа и степень его ионизации значительно увеличивается. Так температура дуги у Гердиена возросла до 30000 °С [31,32].

Этот принцип сжатия столба дуги в дальнейшем был использован для создания плазматронов - электродуговых нагревателей газа, у которых интенсификация плазмообразования достигается путем заключения части столба дуги в узкий водоохлаждаемый канал сопла плазмотрона и обдува сжатой дуги аксиальным, радиальным или вихревым потоками газа.

В инженерной практике наметились две схемы плазматронов: прямого и косвенного действия. В первом случае одним из электродов является обрабатываемый материал и столб плазмы совпадает со столбом дуги, которую в литературе часто называют "проникающей дугой" или сжатой дугой прямого действия. В этом случае используется два энергетических источника: плазменная струя и электрически активное пятно дуги [33]. Внутренний коэффициент полезного действия такого плазматрона сравнительно велик и достигает 60-80%. Если изделие непосредственно не подключено к источнику сварочного тока, а роль анода выполняет сопло, которое конструктивно может совпадать с каналом плазмотрона, то источник теплоты становится независимым от изделия со струей плазмы, выделенной из столба дуги в виде факела, длина которого зависит от режима работы плазмотрона и состава плазмообразующего газа. Такую дугу называют сжатой дугой косвенного действия или просто плазменной струей.

Сжатая дуга косвенного действия более универсальная (факел плазмы можно направить на любое тело), чем дуга прямого действия. Однако тепловая

энергия в плазмотроне косвенного действия передается обрабатываемому изделию лишь струей плазмы, нагретой столбом дуги [34]. Поэтому в большинстве случаев она невелика и используется в основном для напыления, сфероидизации, сварки пластмасс, резки тонких диэлектрических и текстильных материалов.

Непосредственное возбуждение сжатой дуги прямого действия через узкий канал сопла затруднено. Поэтому вначале обычно возбуждается дежурная дуга косвенного действия между электродом и соплом плазмотрона, а затем, как только факел плазмы достигает изделия, возбуждается дуга прямого действия. При этом дежурная дуга в зависимости от схемы ее питания отключается либо продолжает гореть, стабилизируя основную дугу на малых токах [35].

Сжатие столба дуги возможно лишь до определенного предела. При критическом соотношении между силой тока, диаметром сопла, его длиной и расходом плазмообразующего газа возникает так называемая "двойная" или каскадная дуга, горящая между электродом плазмотрона и его соплом и между соплом и изделием.

Режим двойной дуги называют аварийным, так как он приводит к быстрому разрушению сопла плазмотрона. Это явление связано с тем, что при увеличении тока и уменьшении диаметра сопла увеличивается напряженность электрического поля в его канале и одновременно уменьшается пограничный холодный слой газа у стенки сопла, благодаря чему повышается его электропроводность и создаются условия для электрического пробоя. Снижению электрической прочности пограничного слоя газа способствует также заниженный расход плазмообразующего газа. При оптимальном его значении наружные слои струи газа, омывающие дугу и канал плазмотрона, остаются сравнительно холодными и электрически изолируют столб от сопла плазмотрона. Чем больше расход газа, тем больше уносится в осевом направлении тепла, отбираемого газом от столба, и тем, следовательно, меньше

тепловая нагрузка на сопло и выше диэлектрическая прочность пограничного слоя газа и наоборот. Поэтому, несмотря на то, что сопло плазмотрона, как правило, всегда охлаждается водой, для каждого значения его диаметра, длины и тока дуги существуют критические значения расхода газа, ниже которых возникает двойное дугообразование [36,37].

При большом значении расхода газа сварка становится невозможной, так как металл ванны выдувается из зоны сварки и происходит разделительная резка. Этот технологический процесс один из первых плазменных методов обработки материалов, который получил широкое применение в промышленности для резки цветных металлов, нержавеющей стали и других металлов.

По сравнению с резкой сварка сжатой дугой является более сложным технологическим процессом, и ей предшествовали специальные исследования не только по выбору электрических режимов, но главным образом по отработке газодинамических параметров плазмотрона, обеспечивающих высокую стойкость сопла плазмотрона и нормальное формирование шва при глубоком проплавлении [38]. Кроме того, при сварке для получения качественных сварных соединений требуется дополнительная защита расплавленного металла от окружающей среды. Наиболее простым вариантом такой защиты является концентрическая подача защитного газа через наружное сопло плазмотрона. В зависимости от состава свариваемого металла в качестве защитного газа могут быть использованы аргон, гелий, углекислый газ, азот, а также различные смеси газов, в том числе смеси, содержащие водород. Сварка подавляющего большинства металлов производится дугой прямой полярности, горящей между вольфрамовым электродом плазмотрона и изделием в струе плазмообразующего инертного газа, как правило, аргона [39].

Раздельная подача плазмообразующего газа и защитного обуславливает отличительную особенность сжатой сварочной дуги: ее прикатодная область существует в среде плазмообразующего газа, а столб и прианодная область -

преимущественно в среде защитного газа. Это обстоятельство позволяет управлять формой дуги и ее технологическими свойствами.

При сварке сжатой дугой падение напряжения на дуге в основном зависит от рода и расхода как плазмообразующего, так и защитного газов, а также от параметров и конструкции сопла плазмотрона. Оно заметно увеличивается по мере увеличения тока и расхода плазмообразующего газа, углубления электрода в сопло и уменьшения диаметра канала сопла. Статическая вольтамперная характеристика сжатой дуги возрастающая.

Сжатую дугу можно разбить на зоны также как и свободную дугу: катодную, анодную и столб дуги. Однако в отличие от свободной дуги столб сжатой дуги неоднороден [40]. Условия существования столба по его длине различны. В области сопла плазмотрона столб сжат, однако вне его пределов он может расширяться. Напряженность электрического поля закрытого участка столба дуги, расположенного внутри канала сопла, как правило выше напряженности электрического поля открытого участка столба дуги и повышается с увеличением тока, расхода плазмообразующего газа и уменьшением диаметра канала сопла. Напряженность электрического поля открытого участка столба дуги выше напряженности электрического поля столба свободной дуги и растет по мере увеличения расхода плазмообразующего газа и уменьшения диаметра сопла. Изменение тока, углубления электрода в сопло и длина канала не оказывают заметного влияния на нее [41,42].

Более высокие значения напряженности электрического поля, полученные на различных участках дуги в плазмотроне, чем в свободном столбе дуги, указывают, что дуга сжата соплом практически на всем протяжении столба, хотя не в одинаковой степени.

Приэлектродные падения напряжения в сжатой дуге, по мнению Г.И.Лескова, по-видимому, не отличаются от приэлектродных падений напряжения свободной дуги и не зависят от тока. Повышение плотности тока в

приэлектродных областях сжатой дуги с одной стороны должно приводить к снижению приэлектродных падений напряжения, однако с другой - с увеличением плотности тока в приэлектродных областях дуги повышается температура примыкающего к ним столба. Это, в свою очередь, обуславливает более высокую разность температур в приэлектродной области и мало изменяющееся отношение разности температур к плотности тока, определяющее приэлектродное падение напряжения [42]. В ряде случаев, когда электродом является трудно испаряющийся материал (вольфрам) и разность температур у его поверхности в свободной дуге сравнительно невелика, увеличение тока и связанное с ним повышение температуры столба из-за сжатия разряда может привести к росту приэлектродного падения напряжения.

Экспериментальные данные об этих величинах тока практически неизвестны.

По мере погружения дуги в свариваемый или разрезаемый металл ее столб на значительной длине заполняется парами этого металла со свойствами им потенциалом ионизации и эффективным сечением, определяющими напряженность поля в столбе. Как правило, сечения атомов металлов выше, чем газа, поэтому их присутствие в столбе приводит к росту напряженности поля. Кроме того, погруженный столб дуги может усиленно охлаждаться теплопроводностью в сторону основного металла. Это также обуславливает более высокую напряженность поля в нем [43].

Столб дуги и струя плазмы в большинстве случаев имеют цилиндрическую форму, поэтому процесс плазменно-дуговой сварки менее чувствителен к изменению длины дуги, чем процесс аргонодуговой сварки. Радиальные размеры столба определяются режимом работы плазматрона и его конструкций. При соответствующем выборе диаметра сопла, рода и расхода плазмообразующего и защитного газов, а также тока дуги можно значительно повысить плотность энергии на изделии, а следовательно, и интенсивность его плавления. По проплавляющей способности сжатая дуга занимает

промежуточное положение между электронным лучом и сварочной дугой, горящей в аргоне.

Высокая проплавляющая способность сжатой дуги обуславливается не только большой сосредоточенностью теплового потока, но и значительным силовым воздействием плазменного потока на сварочную ванну. Силовое воздействие сжатой дуги в 6-10 раз больше чем свободной дуги при одинаковом токе. Максимальное удельное давление дуги возрастает по мере увеличения тока, расхода плазмообразующего газа и уменьшения диаметра сопла и длины дуги. Распределение давления по поперечному сечению сжатой дуги, как показывают экспериментальные данные, подчиняется нормальному закону Гаусса [44].

В процессе сварки сжатой дугой вследствие сосредоточенного характера ее силового и теплового воздействия на сварочную ванну, в последней образуется отверстие в виде "замочной скважины" и плазменная струя проникает на всю толщину свариваемого металла. Процесс сварки проникающей дугой обычно характерен для материалов толщиной более 3 мм. Устойчивое проникание плазменной струи, возможно при достаточно жестких режимах. Параметры плазменной струи с обратной стороны шва можно использовать в качестве сигнала обратной связи по проплавлению при разработке автоматических систем регулирования.

Таким образом, сжатая дуга, формируемая каналом плазмотрона, имеет значительно более широкие возможности по управлению ее технологическими свойствами, чем свободно горящая дуга. Технологические возможности сжатой дуги могут быть еще более расширены путем использования модуляции сварочного тока.

1.4. Модуляция сварочного тока как метод импульсного управления технологическими свойствами дуги

Управление технологическими свойствами сварочной дуги - это управление ее тепловым, силовым и физико-химическим воздействием на электрод. Оно преследует в основном две технологические цели: воздействие на процессы, связанные со стержневым электродом (управление плавлением и переносом металла), и воздействие на процессы в сварочной ванне и околошовной зоне (управление проплавлением металла, формированием металла шва, его первичной кристаллизацией, термическим циклом в околошовной зоне).

Управление технологическими свойствами сварочной дуги достигается путем непосредственного воздействия на энергетические и магнитогидродинамические процессы в самой дуге, например, изменением химического состава электродов или защитной газовой среды, изменением параметров режима, программным изменением величины (модуляцией) сварочного тока. Последний прием в настоящее время получил широкое признание среди специалистов-сварщиков всего мира.

Впервые способ дуговой сварки с модуляцией сварочного тока был предложен М.П.Зайцевым. В дальнейшем было разработано большое число способов и устройств для его реализации, получивших широкое распространение в промышленности.

По технологической направленности использования модуляции тока известные процессы дуговой сварки можно подразделить, главным образом, на две группы: процессы с управляемым переносом электродного металла и процессы с регулируемым проплавлением основного металла и формированием шва.

Первая группа процессов базируется на способе импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом, разработанным Б.Е.Патоном, А.Г.Потапьевским и Н.В.Подолой. Управление переносом достигается

наложением на дугу постоянного тока мощных кратковременных импульсов тока с частотой более 25 Гц, наиболее часто - 50 и 100 Гц. При этом их длительность не превышает нескольких миллисекунд. В этих условиях периодический тепловой поток дуги вследствие большой тепловой инерции сварочной ванны усредняется и поступает в металл практически непрерывным потоком [45].

Базовым способом второй группы процессов является способ сварки импульсной дугой, разработанный А.В.Петровым и Г.А.Славиным. В отличие от первой группы сварочных процессов дугу питают здесь током с пульсациями низкой частоты - до 10 Гц, что позволяет периодически изменять тепловой поток, вводимый в металл, и тем самым регулировать проплавление основного металла и формирование шва. При этом используют различные графики изменения тока. Технологические преимущества способа сварки импульсной дугой с прямоугольным графиком изменения тока в наибольшей мере проявились при сварке тонколистового металла. При сварке толстого металла предпочтительным оказался способ с экспоненциальной формой импульсов, который более полно учитывает условия теплоотвода в изделии и обеспечивает благоприятные условия для качественного формирования шва.

Следует заметить, что модуляция сварочного тока как способ импульсного управления технологическими свойствами дуги получила широкое распространение главным образом при сварке свободной дугой. При сварке сжатой дугой должного применения до настоящего времени она не получила. Это обусловлено недостаточной изученностью свойств и особенностей существования сжатого дугового разряда в условиях импульсного изменения тока.

Литературные данные по импульсной сжатой сварочной дуге немногочисленны и касаются главным образом ее устойчивости и тепловых характеристик. Установлено, что импульсный режим позволяет устойчиво работать (без двойного дугообразования) на токах, значительно превышающих ток

стационарного режима. Это, в свою очередь, дает возможность производить плазменную обработку при более высоких параметрах плазмы (температуре, скорости, энтальпии и т.д.).

Доказано, что тепловая эффективная мощность и эффективный КПД сжатой дуги при модуляции тока выше, чем для стационарной дуги при том же среднем значении тока. Модуляция тока влияет на осредненное во времени распределение теплового потока по аноду. Повышение частоты модуляции снижает плотность потока в центре и увеличивает диаметр пятна нагрева.

К противоположному выводу пришел В.П. Токмаков, изучая тепловые характеристики импульсной плазменной струи. Он считает, что по концентрации теплового потока импульсная плазменная струя приближается к электронному лучу и намного превосходит все мощные стационарные электрические дуги. Распределение удельного теплового потока импульсной плазменной струи по пятну нагрева удовлетворительно описывается кривой нормального распределения. При прямой полярности струя более сжата, имеет несколько больший коэффициент сосредоточенности и меньший диаметр пятна нагрева, чем при обратной полярности. Увеличение амплитуды импульса приводит к возрастанию максимального удельного теплового потока на оси струи. Условный диаметр пятна нагрева при этом несколько уменьшается. Для стационарной плазменной струи величина диаметра пятна нагрева почти не зависит от тока [46].

Распределение плотности тока по аноду в импульсном режиме следует практически синфазно за изменением тока сжатой дуги. При одиночных импульсах наблюдается сдвиг во времени между током импульса и плотностью тока в пятне. Поэтому постоянная времени, характеризующая переходные процессы дуги в плазмотроне при одиночном импульсе тока, по-видимому больше, чем при горении дуги в режиме модуляции.

Анализируя условия существования импульсного сжатого дугового разряда, отметим, что при горении сжатой дуги в режиме модуляции тока, по-

видимому, могут быть созданы условия для ее дополнительного контрагирования и соответственно расширения технологических возможностей, в том числе и проплавляющей способности.

Известно, что при определенных скоростях изменения тока наблюдается фазовый сдвиг между изменением тока разряда и его параметрами (размером столба, пятен дуги, температурой и пр.). Это обусловлено тем, что тепловые процессы играют определенную роль в динамике развития разряда. Тепловая постоянная времени столба дуги определяется главным образом теплофизическими параметрами плазмы и внешними условиями (обдувом дуги, геометрией сопла и др.), в то время как постоянная времени развития пятен - параметрами материала электродов, их размерами и геометрией.

При питании дуги повторяющимися импульсами тока время установления устойчивого разряда определяется полнотой протекания процессов ионизации в течение импульса тока и деионизации во время паузы, которые, в свою очередь, зависят от энергетических и временных характеристик процесса. Поэтому можно предположить, что если длительность протекания тока импульса будет меньше длительности перехода сжатого дугового разряда в устойчивое состояние, то диаметр активного пятна на металле не достигнет величины, соответствующей мгновенным значениям тока и напряжения импульсов, и сжатый дуговой разряд будет характеризоваться большим контрагированием, а следовательно и большей проплавляющей способностью. Косвенным подтверждением этого являются экспериментальные данные по свободной дуге с вольфрамовым электродом в аргоне Г.А. Славина и Е.А. Столпнера. Ими показано, что при питании свободной дуги кратковременными импульсами тока ее горение переходит в динамический режим. Проплавляющая способность такой дуги более чем на 30% выше, чем постоянно горящей дуги [47].

Многочисленными исследованиями условий проникания струи плазмы и формирования шва при сварке сжатой проникающей дугой установлено, что

качественное формирование (особенно металлов толщиной более 4 мм) обеспечивается лишь при минимальном объеме сварочной ванны. Этого можно достигнуть, используя плазмотроны с минимальным диаметром канала сопла. Однако их применение ограничивается возможностью возникновения аварийного режима - двойного дугообразования. Поэтому питание сжатой дуги кратковременными мощными импульсами тока с целью ее дополнительного сжатия для уменьшения диаметра столба дуги и повышения концентрации тепловой энергии на изделии может явиться эффективным приемом расширения ее технологических возможностей.

Значительно улучшить условия формирования шва при сварке сжатой проникающей дугой можно также путем питания дуги модулированным током с пульсациями низкой частоты - до 15 Гц. В этом случае плазменная струя погружается в сварочную ванну не постоянно, как при стабильном плазменном процессе в непрерывном режиме, а периодически, образуя характерное проплавление в виде "замочной скважины". При этом в более широком диапазоне токов достигается высокое качество, уменьшается общий нагрев изделия, снижается его деформация. Процесс незаменим там, где необходимо обеспечить соединение деталей в условиях неравномерного теплоотвода. Импульсный режим позволяет преодолеть одну из главных трудностей сварки со сквозным проплавлением - необходимость очень точного поддержания параметров режима сварки. Он также позволяет достаточно просто осуществить управление процессом с обратной связью по проплавлению. В качестве сигнала обратной связи при этом наиболее целесообразно использовать величину напряжения скрытой составляющей длину дуги.

1.5. Плазменная дуговая сварка: процесс, зондирование, управление и моделирование

Плазменная дуга достигает высокой температуры и скорости из-за сжатия, образуя сплавление металлических деталей. Одного

плазмообразующего газа недостаточно для защиты металла сварного шва, и поэтому большой объем инертного защитного газа пропускается через внешнее газовое сопло, окружающее внутреннее сопло. В качестве защитных газов используются аргон или гелий. [51]

В плазменной сварке сжатой дугой PAW существует два режима работы: плавление и сварка в замочную скважину рис.1. Когда энергия передается на заготовку из плазменной дуги, энергия распространяется по поверхности и немедленно вызывает нагрев и преобразование кинетической энергии. Если скорость, с которой происходит введение энергии, превышает скорость, с которой отводится тепло, температура повышается, что в конечном итоге приводит к плавлению и образованию сварного шва. Этот режим введения энергии и осуществления сварки называется режимом плавки или режимом проводимости. Если плотность энергии, поступающей из плазменной дуги достаточно высока, скорость, с которой она вводится, значительно превышает скорость, с которой она отводится, поступая в заготовку. [50] В этом случае плазменная дуга может проходить через расплавленный бассейн и образовывать небольшое сквозное отверстие в сварочной ванне, называемое замочной скважиной. Перемещение сварочной горелки и связанной с ней замочной скважины вызовет поток расплавленного металла, окружающего замочную скважину, в тыльную часть, где она образует обратный сварной шов. Это режим замочной скважины. Режим замочной скважины дает большее проплавление, чем режим плавки.

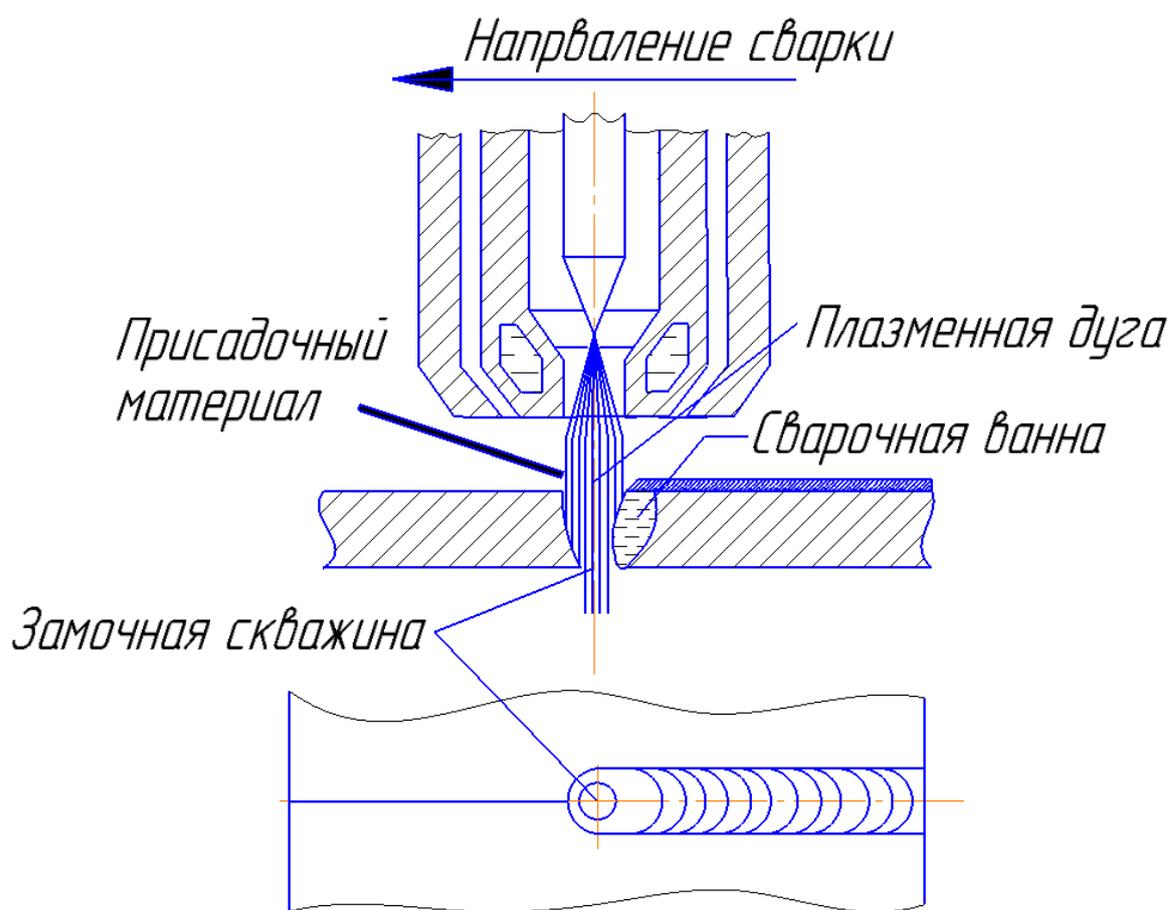


Рисунок 1- Схема плазменной дуговой сварки в замочную скважину.

Дуга, используемая в РАВ, сжимается небольшим соплом и имеет гораздо более высокую скорость (300-2000 м/с) и интенсивность ввода тепла (109-1010 Вт/м²), чем при обычной сварке вольфрамовым электродом (GTAW). [48] Как следствие, РАВ имеет много преимуществ по сравнению с GTAW, с точки зрения глубины проникновения, подготовки швов, тепловых деформаций и т.д. Конкретнее, РАВ имеет следующие характеристики:

1. РАВ предлагает большую скорость сварки, большую концентрацию энергии и высокую эффективность, чем GTAW, что делает его одним из самых эффективных процессов во многих смыслах. РАВ обладает лучшим проникновением, чем GTAW. Кроме того, при сварке в режиме проплавления в

замочную скважину сварные швы получаются с полным проплавлением что дает возможность варить относительно толстый материал за один проход.

2. PAW - это процесс дуговой сварки, который использует неплавящийся вольфрамовый или из вольфрамового сплава электрод. Утопленный электрод в сопле является преимуществом - меньше загрязняется электрод, что увеличивает срок службы электрода. Электрод, как правило, может использоваться всю смену без заточки.

3. Не смотря на то, что дуга сжата, плазменный столб имеет значительно больший диаметр, чем электронный или лазерный луч. PAW сводит к минимуму необходимость дорогостоящей подготовки швов и уменьшает или устраняет необходимость в присадочном материале.

4. Большое отношение глубины к ширине сварного шва выполненного плазменной дугой, по сравнению с сваркой GTAW, также может значительно уменьшить угловые и остаточные напряжения. Более узкая ЗТВ, меньше внутренних дефектов и лучшее качество сварки делают его эффективным методом для сварки тех конструктивных элементов, обратные стороны которых трудно сваривать, таких как герметичный контейнер или труба малого диаметра.

Однако, хотя PAW имеет потенциал заменить GTAW во многих ситуациях в качестве лидирующего процесса для точного соединения, оборудование PAW является более сложным и дорогостоящим, а потребность в водяном охлаждении не дает возможности сделать горелку маленького размера. Так же, системы электроснабжения и электроуправления сложнее, чем у системы GTAW. Кроме того затруднительны настройка и установка параметров, за счет высоких требований к сборке горелки, сопла и качеству вольфрама. [47]

Как уже упоминалось, плазменная дуговая сварка обычно используется в двух режимах работы: обычное плавление сварных швов и сварные швы в замочную скважину, разница в том образуется ли замочная скважина или нет во время сварки. Режим плавки выполняется с более мягкой, менее суженной дугой, с использованием более низких скоростей газового потока плазмы. Это способствует некоторому увеличению ширины сварного шва, чем при сжатой дуге. Этот тип сварки используется как при односторонней сварки с формированием обратного валика корня шва тонких пластин, так и при двусторонней сварки или многослойной сварки толстых пластин. При токе ниже 30 А данная сварка называется микроплазменной.

Сварка в замочную скважину обычно производится с использованием жесткой и сжатой дуги. При увеличении скорости плазменного потока и перемещении электрода отверстие, известное как «замочная скважина», пробивается по всей толщине металла через лицевую поверхность сварочной ванны, где силы плазменной дуги вытесняют расплавленный металл. Обычно этот метод используется для сварных стыков без разделки кромок при толщине материала от 2,4 мм до 8 мм, требующих 100% проплавления за один проход. [49] По сравнению с лазерной и электронно-лучевой сваркой, сварка в замочную скважину PAW более экономична и более неприхотлива к подготовке деталей, несмотря на менее плотную вводимую энергию более широкий сварной шов. Таким образом, сварка в замочную скважину PAW нашла применение в сварке конструкционных сталей, автомобилей, самолетов, ракет, космических челноков.

Сварка в замочную скважину включает в себя несколько типов: дуговую сварку постоянным током, импульсную плазменную дуговую сварку, плазменную сварку с переменной полярностью.

1. Плазменная дуговая сварка постоянным током. На начальном этапе исследования плазменной дуговой сварки в первую очередь применялся

постоянный ток. Постоянный ток в РАW зависит от толщины пластины и требования к проникновению. Небольшое колебание параметров сварки (например скорость сварки, толщина изделия, сварочный ток) приведет к закрытию отверстия замочной скважины и вывода из стабильного состояния сварочного процесса из-за отсутствия термодинамического равновесия, которое в свою очередь зависит от множества факторов. Следовательно, для стабильного процесса сварки в замочную скважину необходимо выбирать правильные режимы. Применение данной разновидности сварки узконаправленно из-за небольших границ регулирования.

2. Импульсная плазменная сварка. Во время процесса РАW внутри ванны формируется замочная скважина, которая чувствительна к любым изменениям параметров сварки. Замочная скважина в обычном состоянии узкая. Для ее расширения в квазистационарном состоянии применяется импульсный ток для создания одной замочной скважины для каждого импульса тока, при этом импульс сварочного тока имеет прямоугольную форму. После образования замочной скважины, ток переключается с пикового тока на низкий базовый ток, вследствие чего замочная скважина закрывается во избежание прожога.

Пульсирующий нагрев металла расширяет регулируемый диапазон тепловложения при сварке и уменьшает накопление тепла на металле. В результате появляется возможность контролировать тепловложение при сварке, что гарантирует хорошее качество сварочного шва во всех пространственных положениях. Однако, для прямоугольной формы импульса тока режим «одна замочная скважина на каждом импульсе» подходит лишь для сварки листов металла тоньше 4 мм. [51]

3. Плазменная дуговая сварка с переменной полярностью (VPPAW). Плазменная дуговая сварка с переменной полярностью сочетает в себе уникальные возможности плазменной сварки в замочную скважину с

циклической переменной полярности тока. Это дает множество преимуществ для сварки алюминия, например в аэрокосмической промышленности.

Когда на электроде «минус» (прямая полярность), при сварке плазменной дугой обеспечивается большее тепловыделение на поверхности изделия чем на вольфрамовом неплавящемся электроде, тепловыделение на котором сводится к минимуму. Но это создало бы неустойчивую дугу и неправильную форму сварного шва. Обратная полярность (на электроде положительный, на изделии отрицательный полюс) имеет преимущество в том, что поверхность изделия подвергается процессу очистки из-за явления очистки катода, при столкновении тяжелых (по сравнению с электронами) положительных ионов на поверхности детали происходит испарение оксидов из-за высокой плотности тока на катодном пятне. [47]

Импульс тока, имеющий прямоугольную форму, питающийся от переменного тока с неравными по времени отрезками прямой и обратной полярности, предлагает комбинацию высокого тепловложения прямой полярности с явлением очистки при сварке на обратной полярности. Достаточная очистка достигается за счет включения относительно короткого (от одной десятой до одной пятой длительности тока прямой полярности) импульса тока обратной полярности в промежуток времени основного сварочного тока. [47]

При плазменной дуговой сварке качество сварного шва зависит от большого числа факторов, особенно от физических характеристик свариваемого материала и используемых параметров сварки. Параметры сварочного процесса должны быть тщательно сбалансированы для поддержания стабильности замочной скважины и сварочной ванны. Неустойчивость может привести к дефектам в сварном шве, таким как чрезмерное проплавление или неполное проплавление. [48] Основными параметрами, оказывающими сильное влияние на качество сварки, являются

форма и размер сопла, вылет вольфрамового электрода, расстояние от сопла до изделия, марка и толщина вольфрамового электрода, сварочный ток, состав и скорость потока плазмообразующего газа, скорость сварки, состав и скорость потока защитного газа и т. д.

1. Форма и размер плазмотрона. Форма и размер плазмотрона являются основной гарантией надежного и стабильного процесса сварки, а также основным фактором, влияющим на качество сварки. В частности, наиболее важными параметрами являются диаметр сопла и величина вылета электрода.

2. Марка и толщина вольфрамового электрода. Вольфрамовые электроды используются при дуговой сварке в процессе TIG и PAW. В обоих случаях электрод, дуга, сварочная ванна защищены от атмосферного вредного влияния инертным газом. Вольфрамовый электрод используется потому, что он способен выдерживать очень высокие температуры с минимальным плавлением или разрушением. Вольфрамовые электроды обычно содержат небольшие количества других металлических оксидов, которые дают некоторые преимущества, такие как облегчение зажигания дуги, повышение стабильности горения дуги, повышение токопроводящей способности электродного стержня, снижение риска загрязнения шва и увеличение срока службы электрода.

Диаметры вольфрамовых электродов зависят от сварочных токов. Для более высокого тока требуется электрод большего диаметра.

3. Вылет вольфрамового электрода. Вылет вольфрамового электрода это расстояние между концом электрода и нижнем срезом сопла. Этот параметр оказывает существенное влияние на формирование сварных швов и проникновение дуги.

4. Состав и скорость потока плазмообразующего газа. Плазмообразующий газ непосредственно влияет на плазменную струю и

качество сварки. Состав плазмообразующего газа и его скорость потока оказывают сильное влияние на формирование сварочной ванны, на форму сварного шва, на скорость сварки и на дефекты сварного шва. В качестве плазмообразующего газа обычно используют смеси аргона, аргона и водорода.

5. Сварочный ток. Сварочный ток влияет на качество сварки за счет давления дуги и температуру дуги. Исследования показывают, что повышенный сварочный ток увеличивает ширину сварочного шва как на лицевой поверхности, так и в корне шва. Низкая сила тока вызывает недостаточное проплавление и незначительные. Большая сила тока вызывает повреждение электрода сразу после начала или в процессе сварки.

Влияние сварочного тока на качество сварки почти всегда связано со скоростью сварки, типом плазмообразующего газа и скоростью потока. Формирование и механические свойства сварного шва будут лучше, если использовать низкий расход плазмообразующего газа и высокий сварочный ток. В то же время скорость сварки будет выше, что приведет к большей экономичности.

6. Скорость сварки. Существует широкий диапазон скорости сварки для получения качественных сварных швов при подходящем сварочном токе. Конечно, слишком высокая скорость сварки относительно других параметров, особенно сварочного тока, приведет к подрезанию и к неполному проплавлению. Напротив, недостаточная скорость сварки приводит к чрезмерному проплавлению. Желательно осуществлять процесс сварки с наивысшей возможной скоростью для экономической эффективности.

7. Расстояние от сопла до изделия. При сварке в замочную скважину расстояние от сопла до изделия не является очень важным параметром из-за высокой жесткости дуги. Но слишком маленькая длина приведет к узкому сварному шву и подрезанию, слишком длинная дуга будет оказывать влияние

на глубину проплавления и качество сварки. Как правило рекомендуемое расстояние составляет 3-12 мм.

8. Состав и скорость потока защитного газа. Влияние защитного газа на качество сварки плазменной дугой не так важно, как влияние плазмообразующего газа, но его нельзя полностью игнорировать. Влияние особенно заметно при сварке корня шва. Распространенными защитными газами являются смеси аргона, аргона-водорода, аргона-углекислого газа и аргона-кислорода.

Плазмотрон имеет медное сопло с водяным охлаждением, чтобы сжимать плазменную дугу за счет теплового пинч-эффекта. Таким образом, появляется возможность создания плазменной дуги с высокой плотностью энергии и высоким давлением плазменной струи. Когда плазменная дуга зажигается, она расплавляет материал и создает сварочную ванну. Из-за высокой скорости и импульса сварочного тока плазменная дуга может проникать через сварочную ванну и образовывать замочную скважину. Перемещение сварочной горелки и связанной с ней замочной скважины образует поток расплавленного металла, окружающего замочную скважину, на тыльной стороне изделия кристаллизуется корневой шов с обратным валиком. [50]

На практике относительное перемещение между плазменной струей и заготовкой часто не происходит до тех пор, пока не будет достигнуто полное проплавление в замочную скважину. Процесс образования замочной скважины, проходит следующие этапы:

1. Закрытая замочная скважина. Внутри сварочной ванны образуется полость, но она полностью не проникает через заготовку.

2. Нестабильная открытая замочная скважина. Полость в сварочной ванне перешла в сквозную замочную скважину. Поскольку открытая замочная

скважина только что установилась, она нестабильна и может мгновенно закрыться в течение очень короткого периода времени.

3. Открытие замочной скважины в квазистационарном состоянии. Открытая замочная скважина постоянно поддерживается. Между тем, размер замочной скважины варьируется в пределах ограниченной области.

Размер и форма замочной скважины, создаваемой RAW, зависит главным образом от давления воздействующей плазменной струи.

При сварке в замочную скважину качество сварного шва зависит от стабильности ключевого отверстия, которое зависит от теплопередачи и потоков жидкого металла внутри сварочной ванны. Тем не менее, многие факторы влияют на стабильность замочной скважины. Потоки жидкого металла и теплопередачи оказывают большое влияние при сварке в замочную скважину, где сварочная ванна соединена с замочной скважиной, и оба они динамически взаимодействуют друг с другом.

Основной силой, стремящейся сформировать и удерживать замочную скважину, является давление плазменного потока. Давление обратного потока, оказываемое с поверхности сварочной ванны из-за испаряющихся частиц, покидающих поверхность, играет незначительную роль в сварке. Силы, стремящиеся закрыть замочную скважину, включают силу гравитации и поверхностное натяжение. Гравитация в любой точке жидкости, окружающей замочную скважину, прямо пропорциональна плотности и высоте металла над ней. Эффект поверхностного натяжения - это сила, которая стремится минимизировать площадь поверхности расплавленного металла. В замочной скважине перед преодолением поверхностного натяжения имеется тенденция к повышению давления дуги плазмы и давления обратного потока. [47]

Внутри сварочной ванны, окружающей замочную скважину, действуют четыре основные силы, определяющие поток жидкости и теплообмен: давление

плазменной дуги, поверхностное натяжение, выталкивающая и электромагнитная силы.

При плазменной дуговой сварке в замочную скважину устойчивость замочной скважины является важным фактором, влияющим на стабильность сварочного процесса и качество сварного соединения. Таким образом, мониторинг, зондирование и контроль состояния замочной скважины очень важны для достижения безупречных и высококачественных сварных швов.

Зондирование сигнала напряжения плазменного потока.

Когда образуется открытая замочная скважина, плазменный поток будет выходить через замочную скважину. Часть металлического листа выбирается в качестве сигнального датчика, установленного под обрабатываемой деталью для сварки и изоляции. Из-за явления пространственного заряда плазмы плазменный поток устанавливает электрический потенциал между заготовкой и детектором. Однако, если открытая замочная скважина не установилась или закрыта из-за недостатка тепла и силовых воздействий, между заготовкой и детектором не устанавливается электрический потенциал. Следовательно, электрическое напряжение, возникающее из-за потока плазмы, можно измерить, чтобы судить о возникновении замочной скважины и о ее размере. Существует взаимосвязь между сварочным током, напряжением плазмы и ширины обратного валика. Во время процесса сварки увеличение сварочного тока в некотором диапазоне вызывает более сильный нагрев и силовое воздействие от дуговой плазмы, так что размер замочной скважины возрастает по мере увеличения сварочного тока. Увеличение размера замочной скважины приводит к увеличению напряжения плазмы и более широкому сварной шву с обратной стороны. [47]

Но это косвенный подход, связывающий амплитуду электрического потенциала с интенсивностью плазмы, выходящей из замочной скважины.

Зондирование звукового сигнала

При различных условиях процесса сварки на переменном токе, соответствующая сварочная ванна производит различный акустический сигнал, который может быть обнаружен для классификации трех состояний сварочной ванны. Однако надежность датчиков, основанных на звуковом сигнале, не удовлетворительна из-за помех от шумов окружающей среды.

Зондирование светового сигнала

Свечение плазменной дуги было однажды обнаружено спектроскопическим подходом для получения информации о образовании и разрушении ключа. Но сигнал обнаружения не может точно отражать размер замочной скважины в реальном времени.

Датчик заряда плазменного облака

Чтобы надежно определить состояние замочной скважины разработанные датчики для контроля отражения плазмы. Когда замочная скважина не полностью проникла (закрытая замочная скважина), плазменная дуга должна быть отражена от полости. После того, как замочная скважина будет полностью установлена (открытая замочная скважина), плазменная струя выйдет через отверстие замочной скважины, так что количество отраженной плазмы, если таковое имеется, будет значительно меньше. Датчик заряда плазменного облака контролирует эффект динамического изменения заряда плазменного облака над поверхностью заготовки. Напряжение между зондом и заготовкой может отражать угол облака плазмы, который является индикатором состояния замочной скважины. Однако такой зондирующий подход также является косвенным и не дает количественной информации о форме и размере открытой замочной скважины. [51]

Зондирование визуального изображения

Датчик визуального распознавания может предоставить более прямую информацию о состоянии и размере ключа. Система камер включает в себя блок стробоскопической подсветки (импульсный лазер), головной блок камеры и системный контроллер. Камера синхронизируется с лазерным импульсом, поэтому интенсивность лазерного облучения во время пика была значительно выше, чем интенсивность плазменного потока. Но такая лазерно-стробоскопическая система сложна и очень дорога на практике.

Дешевый визуальный датчик более привлекателен для восприятия замочной скважины в процессе РАВ. Камера оснащена узкополосным фильтром пропускания (центральная длина волны 655 нм, ширина полосы 40 нм и прозрачность 85%) и нейтральный фильтр, а также захват изображения. Большой размера факела препятствует наблюдению за изображением замочной скважины с верхней стороны изделия. Таким образом, камера нацелена на обратную сторону изделия для наблюдения за изображением замочной скважины. Если обрабатываемая деталь полностью проплавлена и образована открытая замочная скважина, изображение замочной скважины будет захвачено камерой. Во время сварки и факел и камера неподвижны, а обрабатываемая деталь движется со скоростью сварки, которая контролируется компьютером. Наблюдение направлено к задней части сварочной ванны, угол обзора установлен на 50°. Расстояние от объектива камеры до исследуемой плоскости составляет около 150 мм. После калибровки камеры и обработки изображения можно определить форму и размер замочной скважины

Так в режиме реального времени можно точно определить состояние замочной скважины (открытой или закрытой, а также форму и размер). Для установления корреляции между управляющими переменными и управляемой переменной разработаны некоторые специальные алгоритмы управления, такие как алгоритм пропорционального и интегрального управления, алгоритм

прогнозирования управления, алгоритм управления интервальной моделью и алгоритм управления нелинейной моделью интервалов.

Моделирование

Формирование и устойчивость замочной скважины, а также окружающее ее поведение сварочной ванны связаны со сложными явлениями, такими как динамический баланс различных сил, действующих на поверхности замочной скважины и сварочной ванны, поток плазмы и теплообмен, плавление и кристаллизация. Все эти физические явления оказывают решающее влияние на качество сварного шва. Чтобы успешно реализовать замочную скважину, необходимо четко понимать механизм процесса, связанного со всеми физическими явлениями. Поэтому очень важно смоделировать динамическое развитие замочной скважины и связанного с ней физического поведения в процессе сварки.

1.6. Задачи исследования

Проведенный анализ литературных данных показал, что сжатая сварочная дуга, формируемая каналом плазмотрона, имеет значительно более широкие возможности по управлению ее технологическими свойствами, чем свободно горящая дуга. Широко используется она, как правило, в непрерывном режиме горения, который не всегда оптимален и в настоящее время практически исчерпал свои технологические возможности. В ряде случаев представляет практический интерес использование плазменных установок, предназначенных для работы в импульсном режиме, обеспечиваемом модуляцией сварочного тока. Модуляция тока позволяет воздействовать на физические процессы, протекающие в сжатой дуге, управлять ее силовым и тепловым воздействием на металл и тем самым значительно расширить технологические и физические возможности дуги и повысить ряд технико-экономических показателей плазменных методов обработки материалов. Однако широкому внедрению сжатой импульсной дуги в производство препятствует несовершенство

существующих способов и средств управления плазменными процессами, обусловленное недостаточной изученностью физических свойств сжатой импульсной дуги и их взаимосвязи с ее технологическими и физическими свойствами.

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что для создания надежных способов активного управления процессами плазменной обработки материалов с целью оптимального с точки зрения качества, ресурсо- и энергосбережения использования сжатой импульсной дуги необходимо исследовать механизм взаимодействия между сжатым дуговым разрядом в условиях импульсного ввода энергии с технологическими и физическими свойствами дуги. При выполнении данной работы были поставлены следующие задачи:

1. Установить зависимость коэффициента «уровня технологичности» от среднего значения сварочного тока.
2. Исследовать условия обеспечения удовлетворительного формирования проплава при плазменной сварке модулированным током.
3. Определить изменение ширины и высоты проплава в зависимости от величины тока импульса.
4. Исследовать влияние на микроструктуру металла шва при плазменной сварке проникающей дугой в импульсном режиме.

2. Исследование физических особенностей сжатой сварочной дуги

Выше было показано, что возможности импульсного управления технологическими свойствами сжатой сварочной дуги ограничиваются в основном недостаточной изученностью ее физических особенностей. В связи с этим в настоящем разделе представлены результаты исследования влияния импульсного изменения тока на условия существования сжатого дугового разряда и на этой основе рассмотрены пути расширения его технологических возможностей.

2.1. Методы исследования, материалы и оборудование

Для коммутации сварочной цепи при плазменной сварке в качестве полупроводникового ключа принципиально могут быть использованы как транзисторы, так и тиристоры со схемой принудительного выключения. Однако на современном уровне развития полупроводниковой техники использование последних предпочтительнее. Поэтому в работе в качестве полупроводникового ключа силовой части модулятора использовали тиристорный ключ.

Надежность работы тиристорного ключа в сварочной цепи зависит прежде всего от правильного выбора схемы принудительного выключения тиристоров. В настоящее время разработано большое количество таких схем. Анализ условий работы их в сварочной цепи источников постоянного тока показал, что наиболее полно этим условиям удовлетворяет схема принудительной двухступенчатой коммутации последовательного типа. На ее основе было разработано устройство для сварки модулированным током как длинной, так и короткой дугой.

С целью расширения регулировочных характеристик модулятора применительно к экспериментальным исследованиям сжатой импульсной дуги на основе указанной выше схемы был разработан новый вариант устройства, схема которого приведена на рис.2.

Устройство содержит сварочный источник питания постоянного тока ИП, фильтрующий конденсатор C_1 , блокирующий диод VD_2 , силовой тиристор VS_1 , коммутирующий контур, состоящий из коммутирующего конденсатора C , вспомогательного тиристора VS_2 , коммутирующего дросселя L_1 , цепочки форсированного перезаряда коммутирующего конденсатора, состоящей из тиристора VS_4 и дросселя L_3 , и цепочки "сброса" (перезаряда) избыточной энергии коммутирующего конденсатора, состоящей из тиристора VS_5 и дросселя L_4 , цепь заряда, состоящую из блокирующего тиристора VS_3 , и зарядного дросселя L_2 . Принцип работы устройства в целом аналогичен предыдущему. Отличие заключается в дополнительном введении параллельного коммутирующему конденсатору цепочки его форсированного перезаряда и цепочки "сброса" избыточной энергии коммутирующего конденсатора.

Введение в устройство двух дополнительных цепочек позволяет форсировать электромагнитные процессы в схеме принудительной коммутации на всех стадиях перезаряда коммутирующего конденсатора и тем самым ускорить в десяток раз общий цикл коммутации повысить экономичность и надежность работы устройства.

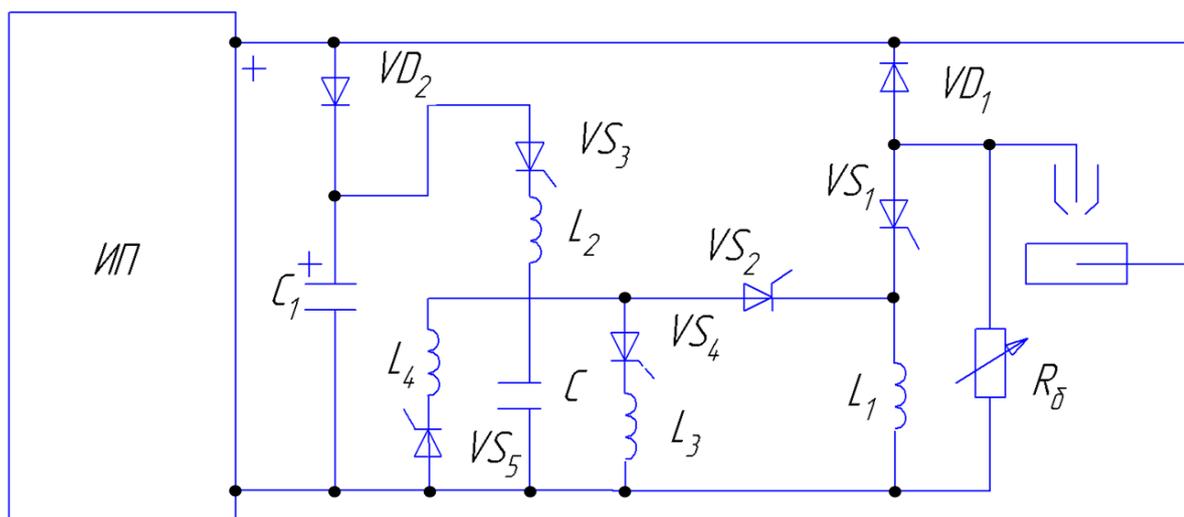


Рисунок 2- Схема силовой части модулятора сварочного тока

Опыты проводили на установке, состоящей из плазмотрона, имитатора изделия, источника постоянного тока, тиристорного модулятора сварочного тока, устройства для зондирования дуги, пускорегулирующей и регистрирующей аппаратуры (рис. 3).

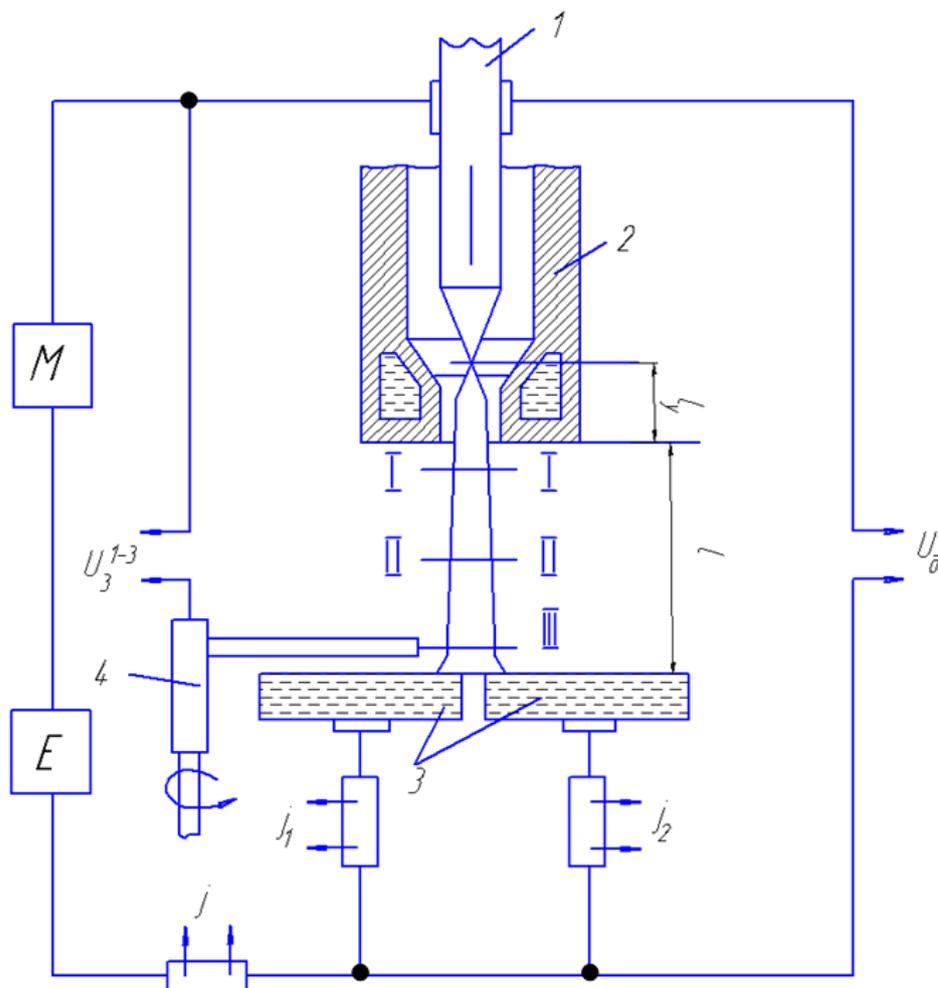


Рисунок 3 - Схема установки для исследования импульсной сжатой дуги
 1- вольфрамовый стержневой электрод; 2- медное водоохлаждаемое сопло; 3 - имитатор изделия (медные водоохлаждаемые пластины); 4- устройство зондирования; I, II, III – 3 участка зондирования; E и M- источник питания и модулятор соответственно; l_y - расстояние между электродом и верхним срезом цилиндрической части канала сопла плазмотрона; l - расстояние между плазмотроном и имитатором изделия

Плазмотрон имел вольфрамовый стержневой электрод (катод) 1 и медное водоохлаждаемое сопло 2 с рабочим каналом диаметром 4 мм. Расстояние

между электродом и верхним срезом цилиндрической части канала сопла составляло 3 мм. В качестве имитатора изделия использовали медную водоохлаждаемую пластину (анод) 3 разделенную на две части, каждая из которых имела автономное охлаждение и токоподвод. Источником питания Е являлся выпрямитель ВКСМ-1001 с балластным реостатом РБ-301. При необходимости для надежного возбуждения дежурной дуги параллельно с основным источником питания включали вспомогательный выпрямитель с повышенным напряжением холостого хода и крутопадающей внешней характеристикой. В качестве модулятора М служил специально разработанный на основе устройства быстродействующий тиристорный коммутатор (см. пп. 2.1).

2.2. Влияние импульсного изменения тока на степень контрагирования плазменной дуги

Для измерения электрических параметров плазменно-дугового разряда в режиме модуляции использовали электроннолучевой двухканальный осциллограф и безындукционный шунт коаксиального типа. Все эксперименты проводили при использовании аргона в качестве плазмообразующего и защитного газов. Расход плазмообразующего газа составлял 5 л/мин, а защитного - 15 л/мин.

Анализ литературных данных по импульсной сжатой сварочной дуге позволяет предположить, что при ее горении в режиме модуляции тока могут быть созданы условия для ее дополнительного контрагирования, а следовательно, и для повышения ее проплавляющей способности.

Влияние импульсного изменения тока на условия контрагирования дуги оценивали по величине диаметров электропроводного канала столба дуги и активного анодного пятна, а также критериями: степенью контрагирования столба дуги ε_c и степенью контрагирования активного пятна ε_{Π} :

$$\varepsilon_c = D_c^0 / D_c^M; \quad \varepsilon_{\Pi} = D_{\Pi}^0 / D_{\Pi}^M \quad (1)$$

где D_c^0 и D_n^0 - соответственно диаметры электропроводного канала столба сжатой дуги и активного анодного пятна в режиме постоянного тока; D_c^M и D_n^M - то же в режиме модуляции тока.

Размеры столба дуги определяли в трех сечениях (рис. 2) проволочными вольфрамовыми зондами диаметром 0,5 мм, укрепленными на изоляционной колодке 4, известным методом вращающегося зонда, а размеры анодного пятна - методом разрезного анода.

Ожидаемый эффект дополнительного контрагирования дуги под воздействием импульсного изменения тока должен повышаться с увеличением полноты протекания процессов деионизации в течение паузы между импульсами тока. Поэтому предварительно изучали влияние длительности паузы на состояние межэлектродного промежутка.

Известно, что возможность повторного возбуждения дуги после ее гашения определяется интенсивностью остаточных термоэлектрических явлений между электродами, обуславливающих проводимость межэлектродного промежутка. Продолжительность существования проводимости после погасания дуги зависит от скорости выключения тока, состава газовой среды, материала электродов. Результаты экспериментального исследования межэлектродного промежутка после гашения сжатой дуги посредством выключения сварочного тока со скоростью $5 \cdot 10^5$ А/с показали, что его проводимость существует в течение $(4-7) \cdot 10^{-2}$ с. Однако повторное самопроизвольное возбуждение дуги при этом возможно лишь при длительности прерывания тока менее $(0,8-1,2) \cdot 10^{-2}$ с. Поэтому указанное время приняли за критическое значение длительности паузы, выше которой дуговой разряд переходит в неустойчивое состояние.

Следует заметить, что в импульсном режиме горения дуги критическое значение длительности паузы с уменьшением длительности импульсов тока ниже $6 \cdot 10^{-4}$ с уменьшается. Полученные критические значения длительности

паузы учитывали при выборе режимов сварки в серии опытов по изучению влияния временных параметров импульсов тока на степень контрагирования дуги.

Результаты экспериментов по исследованию влияния длительности импульсов тока τ_u на степень контрагирования столба сжатой дуги ε_c приведены на рис. 4. Видно, что дополнительное сжатие (контрагирование) плазменной

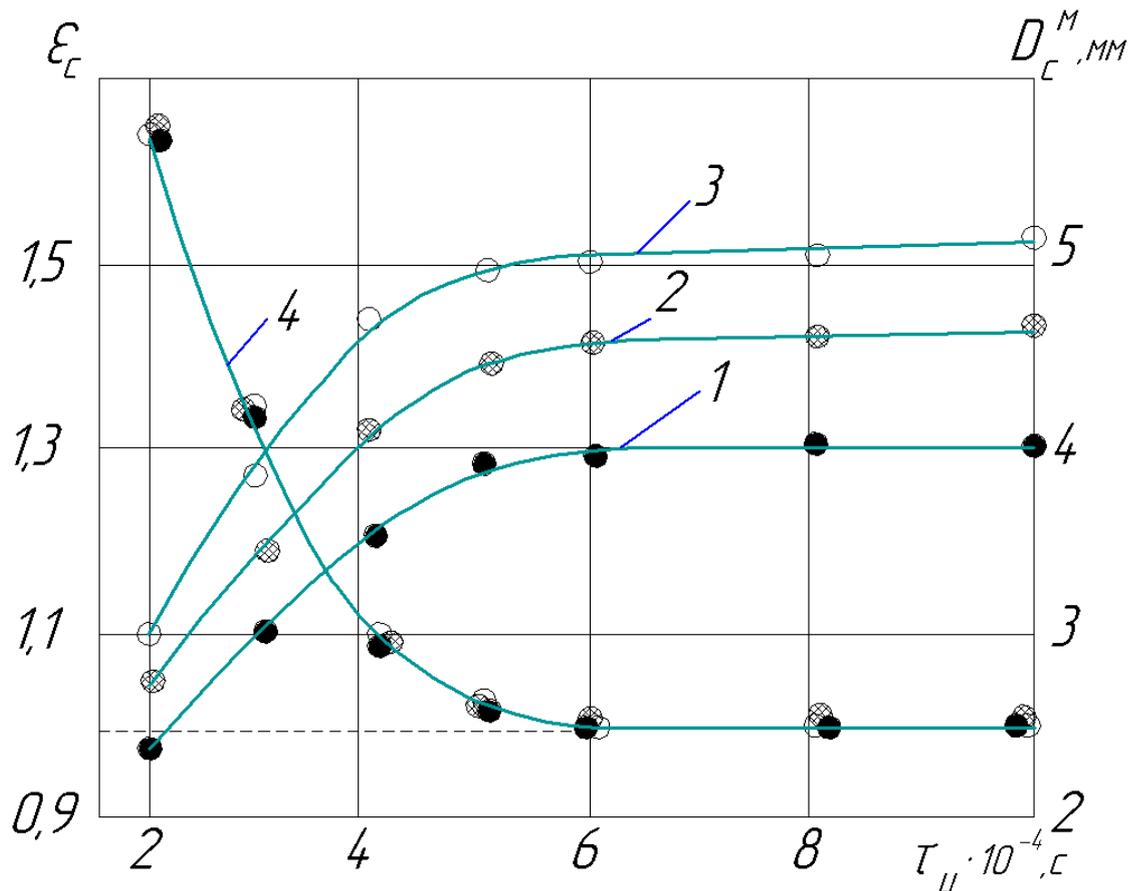


Рисунок 4 - Зависимость степени контрагирования столба плазменной дуги и его диаметра от длительности импульсов тока

1,2 и 3 -расстояние l между нижним срезом сопла плазмоторона и анодом соответственно 7, 14 и 21 мм; 4- степень контрагирования столба плазменной дуги; величина тока импульса 180 А

дуги под воздействием импульсного изменения тока наблюдается лишь при малых значениях длительности импульсов тока. При этом, чем меньше длительность импульсов тока, тем сильнее контрагирует плазменная дуга. С уве-

личением длительности импульсов тока степень контрагирования уменьшается и диаметр столба плазменной дуги растет. При длительности импульсов тока $6 \cdot 10^{-4}$ с степень контрагирования столба импульсной плазменной дуги приближается к значению степени контрагирования плазменной дуги постоянного тока, которое условно принято за единицу (штриховая линия).

Зависимости степени контрагирования активного анодного пятна ϵ_n и плотности тока в нем от величины тока импульса I_u представлены на рис. 5.

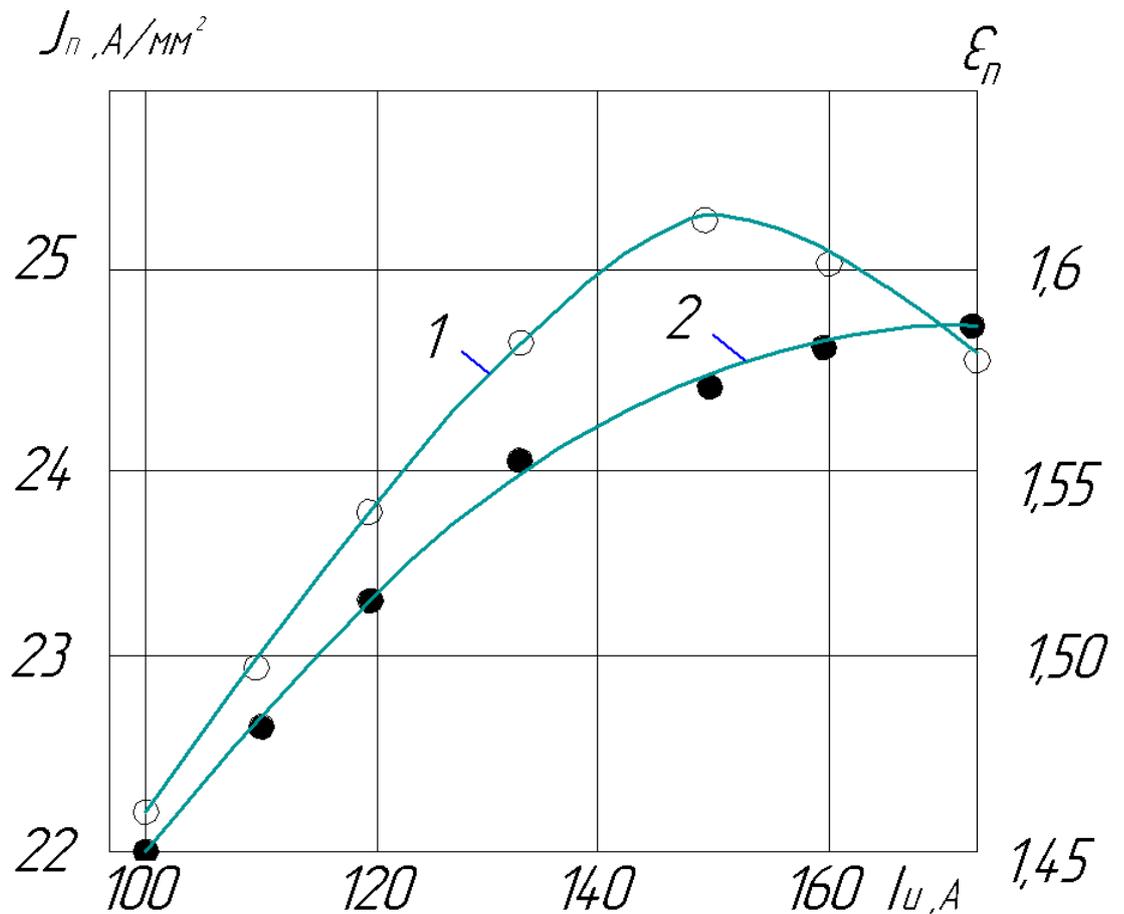


Рисунок 5 - Зависимость степени контрагирования активного анодного пятна и плотности тока в нем от величины тока импульса

1- степень контрагирования активного анодного пятна; 2- плотность тока в активном анодном пятне ($\tau_u = 2,5 \cdot 10^{-4}$ с; $l = 10$ мм)

2-

График изменения степени контрагирования активного анодного пятна при токе импульса 150 А имеет явно выраженный максимум, а его плотность

тока с ростом величины тока импульса стремиться к насыщению. Это означает, что при увеличении величины тока импульса до 150 А контрагирование плазменной дуги увеличивается, хотя в абсолютном выражении незначительно. Дальнейшее увеличение величины тока импульса приводит к некоторому снижению контрагирования плазменной дуги, однако плотность тока в активном пятне сохраняется высокой.

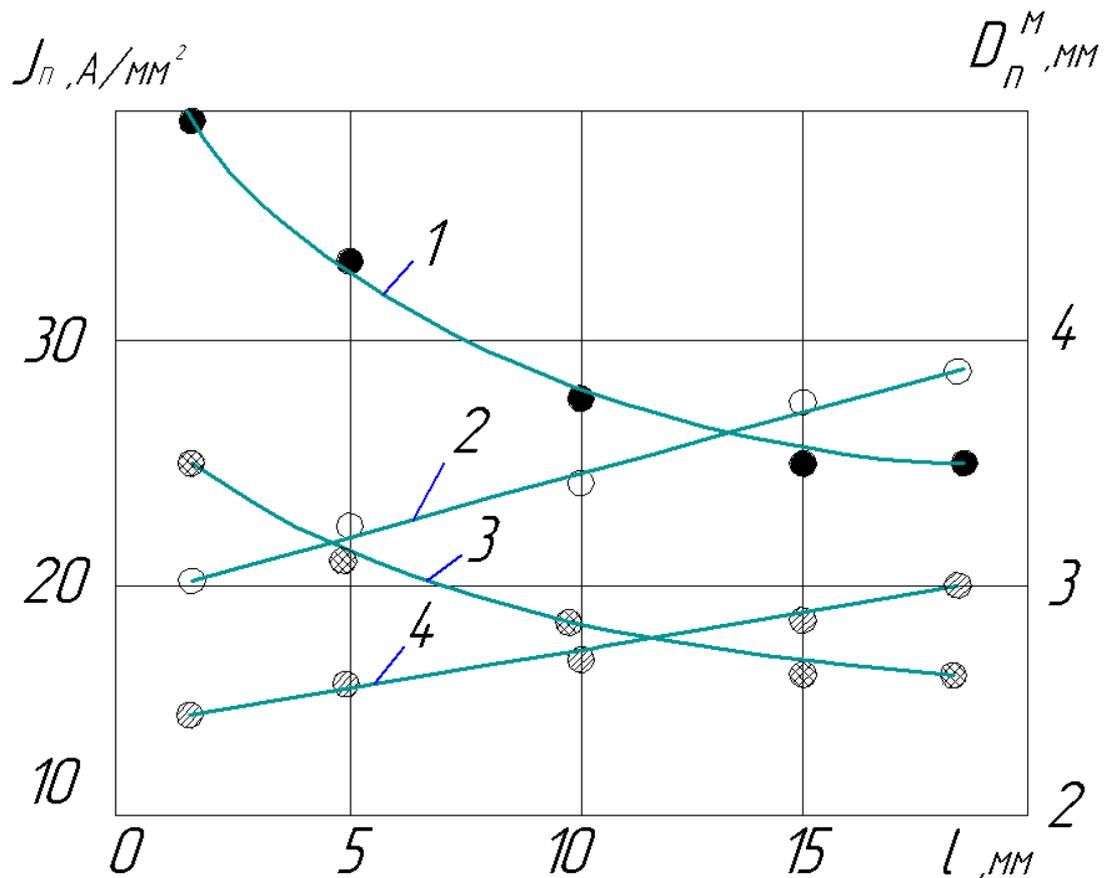


Рисунок 6 - Зависимость плотности тока в анодном пятне и его диаметра от расстояния между нижним срезом сопла плазматрона и анодом при различных длительностях импульсов тока

1,3- плотность тока в анодном пятне ($I_u = 180$ А); 2, 4- диаметр анодного пятна;
 1, 4 - $\tau_u = 2 \cdot 10^{-4}$ с; 2, 3 - $\tau_u = 3 \cdot 10^{-4}$ с

Зависимость плотности тока в анодном пятне и его диаметра от расстояния между нижним срезом сопла плазматрона и анодом для различных значений длительностей импульсов тока приведены на рис. 6. Видно, что с уве-

личением расстояния от анода до сопла плазмотрона анодное пятно дуги несколько расширяется и плотность тока в нем падает, причем эти изменения тем существеннее, чем ближе к аноду. Из графиков также следует, что плотность тока в анодном пятне существенно зависит от длительности импульсов тока.

2.3. Исследование электрических характеристик контрагированной импульсной дуги

Для выявления взаимосвязей между физическими и технологическими свойствами импульсной плазменной дуги исследовали влияние импульсного изменения тока на напряжение плазменной дуги, напряженность электрического поля ее столба и на ее анодное падение напряжения. Эксперименты проводили в тех же условиях с использованием установки, представленной на рис. 3. Величину напряженности электрического поля столба дуги и изменение анодного падения напряжения определяли методом зондирования с помощью устройства 4 (рис. 3).

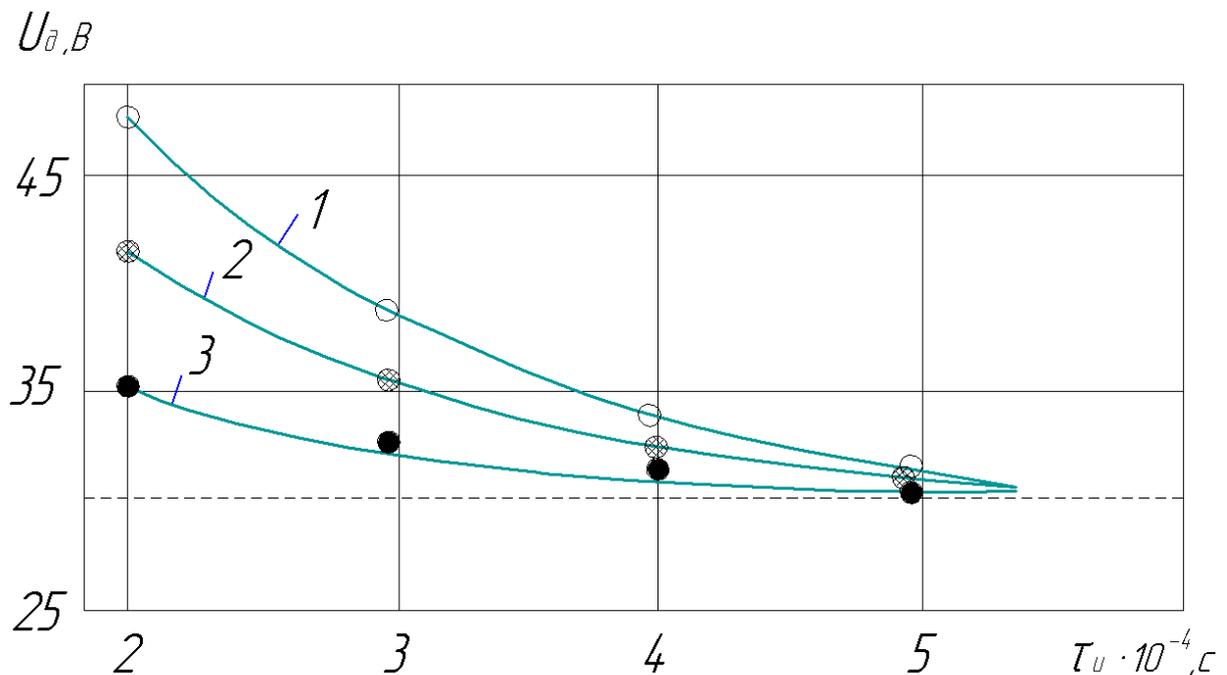


Рисунок 7 - Зависимость напряжения плазменной дуги от длительности импульсов тока при различных длительностях паузы

1 - $\tau_n = 1,6 \cdot 10^{-2}$ с; 2 - $\tau_n = 1,2 \cdot 10^{-2}$ с; 3 - $\tau_n = 0,8 \cdot 10^{-2}$ с ($I_u = 180$ А, $l = 10$ мм)

Исследованиями установлено, что при длительности импульсов тока $5 \cdot 10^{-4}$ с напряжение плазменной дуги (рис. 8), напряженность электрического поля столба плазменной дуги и ее анодное падение напряжения (рис. 8) стремятся к их значениям на плазменной дуге постоянного тока. С уменьшением длительности импульсов тока, ниже указанного значения, напряжение плазменной дуги, напряженность поля ее столба и анодное падение напряжения возрастают, причем, чем больше пауза между импульсами тока, тем выше значения указанных величин. Кривые $U=f(\tau_u)$, $E=f(\tau_u)$ и $\Delta U_a=f(\tau_u)$ подобны кривой $\varepsilon_c=f(\tau_u)$, (см. рис. 4). Это указывает на зависимость напряженности электрического поля столба плазменной дуги и ее анодного падения напряжения от степени дополнительного контрагирования плазменной дуги под воздействием импульсов тока определенной длительности, причем большей степени контрагирования соответствуют более высокие значения указанных параметров.

Таким образом, питание сжатой дуги кратковременными импульсами тока позволяет вследствие затруднения развития ионизации в радиальном направлении дополнительно повысить плотность тока в сжатой дуге.

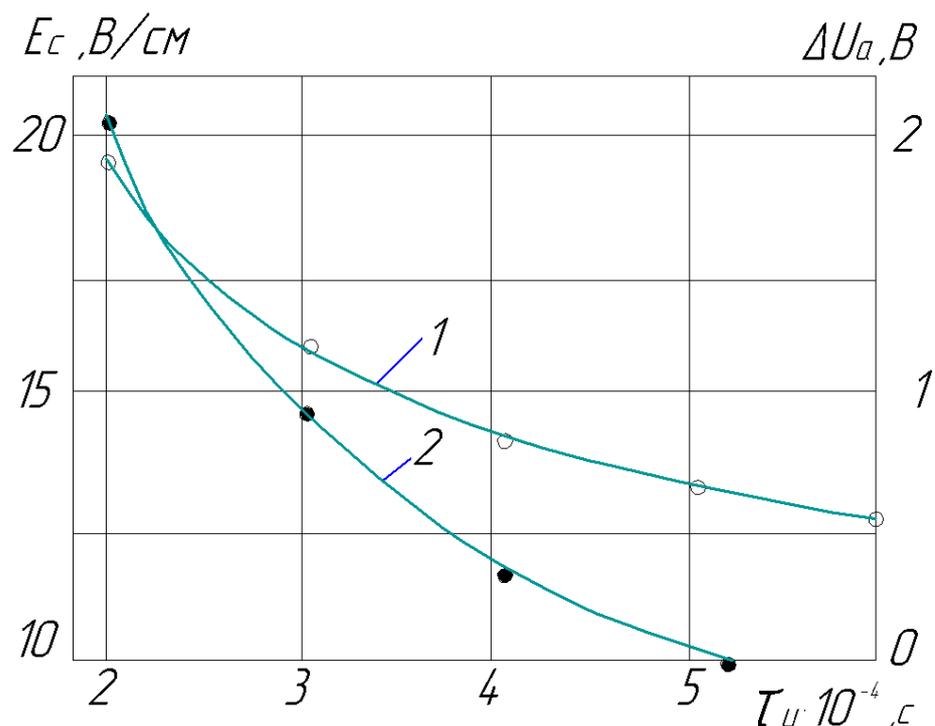


Рисунок 8 - Зависимость напряженности электрического поля столба плазменной дуги и изменения ее анодного падения напряжения от длительности импульсов тока

1- напряженность электрического поля столба плазменной дуги;

2- анодное падение напряжения; $I_u = 180 \text{ А}$; $l = 10 \text{ мм}$; $\tau_n = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}$

2.4. Исследование технологических особенностей плазменной импульсной дуги

В разделе 2.2 установлено, что под воздействием повторяющихся кратковременных импульсов сварочного тока ниже $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ горение плазменной импульсной дуги переводится в динамический режим, позволяющий увеличить плотность тока и величину напряжения на дуге, а, следовательно, привести к большей плотности вводимой энергии. Это позволяет увеличить проплавляющую способность плазменной импульсной дуги. Однако, как показали опыты, возможности регулирования параметров режима сварки при данном процессе невелики. Работа плазменной импульсной дуги при требуемых динамическим режимом параметрах модулированного тока

практически переходит в стационарный режим. Поэтому для проведения дальнейших исследований технологических возможностей плазменной импульсной дуги предварительно рассмотрим особенности поведения плазменной дуги при сварке в стационарном режиме.

Использование плазменной (сжатой) дуги для сварки различных изделий находит все большее распространение в разных отраслях промышленности [1, 2]. О широких ее возможностях свидетельствуют примеры применения этого процесса при изготовлении изделий из материалов широкой номенклатуры (низкоуглеродистых и низколегированных, высокопрочных и нержавеющей сталей, никелевых и титановых сплавов, меди и ее сплавов, алюминиевых сплавов).

Плазменную сварку разделяют на три разновидности: микроплазменная сварка изделий толщиной 0,025...1 мм (сила тока 0,1...25 А), плазменная сварка изделий толщиной 1...3 мм (сила тока 25...100 А) и плазменная сварка проникающей дугой при силе тока больше 100 А.

Микроплазменная сварка отличается очень высокой устойчивостью и стабильностью горения микроплазменной дуги на малых токах, что достигается благодаря высокой степени сжатия столба дуги каналом сопла малого диаметра (0,8...1,2 мм).

Плазменная сварка при силе тока до 100 А характеризуется небольшой степенью сжатия столба дуги и по свойствам близка к аргонодуговой сварке неплавящимся электродом, но дуга более «жесткая» и допускает большее изменение длины дуги. За счет увеличения расхода газа позволяет увеличивать глубину проплавления.

Наиболее велико различие между аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом и плазменной сваркой проникающей дугой [3]. Сочетание повышенной величины сварочного тока со значительным давлением скоростного газового потока столба плазменной дуги создает в передней части сварочной ванны кратер, проникающий через всю толщину свариваемого

металла с образованием сквозного отверстия в виде «замочной скважины». Это обеспечивает провар по всей толщине металла с формированием силами поверхностного натяжения обратного валика. Применяют этот способ в основном при сварке стыковых соединений без разделки кромок и присадочного металла толщиной 3...10 мм на весу, собранных без зазора. В ряде случаев успешно сваривают за один проход стыковые соединения большей толщины. При сварке металла повышенных толщин (13...25 мм) производят многослойную сварку. Для этого требуется разделка кромок. Ее подготовку осуществляют с пониженным углом раскрытия и повышенным притуплением, сборку производят без зазора. Первый проход выполняют без присадочного металла со сквозным проплавлением, последующие проходы производят с применением присадочного металла. При этом наложение последующих слоев не должно сопровождаться проплавлением типа «замочная скважина». Для этого действие плазменной струи регулируют изменением расхода плазмообразующего газа так, чтобы расплавленный металл не вытеснялся из сварочной ванны. Однако наибольшие преимущества сварка плазменной проникающей дугой дает при соединении металла допустимой толщины за один проход без разделки кромок и без присадочного металла.

Плазменные установки для сварки плазменной проникающей дугой, как правило, работают в стационарном режиме, который не всегда оптимален. Многочисленными исследованиями условий формирования шва при сварке плазменной проникающей дугой на весу в стационарном режиме установлено, что получение качественных сварных соединений возможно обеспечить лишь при минимальном объеме сварочной ванны и тщательном установлении и поддержании на заданном уровне параметров режима сварки (особенно для повышенного диапазона свариваемых толщин).

Главным недостатком процесса сварки плазменной проникающей дугой в стационарном режиме является низкий «уровень технологичности», что выражается в возможных нарушениях стабильности формирования шва,

обусловленных очень узким диапазоном гарантированных режимов. Колебания режима сварки, а также наличие дефектов сборки стыка может привести к изменению проникающей способности плазменной дуги и появлению дефектов сварного шва в виде газовых полостей, прожогов или увеличению высоты обратного валика с резким переходом к основному металлу.

Предварительный анализ главной трудности процесса формирования проплава при сварке стыковых соединений плазменной проникающей дугой показал, что преодолеть ее можно путем питания плазменной дуги модулированным током с пульсациями низкой частоты – до 5 Гц. Этой проблеме и посвящена настоящая работа.

Для проведения исследований использовали стенд, скомпонованный на базе серийно выпускаемой установки для плазменной сварки УПС-301УХЛ4, предназначенной для работы в непрерывном и в импульсном режимах.

За критерий «уровня технологичности» при сварке плазменной проникающей дугой приняли безразмерную величину $K_{ут} = v_y/v_{кр}$, где $v_{кр}$ – минимальное (критическое) значение линейной скорости сварки плазменной проникающей дугой, при которой не происходит нарушения стабильности формирования шва, определяемое из опыта; v_y – условное минимальное значение линейной скорости сварки, равное 16 м/ч, «уровень технологичности» которого принят за единицу.

Эксперименты, выполнявшиеся с целью определения значений $v_{кр}$, проводили при проплавлении пластин из стали 12Х18Н10Т толщиной 5 мм, которые на специальных тележках перемещали с заданной скоростью в нижнем и вертикальном положениях. Для исключения влияния факторов сборки опыты проводили на целых пластинах путем их проплавления без присадочного металла. При этом для заданных средних значений сварочного тока выполняли серию проплавок с тем, чтобы установить предельное значение скорости сварки, ниже которого начинаются нарушения стабильности формирования шва. Проплавление пластин выполняли плазмотроном установки, который

закрепляли неподвижно с нормальным направлением его оси по отношению к проплавляемой пластине. Плазмотрон содержал неплавящийся электрод диаметром 3 мм с конической формой заточки под углом 45° и притуплением 0,6 мм. Диаметр канала d_k сопла плазмотрона составлял 2,0 мм. Расстояние электрод-сопло и сопло-металл во всех опытах составляли 1,5 и 5 мм соответственно. При сварке в импульсном режиме ток паузы I_p между импульсами тока поддерживали постоянным в пределах 25 А. Расход плазмообразующего газа (аргона), подаваемого тангенциально, составлял от 3 до 4 л/мин. Характер поведения сварочной ванны и факела проникающей сжатой дуги изучали с помощью скоростной киносъемки, синхронизированной с осциллографированием рабочего напряжения и тока дуги.

Исследование влияния модуляции тока на «уровень технологичности» процесса плазменной сварки проникающей дугой показало, что с ростом среднего значения сварочного тока «уровень технологичности», оцениваемый критерием $K_{ут}$, у обоих процессов сварки возрастает (рис. 9). При этом «уровень технологичности» процесса сварки в импульсном режиме оказался существенно выше, чем при сварке в стационарном режиме.

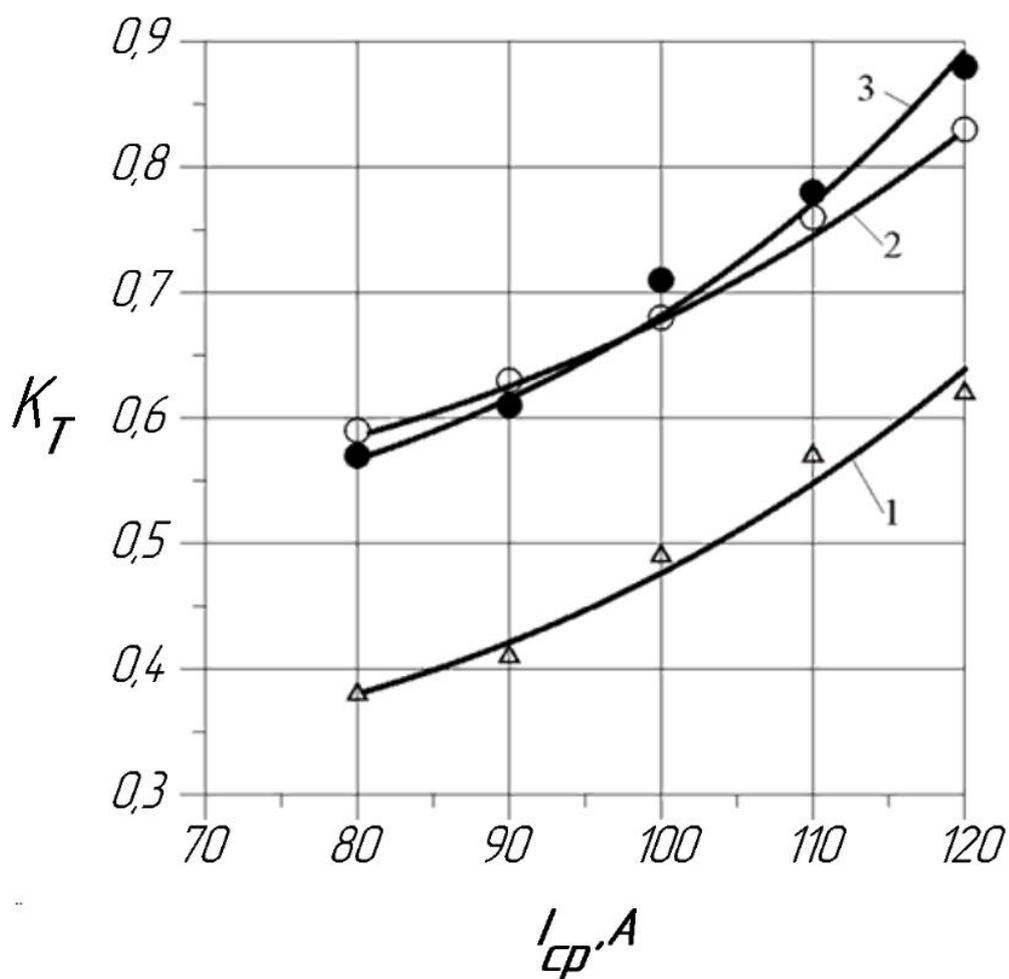
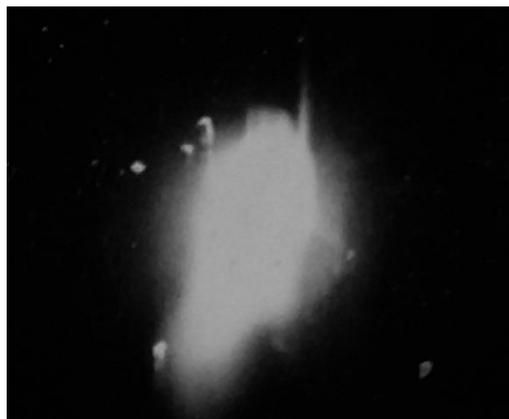


Рисунок 9 - Зависимость коэффициента «уровня технологичности» от среднего значения сварочного тока

1 - сварка в стационарном режиме; 2, 3 - сварка в импульсном режиме при скважности импульсов $S = T_{ц} / \tau_{и}$ 1,5 и 2,0 соответственно.

Просмотр кинокадров и осциллограмм показал, что при сварке в импульсном режиме плазменная струя погружается в сварочную ванну не постоянно, как при стабильном плазменном процессе в непрерывном режиме, а периодически (рис. 10), образуя во время действия импульса сварочного тока характерное проплавление в виде «замочной скважины». Это можно объяснить наличием высокой концентрации энергии и повышенного силового воздействия сжатой дуги в этот период. Во время паузы «замочная скважина» частично закрывается. Оптимальные размеры «замочной скважины» легко

устанавливаются регулированием параметров основных импульсов тока. Это значительно упрощает технику сварки и создает условия для качественного формирования шва.



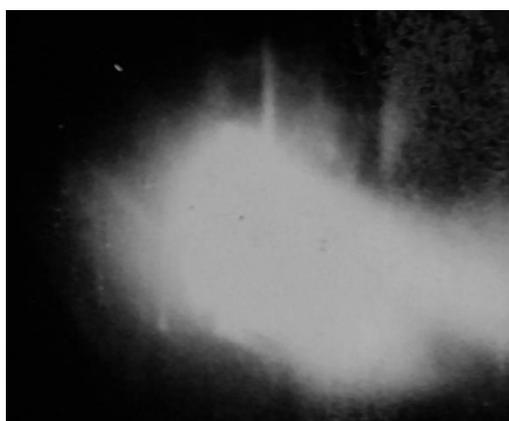
1



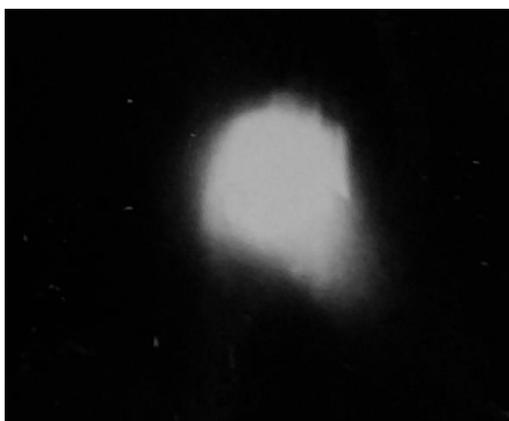
2



3



4



5



6

Рисунок 10 - Кинокадры скоростной киносъемки процесса периодического образования «замочной скважины» при сварке плазменной проникающей дугой в импульсном режиме.

На рис. 11 представлены кривые, выражающие зависимость скважности импульсов $S = T_{ц} / \tau_{и}$ от тока импульса $I_{и}$ при различных значениях их длительности $\tau_{и}$ и скорости сварки $v_{св}$. Графики устанавливают определенные соотношения между параметрами импульсов сварочного тока, при соблюдении которых обеспечивается удовлетворительное формирование шва при полном проплавлении металла и минимальной ширине обратного валика.

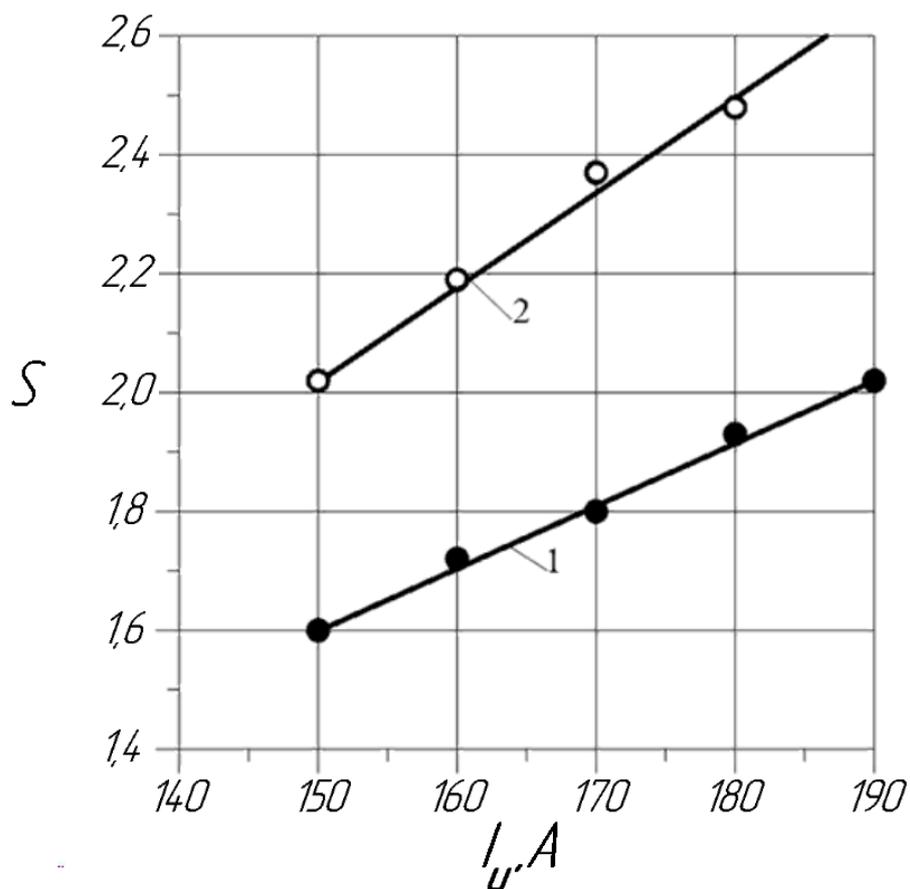


Рисунок 11 - Условия обеспечения удовлетворительного формирования проплава при плазменной сварке модулированным током

1 – $\tau_{и} = 0,16$ с, $v_{св} = 15$ м/ч; 2 – $\tau_{и} = 0,12$ с, $v_{св} = 12$ м/ч.

Влияние величины тока импульса на геометрические размеры проплава (обратного валика) показано на рис. 12. Изменение величины тока импульса от 160 до 200 А вызывает увеличение проникающей способности плазменной дуги, что обеспечивает рост высоты проплава h от 0,21 до 0,54 мм и ширины

проплава b от 2,5 до 4,0 мм. Таким образом, изменение величины тока импульса в указанном диапазоне при среднем значении сварочного тока $I_{cp} = 120$ А и длительности импульсов $\tau_{и} = 0,17$ с обеспечивает при скорости сварки 16 м/ч образование проплава в допустимых пределах.

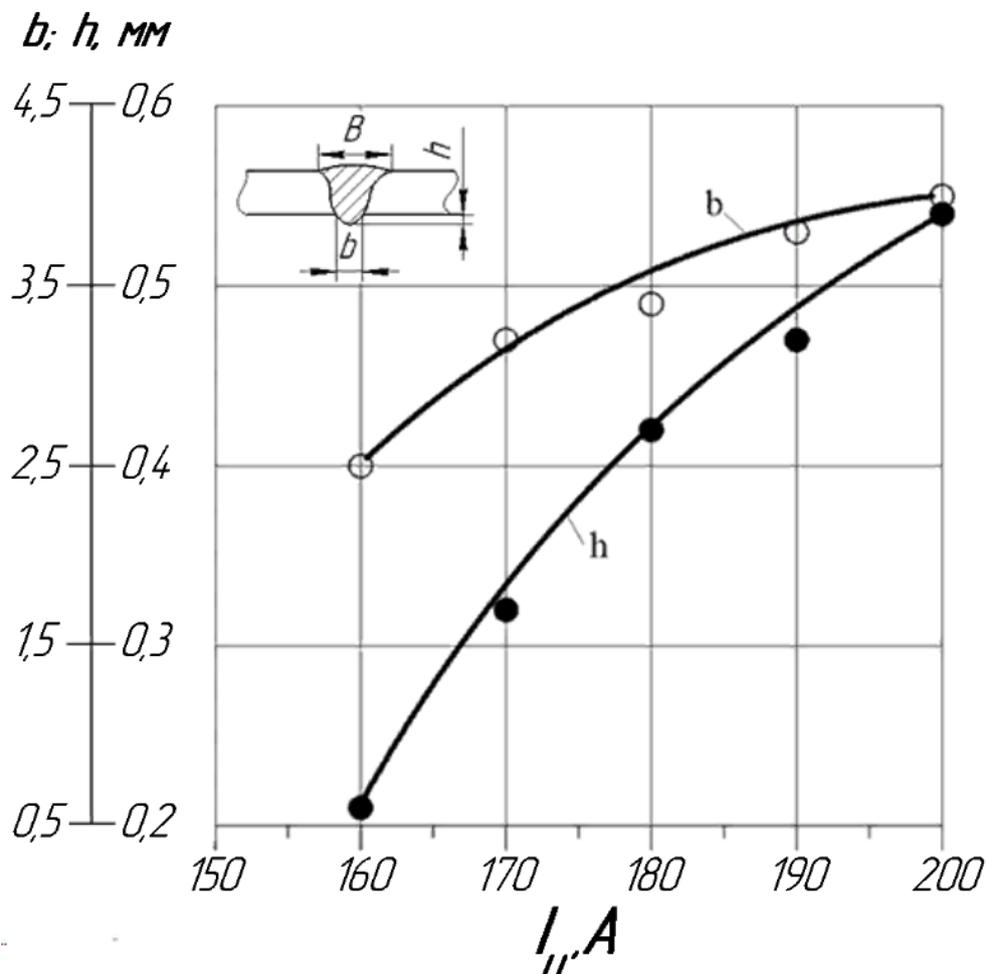


Рисунок 12 - Изменение ширины и высоты проплава в зависимости от величины тока импульса

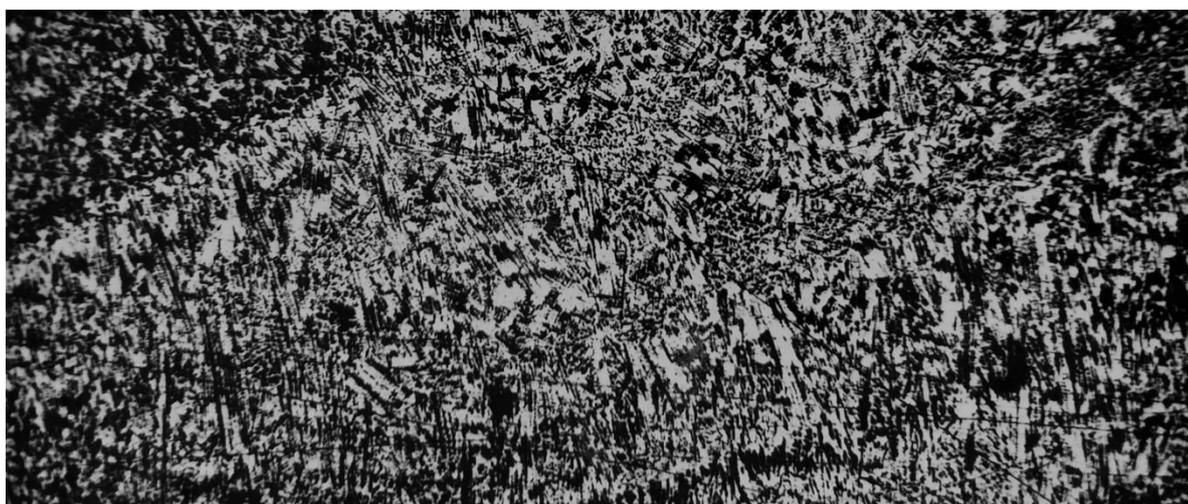
$$I_{cp} = 120 \text{ А}; \tau_{и} = 0,17 \text{ с}; v_{св} = 16 \text{ м/ч}; B = 6...8 \text{ мм}$$

Исследования первичной микроструктуры металла швов из стали 12X18H10T, выполненных сваркой плазменной проникающей дугой показали, что при сварке в стационарном режиме (рис. 13, а) наблюдается естественная слоистая кристаллизация металла. При этом в исследуемых швах слои кристаллизации выявляются лишь вблизи линии сплавления. Слоистое строение не нарушает направленного роста дендритов. В середине шва

наблюдается структура с центральным кристаллитом, на отдельных участках которой имеют место зоны мелких дезориентированных дендритов.



а)



б)

Рисунок 13 - Микроструктура металла шва при плазменной сварке
проникающей дугой

а – стационарный режим; б – импульсный режим; (x70)

При сварке в импульсном режиме (рис. 13, б) металл кристаллизуется слоями, периодичность которых соответствует частоте следования импульсов. Импульсы сварочного тока, воздействуя на сварочную ванну в процессе кристаллизации, приводят к разориентации кристаллизующегося слоя. В

середине шва наблюдается зона мелкодендритной дезориентированной структуры.

Металлографическими исследованиями в сварных швах не обнаружено трещин, рыхлот и других дефектов. Количество феррита в металле шва колеблется в пределах 2...4 %.

Предел кратковременной прочности проплавленных образцов, изготовленных для механических испытаний в соответствии с ГОСТ 6996-66, находится в пределах 580...640 МПа. Разрушение образцов, сваренных в стационарном режиме, происходит по металлу шва, а сваренных в импульсном режиме – по основному металлу.

При плазменной сварке проникающей дугой с увеличением толщины свариваемого металла вследствие его сквозного проплавления с формированием обратного валика происходит углубление поверхности шва с лицевой стороны, иногда с образованием подрезов. Для компенсации этого явления применяют повторный сглаживающий проход с пониженным расходом плазмообразующего газа или выполняют плазменную сварку проникающей дугой с применением присадочной проволоки (рис. 14), иногда подогреваемой. Для лучшего формирования шва присадочную проволоку направляют в хвостовую часть сварочной ванны [3], выбирая такую точку ввода, чтобы проволока не приближалась близко к дуге и не нарушала формирование сквозного отверстия, и, во-вторых, чтобы она не была слишком удалена от дуги во избежание ухудшения формирования шва.

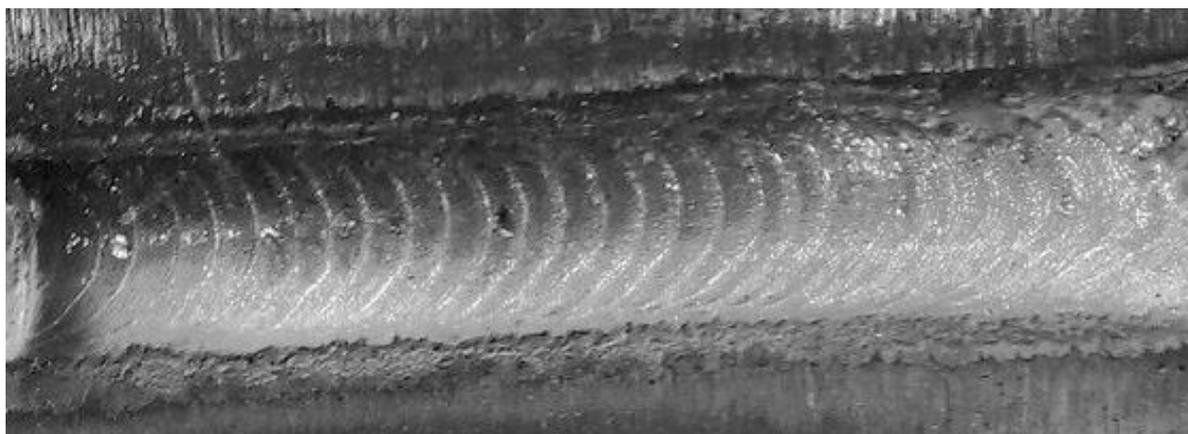


Рисунок 14 - Внешний вид сварного шва, выполненного плазменной импульсной дугой с подачей присадочной проволоки в хвостовую часть сварочной ванны.

В работе, кроме исследований формирования проплава на весу при плазменной сварке проникающей дугой нержавеющей стали, была ориентировочно опробована плазменная сварка низколегированной трубной стали 09Г2С. Как показали предварительные опыты (рис. 15), проникающая плазменная дуга обеспечивает удовлетворительное формирование проплава и при сварке стыковых соединений из низколегированных сталей.

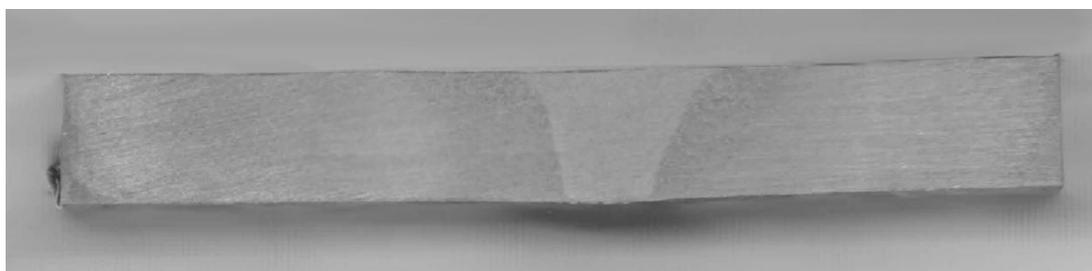


Рисунок 15 - Макрошлиф сварного соединения из стали 09Г2С толщиной 5 мм.

3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

3.1. Потенциальные потребители результатов исследования.

Выпускная квалификационная работа выполняется в рамках научно-исследовательской работы для организации. Заинтересованными лицами в полученных данных будут являться сотрудники организации.

Суть работы заключается в исследовании процесса сварки плазменной дугой в динамическом режиме, а так же влияния продолжительности импульсов тока, величины тока импульсов на формирование сварного шва.

Таблица 1 - Сегментирование рынка

		Показатель		
		Низкий показатель	Средний показатель	Высокий показатель
Технологические показатели качества сварного соединения	Кол-во дефектов на 1 см сварного шва	1,2	-	3
	Разбрызгивание электродного металла	1	2	2,3
	Глубина проплавления, мм	3,2	3	1

1- Гибридная сварка плавящимся электродом;

2- Механизированная сварка плавящимся электродом;

3- Ручная дуговая сварка.

Результат сегментирования показал, что уровень конкуренции низок. Гибридная сварка плавящимся электродом, как видно из сегментирования, хороший способ сварки, который может получать качественные сварные соединения.

Анализ конкурентных технических решений.
 Таблица 2 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство в эксплуатации	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
2. Затраты сварочного материала	0,2	5	1	5	1	0,2	1
3. Качество сварного соединения	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,1
Экономические критерии оценки эффективности							
1 Цена	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
2 Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
3 Конкурентно-способность работы	0,25	5	2	4	1,25	0,5	1
Итого	1	30	20	29	5	2,35	3,75

Где сокращения: Б_ф- Гибридная сварка неплавящимся электродом; Б_{к1} – Механизированная сварка плавящимся электродом; Б_{к2}- Ручная дуговая сварка.

Анализ конкурентных технических решений определили по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (2)$$

где: K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Итогом данного анализа является то, что метод предложенный в дипломе эффективнее, чем методы конкурентов.

SWOT – анализ

Таблица 3 - Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	<p>С1. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С2. Широкая область применения</p> <p>С3. Использование современного оборудования</p> <p>С4. Актуальность проекта</p> <p>С5. Наличие опытного руководителя</p>	<p>Сл1. Развитие новых технологий</p> <p>Сл2. Перенастройка оборудования</p> <p>Сл3. Требуется два источника питания</p> <p>Сл4. Отсутствие квалифицированного персонала.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Получение качественных сварных соединений</p> <p>В2. Регулирование производительности</p> <p>В3.Повышение стоимости конкурентных разработок</p>	<p>Получение высокоэффективного оборудования для сварки (наплавки) изделий.</p> <p>Возможность создавать партнерские отношения с рядом ведущих вузов для совместных исследований в области плазменной наплавки.</p>	<p>Требуется множество перенастроек в связи с новшеством оборудования.</p> <p>Повышение квалификации персонала</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Появление новых технологий</p> <p>У2.Снижение государством финансирования темы</p> <p>У3.Введение дополнительных государственных требований и сертификации программы.</p>	<p>Экономическая эффективность данного оборудования в промышленности Российской Федерации. Повышение квалификации персонала т.к тема актуальна и есть современное оборудование</p>	<p>Требуется множество ресурсов для реализации данного проекта.</p>

Интерактивные матрицы проекта представлены в таблицах 4, 5, 6, 7.

Таблица 4 - Интерактивная матрица возможностей и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	+	+	+	+
	B2	+	+	+	+	+
	B3	+	+	-	+	+
	B4	+	+	+	+	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и возможности: B1C2C3C4C5, B2B4C1C2C3C4C5, B3C3C4C5.

Таблица 5 - Интерактивная матрица возможностей и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	-	-	-	+
	B2	+	-	+	-
	B3	-	+	-	+
	B4	+	+	+	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и возможности: B2Сл1Сл3, B3B4Сл1.

Таблица 6 - Интерактивная матрица угроз и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	-	-	-	+	+
	У2	+	-	-	-	-
	У3	-	-	-	+	-
	У4	-	-	+	+	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и угроз: У1С4С5, У4С3С4.

Таблица 7 - Интерактивная матрица угроз и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	+	+	+	-
	У2	-	+	-	-
	У3	-	-	-	-
	У4	-	-	-	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и угроз: У1Сл1Сл2Сл3.

Определение возможных альтернатив проведения научных исследований.
Таблица 8 - Морфологическая матрица

	1	2	3
А. Диаметр сварочной проволоки, мм	1	1.2	1
Б. Марка сварочной проволоки	Св-08А	Св-10Г2С	Св-04Х19Н9
В. Плазмообразующий газ	Ar (высший сорт)	Ar (Сорт 1)	-
Г. Стабилизирующий газ	Ar (высший сорт)	Ar (Сорт 1)	-
Д. Защитный газ	Ar	CO ₂	Ar + CO ₂

Возможные варианты решения технической задачи:

- 1) А1Б1В2Г2Д3 – В первом случае, сварка низкоуглеродистых сталей при малых затратах на материал.
- 2) А2Б2В2Г2Д3 – Во втором случае, низкоуглеродистых или низколегированных сталей при малых затратах материал.
- 3) А3Б3В1Г1Д1 - В третьем случае, сварка хромистых (нержавеющих) сталей аустенитного класса, с повышенными требованиями к материалу.

3.2. Планирование научно-исследовательских работ.

Структура работ в рамках научного исследования.

Таблица 9 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Анализ актуальности темы	
Выбор направления исследования	3	Поиск и изучение материала по теме	Студент
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель, студент
	5	Календарное планирование работ	
Теоретические исследования	6	Изучение литературы по теме	Студент
	7	Подбор нормативных документов	
	8	Изучение установки УПН 303	
Оценка полученных результатов	9	Анализ результатов	Научный руководитель, студент
	10	Вывод по цели	Научный руководитель, студент

Определение трудоемкости выполнения работ.

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (3)$$

где: $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4)$$

где: T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Разработка графика проведения научного исследования.

Диаграмма Ганта - горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (5)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (6)$$

где: $T_{\text{кал}} = 365$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}} = 104$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 14$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48.$$

Все рассчитанные значения вносим в таблицу (табл. 8).

После заполнения таблицы 8 строим календарный план-график (табл. 11). График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 10 - Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}			Длительность работ в календарных днях T_{ki}		
	t_{\min} , чел-дни			t_{\max} , чел-дни			$t_{ожl}$, чел-дни									
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Составление и утверждение темы проекта	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руководитель	2	2	2	3	3	3
Анализ актуальности темы	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Рук.-студ.	1	1	1	2	2	2
Поиск и изучение материала по теме	1	1	1	5	5	5	2,6	2,6	2,6	Студ.-рук.	1	1	1	2	2	2
Выбор направления исследований	1	2	2	3	4	4	1,4	2,8	2,8	Руководитель	1	2	2	2	3	3
Календарное планирование работ	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руководитель	2	2	2	3	3	3
Изучение литературы по теме	7	7	7	14	14	14	9,8	9,8	9,8	Студент	10	10	10	15	15	15
Подбор нормативных документов	5	6	6	8	9	9	6,2	7,2	7,2	Студ.-рук.	3	4	4	5	6	6
Изучение результатов	1	2	2	2	3	3	1,4	3	3	Студент	2	3	3	3	5	5
Проведение расчетов по теме	5	6	6	8	9	9	6,2	7,2	7,2	Студент	7	8	8	10	11	11
Анализ результатов	1	1	1	4	4	4	2,2	2,2	2,2	Студ.-рук.	2	2	2	3	3	3
Вывод по цели	1	1	1	4	4	4	2,2	2,2	2,2	Студент	3	3	3	4	4	4

Таблица 11 - Календарный план-график проведения ВКР по теме

№ Ра-бот	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ										
				Март			апрель			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	3	★										
2	Анализ актуальности темы	Рук.-студ.	2	★	◆									
3	Поиск и изучение материала по теме	Студ.-рук.	2		★	◆								
4	Выбор направления исследований	Руководитель	2			◆								
5	Календарное планирование работ	Руководитель	3			◆								
6	Изучение литературы по теме	Студент	15				★	★	★					
7	Подбор нормативных документов	Студ.-рук.	5				★	◆						
8	Изучение установки	Студент	6						★					
9	Моделирование плазмотрона	Студент	3							★				
10	Изучение результатов	Студент	3									★		
11	Проведение расчетов по теме	Студент	10									★		
12	Анализ результатов	Студ.-рук.	3									★	◆	
13	Вывод по цели	Студент	4											★

★ – студент; ◆ – руководитель.

3.3. Бюджет научно-технического исследования (НТИ).

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

Расчет материальных затрат НТИ.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi}, \quad (7)$$

где: m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расxi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов.

Таблица 12 - Материальный затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы, (Z _м), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Бумага	лист	150	100	130	2	2	2	345	230	169
Картридж для принтера	шт.	1	1	1	1000	1000	1000	1150	1150	1150
Интернет	М/бит (пакет)	1	1	1	350	350	350	402,5	402,5	402,5
Сварочная проволока	кг.	0,5	0,5	0,5	80	80	80	50	50	50
ПГ,СГ,ЗГ	лит.	1	1	1	12	12	12	15	15	15
Итого								1962,5	1847,5	1786,5

Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме.

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены.

Таблица 13 - Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	УПН - 303	1	-	-	180	-	-	207	-	-
Итого:								207	-	-

Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы.

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл. 14.

Таблица 14 - Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудо-емкость, чел.-дн.			Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.		
			Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	2	2	2	3,6			8	8	8
2.	Анализ актуальности темы	Рук.-студ.	1	1	1	4,4			5	5	5

3.	Поиск и изучение материала по теме	Студ.-рук.	1	1	1	4,4	5	5	5
4.	Выбор направления исследований	Руководитель	1	2	2	3,6	4	8	8
5.	Календарное планирование работ	Руководитель	2	2	2	3,6	8	8	8
6.	Изучение литературы по теме	Студент	10	10	10	0,8	8,9	8,9	8,9
7.	Подбор нормативных документов	Студ.-рук.	3	4	4	4,4	14,8	19,7	19,7
8.	Изучение установки	Студент	4	6	6	0,8	3,6	5,4	5,4
9.	Модернизация установки	Студент	2	3	4	0,8	1,8	2,7	3,6
10.	Анализ результатов	Студ.-рук.	2	2	2	4,4	9,8	9,8	9,8
11.	Вывод по цели	Студент	3	3	3	0,8	2,7	2,7	2,7
Итого:							71,6	83,2	84,1

Проведем расчет заработной платы относительно того времени, в течение которого работал руководитель и студент. Принимая во внимание, что за час работы руководитель получает 450 рублей, а студент 100 рублей (рабочий день 8 часов).

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (8)$$

где: $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$).

Максимальная основная заработная плата руководителя (кандидата технических наук) равна примерно 48000 рублей, а студента 31700 рублей.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (9)$$

где: $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таким образом, заработная плата руководителя равна 53760 рублей, студента – 35504 рублей.

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (10)$$

где: $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2017 г. в соответствии с федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Таблица 15 - Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб			Дополнительная заработная плата, руб		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель проекта	48000	57000	57000	5760	6840	6840
Студент-дипломник	31700	27200	28100	3804	3264	3372
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271					
Итого						
Исполнение 1	24190,5 руб.					
Исполнение 2	25556,4 руб.					
Исполнение 3	25829,5 руб.					

Накладные расходы.

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{накл} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{нр}, \quad (11)$$

где: $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Таким образом, наибольшие накладные расходы при первом исполнении равны: $Z_{накл} = 357807,5 \cdot 0,16 = 57249,2$ руб.

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.
Таблица 16 - Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
1. Материальные затраты НТИ	37353	36720,5	36636,5	Пункт 3.3.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	207000	115000	138000	Пункт 3.3.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	79700	84200	85100	Пункт 3.3.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	9564	10104	10212	Пункт 3.3.3
5. Отчисления во внебюджетные фонды	24190,5	25556,4	25829,5	Пункт 3.3.4
6. Накладные расходы	57249,2	43452,9	47324,5	16 % от суммы ст. 1-5
7. Бюджет затрат НТИ	415056,7	315033,8	343102,5	Сумма ст. 1- 6

Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского

проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{415056,7}{415056,7} = 1; \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{315033,8}{415056,7} = 0,76; \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп3}} = \frac{343102,5}{415056,7} = 0,83.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a^i \cdot b^i, \quad (13)$$

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a^i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a , b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 17).

Таблица 17 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой ко- эффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Сварочный материал	0,25	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации	0,25	5	2	3
3. ПГ,СГ,ЗГ	0,15	4	4	4
4. Модернизация уст-ки УПН - 303	0,35	4	5	5
ИТОГО	1	4,5	3,15	3,8

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,35 = 4,5;$$

$$I_{p-исп2} = 3 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,35 = 3,15;$$

$$I_{p-исп3} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,35 = 3,8;$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}}, \quad (14)$$

$$I_{исп1} = \frac{4,5}{1} = 4,55; \quad I_{исп2} = \frac{3,15}{0,76} = 4,14; \quad I_{исп3} = \frac{3,8}{0,83} = 4,57.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.18) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп\ i}}{I_{исп\ max}} \quad (15)$$

Таблица 18 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,76	0,83
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,5	3,15	3,8
3	Интегральный показатель эффективности	4,5	4,14	4,57
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,89	0,98

Сравнив значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что реализация технологии в первом исполнении является более эффективным вариантом решения задачи, поставленной в данной работе с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

4. Социальная ответственность

Введение

При выполнении магистерской работы большая часть времени проводилась в лаборатории 16А корпуса. В этой аудитории проводились эксперименты по сварке плазменной дугой в динамическом режиме горения с помощью специальной установки.

В этом разделе рассмотрены вопросы, связанные с техникой безопасности и охраной труда в лаборатории, правила эксплуатации помещения, как при возникновении опасной ситуации, так и при ЧС.

4.1. Техногенная безопасность

Важное место в обеспечении техногенной безопасности занимает сертификация технических устройств. Общий порядок и условия применения технических устройств на опасном объекте устанавливаются Правительством Российской Федерации.

При организации рабочего места, следует принять во внимание тот факт, что качество и производительность труда, зависят от существующих на данном рабочем месте условий труда и соответствия этих условий установленным нормам. Организация рабочего места заключается в выполнении ряда мероприятий, обеспечивающих рациональный и безопасный труд и должна соответствовать ГОСТ 22269–76.

Во время работы с компьютером, рентгеновским и сварочным аппаратами возможно воздействие следующих опасных и вредных факторов:

- повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне;
- повышенный уровень шума на рабочем месте;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- нахождение в рабочей зоне баллонов под давлением;
- повышенный уровень статического электричества;
- источники питания.

При автоматических способах сварки возникают нервно-психические перегрузки из-за напряженности труда. Воздействие опасных

производственных факторов может привести к травме или внезапному резкому ухудшению здоровья. Это действие электрического тока, искры и брызги расплавленного металла, движущиеся машины, механизмы и т.д. Использование открытого газового пламени, наличие расплавленного металла и шлака и т.п. увеличивают опасность возникновения пожара, а неправильное транспортирование, хранение и использование баллонов со сжатыми газами, нарушение правил эксплуатации газосварочного оборудования и т.п., взрывов.

Требования к выбору и применению средств индивидуальной защиты (СИЗ).

Работники, занятые производством газопламенных и электросварочных работ, в соответствии с правилами обеспечения работников специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты должны обеспечиваться средствами индивидуальной защиты.

Спецодежда должна быть безвредной, удобной, не стеснять движения работающего, не вызывать неприятных ощущений, защищать от искр и брызг расплавленного металла свариваемого изделия, влаги, производственных загрязнений, механических повреждений, отвечать санитарно-гигиеническим требованиям и условиям труда. Выбор спецодежды в зависимости от методов сварки и условиям труда должен производиться в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 12.4.297-2013.

Уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне

К ионизирующим (радиоактивным) излучениям относят рентгеновские и γ -излучения, являющиеся электромагнитными колебаниями с очень малой длиной волны, а также α - и β -излучения, позитронное и нейтронное излучения, представляющие собой поток частиц с зарядом или без него. Рентгеновское и γ -излучение вместе называют фотонным излучением.

Действие ионизирующих излучений возникает при ЭЛС, проведении γ - и рентгеноскопии сварных швов, использовании торированных вольфрамовых электродов.

Защиту от внешнего облучения проводят в трех направлениях:

- 1) экранированием источника;
- 2) увеличением расстояния от него до работающих;
- 3) сокращением времени пребывания людей в зоне облучения.

В качестве экранов применяют хорошо поглощающие ионизирующие излучения материалы, такие, как свинец, бетон. Толщину защитного слоя рассчитывают в зависимости от вида и мощности излучения. Следует учитывать, что мощность излучения снижается пропорционально квадрату расстояния от источника. Эту зависимость используют при внедрении дистанционного управления процессами. Время пребывания работающих в зоне воздействия радиации ограничивают из условия соблюдения предельных доз облучения.

Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны

Микроклимат производственных помещений определяется действующими на организм сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих поверхностей.

Интенсивность инфракрасного (теплого) излучения от свариваемых изделий и сварочной ванны определяется температурой изделий, их габаритами и конструкцией, а также температурой и размерами сварочной ванны. При отсутствии средств индивидуальной защиты воздействие теплового излучения с интенсивностью, превышающей допустимый уровень, может привести к нарушениям терморегуляции, тепловому удару. Контакт с нагретым металлом вызывает ожоги.

Оптимальные микроклиматические условия обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены, не вызывают отклонений в состоянии здоровья и создают предпосылки для высокой работоспособности.

Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны должны соответствовать ГОСТ 12.1.005–88. Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха приведены в таблице 18.

Таблица 18– Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений (по ГОСТ 12.1.005–88)

Период года	Температура, °С					Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
	Оптимальная	Допустимая на рабочих местах				Оптимальная	Допустимая, не более	Оптимальная, не более	Допустимая, не более
		Верхняя		Нижняя					
		Пост.	Не пост.	Пост.	Не пост.				
Холодный	22-24	25	26	21	18	40-60	75	0,1	0,1
Теплый	23-25	28	30	22	20	40-60	70	0,1	0,1

Микроклимат комнаты поддерживается на оптимальном по ГОСТ уровне системой водяного центрального отопления, естественной вентиляцией, а также искусственным кондиционированием и дополнительным прогревом в холодное время года.

Уровень шума

Шум является общебиологическим раздражителем и в определенных условиях может влиять на органы и системы организма человека. Шум ухудшает точность выполнения рабочих операций, затрудняет прием и восприятие информации. Длительное воздействие шума большой интенсивности приводит к патологическому состоянию организма, к его утомлению. Интенсивный шум вызывает изменения сердечнососудистой системы, сопровождаемые нарушением тонуса и ритма сердечных сокращений, изменяется артериальное кровяное давление.

Методы установления предельно допустимых шумовых характеристик стационарных машин изложены в ГОСТ 12.1.023–80. Шум на рабочих местах также может проникать извне через открытые проемы форточек, окон и дверей из кабинета в коридор. Для оценки шума используют частотный спектр измеряемого уровня звукового давления, выраженного в децибелах (дБ), в активных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром.

По характеру спектра в помещении присутствуют широкополосные шумы. Источник шумов – электродвигатели в системе охлаждения. Для рабочих помещений административно-управленческого персонала производственных предприятий, лабораторий, помещений для измерительных и аналитических работ уровень шума не должен превышать 50 дБ, ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ.

Уменьшение влияния данных факторов возможно путём:

1. Изоляции источников шумов;
2. Проведение акустической обработки помещения;
3. Создание дополнительных ДВП или ДСП изоляционных перегородок;
4. Защита от шумов – заключение вентиляторов в защитный кожух и внутрь корпуса ЭВМ.

Освещенность

Рациональное освещение имеет большое значение для высокопроизводительной и безопасной работы. Нормирование значений освещенности рабочей поверхности для данной группы помещений составляет 400 лк (СП 52.13330.2011).

Различают естественное и искусственное освещение. Естественное – обуславливают световым потоком прямых солнечных лучей и диффузионным световым потоком прямых солнечных лучей и диффузионным светом неба, т.е. многократным отражением солнечных лучей от мельчайших взвешенных в атмосфере частиц пыли и воды. Величина такого освещения изменяется как в течение года, так и в течение суток. Изменение в течение суток зависят от

географических координат, прозрачности воздуха, облачности и других характеристик окружающей среды.

Недостаточная освещенность может быть вызвана ошибочным расположением ламп в помещении, не правильным выбором количества осветительных приборов и не рациональной загрузкой на них электрического тока. Данный фактор может стать причиной неадекватного восприятия человека технологического процесса, его утомления, а также вызвать пульсирующие головные боли.

В соответствии задач зрительной работы помещение относится к 1 группе, т.е. помещения, в которых производится различение объектов зрительной работы при фиксированном направлении линий зрения. Для производственных помещений, а также научно-технических лабораторий, коэффициент естественного (КЕО) не должен быть менее 0,5%, а коэффициент пульсаций освещенности ($K_{п}$) не должен быть больше 10%. [СП 52.13330.2011]

В целях уменьшения пульсаций ламп, их включают в разные фазы трехфазной цепи, стабилизируют постоянство прохождения в них переменного напряжения. Но самым рациональным решением данного вредного факторы является изначально правильное расположение и подключение источников света в помещении, путем замеров освещенности, при помощи люксметра, и сравнения полученных результатов с нормативными документами.

При сварочных работах плазменной дугой, в сочетании с работой на персональном компьютере и с работой с нормативной и технической документацией согласно нормам, СП 52.13330.2011 регламентируется минимальная искусственная освещенность рабочих мест в 400 лк при общем освещении. Разряд зрительной работы 1Г [СП 52.13330.2011 с. 3-6].

Световой поток, создаваемый каждой из ламп, рассчитывается по формуле (16)

$$F = \frac{E \cdot S \cdot z \cdot k}{n \cdot \eta} , \quad (16)$$

где F – световой поток одной лампы ЛДЦ 40-4 F=1995, лм;

E – минимальная освещенность, $E = 400$ лк;

S – площадь помещения, $S = 20$ м²;

z – поправочный коэффициент, $z = 0,9$;

k – коэффициент запаса, $k = 1,5$;

η – коэффициент использования осветителей, %;

n – число светильников в помещении.

Коэффициент k для помещений, освещаемых люминесцентными лампами, при условии чистки светильников не реже двух раз в год, берется равным от 1,4 до 1,5.

Коэффициент использования может быть определен по известному индексу помещения (i), рассчитанный по выражению (17)

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (17)$$

где A – длина помещения, $A = 5$ м;

B – ширина помещения, $B = 4$ м.

Для соответствующих размеров аудитории со светлым потолком и стенами, оклеенными светлыми обоями, согласно методическим указаниям, примем коэффициенты отражения от стен $\rho_c = 30$ % и потолка $\rho_n = 70$ %.

По формуле (18) определим расчетную высоту подвеса светильников над рабочей поверхностью (h).

$$h = H - h_p - h_c, \quad (18)$$

где h_p – расстояние от пола до рабочей поверхности стола, м, $h_p = 0,8$ м;

h_c – расстояние от потолка до светильника, $h_c = 0,15$ м;

H – высота потолка в помещении, $H = 3,2$ м.

Из расчетов следует, что $h = 2,25$ м, тогда согласно выражению (18)

$$i = \frac{5 \cdot 4}{2,25 \cdot (5 + 4)} = 0,99 \quad (19)$$

По таблице коэффициентов использования светового потока для соответствующих значений i , ρ_c и ρ_n примем $\eta = 49$ %.

Для осуществления проверочного расчета с целью определения того, создает ли существующая система освещенности требуемую освещенность по СП 52.13330.2011, рассчитаем количество ламп в помещении, выразив отношение из формулы (16).

$$n = \frac{400 \cdot 20 \cdot 0,9 \cdot 1,5}{1995 \cdot 0,49} = 11,05$$

Таким образом, люминесцентные лампочки дневного света (ЛДЦ 40-4) в количестве 12 штук, мощностью 40 Вт, потребляемые ток 0,34 А при питании от сети 220 В, достаточны для обеспечения минимальной требуемой освещенности в анализируемом помещении.

Меры безопасности при эксплуатации электрооборудования

Условия безопасной работы сварщика изложены в ГОСТ 12.3.003-86 «Работы электросварочные. Общие требования безопасности», а также в «Правилах устройства электроустановок». В них указываются требования к производственным помещениям, к организации рабочих мест, к размещению и подключению источников, а также к персоналу.

В соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» сварщики относятся к группе II по электробезопасности персонала, обслуживающего электроустановки.

Комната, в которой выполнялась работа, относится к категории помещений без повышенной опасности, поскольку она характеризуется следующими признаками: температура воздуха и влажность в норме, отсутствие сырости.

Одной из причин электротравматизма при сварке является поражение сварщика высоким входным напряжением сети. В частности, высокий потенциал может появиться на коже или в сварочной цепи при повреждении изоляции входной цепи. В этом случае при одновременном касании земли и кожаного тела сварщика окажется включенным в цепь с высокой разностью потенциалов. К защитным мерам от опасности прикосновения к токоведущим

частям электроустановок относятся: изоляция, ограждение, блокировка, пониженные напряжения, электротехнические средства.

Среди распространенных способов защиты от поражения электрическим током при работе с электроустановками различают:

- защитное заземление – предназначено для превращения «замыкания на корпус» в «замыкание на землю», с тем, чтобы уменьшить напряжение прикосновения и напряжение шага до безопасных величин (выравнивание самый распространенный способ защиты от поражения электрическим током;
- зануление – замыкание на корпус электроустановок;
- системы защитного отключения – отключение электроустановок в случае проявления опасности пробоя на корпус;
- защитное разделение сетей;
- предохранительные устройства.

К работам на электроустановках допускаются лица, достигшие 18 лет, прошедшие инструктаж и обученные безопасным методам труда. К тому же электробезопасность зависит и от профессиональной подготовки работников, сознательной производственной и трудовой дисциплины. Целесообразно каждому работнику знать меры первой медицинской помощи при поражении электрическим током.

4.2. Региональная безопасность

Охрана окружающей среды – это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения – это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства. Охрану природы можно представить как комплекс государственных, международных и общественных мероприятий, направленных на рациональное использование природы, восстановление, улучшение и охрану природных ресурсов.

В процессе выполнения работы образуются следующие отходы: железная окалина, электродные огарки, шлаковые отходы и прочее.

Процесс обращения с отходами на производстве включает в себя следующие этапы: образование, накопление, первичная обработка (сортировка, прессование, тарирование и др.).

Обращение с каждым видом отходов производства и потребления зависит от их происхождения, агрегатного состояния, физико-химических свойств субстрата, количественного соотношения компонентов и степени опасности для здоровья населения и среды обитания человека.

На промышленной площадке производства процесс обращения с отходами включает в себя этапы: образование (не является лицензируемым), накопление и временное хранение, первичную обработку (сортировку, прессование, тарирование) и передача (транспортировка) транспортом Исполнителя, имеющим разрешительную документацию для транспортировки и дальнейшего обращения с отходами: использование, обезвреживание, утилизацию, захоронение, вторичную переработку.

Организация сбора отходов - деятельность по удалению отходов из мест их образования и накоплению их в местах временного хранения, предназначенных для сбора отходов.

Места, предназначенные для сбора отходов. Сбор отходов производится:

- в контейнеры для твердых бытовых отходов и уличного смета;
- на специальные площадки для крупногабаритных отходов (металлолом, отработанные покрышки, аккумуляторы);
- в специализированные помещения для хранения (ртутные лампы);
- на территориях цехов, складировются отходы производства;
- в иные места (помещения) для временного хранения отходов.

Требования к конструкции контейнеров для сбора твердых бытовых отходов и к их установке:

Сбор твердых бытовых отходов (далее - ТБО) производится в контейнеры емкостью до 1,2 м³, исключающие попадание атмосферных осадков и раздувание отходов.

На контейнеры наносится информация способом, обеспечивающим ее механическую стойкость:

- вид отходов;
- инвентарный номер контейнера;
- владелец контейнера;
- наименование (номер контейнерной площадки).

На контейнерной площадке размещается информация:

- наименование (номер контейнерной площадки);
- владелец контейнерной площадки;
- график вывоза отходов;

Порядок размещения контейнерных площадок:

Места размещения контейнерных площадок и иных мест временного хранения отходов, специальных площадок для крупногабаритных отходов, определены руководством и обозначены на карте-схеме.

При увеличении объемов образования отходов может увеличиваться количество контейнеров на существующей контейнерной площадке, но не более допустимого в соответствии с действующими санитарными нормами и правилами.

Для утилизации люминесцентных ламп необходимо заключить договор с компанией, имеющей лицензию на утилизацию отходов соответствующего класса опасности.

4.3. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Руководитель (ответственный) принимает обязательства выполнения и организации правил эвакуации и соблюдение требования безопасности в помещении.

Расстояние между установками должны обеспечивать безопасные условия труда и удобства при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте.

Рабочее место обслуживающего персонала, взаимное расположение всех элементов (органов управления, средств отображения информации, оповещения и др.) должны обеспечивать рациональность рабочих движений и максимально учитывать энергетические, скоростные, силовые и психофизиологические возможности человека.

Следует предусматривать наличие мест для размещения съемных деталей, переносной измерительной аппаратуры, хранение заготовок, готовых изделий и др.

Установки должны эксплуатироваться в специально выделенных помещениях либо могут располагаться в открытом пространстве на фундаментах или платформах транспортных средств.

Помещения должны соответствовать требованиям пожарной безопасности и иметь необходимые средства предотвращения пожара и противопожарной защиты.

Отделку помещений следует выполнять только из негорючих материалов.

Двери помещений должны иметь знак ультрафиолетовой опасности.

Высота помещений должна быть не менее 3.2 м. Коммуникации (вода, электроэнергия, воздух, вакуумсистемы, инертные газы и др.) следует прокладывать под полом в специальных каналах с защитными коробами (возвышение над уровнем пола не допускается) или подвешивать кабели на высоте не менее 2.2 м от пола.

Помещения должны иметь приточно-вытяжную вентиляцию. При необходимости, рабочие места должны быть оборудованы местной вытяжкой с целью исключения попадания в рабочее помещение продуктов взаимодействия ультрафиолетового излучения с обрабатываемыми материалами.

Установки, при работе которых возможно возникновение ионизирующего излучения, должны иметь конструкцию с учетом требований по безопасности в соответствии с ОСП-72/87.

Поверхность установки при изготовлении рекомендуется выполнять матовыми, а цвета окраски выбираются из числа максимально поглощающих ультрафиолетовое излучение.

Рекомендуемое число цветов в оформлении изделия не более трех, кроме сигнальных и отличительных.

Температура поверхностей частей установки, с которыми может соприкоснуться обслуживающий персонал, и органов управления не должна превышать 40⁰

Установка должна иметь защитные устройства, предотвращающие несанкционированное воздействие на персонал ультрафиолетового излучения, а также защитные блокировки с целью обеспечения безопасности при техническом обслуживании и работе.

В целях общего поддержания безопасности создаются следующие мероприятия:

Планирование защиты населения и территории от ЧС на уровне организации;

Создание запасов средств индивидуальной защиты и поддержание их в готовности;

Выявление угроз пожара и оповещение персонала;

Подготовка работающих к действиям в условиях ЧС;

Подготовка и поддержание в постоянной готовности сил и средств для ликвидации ЧС.

4.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Безопасность в чрезвычайных ситуациях — состояние защищенности населения, объектов экономики и окружающей природной среды от опасностей в чрезвычайных ситуациях.

Основными причинами возникновения чрезвычайных ситуаций являются, во-первых, внутренние, к которым относятся: сложность технологий, недостаточная квалификация персонала, проектно-конструкторские недоработки, физический и моральный износ оборудования, низкая трудовая и

технологическая дисциплина. Во-вторых, внешние чрезвычайные ситуации, - это стихийные бедствия, неожиданное прекращение подачи электроэнергии, воды, технологических продуктов, терроризм.

Инженерно-технические мероприятия должны обеспечивать повышенную устойчивость промышленных зданий и сооружений при наступлении чрезвычайных ситуаций.

Должны проводиться организационные мероприятия, которые предусматривают заблаговременную разработку и планирование действий персонала или личного состава штаба, служб и формирований государственной обороны в условиях возникновения чрезвычайной ситуации.

Непосредственными организаторами для населения, являются начальники штабов государственной обороны, командиры воинских подразделений, директора заводов, начальники цехов, участков и т. д.

Промышленные здания могут обеспечивать лишь частичную защиту от радиации и для защиты населения от поражающего воздействия должны применяться специальные сооружения:

- противорадиационные укрытия, которые строятся из подручных материалов;
- убежища с упрощенной фильтровентиляционной системой;
- убежища с фильтровентиляционным оборудованием промышленного изготовления.

При проектировании новых цехов необходимо предусмотреть строительство убежища для защиты работающей смены. Убежища должны обеспечивать защиту от проникающей радиации и радиоактивного заражения, оборудоваться вентиляционными установками, санитарно – техническими приборами, а также средствами очистки от отравляющих веществ и биологических аэрозолей. В убежище необходимо предусмотреть отсеки для укрытия людей, санитарные узлы, фильтровентиляционную камеру, кладовую для хранения продуктов питания, вход и аварийный выход. Убежище должно иметь телефонную связь с пунктом управления предприятия и репродуктор,

подключенный к городской сети. Канализация и водоснабжение убежища осуществляется на базе городских сетей. В убежищах должно предусматриваться отопление.

Главная задача при чрезвычайных ситуациях - защита населения от возможного поражения. Выполнение этой задачи достигается путем укрытия населения в защитных сооружениях, эвакуацией его из городов и обеспечением индивидуальными средствами защиты от оружия массового поражения.

Пожарная безопасность

Пожарная безопасность – состояние объекта, при котором исключается возможность пожара, а в случае его возникновения предотвращается воздействие на людей опасных его факторов и обеспечивается защита материальных ценностей.

Противопожарная защита – это комплекс организационных и технологических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также на создание условий для успешного тушения пожаров.

Пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты. Во всех служебных помещениях обязательно должен быть «План эвакуации людей при пожаре», регламентирующий действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающий места расположения пожарной техники.

По пожарной и взрывопожарной опасности помещения производственного и складского назначения независимо от их функционального назначения подразделяют на следующие категории:

- 1) повышенная взрывопожароопасность (А);
- 2) взрывопожароопасность (Б);
- 3) пожароопасность (В1-В4);
- 4) умеренная пожароопасность (Г);
- 5) пониженная пожароопасность (Д);

К категории Г относятся помещения, в которых находятся (обращаются) негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени, и (или) горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива.

В лаборатории 221 16А корпуса НИ ТПУ находятся газы в баллонах для сварки (наплавки) в жидком состоянии, сварочные материалы. При работе возникает выделение лучистого тепла, искр, и т.п. Поэтому выбираем категорию пожароопасности «Г».

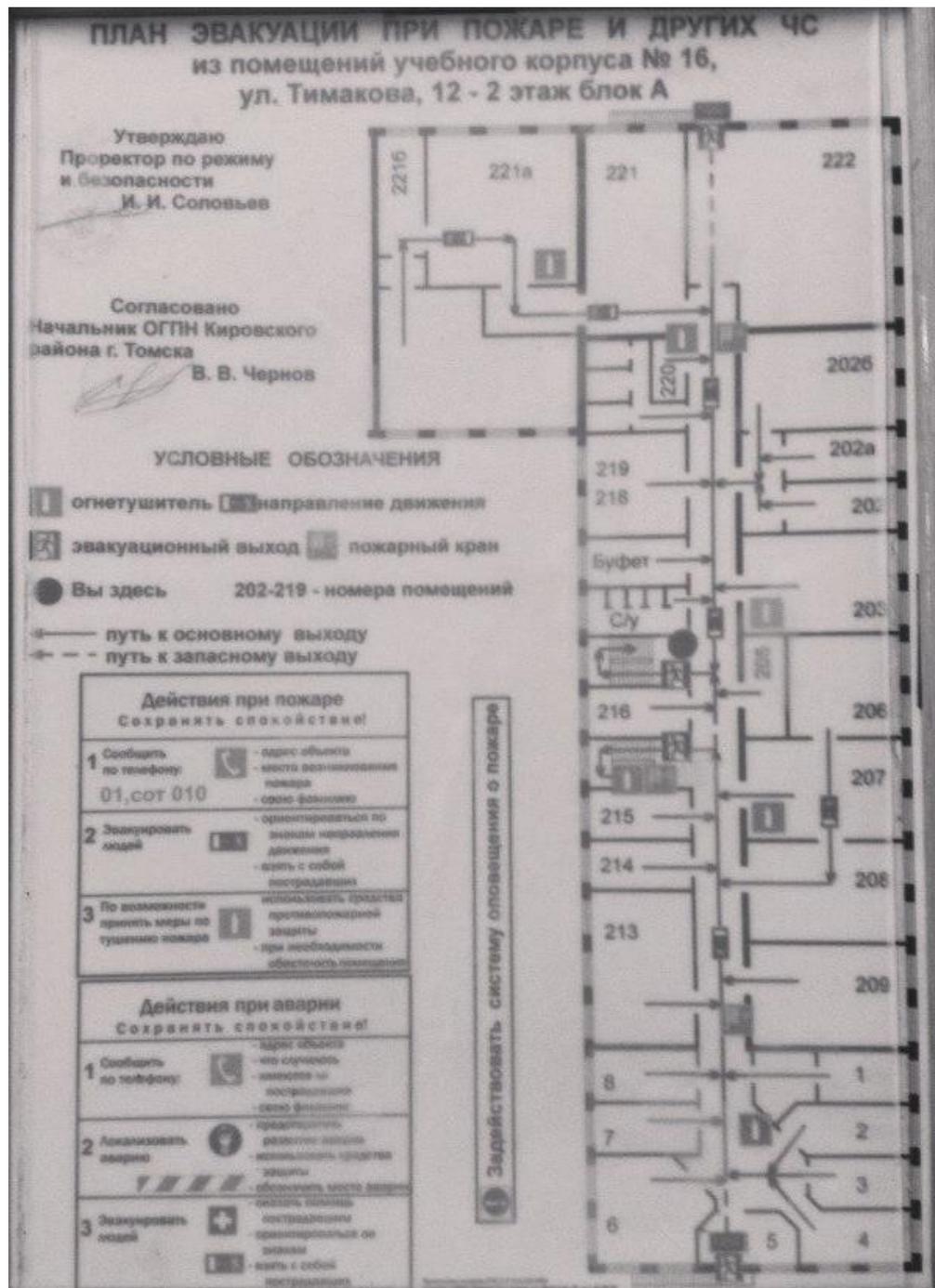


Рисунок 16- План эвакуации из корпуса №16А НИ ТПУ

С целью предотвращения пожаров необходимо:

1. Уходя из помещения проверить отключения всех электронагревательных приборов, электроустановок, а также силовой и осветительной сети.
2. Курить только в отведенных для курения местах.

3. В случае возникновения пожара приступить к его тушению имеющимися средствами, эвакуироваться и вызвать по телефону «01» пожарную службу.

4. Сотрудники должны быть ознакомлены с планом эвакуации людей и материальных ценностей при пожаре. План эвакуации должен находиться в каждом помещении и на каждом этаже лестничной площадке.

Через данное помещение проходит большое количество проводов и большое количество электроприборов. Не правильная изоляция данных проводов, или отсутствие заземления может привести к поражению человека или к возникновению возгораний.

В целях безопасности в помещениях имеются рубильники для полного обесточивания помещения, а также изоляция проводов, защитное состояние сети и применение спец. Защитных устройств (сетевые фильтры, автоматические выключатели).

При выполнении магистерской дипломной работы на тему «Исследование влияния импульсного изменения тока на физические и технологические свойства плазменной дуги» охрана труда и здоровье трудящихся на производстве, когда особое внимание уделяется человеческому фактору, стали наиважнейшей задачей. При решении задач имелось четкое представление сущности процессов и соблюдена техника безопасности. Проанализировав влияние на организм вредных и опасных факторов, данная работа была выполнена с соблюдением всех требований и норм безопасности с целью предотвращения возможности травматизма и профессиональных заболеваний.

Заключение

Для решения поставленной задачи по исследованию механизма формирования сжатого дугового разряда в условиях импульсного ввода энергии в рамках настоящей работы было выполнено:

1. Проведен анализ литературных данных по физическим и технологическим особенностям импульсной сжатой сварочной дуги.

2. Разработан и подготовлен лабораторный стенд для исследований сжатого дугового разряда в условиях импульсного изменения тока.

3. Проведены предварительные эксперименты по изучению и выявлению механизма влияния импульсного изменения тока на дополнительное контрагирование сжатой дуги.

4. Проведены экспериментальные исследования электрических характеристик дополнительно контрагированной сжатой дуги под воздействием импульсного изменения тока.

5. Проведены исследования технологических особенностей плазменной импульсной дуги.

Проведенные экспериментальные исследования влияния импульсного изменения тока на физические и технологические свойства сжатой плазменной дуги позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что при питании сжатой дуги повторяющимися кратковременными импульсами тока длительностью ниже $5 \cdot 10^{-4}$ с, размеры столба сжатой дуги и ее активного анодного пятна на металле не достигают величин, соответствующих мгновенным значениям тока импульса, что приводит к увеличению плотности тока, напряжения на сжатой дуге, напряженности электрического поля столба плазменной дуги и ее анодного падения напряжения, а следовательно, к большей плотности вводимой энергии.

2. Наибольшее влияние на эффект дополнительного контрагирования под воздействием импульсного изменения тока оказывает длительность импульсов тока. Это дает возможность перевести горение сжатой дуги в динамический режим и тем самым расширить ее технологические возможности.

3. Для различных режимов горения импульсной сжатой дуги существуют критические значения длительности паузы между импульсами тока, при которых дуга переходит в динамический режим.

4. «Уровень технологичности» процесса плазменной сварки проникающей дугой можно повысить, применяя модуляцию сварочного тока. Удовлетворительное формирование проплава при заданной величине скважности импульсов, их длительности и скорости сварки определяется величиной тока импульсов. Косвенным критерием оценки характера проплавления может служить поведение факела ионизированных газов, выходящих с обратной стороны стыкового соединения.

5. При плазменной сварке модулированным током проникающей дугой геометрические параметры проплава (высота и ширина) при заданном среднем значении сварочного тока, длительности импульсов тока и скорости сварки определяются величиной тока импульсов.

6. Модуляция сварочного тока при сварке плазменной проникающей дугой, создавая тепловые и силовые возмущения сварочной ванны в процессе ее кристаллизации, благоприятно сказывается на формировании первичной структуры металла шва, который имеет мелкодендритное разориентированное строение.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Монич П.В. Исследования влияния импульсного изменения тока на свойства плазменной дуги // Научный рук. Дедюх Р.И. - сборник трудов X Всероссийской научной конференции молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации", Новосибирск 5-6 декабря 2016 г. в 9 ч.: НГТУ – 2016. – Ч.3. – с.318-320.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Теория сварочных процессов / Под ред. В.В.Фролова.-М.: Высшая школа, 1988.-559 с.
2. Хренов К.К. Электрическая сварочная дуга.-Киев- М.: Машгиз,1949.-204 с.
3. Браун А.Я. и Погодин-Алексеев Г.И. Термическая теория электросварочной дуги.-М.: Машгиз, 1951.
4. Тиходеев Г.М. Энергетические свойства электрической сварочной дуги.-М.-Л.: АН СССР, 1961.-254 С.
5. Мазель А.Г. Технологические свойства электросварочной дуги. -М.: Машиностроение, 1969. -178 с.
6. Лесков Г.К. Электрическая сварочная дуга.-М.: Машиностроение. 1970.-335 с.
7. Ленивкин В.Я. .Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах.- М.: Машиностроение. 1989.-264 С.
8. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги.-М.: Наука, 1968.-244 с.
9. Филькельнбург В. и Меккер г. Электрические дуги и термическая плазма: Пер. с нем.-М.:ИЛ, 1961.-369 с.
10. Ю.Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. _М.: Наука,1970.-636 с.
11. И.Сварка з машиностроении. Т.1 /Под ред. Н.А.Ольшанского.-М.: Машиностроение, 1978.-501 с.
12. Кулагин И.Д. и Кудинов В.В. Шунтирование столба сжатого дугового разряда корпусом электропроводного сопла.-В сб.: Электротермия.1964, вып.32.
13. Быховский Д.Г. Плазменная резка.-Л.: Машиностроение, 1972. -168 С.

14. Николаев А.В. О каскадной дуге в плазменных установках //Автоматическая сварка.- 1971.- № 6. -С. 5-7.
15. Микроплазменная сварка / В.Е.Патон, В.С.Гроздецкий. Д.А.Дудко и др.-Киев: Наукова думка, 1979-248 с.
16. Малаховский А.В. Влияние параметров режима, размеров и формы сопла плазмотрона на параметры дуги // Сварочное производство.-1982.- № 4.- с.6-7.
17. Малаховский В.А., Стихин В.А. и Попков А.М. Электрические характеристики сжатой сварочной дуги // Сварочное производство.-1974.- № 9.- с.3-5.
18. Малаховский В.А., Стихин В.А., Попков А.М. Влияние геометрии сопла на проплавляющую способность сжатой дуги //Сварочное производство.- 1973. - № 8.- с. 10-11.
19. Малаховский В.А., Стихин В.А. и Попков А.М. Влияние конструкции сопла плазменной горелки и параметров режима на размеры дуги// Сварочное производство. - 1976.- № 8.- с.43-45.
20. Букаров В.А., Ищенко Ю.С. и Пищик В.Т. О силовом воздействии сжатой дуги на свариваемый металл // Сварочное производство. -1976.- № 6.- с.5-7.
21. Степанов В.В. и Нечаев В. И. О давлении плазменной дуги// Сварочное производство.- 1974.- № 11.- с.4-5.
22. Степанов В.В., Нечаев В.И., Лаптева Н.Е. и Дядюк В.Б. Распределение давления в плазменной дуге и влияние расхода плазмообразующего газа на качество шва // Автоматическая сварка.-1977. № 6.- С.5-7.
23. Букаров В.А., Ищенко Ю.С., Дорнеев Ю.Н., Пищик В.Т. Особенности проникания струи плазмы на первой стадии процесса сварки //Сварочное производство.-1978.-№ 4.-с.2-4.
24. Петров А.В., Акулов А.И., Гладков Э.А. и др. Выбор сигнала

обратной связи для автоматизации процесса плазменной сварки // Сварочное производство.- 1977.- № 12.- С.35-37.

25. А.с. 100898 (СССР). Способ сварки тонколистовой стали электрической дугой /М.П.Зайцев.- Оpub.в Б.И., 1966, № 7.

26. Патон Б.Е., Потапьевский А.Г., Подола Н.В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса // Автоматическая сварка.-1964.- № 1.- с.1-6.

27. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом.- М.: Машиностроение, 1974.- 240 с.

28. Петров А.В., Славин Г.А. Автоматическая сварка тонколистовой стали импульсной дугой // Сварочное производство.-1962. № 28-с. 18-21.

29. Петров А.В., Славин Г.А. Исследование технологических возможностей импульсной дуги // Сварочное производство.-1966.-№ 2.-С.1-4.

30. Петров А. В. Тепловые характеристики импульсно-дугового процесса сварки //Физика и химия обработки материалов.-1957.- № 6.-С. 11-19.

31. Славин Г. А., Маслова Н.Д., Морозова Т. В. Некоторые особенности кристаллизации жидкого металла ванны при сварке импульсной дуги вольфрамовым электродом // Сварочное производство.- 1973.- № 6.-с.7-9

32. Славин Г.А. Формирование дезориентированной структуры металла шва при наложении низкочастотных возмущений на сварочную ванну// Сварочное производство.- 1980.- № 6.- с.3-5.

33. Вагнер Ф.А., Степанов В.В. Выбор параметров режима сварки пульсирующей дугой и их влияние на свойства сварных соединений //Сварочное производство.- 1968.- № 5.-с. 14-16.

34. Вагнер Ф.А. Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой.-М.: Энергия, 1980.-120 с.

35. Асонов А.Н., Николаев А.В., Рыкалин Н.Н. Устойчивость горения плазменной дуги в импульсном режиме // Физика и химия обработки материалов.- 1969.- № 5.-с. 140-143.

36. Рыкалин Н.Н., Николаев А.В., Леонов А.Н. Электрические и энергетические характеристики плазменной дуги при модуляций тока //Автоматическая сварка.- 1975.- № 11. -с. 1-5.
37. Кулагин И.Д., Николаев А. В. Определение плотности тока в пятнах сварочной дуги // Тр. ин-та металлургии им. Байкова АН СССР. - 1958.- Вып.3. - с. 250-261.
38. Кулагин И. Д., Николаев А. В. О плотности тока в анодном пятне //Физика и химия обработки материалов. - 1969.- № 6. с. 3-9.
39. Потапьевский Л.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом.- М.: Машиностроение, 1974. - 240 с.
40. Славин Г.А., Столпнер Е.А. Некоторые особенности дуги, питаемой кратковременными импульсами тока // Сварочное производство.-1974.-№ 2.- с.3-5.
41. Sipkes M.P .Pulsed-ars plasma for welding, in position //Adv.welol.Process. Vol.1. Abington.-1974.-p.105-112.
42. Maruo H., Harata V., Koso M. Welding milol steel plate with pulsed plasma arc. Itw. Dos. № IV-225-77. Osaka, 1977.
43. Lucas W. TIG and plasma welding in the 80 s. Part 2. Process fundamentals-plasma and pulsed curent // Metall Constr.-1982.-№10.- p.534-538.
44. А.с. 727305, СССР. МКИ В23К 9/10. Способ автоматической электродуговой сварки погруженной дугой модулированным током /Р.И.Дедюх, А.Ф. Князьков, Н.А. Азаров, А.С. Киселев.- Оpubл 15.04.80. Бюл. № 14.
45. Дедюх Р.И., Азаров Н.А. Разработка процесса плазменной сварки модулированным током с регулируемым проплавлением // Применение импульсных процессов в сварке.- Ростов-на-Дону, 1987,- с.58-60.
46. Кремниевые управляемые вентили-тиристоры. Технический справочник: Пер. с англ. /Под ред. В.А.Лабунцова и В.Ф.Свиридова:М.-Л. Энергия, 1974.-360 с.

47. Tomsic M, Barhost S. Keyhole plasma arc welding of aluminum with variable polarity power. *Welding Journal* 1984; 63:25–32.
48. Keanini RG, Rubinsky B. Plasma arc welding under normal and zero gravity. *Welding Journal* 1990;69:41–50.
49. Metcalfe JC, Quigley MBC. Heat transfer in plasma arc welding. *Welding Journal* 1975; 54:99–103.
50. Vilkas EP. Plasma arc welding of exhaust pipe system components. *Welding Journal* 1991;70:49–52.
51. Craig E. The plasma arc process – a review. *Welding Journal* 1988; 67:19–25.
52. ГОСТ 22269–76 Система "Человек-машина". Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.- М.: Издательство стандартов,1978-4с.
53. ГОСТ Р 12.4.297-2013 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения, конвективной теплоты, выплесков расплавленного металла, контакта с нагретыми поверхностями, кратковременного воздействия пламени. Технические требования и методы испытаний-М: Стандартинформ, 2014-11с.
54. ГОСТ 12.1.005–88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1) -М: Стандартинформ, 2008-71с.
55. ГОСТ 12.1.023–80 Шум. Методы установления значений шумовых характеристик стационарных машин-М: Стандартинформ, 1989-11с.
56. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1) -М: ИПК Издательство стандартов, 1984-11с.
57. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*-М: ОАО "ЦПП", 2011-68с.

58. ГОСТ 12.3.003-86 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Работы электросварочные. Требования безопасности (с Изменением N 1) -М: Стандартиформ, 1988-11с.

Приложение

Раздел №1.5 Плазменная дуговая сварка: процесс, зондирование, управление и моделирование

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Монич Павел Викторович		

Консультант кафедры ОТСП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Слободян Михаил Степанович	к.т.н		

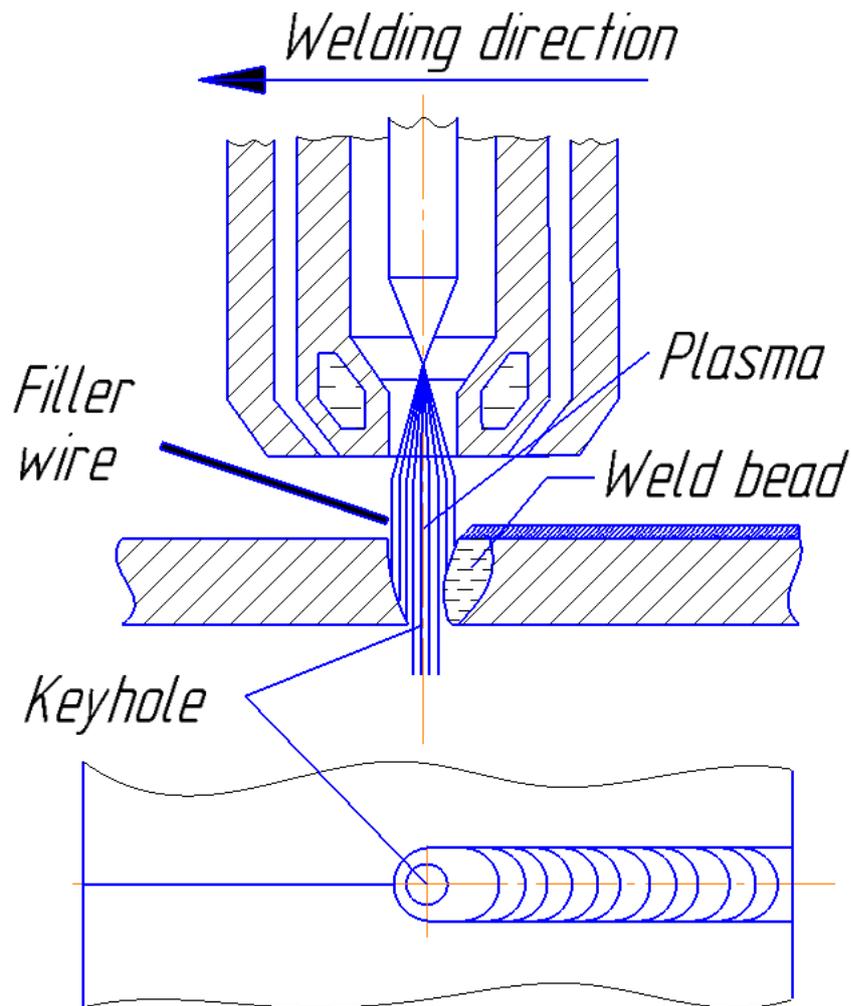
Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Казанцев Андрей Юрьевич	к.ф.н.		

1.5 Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling

The plasma arc reaches the high temperature and velocity due to the restriction by the orifice, fusing and joining the metal pieces as desired. The plasma gas itself is not sufficient to protect the weld metal and therefore, a large volume of inert shielding gas is allowed to flow through an outer gas nozzle surrounding the inner nozzle. The shielding gases that can be used are argon, or helium.

There are two modes of operation in PAW melt-in and keyhole fig.1. When energy is transferred to a workpiece from plasma arc the energy strikes the surface and immediately causes heating by a combination of conduction of heat in the arc and conversion of kinetic energy. If the rate at which energy is being deposited exceeds the rate at which heat is being conducted away, the temperature rises eventually causing melting and producing a fusion weld. This mode of energy deposition and weld production is called the melt-in mode or the conduction mode. If the density of the energy coming from the plasma arc is high enough, the rate at which it is deposited greatly exceeds the rate at which it is lost by being conducted into the workpiece. In this case, the plasma arc can penetrate through the molten pool and form a small throughout hole in the weld pool, referred to as keyhole. Moving the welding torch and the associated keyhole will cause the flow of the molten metal surrounding the keyhole to the rear region where it re-solidifies to form a weld bead. This is the keyhole mode in PAW. Clearly, the keyhole mode produces a larger penetration than the melt-in mode.



Picture 1-Schematic of keyhole plasma arc welding.

The arc used in PAW is constricted by a small nozzle and has a much higher velocity (300–2000 m/s) and heat input intensity (109–1010 W/m²) than that in conventional gas tungsten arc welding (GTAW). As a consequence, PAW has many advantages over GTAW, in terms of the penetration depth, joint preparation and thermal distortion, etc. To be specific, PAW has the following characteristics:

1. PAW offers greater welding speed, greater energy concentration and high efficiency than GTAW, which make it to be one of the most effective processes for many applications. And PAW gives better penetration than GTAW. Besides, welding in key-hole mode can make full-penetration welds in relatively thick material in a single pass.

2. PAW is an arc welding process that uses a non-consumable tungsten or tungsten alloy electrode. Recessing the electrode in a nozzle is an advantage as electrode contamination is minimized, which increases electrode service life. An electrode can usually last for an entire production shift without needing to be reground.

3. Although the arc is constricted, the plasma column has a significantly larger diameter than the electron or laser beams. PAW minimizes the need for costly joint preparation and reduces or eliminates the need for filler metal.

4. The high depth-to-width ratio of a plasma weld compared to a GTAW weld also can greatly reduce angular distortion and residual stress. Narrower HAZ, less internal defects and better welding processing property make it an effective method to weld those structural components whose back-sides are difficult to be welded, such as a sealed container or a small-diameter pipe.

However, although PAW has a potential to replace GTAW in many applications as a primary process for precise joining, the equipment of PAW is more complex and costly, and the need for water cooling of the torch does not make the torch of small size possible. Also, power supply and electric control systems are more complex than those in GTAW. Moreover, the adjustment and matching of its parameters are difficult, and it needs a high installation requirement of the torch, nozzle, and tungsten.

As aforementioned, plasma arc welding is typically used in two modes of operation, melt-in fusion welds and keyhole fusion welds, the difference is whether the keyhole forms or not during the welding. The melt-in mode is accomplished with a softer, less constricted arc, using lower plasma gas flow rates. This provides a slightly wider weld bead than when the arc is constricted. This type weld mode is used for one-side welding with back formation of the thin plate or the double-side welding and multi-layer welding of the thick plate. Generally, when the current is lower than 30 A, the melt-in fusion welding is called micro-plasma welding.

The keyhole welding is generally obtained by using a stiff and constricted arc. With increased plasma gas flow rate and electrode setback, a hole known as the “keyhole” is pierced through the entire metal thickness at the leading edge of the weld pool, where the forces of plasma column displace the molten metal. Typically this technique is used for square butt welds on material thickness from 2.4 mm to 8 mm requiring 100% penetration in a single pass. As compared to laser welding and electron beam welding, keyhole PAW is more cost effective and more tolerant of joint preparation, though its energy is less dense and its keyhole is wider. Thus, keyhole PAW has found applications on the welding of structural steels, automobiles, airplanes, rockets, space shuttles.

The keyhole PAW includes several types as follows: DC plasma arc welding, pulsed plasma arc welding, variable polarity plasma arc welding.

1. DC plasma arc welding. In the initial stage of the study on plasma arc welding, constant direct current is applied at first. The current in the DC PAW depends on the plate thickness and the penetration requirement. And the slight fluctuation of the welding parameters (e.g. welding velocity, plate thickness, welding current) will result in the closure of the keyhole and the instability of the welding process because of the thermodynamic equilibrium state depending on multitudinous factors. Consequently, proper range of the welding parameters should be chosen cautiously for the stable welding process in the DC keyhole PAW. However, its application is limited because of the small regulation margin.

2. Pulsed plasma arc welding. During PAW process, keyhole is formed inside the weld pool, and it is sensitive to any changes of the welding parameters. In conventional keyhole PAW, the appropriate parameter-window is narrower. To expand the parameter-window for quasi-steady state of keyhole, pulsed current PAW is invented to produce one keyhole for each pulse with a pulse current waveform such as typical square-waveform of welding current. After the keyhole is established, the current is switched from the peak current to the low base current so that the keyhole is closed to avoid burn-through.

The pulsed heating of the metal expands the adjustable range of the thermal conditions in welding and reduces heat accumulation on the metal. As a result, welding heat input can be controlled strictly to guarantee a good quality of the welding bead in all-position welding. However, for square waveform PAW, the mode “one keyhole in each pulse” is usually suitable for welding of metal sheet thinner than 4 mm.

3. Variable polarity plasma arc welding (VPPAW). Variable polarity plasma arc welding, i.e., VPPAW process, combines the unique plasma keyhole capabilities with cyclic variable polarity, which provides many benefits for aluminum applications such as aerospace manufacture.

Electrode negative operation (straight polarity) is necessary for plasma arc and it provides sufficient constant heat to the workpiece and minimizes heat buildup at the tungsten. But it would produce an unstable arc and irregularly shaped weld bead. Reverse polarity (electrode is positive and workpiece is negative) has the advantage that the workplace is subjected to a cleaning process due to the phenomenon of cathode cleaning action, by the impingement of heavy (compared to electrons) positive ions on the workpiece surface and the evaporation of oxides due to high current density on the cathode spot.

A variable polarity square-wave with unequal straight and reverse polarity times offers a combination of the high heating capability of straight polarity with the cleaning feature of reverse polarity. Adequate cleaning is obtained by incorporating a relatively short (one-tenth to one-fifth the duration of the straight polarity current) pulse of reverse polarity current into the welding current waveform.

In plasma arc welding, the quality of the weld depends on a large number of factors, especially the physical characteristics of the material to be welded and the welding parameters to be used. The welding process parameters must be carefully balanced to maintain the stability of the keyhole and the weld pool. Instabilities can result in weld discontinuities such as excessive penetration and incomplete

penetration. The main parameters having a significant effect on welding quality include nozzle shape and size, tungsten electrode setback, the distance from the nozzle to the workpiece, tungsten electrode material and size, welding current, the composition and flow rate of the plasma gas, welding speed, the composition and flow rate of the shielding gas, etc.

1. Nozzle shape and size. Nozzle shape and size are a basic guarantee of a reliable and stable PAW process, and are also the most sensitive factors affecting welding quality. Especially, the nozzle diameter and pore length are the most primary parameters.

2. Tungsten electrode material and size. Tungsten electrodes are used when arc welding with the TIG and PAW process. In both processes the electrode, arc and weld pool are protected from atmospheric contamination by an inert gas. A tungsten electrode is used because it can withstand very high temperatures with minimal melting or erosion. Tungsten electrodes usually contain small quantities of other metallic oxides which can offer some benefits such as facilitating arc starting, increasing arc stability, improving current carrying capacity of the rod, reducing the risk of weld contamination and increasing electrode service life.

Tungsten electrodes diameters depend on the welding currents. Higher current needs an electrode of a larger diameter.

3. Tungsten electrode set-back. Tungsten electrode set-back refers to the distance between the end of the electrode and the nozzle exit. This parameter has a significant effect on weld bead formation and arc penetration.

4. Composition and flow rate of the plasma gas. The plasma gas has direct effects through the plasma jet on the results of welding. The composition of the plasma gas and its flow rate have a strong effect on the behavior of the weld pool, on the appearance of the weld, on the welding speed and on the weld defects. Argon and argon–hydrogen mixtures are usually used as plasma gases.

5. Welding current. The welding current affects weld quality through the arc pressure and arc temperature. Studies show that an increased welding current widens the weld on both the surface and root sides. An inadequate current level causes lack of penetration and slight undercutting. Excessive current levels cause electrode damage either immediately at the start of welding or later.

The effect of welding current on weld quality is nearly always connected with the welding speed and the plasma gas type and flow rate. The formation of the weld and the mechanical properties of the weld joint will be best if a low plasma gas flow rate and a high welding current are used. At the same time, the welding speed will be higher, which is also more economical.

6. Welding speed. There is a wide range of variation in welding speed to produce acceptable welds, if the welding current is suitable. Of course too high welding speed, in relation to the other parameters especially the welding current, will result in undercutting and incomplete penetration. On the contrary, inadequate welding speed leads to excessive penetration. It is desirable to weld at the highest possible welding speed for the sake of economical effectiveness.

7. Distance from the nozzle to the workpiece. In the keyhole PAW, the distance from the nozzle to the workpiece is not a very sensitive parameter because of high arc stiffness. But too small length of arc will lead to narrow weld and undercut, and too long arc will affect the arc penetration and the welding quality. Generally, appropriate distance is 3–12 mm.

8. Composition and flow rate of the shielding gas. The effect of shielding gas on the weld quality of plasma arc welding is not as important as that of the plasma gas, but it cannot be ignored entirely. The effects are particularly noticeable in welding of joint roots. The possible shielding gases are argon, argon–hydrogen, argon–carbon dioxide and argon–oxygen gas mixtures.

The plasma arc torch has a water-cooled copper nozzle to constrict the arc plasma through thermal pinch effect. So the arc plasma with high energy density and

high arc pressure can be produced. When the plasma arc impinges on the area where two workpieces are to be joined, it can melt material and create a molten liquid pool. Because of its high velocity and the associated momentum, the plasma arc can penetrate through the molten pool and form a keyhole in the weld pool. Moving the welding torch and the associated keyhole will cause the flow of the molten metal surrounding the keyhole to the rear region where it resolidifies to form a weld bead.

In practice, the relative motion between the plasma jet and workpiece is often held at zero until full keyholing is obtained. During the keyhole formation process, the keyhole undergoes the following stages:

1. Blind keyhole. A cavity is formed inside the weld pool, but it does not completely penetrate through the workpiece.

2. Unstable open keyhole. The cavity in the weld pool has been transformed into the penetrated keyhole. Because the open keyhole is just established, it is unstable and may close momentarily during a very short period.

3. Open keyhole in quasi-steady state. The open keyhole is consistently maintained. Meanwhile, the keyhole size just varies within a limited scope.

The size and shape of the keyhole produced by PAW depend mainly on the pressure of the impinging plasma jet.

In keyhole PAW, the quality of the weld depends on the keyhole stability, which depends on the heat transfer and fluid flow phenomena inside the weld pool. However, many factors make effect on the stability of the keyhole. The fluid flow and heat transfer phenomena are very complicated in the keyhole welding where the weld pool is coupled with the keyhole and both interact with each other dynamically.

The dominating force tending to form and maintain the keyhole is the plasma stream pressure. The recoil pressure exerted on the weld pool surface due to the evaporating particles leaving the surface plays a minor role in PAW. The forces

tending to close the keyhole include the gravitational pressure and the surface tension. The gravity at any point in the liquid surrounding the keyhole is directly proportional to the density and height of metal above it. The effect of surface tension is the force which tends to minimize the surface area of the molten metal. In keyholing, before workpiece breakthrough surface tension tends to act upwards against the arc plasma pressure and recoil pressure.

Inside the weld pool surrounding the keyhole, the pressure of plasma arc, surface tension, buoyancy, and electromagnetic force are four main forces determining the fluid flow and heat transfer.

In keyhole plasma arc welding, the stability of keyhole is an important factor that affects the stability of the welding process and the quality of the weld joint. Thus, monitoring, sensing and control of keyhole status are very important to achieve defect-free and high-quality welds.

Probing the voltage signal of the plasma stream

When an open keyhole is established, the efflux plasma will exit through the keyhole. A piece of metal sheet is chosen as the detection bar mounted underneath the workpiece to be welded and kept insulated. Due to the phenomenon of plasma space charge, the efflux plasma establishes an electrical potential between the workpiece and the detection bar. However, if the open keyhole is not established or closed because of insufficient heat and force actions, there is no efflux plasma between the workpiece and the detection bar and thus no electrical potential is established. Hence, the electrical voltage resulted from the plasma efflux can be measured to characterize the establishment of keyhole and the keyhole size. There is a correlation between welding current, efflux plasma voltage and backside weld width. During the PAW process, increasing of welding current within some range causes stronger heat and force action from the arc plasma, so that the keyhole dimension grows as welding current increases. The growing of keyhole dimension results in increasing of efflux plasma voltage and wider weld bead at backside.

But this is just an indirect approach correlating the electrical potential amplitude with the intensity of efflux plasma exiting from the keyhole.

Sensing the sound signal

Under different process conditions in variable polarity PAW, the corresponding weld pool produces different acoustical signal which may be detected to classify the three modes of weld pool. However, the reliability of sound signal based sensors is not satisfactory because of the interference from environmental noises.

Sensing the light signal

The plasma arc light was once detected by spectroscopic approach to obtain information concerning the keyhole formation and collapse. But the detection signal cannot accurately reflect the size of the keyhole in real time.

Plasma cloud charge sensor

To detect the state of the keyhole reliably sensors to monitor the plasma reflection are developed. When the keyhole is not fully penetrated (blind keyhole), the plasma arc has to be reflected from the cavity. After the keyhole is fully established (open keyhole), the plasma jet will exit at the bottom of the penetrated keyhole, so that the amount of reflected plasma, if any, will be significantly reduced. The plasma cloud charge sensor monitors the charge effect of the dynamic change of the plasma cloud above the surface of the work piece. The voltage between the probe and the workpiece can reflect the angle of plasma cloud which is an indicator of keyhole status. However, such sensing approach is also indirect, and is unable to provide quantitative information on the shape and size of an open keyhole.

Visual image sensing

Vision sensor can provide more direct information on the keyhole condition and size. The camera system includes a strobe illumination unit (pulse laser), camera head and system controller. Camera was synchronized with the laser pulse, thus, the intensity of laser illumination during the peak was much higher than that of the

plasma efflux. But such a laser-strobe system is complicated and very expensive in practical applications.

A low-cost visual sensor is more attractive for sensing keyhole in PAW process. The camera is equipped with a narrow-band pass filter (central wavelength is 655 nm, bandwidth is 40 nm, and transparency is 85%) and a neutral filter, and an image grabber. Because of the large volume of the PAW torch, it obstructs the view of observing the keyhole image from the topside of the test-piece. Thus, the camera aims at the back-side of the test-piece to observe the keyhole image. If the work-piece is fully penetrated and an open keyhole is formed, the keyhole image is captured by the camera. During welding, both the PAW torch and the camera are stationary, while the work-piece is traveling at the welding speed, which is controlled by the computer. The observation is directed toward the rear of the weld pool and the viewing angle is set to 50°. The distance from the camera lens to the object plane is around 150 mm. After camera calibration and image processing, the keyhole shape and size can be determined.

The keyhole status (open or blind, and shape and size) in PAW is reliably detected in real-time. Some special control algorithms are developed to establish the correlation between the controlling variables and the controlled variable, such as the proportional and integral control algorithm, the predictive control algorithm, the interval model control algorithm, and nonlinear interval model control algorithm.

Modeling

The formation and stability of keyhole as well as the weld pool behaviors surrounded it are related to complicated phenomena, such as the dynamic balance of various forces acting on the surfaces of keyhole and weld pool, fluid flow and heat transfer, melting and solidification. All these physical phenomena have decisive effects on the weld quality. To implement the keyhole PAW successfully, it is essential to achieve full understanding of the process mechanism related to all these physical phenomena. Therefore, it is of great significance to model the dynamic

development of keyhole and associated physical behaviors in the keyhole PAW process.