

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



ЛЮКС Дмитрий Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА И ТЕХНОЛОГИИ
СТЫКОВОЙ СВАРКИ ТРУБНЫХ ПЕРЕХОДНИКОВ ДУГОЙ
НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Специальность 05.02.10
"Сварка, родственные процессы и технологии"

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель -
профессор, доктор технических наук
Сидякин В.А.

Москва - 2018

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	4
Глава 1 Состояние вопроса, цель и задачи исследований	
1.1 Сварка трубных переходников из разнородных металлов	10
1.2 Анализ состояния вопроса по стыковой сварке дугой низкого давления труб из разнородных металлов	18
1.3 Применение поперечного магнитного поля при сварке и в других технологических процессах и устройствах	30
1.4 Цель и задачи исследований	40
Выводы по главе 1	41
Глава 2 Исследование влияния поперечного магнитного поля на свойства дуги низкого давления при стыковой сварке	
2.1 Разработка установки для проведения экспериментальных исследований	42
2.2 Исследование влияния поперечного магнитного поля на скорость движения катодных пятен	53
2.3 Исследование влияния поперечного магнитного поля на равномерность нагрева торцов труб	63
2.4 Разработка способов и устройств для создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами труб	74
Выводы по главе 2	84
Глава 3 Разработка и модернизация сварочного оборудования	
3.1 Установка «СТЫК-3» для стыковой сварки дугой низкого давления	87
3.2 Разработка сварочного модуля для сварки трубных заготовок переходников диаметром до 100 мм	91

3.3	Разработка источника питания электрической дуги низкого давления с током до 1500 А	100
3.4	Модернизация системы управления и контроля на современной элементной базе	113
	Выводы по главе 3	120
Глава 4 Разработка технологии сварки трубных заготовок переходников из сплавов АМг3 + ОТ4		
4.1	Характеристика сплавов АМг3 и ОТ4	122
4.2	Существующие технологически процессы изготовления трубных переходников алюминий-титан	127
4.3	Выбор тепловых режимов, разработка конструкции сварного соединения, разработка режимов сварки	135
4.4	Изучение структурной и химической неоднородности сварных соединений	148
4.5	Исследование механических свойств и работоспособности сварных соединений	151
	Выводы по главе 4	154
	Общие выводы	158
	Литература	161
	Приложения	171
	Акт опробования 1	172
	Акт опробования 2	173

ВВЕДЕНИЕ

В современных конструкциях летательных аппаратов, криогенной техники, радиоэлектронной промышленности и др. находят широкое применение биметаллические конструкции. Для соединения элементов трубчатых конструкций из разнородных металлов применяются трубные биметаллические переходники.

Наибольшее применение при изготовлении трубных переходников в настоящее время нашли методы сварки давлением – трением, клинопрессовой, прокаткой, взрывом, и др. При этих методах сварки удаление оксидных плёнок и формирование межатомных связей происходит в твёрдой фазе в процессе значительных пластических деформаций заготовок. Трубные переходники получают в результате механической обработки биметаллических заготовок в виде прутков, толстостенных труб, листов и др. Существующая технология изготовления переходников характеризуется большой трудоёмкостью и низким коэффициентом использования металлов.

Высокие требования по надёжности к трубопроводам и другим узлам летательных аппаратов, отсутствие объективных методов контроля качества сварки биметаллических соединений, полученных этими методами, ограничивают, а иногда делают невозможным их использование.

При изготовлении ряда ответственных конструкций для сварки трубных переходников из разнородных металлов алюминий-сталь, алюминий-титан, сталь-титан и др. нашёл применение способ стыковой сварки дугой низкого давления, при котором нагрев торцов труб производится электрической дугой переменного тока, горящей в зазоре между ними в инертной атмосфере низкого давления и распределённой по всей торцевой поверхности.

В настоящее время применение способа стыковой сварки дугой низкого давления ограничено диапазоном диаметров трубных заготовок

6...40 мм. Это обусловлено тем, что при больших диаметрах усложняется получение равномерного нагрева и оплавления торцов свариваемых труб.

Стыковая сварка дугой низкого давления характеризуется высоким качеством формирования сварных соединений разнородных металлов благодаря наличию эффективной катодной очистки торцов от оксидных плёнок, сваркой в инертной атмосфере низкого давления и возможностью ограничения теплового взаимодействия металлов при формировании соединений по схеме сваркопайки. Это обеспечивает получение трубных переходников с высокой герметичностью и хорошей работоспособностью при статических и динамических нагрузках.

В связи с этим, актуальной задачей является распространение применения этого способа на сварку трубных заготовок переходников диаметром до 100 мм.

В настоящей работе для улучшения равномерности нагрева и оплавления торцов труб при стыковой сварке дугой низкого давления предложено на дуговой разряд, горящий в зазоре между торцами труб наложить поперечное магнитное поле, что обеспечит помимо хаотического блуждания катодных пятен по торцу труб их направленное движение по окружности торцов.

Целью работы является расширение технологических возможностей способа стыковой сварки дугой низкого давления и специального сварочного оборудования для сварки трубных заготовок переходников из разнородных металлов диаметром до 100 мм путем использования движения катодных пятен дуги в поперечном магнитном поле.

Работа состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка литературы и приложений.

В первой главе приведён анализ особенностей применения различных способов сварки разнородных металлов при изготовлении трубных

переходников. Показана перспективность применения стыковой сварки электрической дугой низкого давления. Изложены основные ограничения применения стыковой сварки дугой низкого давления и предложено усовершенствовать этот способ сварки путём наложения поперечного магнитного поля на дуговой разряд в зазоре между торцами свариваемых труб. Проведён анализ применения магнитного поля при сварке и в других технологических процессах. Сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе изложены результаты разработки установки и специальных методик для исследования влияния поперечного магнитного поля на свойства дуги низкого давления. Определена зависимость скорости движения катодных пятен по торцам труб для различных металлов от магнитной индукции. Определены условия, при которых обеспечивается равномерный нагрев торцевых поверхностей труб дугой низкого давления в поперечном магнитном поле. Разработаны способы и устройства для создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами свариваемых трубных заготовок

В третьей главе изложена модернизация установки «СТЫК-3», которую потребовалось выполнить для обеспечения возможности сварки трубных заготовок переходников диаметром до 100 мм. Разработан сварочный модуль с вертикальным расположением осей свариваемых деталей с устройствами для создания поперечного магнитного поля и механизмом осадки с усилием до 10 кН, инверторный источник питания дуги с током до 1500А, модернизирована система компьютерного управления процессом сварки.

Четвертая глава посвящена разработке технологии стыковой сварки дугой низкого давления в поперечном магнитном поле трубного переходника из алюминиевого сплава АМг3 и титанового сплава ОТ4 диаметром 70 мм. Изучены особенности формирования, структурная и химическая

неоднородность, механические свойства и работоспособность сварных соединений.

Методы исследований

Для проведения экспериментальных исследований влияния поперечного магнитного поля на дуговой разряд при низком давлении инертного газа разработана вакуумная установка и специальные методики: фотосъемка и скоростная киносъемка торцевой поверхности трубы-катода; измерение скорости движения катодного пятна в поперечном магнитном поле путем регистрации излучения локального участка торца трубы-катода с помощью фотодиода; измерение распределения температуры на торцевой поверхности трубы в момент выключения дугового разряда путем сканирования инфракрасного излучения поверхности вращающимся фотодиодом. Управление экспериментами осуществлялось с помощью компьютера. При этом регистрировались основные параметры процесса – ток и напряжение дуги, выходные сигналы фотодиодов и др.

Структурная и химическая неоднородность сварных соединений исследована методами световой микроскопии (микроскопы МИМ-8 и ММП-2), растровой электронной микроскопии (электронный микроскоп КУКУ-2800В) и микрорентгеноспектрального анализа (спектрометр NORAN).

Изучение механических свойств и работоспособности сварных соединений проводили по стандартным методикам.

Научная новизна

1. С целью повышения равномерности нагрева торцов свариваемых труб предложена новая схема процесса стыковой сварки дугой низкого давления, при которой на дугу, горящую в зазоре между торцами труб, накладывается поперечное магнитное поле, что изменяет характер движения катодных пятен – на хаотическое блуждание катодных пятен накладывается направленное движение по окружности торцов труб.

2. Определен диапазон значений магнитной индукции, приемлемый для практического применения при стыковой сварке дугой низкого давления. Установлено, что при индукции поперечного магнитного поля более 200 мТл значительно увеличивается напряжение дугового разряда, усложняется возбуждение разряда и снижается стабильность его горения.

3. Для ряда металлов определена зависимость скорости движения катодного пятна от магнитной индукции поперечного магнитного поля. Исследования выполнены при абсолютном давлении аргона 800 Па, при котором осуществляется процесс стыковой сварки. В интервале значений магнитной индукции $B=0\dots150$ мТл скорость катодного пятна приблизительно выражается линейной зависимостью $v=K\cdot B$, где K – подвижность пятна. Например, для трубы-катода из стали 12X18H10T $K=170$ м/(с·Тл).

4. Неравномерность нагрева торцевой поверхности трубы-катода, выраженная в относительной форме – отношением размаха температуры к ее среднему значению, обратно пропорциональна числу оборотов катодных пятен по торцу трубы. Достаточно равномерный нагрев торца трубы-катода с относительным размахом температуры менее 10% может быть получен при условии: $t > 300 \cdot \frac{\pi D}{KB}$, где t – время нагрева, с; D – диаметр трубы, м; B – магнитная индукция, Тл; K – подвижность катодных пятен в магнитном поле, м/(с·Тл).

Практическая ценность и реализация работы

1. Усовершенствован способ стыковой сварки дугой низкого давления путём наложения поперечного магнитного поля на дугу, горящую в зазоре между торцами свариваемых труб, что повысило равномерность нагрева торцов труб и позволило расширить диапазон диаметров свариваемых трубных заготовок переходников до 100 мм.

2. Разработан новый источник питания дуги низкого давления, основанный на использовании ММА сварочных инверторов и специального преобразователя постоянного тока в переменный с частотой тока 0...50 Гц и силой тока 50...1500А.

3. Для сварки трубных заготовок переходников из разнородных металлов диаметром до 100 мм модернизирована сварочная установка «СТЫК-3». Установка оснащена новым сварочным модулем, источником питания дуги и системой компьютерного контроля и управления процессом сварки.

4. Разработана и опробована на предприятии ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» технология сварки трубных переходников диаметром 70 мм из сплавов АМГ3+ОТ4.

Апробация работы Основные научные положения и практические результаты работы доложены на научно-технических конференциях и семинарах: Всероссийская НТК «Новые материалы и технологии» (Москва, МАТИ в 2010, 2012 г.г.), Международной НТК «Гагаринские чтения» (Москва, МАТИ в 2011, 2012, 2013, 2014 г.г.).

Диссертационная работа обсуждалась на научно-техническом семинаре кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» МАТИ.

Публикации По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе 5 в журналах из перечня, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы Диссертация изложена на 173 страницах, включая 79 рисунков и 19 таблиц, состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и приложения. Список литературных источников включает 103 наименования.

Глава 1 Состояние вопроса, цель и задачи исследований

1.1 Сварка трубных переходников из разнородных металлов

Изготовление трубных переходников из разнородных металлов представляет собой самостоятельную достаточно сложную проблему. Трубные биметаллические переходники изготавливают различными способами сварки и пайки.

При разработке процессов формирования сварных соединений труб из разнородных металлов учитываются два основных фактора:

- а) характер химического взаимодействия металлов;
- б) различие их теплофизических свойств.

По характеру взаимодействия свариваемые металлы можно подразделить на три группы:

- 1) металлы, обладающие неограниченной взаимной растворимостью, как в жидком, так и в твердом состоянии (Cu-Ni, Ti-Nb и др.);
- 2) металлы, образующие твердые растворы с ограниченной взаимной растворимостью и образованием эвтектики или перитектики (Cu-Ag, Cu-Fe, Fe-Ni и др.);
- 3) металлы, обладающие ограниченной взаимной растворимостью и образующие устойчивые химические соединения (Al-Fe, Al-Ti, Fe-Ti и др.).

Большинство пар разнородных металлов, которые используются при изготовлении трубных переходников, имеют значительно отличающиеся теплофизические свойства – температуру плавления, теплопроводность и др. Например, широко используются соединения труб следующих сочетаний: медь-сталь, алюминий-сталь, алюминий-титан и др.

В зависимости от характера взаимодействия свариваемых металлов и соотношения их теплофизических свойств выбирается схема формирования соединений.

Известно, что по условиям формирования межатомных связей способы сварки подразделяются на три группы:

1) процессы, при которых формирование межатомных связей происходит в твердой фазе, - поверхности обеих свариваемых деталей находятся в твердом состоянии;

2) процессы, при которых формирование межатомных связей происходит в жидкой фазе, - поверхности обеих свариваемых деталей расплавляются;

3) процессы, при которых межатомные связи формируются в контакте твердой и жидкой фаз, - поверхность одной детали расплавляется, а поверхность другой остается в твердом состоянии (процессы сваркопайки).

С технологической точки зрения сварочные процессы разделяют на методы сварки плавлением и давлением.

При сварке плавлением формирование соединений происходит в процессе расплавления металлов при отсутствии их деформации под действием внешних сил. При этом возможна реализация двух вариантов условий формирования связей - в жидкой фазе и в контакте твердой и жидкой фаз.

Для сварки давлением характерна деформация свариваемых деталей под действием внешних сил. Определяющее влияние на формирование свойств соединений оказывает совместная пластическая деформация металлов.

При сварке давлением возможна реализация всех трех вариантов условий формирования связей.

При сварке плавлением с формированием связей в жидкой фазе стадии образования физического контакта и химического взаимодействия реализуются в процессе объединения слоев расплавленного металла на кромках свариваемых деталей в общую жидкую ванну.

Из методов сварки плавлением для сварки разнородных металлов наиболее широко применяются электродуговая и электроннолучевая сварки.

Интенсивный нагрев деталей, используемый при сварке плавлением, имеет особо отрицательное значение для сварки разнородных металлов. В ванне расплавленного металла и в кристаллизующемся шве протекает объемное взаимодействие свариваемых металлов - происходит их перемешивание, идут процессы растворения и диффузии. При сварке металлов, имеющих ограниченную взаимную растворимость, это приводит к быстрому образованию химических соединений, которые охрупчивают сварной шов. Поэтому, непосредственное соединение разнородных металлов методами сварки плавлением с образованием общей жидкой ванны возможно лишь для металлов первой и второй групп.

Если металлы образуют между собой хрупкие химические соединения, то при использовании методов сварки плавлением их сваривают через промежуточные вставки из металлов, не образующих химических соединений ни с одним из свариваемых металлов [1, 2]. Применяется также легирование металла шва элементами, тормозящими рост интерметаллидных соединений [3, 4].

Для соединения методами сварки плавлением металлов третьей группы получила применение схема формирования с расплавлением одного, более легкоплавкого, из соединяемых металлов - сваркопайка [5-7].

В этом случае формирование межатомных связей происходит в процессе смачивания жидким металлом поверхности твердого металла.

При использовании методов сварки плавлением сваркопайка может осуществляться как непосредственно между соединяемыми металлами, так и с нанесением покрытий на более тугоплавкий металл.

Прочные химические связи при взаимодействии расплавленного металла с твердым устанавливаются в процессе хемосорбции. Для

осуществления хемосорбции требуется активация поверхности твердого металла. При сваркопайке в основном используется термическая активация атомов, которая достигается путем нагрева твердого металла выше определенной температуры, зависящей от природы взаимодействующих металлов.

При сваркопайке, выполняемой методами сварки плавлением, время контактирования твердой и жидкой фаз обычно на несколько порядков больше времени хемосорбции. Поэтому после установления межатомных связей значительное развитие получает объемное взаимодействие металлов, в результате которого возможно образование хрупкой интерметаллидной прослойки.

Резкое ухудшение механических свойств соединений обычно имеет место при образовании сплошной прослойки толщиной более 2-5 мкм [8, 9]. Такая прослойка образуется не сразу после формирования межатомных связей, а спустя некоторое время, затрачиваемое на гетеродиффузию, растворение, образование зародышей новой фазы, их рост и смыкание вдоль поверхности контактирования, рост толщины прослойки.

Стадия объемного взаимодействия при сваркопайке методами сварки плавлением многих пар разнородных металлов является лимитирующей. Однако, кроме сложности получения соединений без интерметаллидов, возможны затруднения и на других этапах формирования соединений. В ряде случаев затруднено получение оптимального теплового состояния свариваемых деталей из-за теплового взаимодействия металлов, контактирующих между собой при нагреве. При сварке алюминиево-магниевых сплавов, сложнелегированных сталей и других сплавов возможны затруднения на стадии удаления поверхностных оксидов, препятствующих взаимодействию.

Из методов сварки давлением для сварки разнородных металлов в основном используются процессы, при которых формирование межзатомных связей происходит в твердой фазе. Наибольшее применение нашли сварка трением, клинопрессовая сварка, сварка прокаткой, сварка взрывом и диффузионная сварка.

Особенностью всех способов сварки давлением, при которых формирование связей происходит в твердой фазе, является то, что стадия химического взаимодействия осуществляется в процессе создания активных центров на сближаемых поверхностях.

Основной механизм создания активных центров - движение и выход на поверхность дислокаций в процессе совместного пластического деформирования свариваемых деталей [10-13]. Обрыв связей и образование центров взаимодействия происходит и при удалении с поверхности части самого металла или химически связанного с ним оксида.

Созданию активных центров способствует термическая активация атомов - при нагреве развиваются процессы диффузии, происходит зарождение и движение вакансий и дислокаций.

Особенности протекания отдельных стадий формирования соединений в твердой фазе зависят от интенсивности силового воздействия и температуры нагрева свариваемых деталей.

По интенсивности силового воздействия указанные процессы сварки в твердой фазе условно делятся на три группы [14]: с высокоинтенсивным силовым воздействием (сварка взрывом), со среднеинтенсивным силовым воздействием (трением, клинопрессовая, прокаткой) и с низкоинтенсивным силовым воздействием (диффузионная сварка).

Процессы с высокоинтенсивным силовым воздействием отличаются высокой скоростью деформации металла и осуществляются без специального нагрева свариваемых деталей. Удаление оксидов и сглаживание неровностей

поверхностей на стадии образования физического контакта, активация поверхностных атомов осуществляются механически при совместной деформации поверхностных слоев деталей.

Малая длительность взаимодействия исключает развитие диффузионных процессов в зоне соединения. Это позволяет использовать процессы первой группы для сварки разнородных металлов, обладающих ограниченной взаимной растворимостью и образующих между собой хрупкие химические соединения.

Однако, соединения, полученные этими способами, имеют пониженную пластичность и ударную вязкость, что объясняется не только незавершенностью процесса релаксации напряжений, но и неполнотой осуществления первых двух стадий на отдельных участках поверхности соединения. Наибольшую сложность для этих процессов представляет полное удаление поверхностных оксидных пленок.

Процессы сварки со среднеинтенсивным силовым воздействием осуществляются путем совместной пластической деформации свариваемых металлов, которая производится за небольшие промежутки времени с использованием специального нагрева деталей.

Нагрев свариваемых деталей оказывает существенное влияние на протекание всех стадий формирования соединений. Во-первых, с повышением температуры увеличивается пластичность металлов, что облегчает выравнивание поверхностей и сближение атомов при совместной пластической деформации металлов в зоне контактирования. Во-вторых, с повышением температуры растет скорость образования активных центров за счет термической активации атомов.

При сварке разнородных металлов нагрев приводит к развитию процесса гетеродиффузии и в случае ограниченной растворимости металлов - к образованию хрупких химических соединений. В этом случае требуется

определенное ограничение по температуре и длительности нагрева, исключающее образование интерметаллидной прослойки.

Для всех методов сварки в твердой фазе со среднеинтенсивным силовым воздействием лимитирующим процессом является удаление поверхностных оксидных пленок, требующее применения очень больших степеней пластической деформации свариваемых металлов.

При изготовлении элементов конструкций летательных аппаратов в основном используются трубные переходники алюминий-сталь, алюминий-титан и сталь-титан.

Трубные переходники из алюминия и его сплавов АМг2-АМг6 с коррозионностойкой сталью 12Х18Н10Т применяются при изготовлении трубопроводов различного назначения.

В настоящее время их получают путем механической обработки биметаллических заготовок, полученных методами сварки давлением - трением, клинопрессовой, прокаткой [15-19].

Особенностью этих способов сварки является формирование соединения в процессе значительных пластических деформаций, что не позволяет сваривать детали сложной формы, в том числе и тонкостенные трубопроводы.

Этими способами сваривают главным образом стержни, толстостенные трубы, листы. Затем из биметаллических заготовок методами резания, штамповки изготавливают переходники труб. Такая технология изготовления переходников весьма трудоемка и обладает низким коэффициентом использования металла.

В конструкциях летательных аппаратов применяются трубные переходники из алюминиевых сплавов с титановыми сплавами. При изготовлении таких переходников необходимо учитывать высокую активность титана при нагреве по отношению к атмосферным газам. При

изготовлении трубных переходников алюминий-титан также в основном применяются методы сварки давлением - трением, клинопрессовая, прокаткой.

Вопрос о существующих методах сварки трубных переходников алюминий-титан более подробно изложен в главе 4.

Для изготовления трубных переходников сталь-титан в основном нашли применение сварка взрывом [20,21] и сварка прокаткой [23-24].

При этом используются два промежуточных слоя - из меди со стороны стали и ниобия со стороны титана.

Пары металлов железо-медь, медь-ниобий и ниобий-титан не образуют химических соединений и имеют широкую область твердых растворов, что обеспечивает получение сварных соединений без хрупких интерметаллидных прослоек.

Однако указанная технология имеет существенные недостатки. Во-первых, формирование соединений происходит в твердой фазе, а в настоящее время нет надежных методов контроля качества таких соединений. Поэтому существует опасность образования в соединениях непровара и потери их герметичности. Во-вторых, данная технология отличается большой металлоемкостью и трудоемкостью операций, так как трубные переходники изготавливают из листовых биметаллических заготовок

Для изготовления трубных биметаллических переходников, которые применяются в элементах конструкций летательных аппаратов, находят применение способ стыковой сварки, при котором нагрев торцов трубных заготовок производится электрической дугой, горящей в зазоре между ними в инертной среде низкого давления, – стыковая сварка дугой низкого давления. В настоящее время это практически единственный способ сварки давлением, при котором образование межатомных связей происходит в контакте твердой и жидкой фаз – по схеме сваркопайки.

1.2 Анализ состояния вопроса по стыковой сварке дугой низкого давления труб из разнородных металлов

Процесс сварки состоит из трех технологических этапов: нагрева, оплавления и осадки торцов труб. Схема и циклограмма процесс сварки приведены на рис. 1.1 и рис. 1.2.

Для нагрева и оплавления торцов свариваемых деталей используется электрическая дуга переменного тока, горящая в зазоре между деталями в инертной среде низкого давления и равномерно распределенная по всей их торцевой поверхности [25, 26].

Сварка производится в вакуумной камере. Детали устанавливают в зажимах с определенным зазором Δ_3 между их торцами, который остается постоянным на стадии нагрева деталей. Далее камеру вакуумируют до остаточного давления порядка 1 Па, наполняют аргоном до определенного низкого давления (порядка 1 кПа) и возбуждают между торцами деталей электрическую дугу переменного тока.

Равномерное распределение дугового разряда по торцам свариваемых деталей обеспечивается при определенном низком абсолютном давлении аргона и при определенной силе тока дуги, которые выбирают в зависимости от природы металла свариваемых деталей и площади их торцов.

Кроме нагрева торцов и формирования на их поверхности сплошного слоя расплавленного металла дуга осуществляет катодную очистку торцов труб, то есть разрушение и удаление оксидных пленок и других загрязнений на торцевых поверхностях с помощью процесса катодной эрозии.

После оплавления торцов производится осадка, при которой торцы быстро сближаются на величину зазора Δ_1 и дополнительно на величину осадки Δ_2 , необходимую для выдавливания жидкого металла и деформации высокотемпературной зоны соединения. При осадке обеспечивается задержка выключения тока дуги вплоть до замыкания торцов свариваемых деталей.

Усилие осадки сохраняется до остывания торцов, что исключает возникновение больших растягивающих напряжений и образование трещин в соединении при охлаждении.

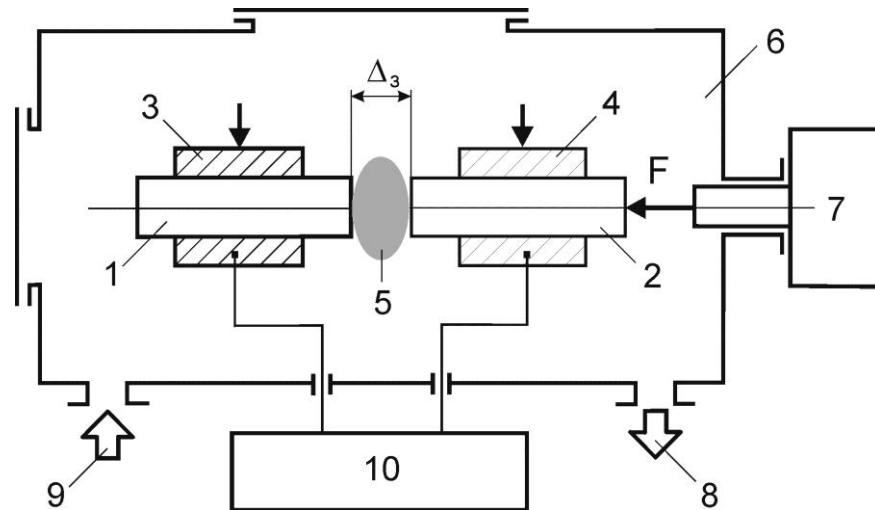


Рисунок 1.1 - Схема стыковой сварки дугой низкого давления:
 1, 2 - свариваемые детали; 3, 4 - неподвижный и подвижный зажимы;
 5 - сварочная дуга; 6 - вакуумная камера; 7 - механизм осадки;
 8 - система вакуумирования камеры; 9 - система газопитания;
 10 - источник питания дуги

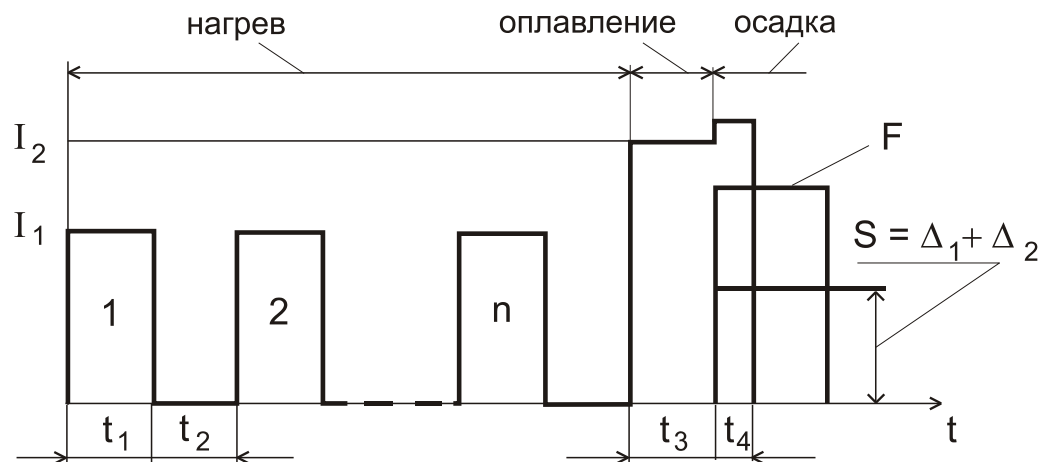


Рисунок 1.2. - Циклограмма изменения силы тока I , усилия осадки F и перемещения S подвижного зажима при сварке: I_1 , I_2 – силы токов при нагреве и оплавлении; t_1 , t_2 – длительности импульсов тока и пауз между ними при нагреве; t_3 – длительность импульса оплавления; t_4 – длительность задержки выключения тока при осадке; Δ_1 – зазор между торцами при нагреве; Δ_2 – величина осадки торцов

Катодная очистка торцов, малое окисление их при нагреве, формирование сплошного слоя расплавленного металла на ровных торцевых поверхностях позволяют получать соединения при небольшой деформации торцов в процессе осадки с образованием небольшого грата.

Принципиальная возможность использования дуги низкого давления для нагрева и равномерного оплавления торцов деталей при стыковой сварке обусловлена следующими ее физическими особенностями, имеющими место в определенном диапазоне давлений газовой среды:

- на катоде дуги существует множество катодных пятен, которые хаотически с большой скоростью перемещаются по поверхности катода и число которых пропорционально силе тока дуги;
- на аноде дуги существует диффузная форма разряда, которая характеризуется отсутствием локальных перегревов поверхности анода и минимальным анодным падением потенциала;
- столб дуги неизотермичен, имеет диффузную форму и характеризуется низкой напряженностью электрического поля.

Первоначально процесс стыковой сварки дугой низкого давления был использован для приварки концевой арматуры к трубопроводам малого диаметра (8-16 мм) из алюминиевых сплавов [27, 28]. В результате проведенных исследований был определен оптимальный диапазон абсолютного давления аргона в сварочной камере, обеспечивающий необходимые свойства дугового разряда, изучены особенности возбуждения и стабилизации дуги переменного тока при низком давлении газа, разработаны технологический процесс приварки концевой арматуры к трубопроводам малого диаметра из сплавов АМг3 и АМг6 и специализированная сварочная установка УДСТ-1.

Дальнейшие работы по совершенствованию процесса стыковой сварки дугой низкого давления, по разработке технологии и оборудования были

направлены в основном на применение нового процесса для сварки труб из разнородных металлов.

Целесообразность применения стыковой сварки дугой низкого давления для сварки разнородных металлов обусловлена ее достоинствами:

- сварка производится в инертной среде низкого давления, что снижает окисление и позволяет сваривать металлы, активно взаимодействующие с атмосферными газами;

- эффективно решается вопрос удаления поверхностных оксидных пленок путем катодной очистки торцов свариваемых деталей в электрическом дуговом разряде;

- на стадии нагрева детали не контактируют друг с другом и, следовательно, теплового и диффузионного взаимодействия свариваемых металлов при нагреве не происходит; это позволяет сравнительно легко управлять тепловым состоянием торцов и задерживает развитие объемного взаимодействия металлов;

- при сварке разнородных металлов с резко отличающимися теплофизическими свойствами и ограниченной взаимной растворимостью при нагреве оплавляется торец одной, более легкоплавкой, детали, и соединение формируется по схеме сваркопайки; благодаря кратковременности нагрева создаются благоприятные условия для предотвращения образования прослойки хрупких интерметаллидных соединений;

- формирование соединений происходит в процессе осадки, при которой из зоны соединения выдавливается расплавленный металл и деформируется высокотемпературная зона соединения.

Формирование соединений труб из разнородных металлов при стыковой сварке дугой низкого давления по схеме сваркопайки осуществляется следующим образом (рис.1.3).

На первом этапе производится катодная очистка торцевых поверхностей труб от оксидных плен и нагрев торца трубы из металла, имеющего более низкую температуру плавления, до температуры, близкой к солидусу.

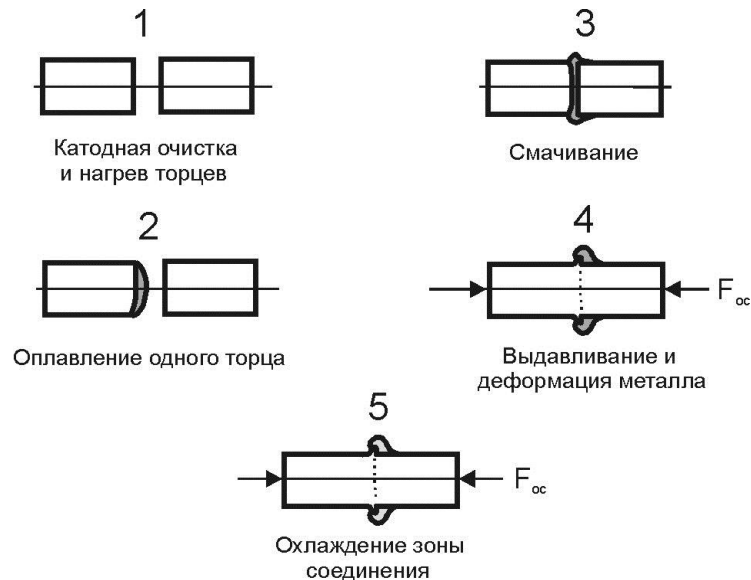


Рисунок 1.3 - Схема формирования сварных соединений труб из разнородных металлов

На втором этапе производится кратковременное оплавление торца этой трубы – на его поверхности образуется равномерный тонкий слой жидкого металла. При этом торец второй трубы из металла с более высокой температурой плавления должен быть нагрет до температуры, превышающей порог смачивания его расплавленным металлом первой трубы.

На третьем этапе в результате быстрого сближения торцов труб при осадке происходит смачивание и растекание расплавленного металла по торцу трубы из металла с большей температурой плавления, поверхность которого находится в твердом состоянии. На этом этапе в контакте жидкой и твердой фаз образуются межатомные связи.

На четвертом этапе жидкий металл выдавливается из стыка труб и осуществляется пластическая деформация высокотемпературной зоны соединения. Это предотвращает образование дефектов литой структуры.

На пятом этапе в результате выравнивания температур теплопроводностью происходит охлаждение зоны соединения. На этом этапе сохраняется усилие осадки, что исключает возможность образования трещин из-за возникновения растягивающих напряжений.

Степень развития объемного взаимодействия металлов при стыковой сварке дугой низкого давления определяется максимальной температурой в контакте металлов и длительностью пребывания металлов в зоне их взаимодействия при высоких температурах.

При формировании соединений по схеме сваркопайки максимальная температура в контакте превышает температуру плавления более легкоплавкого металла на 200-300 К. При осадке за время менее 10^{-2} с в процессе выдавливания из стыка расплавленного металла и деформации высокотемпературной зоны соединения температура в контакте металлов падает ниже температуры плавления более легкоплавкого металла.

Выдавливание расплавленного металла из стыка и большая жесткость теплового режима ограничивают объемное взаимодействие металлов. Это позволяет получать соединения различных пар разнородных металлов, обладающих ограниченной взаимной растворимостью, без хрупкой интерметаллидной прослойки, резко ухудшающей механические свойства соединений. В тех случаях, когда при сварке разнородных металлов избежать образования хрупких прослоек не удастся, сварку можно осуществить через проставку из металла, исключаяющего их взаимодействие.

В работах [29-32] проведены исследования и разработка процесса формирования соединений труб малого диаметра из алюминиевого сплава АМг2 со сталью 12Х18Н10Т. Получены следующие основные результаты:

- оптимальной схемой формирования соединений труб из алюминия со сталью при стыковой сварке дугой низкого давления является сваркопайка;
- необходимое тепловое состояние торцов труб при горении дуги в зазоре

между ними может быть получено путем выбора определенного соотношения толщин стенок трубных заготовок;

- металлографическими исследованиями установлено, что при сварке на разработанных режимах в сварных соединениях отсутствует прослойка интерметаллидов; установлено, что ресурс времени до образования опасной прослойки интерметаллидов вырабатывается при сварке не более чем на 10%;

- проведено изучение образования и роста интерметаллидной прослойки при нагреве сварных соединений; интерметаллидная прослойка образуется со стороны алюминиевого сплава и снижение прочности соединений происходит при толщине прослойки 2-3 мкм; установлено, что биметаллическое соединение может подвергаться нагреву до температуры 450°С в течение 1 часа или до 500°С не более 1 минуты;

- установлено, что сварные соединения переходников АМг2 + 12Х18Н10Т имеют хорошую работоспособность при статических и динамических нагрузках (повторно статическое растяжение и знакопеременный изгиб), высокую герметичность и сохраняют свои свойства после коррозионных испытаний в специальных средах;

- разработана технология изготовления трубных биметаллических переходников АМг2-12Х18Н10Т диаметром 6-14 мм и опытно-промышленное оборудование – сварочная установка УДСТ-3 [33] источник питания дуги переменного тока ИПДС-3; в установке впервые использован синхронный электромагнитный механизм осадки, обеспечивающий высокую и стабильную скорость осадки до 300 мм/с и регулировку усилия осадки 0,2-5 кН; источник питания дуги с напряжением холостого хода 120 В был снабжен специальным блоком стабилизации дуги и обеспечивал регулировку тока в пределах 50-600 А.

С целью внедрения нового процесса в различных отраслях

промышленности была разработана сварочная установка СТЫК-3 [34], в которой основные этапы процесса сварки выполняются в автоматическом режиме. Установка СТЫК-3 предназначена для сварки биметаллических переходников \varnothing 6-26 мм, труб с концевыми элементами и стержней малого диаметра - \varnothing 4 -12 мм.

В работах [35-38] исследования формирования соединений труб из разнородных металлов получили дальнейшее развитие. Были выполнены следующие исследования и разработки:

- с целью расширения технологических возможностей усовершенствована схема процесса сварки – для нагрева торца трубной заготовки, требующей большего тепловложения при сварке, кроме основной дуги, горящей между торцами свариваемых труб, использована дополнительная дуга, горящая между торцом этой заготовки и вспомогательным кольцевым электродом, расположенным соосно со свариваемыми трубами;
- проведены исследования влияния теплового состояния труб из стали и титана на структуру и свойства сварных соединений алюминий-сталь и алюминий-титан, что позволило определить оптимальный диапазон температур нагрева торцов деталей при сварке, при которых исключается возможность образования в соединениях хрупкой интерметаллидной прослойки;
- изучена структурная и химическая неоднородность сварных соединений труб АД1+12Х18Н10Т и АД1+ОТ4;
- определены условия, обеспечивающие эффективную катодную очистку торцов труб при сварке;
- исследованы особенности формирования соединений из сплава АМгб со сталью 12Х18Н10Т через прослойку из алюминия АД1 в условиях стыковой сварки дугой низкого давления;
- изучена работоспособность сварных соединений труб из АД1 и АМгб со

сталью 12Х18Н10Т и титановым сплавом ОТ4 при статических и различных видах динамических нагрузок (повторно-статическое растяжение и изгиб, знакопеременный изгиб, ударный изгиб); испытания показали, что сварные соединения имеют хорошую работоспособность при различных видах нагрузок;

- разработаны технологические процессы сварки трубных переходников АД1+12Х18Н10Т, АМг6+АД1+12Х18Н10Т, АД1+ОТ4 и трубчатых конструкций из разнородных металлов АМг6+ОТ4;

- разработана конструкция сварного соединения и технологический процесс сварки узла кронштейнов из сплавов АМг6 и ОТ4 [39].

Результаты исследований и разработок технологии сварки труб из разнородных металлов были внедрены в криогенном машиностроении и в производстве космической техники [40, 41]

Кроме сварки трубных переходников алюминий-сталь и алюминий-титан разработана технология сварки трубных переходников медь М1 – сталь 12Х18Н10Т для использования в криогенной технике и трубных переходников сталь-титан для применения в космической технике.

Стыковая сварка дугой низкого давления непосредственно трубных заготовок из стали с титаном не обеспечивает требуемых механических свойств переходников из-за образования хрупких интерметаллидных прослоек. Поэтому разработана технология изготовления трубного переходника сталь-титан, исключая взаимодействие стали с титаном при сварке [42].

Сварка трубного переходника из стали 12Х18Н10Т с титановым сплавом ВТ6С осуществляется через проставки из бронзы Бр.Х и ниобиевого сплава 5ВМЦ. Сварное соединение формируется в три этапа: а) сварка трубы из стали с кольцом из бронзы; б) сварка трубы из титана с кольцом из ниобия; в) сварка заготовок 12Х18Н10Т+Бр.Х и ВТ6С+5ВМЦ торцами из

Бр.Х и 5ВМЦ. Все три соединения формируются по схеме сваркопайки, при которой на стадии нагрева оплавляется торец лишь одной, более легкоплавкой, детали, а на стадии осадки расплавленный металл смачивает торец детали из более тугоплавкого металла и выдавливается из стыка.

Исследования структурной и химической неоднородности соединений показали высокий уровень взаимодействия свариваемых металлов, при котором практически исключается возможность образования непровара. В соединениях отсутствуют какие-либо прослойки, что обусловлено характером взаимодействия данных пар металлов, практически нет литой структуры.

Биметаллические переходники из стали 12Х18Н10Т с титановым сплавом ВТ6С, выполненные через две проставки - из бронзы Бр.Х и ниобиевого сплава 5ВМЦ имеют хорошую работоспособность при статических и динамических нагрузках и высокую герметичность.

При разработке технологии стыковой сварки трубных переходников из разнородных металлов в первую очередь должна быть выбрана рациональная конструкция стыка переходников.

Конструкция стыка переходников может быть различной [26]. Это может быть обычное стыковое соединение двух труб (рис. 1.4-а) При необходимости увеличения прочности соединения толщина стенок трубных заготовок в зоне стыка должна быть увеличена (рис. 1.4-г). При изготовлении переходников алюминий-сталь прочность соединения может быть увеличена при утолщении стенки только заготовки из алюминиевого сплава. В этом случае прочность переходника возрастает за счет формирования стыкового соединения с нахлесткой (рис. 1.4-б), а прочность переходника титан-алюминий может быть увеличена благодаря утолщению стенки трубы из титана при осадке (рис. 1.4-в). Для улучшения механических свойств сварных соединений переходников, например, повышения ударной вязкости или для

исключения образования хрупких прослоек, сварка может быть осуществлена через одну или две проставки из специально подобранных металлов (рис. 1.4-д, е).

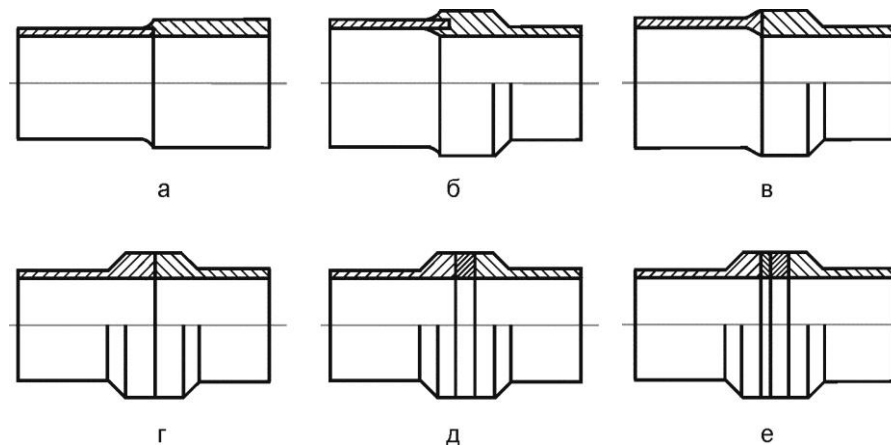


Рисунок 1.4 - Конструкция стыков сварных соединений трубных переходников

Из приведенного анализа работ по стыковой сварке дугой низкого давления следует, что этот процесс нашел применение в основном для сварки трубных переходников из трудно свариваемых пар разнородных металлов.

Кроме того, этот анализ показал, что применение стыковой сварки дугой низкого давления ограничено диапазоном диаметров свариваемых трубных заготовок 6...40 мм с площадью сечения до 300 мм². Имеется также ограничение по тонкостенности трубной заготовки – отношение диаметра к толщине стенки не должно превышать 20.

Эти ограничения связаны с природой нагрева торцов труб дугой низкого давления и имеют следующее объяснение.

Необходимым условием качественного формирования сварных соединений при стыковой сварке дугой низкого давления является равномерность нагрева и оплавления торцевых поверхностей свариваемых деталей. Распределение теплового потока дуги по торцевым поверхностям деталей происходит в процессе хаотического блуждания катодных пятен. Площадь торца, на которой происходит тепловыделение, возрастает с

увеличением числа катодных пятен, скорости их блуждания и временем нагрева. Таким образом, условия равномерного нагрева и оплавления определяются статистической природой блуждания катодных пятен по торцам деталей и, следовательно, равномерность нагрева носит статистический характер.

Равномерный нагрев и оплавление торцевых поверхностей достигаются при определённой плотности тока и длительности нагрева.

Из-за статистического характера тепловыделения при сварке дугой низкого давления равномерность нагрева и оплавления торцов, необходимая для качественного формирования соединений, достаточно легко обеспечивается лишь в ограниченном диапазоне диаметров труб и их тонкостенности. С увеличением диаметра труб и их тонкостенности получение равномерного нагрева и оплавления их торцов за счёт хаотического блуждания катодных пятен усложняется, что проявляется в снижении стабильности формирования соединений.

Учитывая высокое качество процесса формирования соединений при стыковой сварке дугой низкого давления представляется целесообразным расширить область применения этого способа сварки в сторону увеличения диаметров свариваемых трубных заготовок.

В данной работе с целью расширения области применения способа стыковой сварки дугой низкого давления для сварки трубных заготовок переходников диаметром до 100 мм предложено на дугу, горящую в зазоре между их торцами, наложить поперечное магнитное поле. Можно предположить, что применение магнитного поля существенно улучшит равномерность нагрева торцевых поверхностей благодаря наложению на хаотическое блуждание катодных пятен их вращения по торцам труб.

1.3 Применение поперечного магнитного поля при сварке и в других технологических процессах и устройствах

В промышленности широко применяются магнитные поля в различных технологических процессах. Их использование зачастую связано с расширением технологических возможностей какого-либо процесса или необходимостью его стабилизации.

В металлургической отрасли магнитные поля используют в сварке, литейном производстве, при нанесении покрытий и в других процессах.

В сварочном производстве магнитные поля применяются для перемещения сварочной дуги, перемешивания сварочной ванны, формирования швов и наплавляемых валиков, размагничивания изделий перед сваркой и т.д.

Для оценки целесообразности применения поперечного магнитного поля при стыковой сварке дугой низкого давления наибольший интерес представляют известные процессы и устройства, в которых поперечное магнитное поле используется для вращения дуги по обрабатываемой поверхности.

Известны две схемы сварки труб дугой, управляемой магнитным полем. Первая схема (рис. 1.5–а) характеризуется тем, что дуга горит в зазоре между торцами свариваемых деталей замкнутой трубчатой формы. При второй схеме (рис. 1.5–б) дуга горит между свариваемыми деталями и вспомогательным электродом, также имеющим замкнутую форму.

Наибольшее применение получила первая схема, известная также под названием дуго-контактной сварки [43-48]. Она используется при сварке различных трубопроводов для газификации населённых пунктов, в котельном и сантехническом производстве, в автомобильной промышленности (детали карданного вала, амортизатора, пневматической пружины, вакуумного усилителя тормозов и др.), в машиностроении, строительстве,

инструментальном производстве (ниппели, штуцера с трубами, свёрла, метчики, арматура диаметром 8...20 мм).

Вторая схема получила применение при сварке труб с трубными досками и тонкостенных цилиндрических деталей.

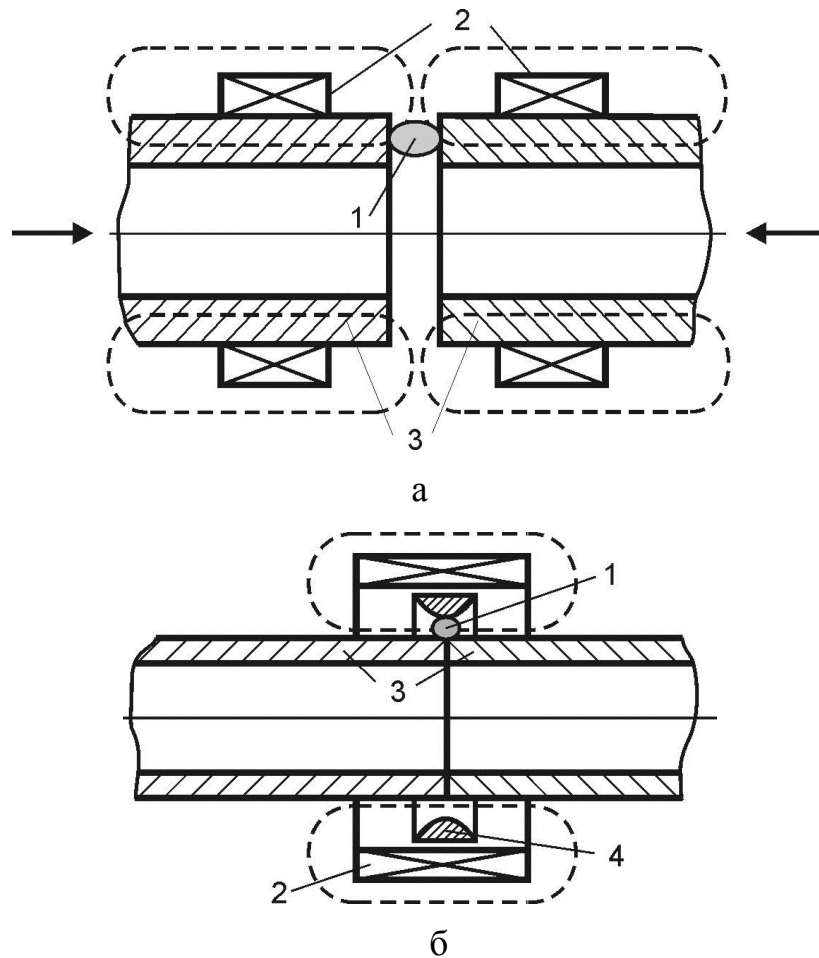


Рисунок 1.5 - Принципиальные схемы сварки дугой, управляемой магнитным полем: 1 – электрическая дуга; 2 – устройства создания магнитного поля; 3 – свариваемые детали; 4 – вспомогательный электрод

При дуго-контактной сварке свойства дуги ничем не отличаются от обычной сварочной дуги, горящей при атмосферном давлении (дуги высокого давления). Основным отличием является наложение поперечного магнитного поля на дугу, в результате чего ей придаётся скорость, направленная по окружности торцов труб.

Дуго-контактная сварка используется для сварки труб из однородных металлов и сплавов. Она отличается отсутствием жёстких требований к

чистоте свариваемых поверхностей, небольшим временем сварки (1,5...30 с), равномерным и концентрированным нагревом торцов свариваемых деталей, отсутствием потребности в сварочных материалах, незначительными размерами наружного и внутреннего грата, равнопрочностью сварных соединений основному металлу, высокой производительностью [49].

При сварке низкоуглеродистых сталей этот процесс осуществляют на воздухе. При сварке коррозионностойких сталей аустенитного класса, алюминиевых и медных сплавов используется защитная атмосфера аргона.

Проводились исследования по сварке разнородных металлов [50] алюминий АД1 + медь М1. Установлено, что использование дуги, движущейся под действием магнитного поля, в качестве источника нагрева при стыковой сварке обеспечивает оптимальный нагрев свариваемых торцов, но работоспособность и прочность сварных соединений определяется наличием в зоне соединения интерметаллидных прослоек, что исключает их применение в ответственных конструкциях.

Таким образом, практика применения дуго-контактной сварки свидетельствует о возможности равномерного нагрева торцов труб за счет распределения по ним эффективной мощности дуги в результате вращения дуги в поперечном магнитном поле.

Поперечное магнитное поле широко используется в различных технологических процессах и устройствах для управления дуговым разрядом в вакууме.

Вакуумная дуга и дуга, горящая при низком давлении газа, существенно отличается от дуги высокого давления, например, обычной сварочной дуги.

На катоде вакуумной дуги, горящей в парах металла катода, существует множество катодных пятен. При отсутствии внешних магнитных полей катодные пятна хаотически с большой скоростью перемещаются по

поверхности катода по законам броуновского движения [51, 52]. В зависимости от условий разряда скорость перемещения пятен составляет от нескольких единиц до нескольких десятков метров в секунду.

Однако перемещение катодного пятна является кажущимся – оно отражает смещение проводящей области при делении и исчезновении катодного пятна или составляющих его ячеек.

Катодное пятно перемещается скачкообразно. В результате движения пятна образуется цепочка перекрывающихся кратеров.

Одной из вероятных причин хаотического движения катодных пятен может быть эффект компенсации положительного объемного заряда, создаваемого ионами в катодной области, отрицательным объемным зарядом, создаваемом электронами, которые эмитирует катод [53-55]. Компенсационный провал результирующего электрического поля в катодной области E_k приводит к уменьшению электронной эмиссии и нарушает устойчивость процесса.

При большом компенсационном провале происходит гибель пятна или его смещение на новое место в сторону максимальной напряженности электрического поля. Уменьшение давления паров металла или газа в прикатодной области способствует увеличению степени компенсации электрического поля. Это объясняется тем, что по мере уменьшения давления уменьшаются концентрация нейтральных атомов, а, следовательно, и ионов. В результате этого при уменьшении давления возрастает скорость хаотического блуждания катодных пятен и площадь поверхности катода, которую охватывает дуговой разряд.

Катодные пятна вакуумной дуги при воздействии внешнего магнитного поля движутся в направлении противоположном правилу Ампера. На рис. 1.6 приведена схема воздействия магнитного поля на катодное пятно.

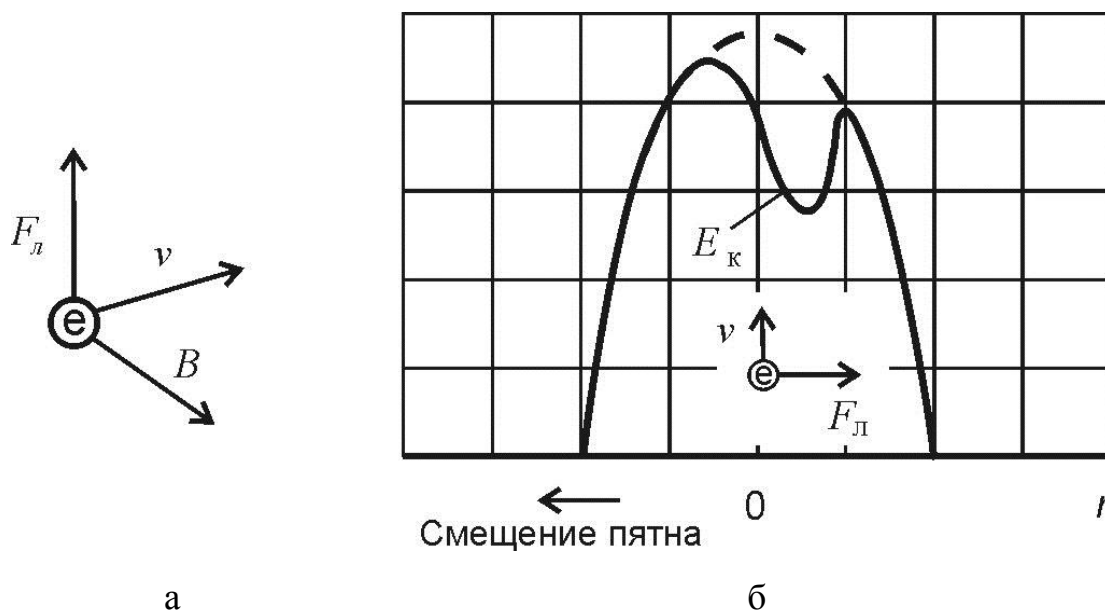


Рисунок 1.6 - Схема воздействия магнитного поля на катодное пятно:
 а – сила Лоренца, действующая на электрон, движущийся в магнитном поле;
 б – компенсация объемного положительного заряда над катодным пятном

При наличии поперечного магнитного поля под воздействием силы Лоренца происходит отклонение потока электронов, выходящих из катодного пятна. Поток электронов компенсирует объёмный положительный заряд ионов над катодным пятном. При этом максимум напряжённости смещается в сторону, противоположную силе Лоренца. В этом же направлении смещается центр электронной эмиссии

Поперечное магнитное поле применяется в вакуумных дугогасительных камерах вакуумных выключателей [56, 57]. Пример контактной системы вакуумной дугогасительной камеры с поперечным магнитным дутьем с серповидными контактами, применяемой в вакуумных выключателях на номинальные напряжения 10 кВ с номинальным током 1600 А и током отключения до 31,5 кА представлен на рис. 1.7.

Это устройство работает следующим образом. При размыкании контактов между полюсами вакуумной дугогасительной камеры вспыхивает дуга, которая сопровождается сильной катодной эрозией контактов. Ток,

текущий в спиральных частях электродов, создает магнитное поле, вызывающее вращательное движение катодных пятен дуги.

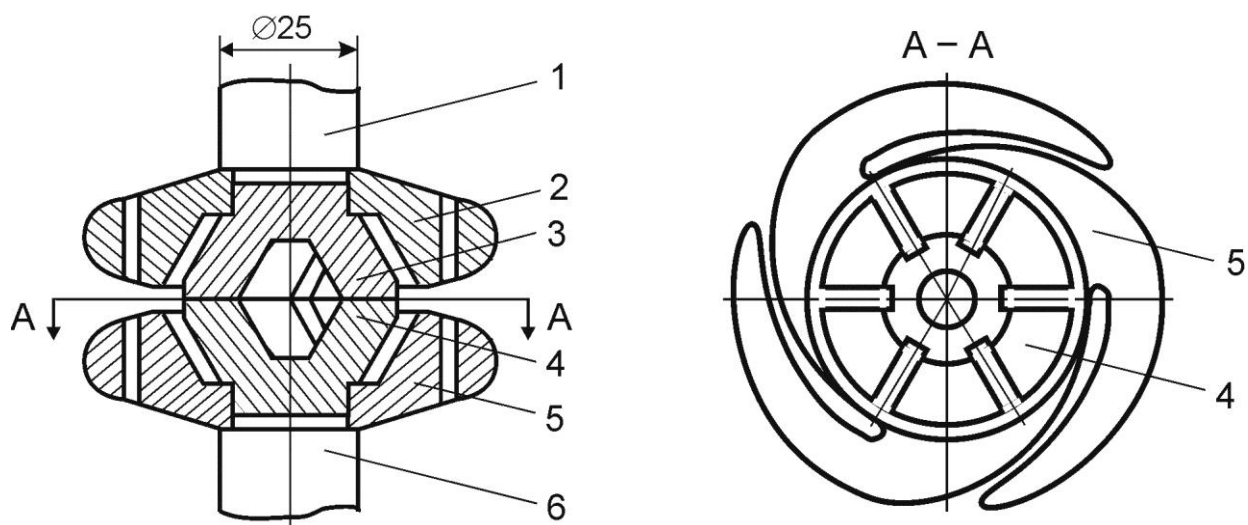


Рисунок 1.7 – Контактная система вакуумной дугогасительной камеры вакуумного выключателя на 10 кВ, 1600А: 1 – подвижный токоввод; 2, 5 – дугогасящие электроды; 3, 4 - контакты; 6 – неподвижный токоввод

Магнитное поле создаёт условия для уменьшения катодной эрозии [58]. В этом случае кроме хаотического блуждания катодных пятен в результате взаимодействия с магнитным полем возникает их направленное движение, скорость которого возрастает с увеличением магнитной индукции поля. Скорость направленного движения катодных пятен может в десятки раз превышать скорость их хаотического блуждания, что и приводит к снижению катодной эрозии.

При небольших токах катодные пятна движутся в направлении, обратном правилу Ампера. Это связано с тем, что при малых токах давление пара мало. При больших токах, когда давление пара приближается к атмосферному, катодные пятна движутся в прямом направлении. В обоих случаях энергия дуги во время ее горения рассеивается на большей площади электродов. Поэтому по сравнению с плоскими дисковыми электродами такие электроды способны отключать большие токи.

Магнитное поле также широко применяется при вакуумном конденсационном нанесении покрытий [59] для управления перемещением дуги по поверхности катода, для обеспечения его равномерной эрозии, для воздействия на ионизационные частицы потока.

Управляя вектором скорости плазменного потока внешним магнитным полем, можно наносить покрытия равномерной толщины на крупногабаритные изделия и детали сложной геометрической формы [60].

Для различных технологических процессов и устройств, использующих дуговые разряды в вакууме, большое значение имеет стабилизация разрядов на катодах [61].

Для вакуумных дуговых разрядов с горячим катодом проблемы стабилизации практически не возникает, так как в этом случае разряд на катоде всегда стабилизирован. Для вакуумных разрядов с холодным катодом, в которых ток переносится на катод в большом количестве микропятен, хаотически перемещающихся по поверхности катода, стабилизация разряда необходима.

Для стабилизации разряда на холодных катодах используются закономерности перемещения катодных пятен во внешнем магнитном поле. Основы такой стабилизации изложены в работе [62].

На рис. 1.8 приведена схема перемещения катодного пятна в однородном внешнем магнитном поле.

При взаимодействии с компонентом магнитного поля \bar{B}_x катодное пятно перемещается по оси y в направлении, обратном правилу Ампера (за плоскость рисунка). При этом наличие компонента магнитного поля \bar{B}_z вызывает перемещение катодного пятна по оси x в направлении острого угла, образованного силовыми линиями магнитного поля с поверхностью катода.

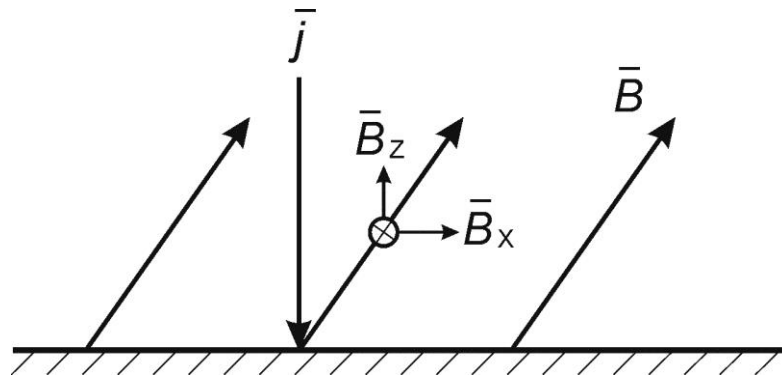


Рисунок 1.8 – Схема перемещения катодного пятна в однородном внешнем магнитном поле: j – вектор плотности тока; B – вектор индукции магнитного поля

На рис. 1.9 приведен пример стабилизации катодного пятна магнитным полем на кольцевом катоде. Кольцевой катод помещен между полюсами электромагнита. Разряд на кольцевом катоде стабилизируется на окружности, где индукция внешнего магнитного поля имеет один компонент, параллельный поверхности катода. Катодные пятна перемещаются по окружности в направлении, обратном направлению действия силы Ампера, а скорость их перемещения может регулироваться изменением величины индукции внешнего магнитного поля [63].

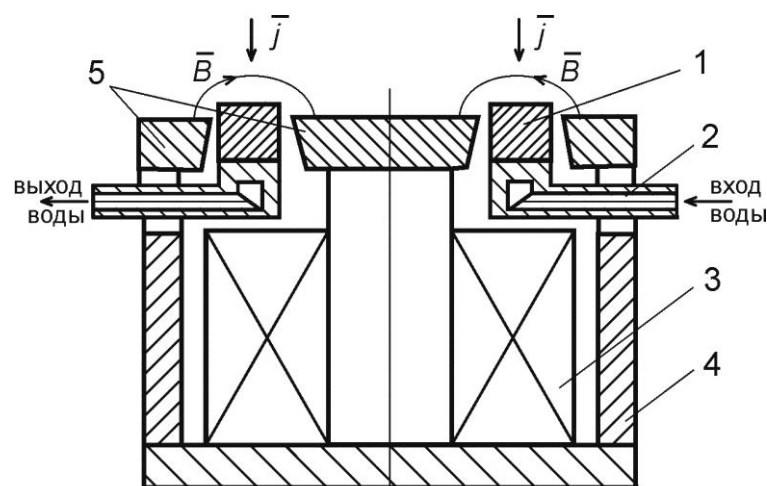


Рисунок 1.9 – Стабилизация вакуумной дуги на кольцевом катоде:
1- катод, 2 – водоохлаждаемая державка, 3 – катушка электромагнита,
4 – магнитопровод, 5 – полюса электромагнита

При случайных отклонениях от стационарной траектории пятно во всех случаях попадает в область, где вектор индукции внешнего магнитного поля образует острый угол с поверхностью катода, и, смещаясь в сторону уменьшения острого угла, возвращается на стационарную траекторию.

В работе [58, 64] исследована зависимость скорости движения катодного пятна вакуумной дуги в поперечном магнитном поле от величины магнитной индукции для различных металлов катода. На рис. 1.10 приведён график зависимости скорости пятна от магнитной индукции для медного катода, а в табл. 1.1 приведены скорости движения пятен для катодов из нержавеющей стали и титана.

Установлено, что в определённом интервале магнитной индукции скорость пятна практически пропорциональна величине магнитной индукции: $V_{\text{п}} = KB$, где $V_{\text{п}}$ – скорость пятна; B – магнитная индукция. Коэффициент пропорциональности K назвали подвижностью пятна. При дальнейшем увеличении магнитной индукции наступает насыщение.

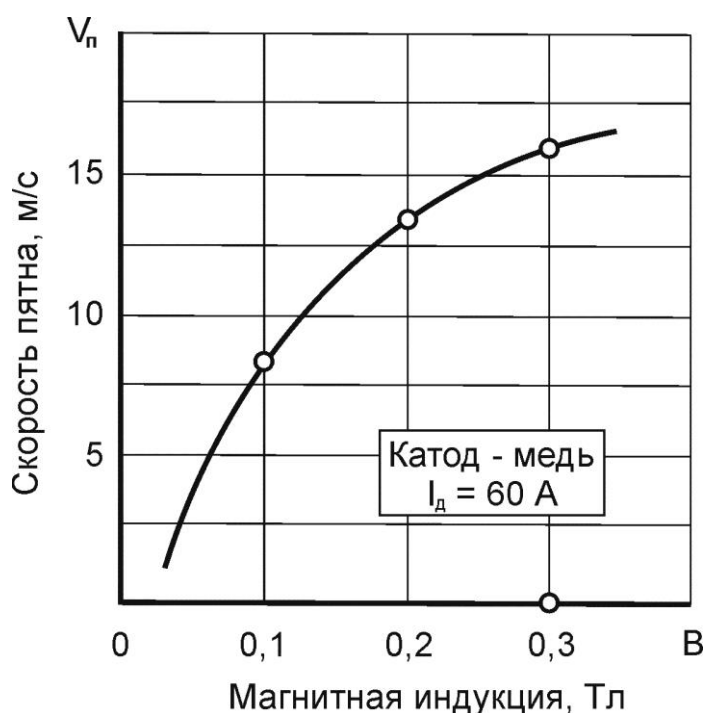


Рисунок 1.10 - Зависимость скорости катодного пятна вакуумной дуги от магнитной индукции

Таблица 1.1 - Связь скорости движения катодных пятен с величиной магнитной индукции

Катод	I , А	B , Тл	K , м/(с·Тл)
Сталь нерж.	35	0,05-0,2	300
Титан	35	0,05-0,2	400

Таким образом, направленная скорость движения катодного пятна вакуумной дуги в поперечном магнитном поле может значительно превышать скорость его хаотического блуждания.

Дуга низкого давления с холодным катодом по своим физическим свойствам близка к вакуумной дуге. Несмотря на присутствие газа, дуга низкого давления аналогично вакуумной дуге горит практически в парах металла катода, так как пары металлов обладают значительно более низким потенциалом ионизации, чем газы.

Однако, такие важные свойства дуги низкого давления, как характер распределения плотности тока в столбе и на катоде, закономерности формирования и движения катодных пятен, в значительной мере определяются природой и давлением газа.

При стыковой сварке дугой низкого давления процесс осуществляется при абсолютном давлении аргона порядка 1000 Па. Присутствие инертного газа в сильной степени упростило зажигание дугового разряда и благодаря существенному снижению критической силы катодного пятна повысило его устойчивость. По-видимому, присутствие инертного газа должно повлиять также на движение катодных пятен в поперечном магнитном поле.

Приведенные примеры магнитного управления дугой подтверждают целесообразность проведения исследований и разработок по улучшению равномерности нагрева торцов труб при стыковой сварке дугой низкого давления за счет наложения поперечного магнитного поля на дугу в зазоре между их торцами.

1.4 Цель и задачи исследований

Целью исследований является расширение технологических возможностей стыковой сварки дугой низкого давления и специального сварочного оборудования для сварки заготовок трубных переходников диаметром до 100 мм путём использования движения катодных пятен дуги в поперечном магнитном поле.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1) Разработать установку для проведения экспериментальных исследований, устройства и методики для измерения скорости движения катодных пятен и распределения температуры на торцах трубных заготовок.

2) Исследовать влияние поперечного магнитного поля на катодные процессы и определить зависимость скорости направленного движения катодных пятен от магнитной индукции при абсолютном давлении аргона 800 Па, при котором осуществляется процесс сварки.

3) Исследовать влияние поперечного магнитного поля на распределение температуры на торцевых поверхностях труб и определить условия, обеспечивающие их равномерный нагрев.

4) Разработать способы и устройства для создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами свариваемых труб.

5) Модернизировать установку «СТЫК-3» для сварки дугой низкого давления в поперечном магнитном поле трубных заготовок переходников диаметром до 100 мм.

6) Изучить особенности формирования, структурную и химическую неоднородность сварных соединений трубных заготовок переходника алюминиевый сплав АМгЗ + титановый сплав ОТ4 диаметром 70 мм.

7) Разработать технологию сварки и исследовать свойства и работоспособность сварных соединений трубных заготовок переходника АМгЗ+ОТ4.

Выводы по главе 1

1. Наибольшее применение при изготовлении трубных переходников нашли методы сварки давлением – трением, клинопрессовая, прокаткой, взрывом, и др. При этих методах сварки формирование соединений происходит в твёрдой фазе в процессе значительных пластических деформаций заготовок. Трубные переходники получают механической обработкой биметаллических заготовок в виде прутков, толстостенных труб, листов и др. Такая технология изготовления переходников характеризуется большой трудоёмкостью и низким коэффициентом использования металлов.

2. При изготовлении трубных переходников нашёл применение способ стыковой сварки дугой низкого давления. Он характеризуется высоким качеством формирования соединений благодаря наличию эффективной катодной очистки торцов от оксидных плёнок, сваркой в инертной атмосфере низкого давления и возможностью ограничения теплового взаимодействия металлов при формировании соединений по схеме сваркопайки. Однако применение способа стыковой сварки дугой низкого давления ограничено диапазоном диаметров трубных заготовок 6...40 мм. Это обусловлено тем, что при больших диаметрах усложняется получение равномерного нагрева и оплавления торцов свариваемых труб.

3. Актуальной задачей является распространение применения способа стыковой сварки дугой низкого давления на сварку трубных заготовок переходников диаметром до 100 мм.

Для улучшения равномерности нагрева и оплавления торцов труб предложено на дуговой разряд, горящий в зазоре между ними, наложить поперечное магнитное поле, что обеспечит помимо хаотического блуждания катодных пятен их направленное движение по окружности торцов труб.

4. Сформулированы цель и задачи исследований.

Глава 2 Исследование влияния поперечного магнитного поля на свойства дуги низкого давления при стыковой сварке

2.1 Разработка установки для проведения экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований влияния поперечного магнитного поля на дугу низкого давления была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 2.1).

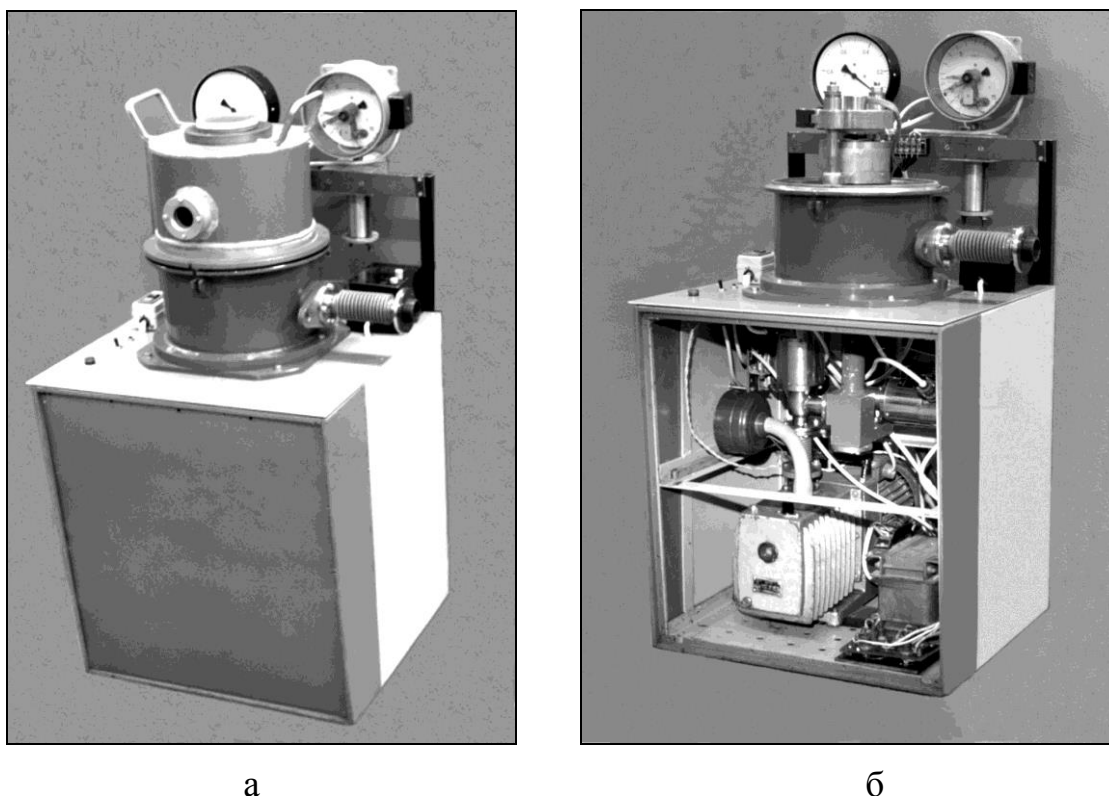


Рисунок 2.1 - Внешний вид экспериментальной установки:
а – в собранном состоянии, б – со снятыми крышкой вакуумной камеры и
передней стенкой корпуса

Основными элементами установки являются:

- вакуумная камера,
- система вакуумирования и газопитания камеры,
- зажимы для нагреваемых труб со встроенным электромагнитом для создания поперечного магнитного поля в зазоре между их торцами;
- электрическая схема питания дуги;
- система компьютерного управления экспериментальными исследованиями.

Вакуумная камера

Вертикальная вакуумная камера состоит из корпуса и съемной верхней части. Внутри корпуса установлены зажимы для нагреваемых труб. На дне корпуса камеры имеется фланец для подключения системы вакуумирования. В задней части стенки камеры расположены два токоввода и штуцер для подачи в камеру аргона. На верхней части камеры имеются два окна. Окно на вертикальной стенке предназначено для визуального наблюдения дуги, а окно, расположенное сверху, для регистрации процессов на катоде дуги с помощью фото- и киносъемки и других специальных устройств.

За камерой на стойках расположена система наполнения камеры аргоном.

Система вакуумирования и газопитания

Система обеспечивает вакуумирование камеры, наполнение ее до заданного абсолютного давления аргоном и наполнение камеры атмосферным воздухом после эксперимента (рис. 2.2).

Вакуумирование камеры производится механическим насосом 12 пластинчато-роторного типа 2НВР-5Д производительностью 5 л/с. Вакуумные клапаны 10, 11 типа КМУ-25 имеют Ду=25 мм и предназначены соответственно для автоматического включения вакуумирования камеры и напуска в нее атмосферного воздуха.

На вход системы газопитания подключен баллон с аргоном. Редуктор, установленный на баллоне, настраивается на давление 0,4 МПа.

Электромагнитный клапан 1 типа П-ЭПК-12 предназначен для наполнения дозатора аргоном, а клапан 6 того же типа - для выпуска аргона из дозатора в вакуумную камеру. Электроконтактный мановакуумметр 4 типа ЭКМВ используется для измерения давления газа в дозаторе. Благодаря

наличию блокировочных контактов он также задает верхнее и нижнее граничные значения этого давления.

Дроссели 2 и 5 снижают скорость течения аргона и обеспечивают плавное изменение давления в дозаторе, что необходимо для точной фиксации его граничных значений.

Наполнение дозатора происходит автоматически при включении установки и после каждого наполнения камеры аргоном.

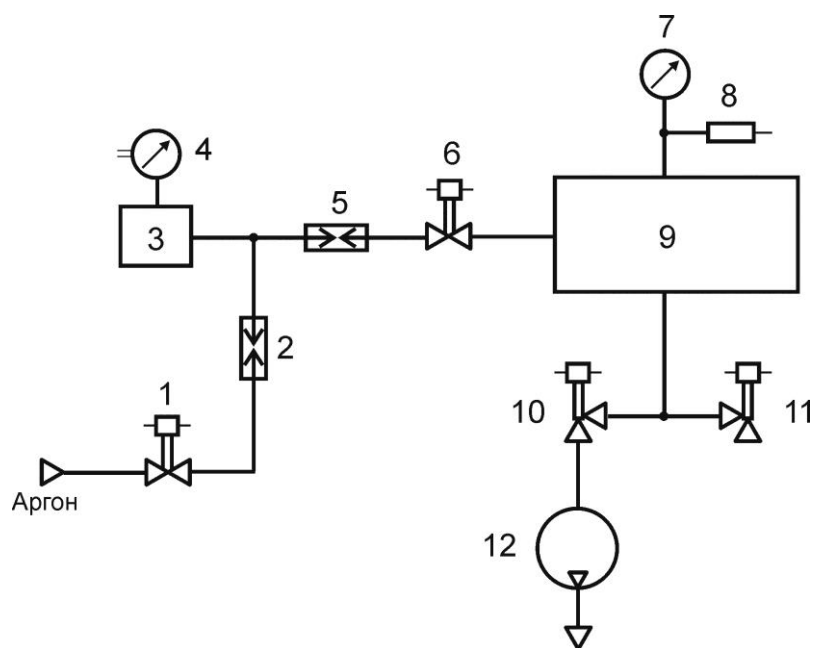


Рисунок 2.2 - Схема системы вакуумирования и газопитания

Остаточное давление воздуха в камере измеряется двумя вакуумметрами: деформационным вакуумметром 7 типа ВО и вакуумметром ВИТ-3. Его манометрический преобразователь 8 типа ПМТ-4М подсоединен к камере.

На рис. 2.3 приведена электрическая схема управления системой вакуумирования и газопитания камеры.

С помощью автомата защиты F1 производится включение питания электрической схемы. При этом срабатывает клапан Y3 и происходит наполнение дозатора аргоном. Наполнение аргоном дозатора происходит до давления, при котором срабатывает контакт КВ электроконтактного

мановакуумметра ЭКМВ. При этом сработает ребе К2, которое своим нормально замкнутым контактом отключит питание клапана Y3.

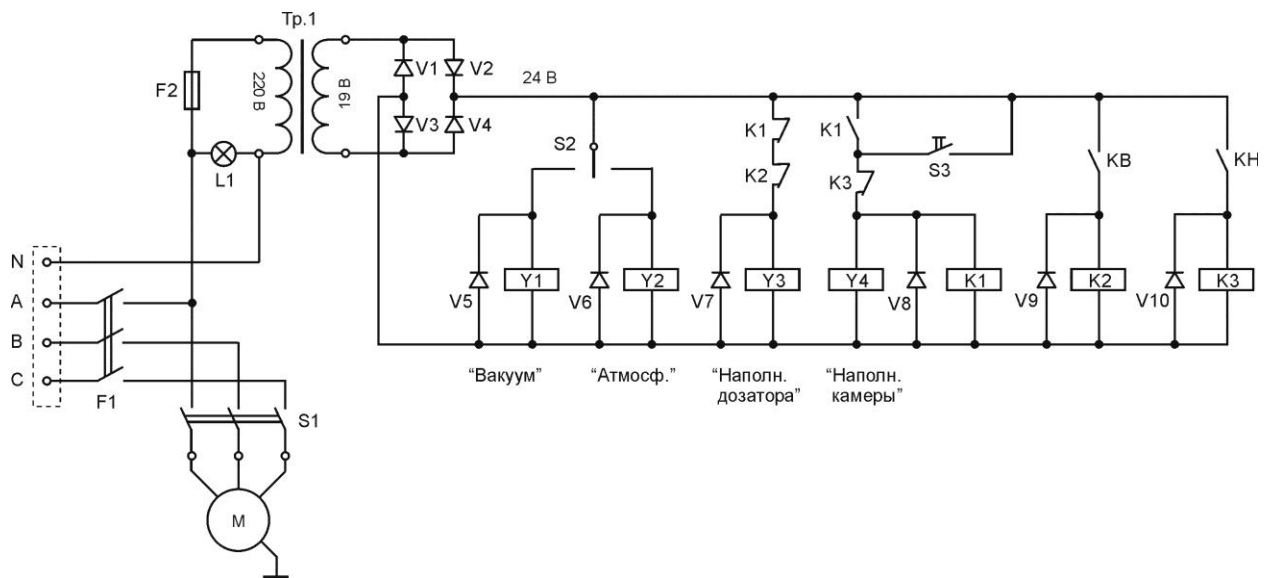


Рисунок 2.3 – Электрическая схема управления вакуумированием камеры и наполнением ее аргоном

Для включения вакуумного насоса оператор включает кнопочный выключатель S1. Для вакуумирования камеры оператор переводит трёхпозиционный выключатель S2 в левое (по схеме) положение. При этом срабатывает электромагнитный вакуумный клапан Y1. При достижении необходимого значения вакуума оператор переводит переключатель S2 в среднее положение и вакуумирование камеры прекращается. Для наполнения камеры аргоном оператор кратковременно нажимает кнопку S3. При этом срабатывает клапан Y4 и промежуточное реле K1. Происходит наполнение камеры аргоном из дозатора. Нормально разомкнутый контакт K1 блокирует кнопку S3, а нормально замкнутый контакт разрывает цепь питания клапана Y3, что предотвращает наполнение дозатора аргоном при наполнении аргоном камеры. Наполнение камеры происходит до тех пор, пока давление в дозаторе уменьшится до минимального значения, при котором работает контакт КН ЭКМВ. При этом сработает промежуточное реле К3, которое отключает питание клапана Y4 и промежуточного реле К1. При замыкании

нормально замкнутого контакта К1 происходит наполнение дозатора аргоном.

Рабочее давление в камере определяется порцией газа, поступившей из дозатора, и рассчитывается по формуле: $p_k = k \cdot \Delta p_d$, где Δp_d – изменение давления в дозаторе при наполнении камеры, равное разности верхнего и нижнего граничных значений давления по мановакуумметру ЭКМВ; k – постоянная дозатора, зависящая от соотношения объемов дозатора и камеры. Постоянная k дозатора определяется экспериментально.

Зажимы для нагреваемых труб

Зажимы установлены на двух вертикальных направляющих (рис. 2.4). Они предназначены для фиксации нагреваемых труб и обеспечивают токоподвод к ним от источника питания дуги.

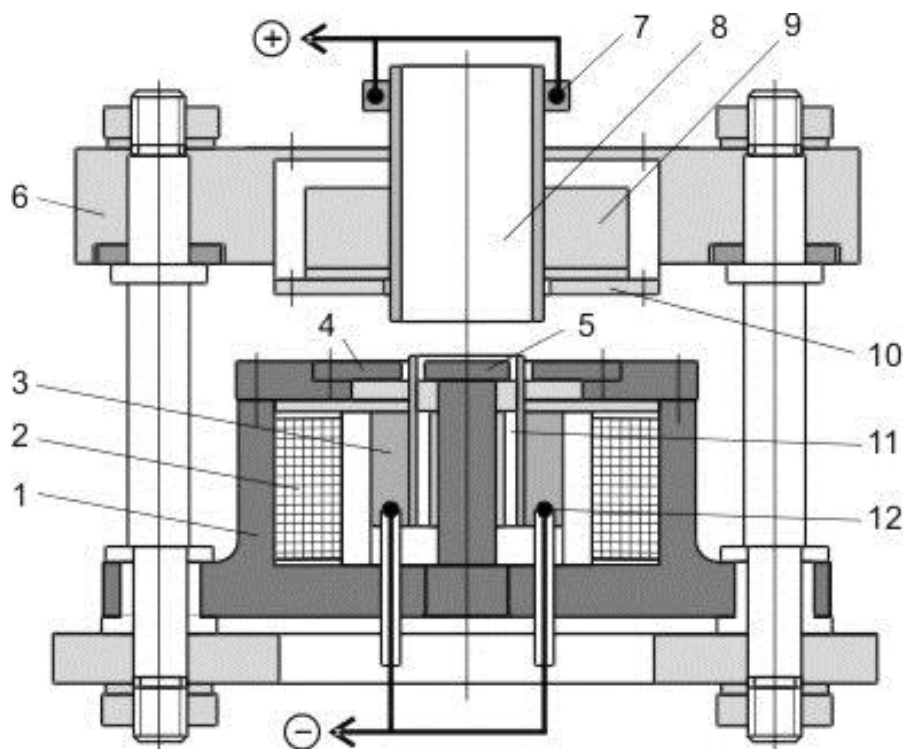


Рисунок 2.4 – Схема зажимных устройств с электромагнитом для создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами труб

Верхнее зажимное устройство состоит из корпуса 6, зажимной втулки 9 и токоподвода 7. Нижнее зажимное устройство конструктивно совмещено с

электромагнитом, служащим для создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами труб, и состоит из корпуса электромагнита 1, обмотки 2, зажимной втулки 3, полюсных наконечников 4 и 5, токоподвода 12.

Защитный экран 10 и полюсные наконечники 4, 5 препятствуют распространению разряда на боковые поверхности труб.

Труба 11, установленная в нижнем зажиме, подключается к отрицательному полюсу источника питания дуги. Поэтому при горении дуги торец этой трубы является катодом. Труба 8, установленная в верхнем зажиме при горении дуги является анодом. Диаметр верхней трубы больше диаметра нижней трубы. Это позволяет наблюдать через верхнюю трубу катодные процессы на торце нижней трубы.

Расчёт магнитопровода Целью расчёта является определение зависимости магнитной индукции в зазоре от магнитодвижущей силы (ампер-витков обмотки) и от силы тока в обмотке электромагнита.

На рис. 2.5 представлен эскиз магнитопровода. Магнитопровод состоит из 6 участков, каждый из которых характеризуется длиной l и площадью поперечного сечения S .

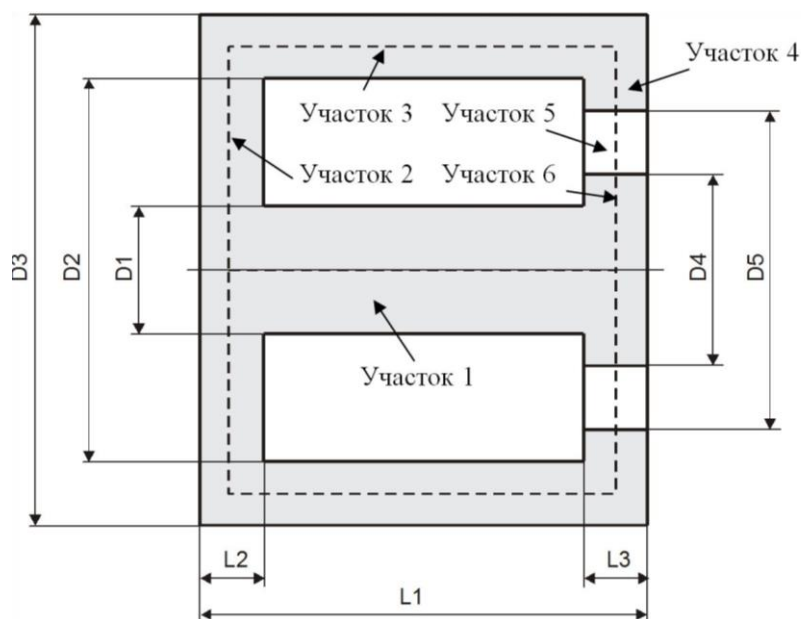


Рисунок 2.5 - Эскиз магнитопровода, размеры в м:
 $D1=0,02$; $D2=0,1$; $D3=0,12$; $D4=0,023$; $D5=0,033$; $L1=0,07$; $L2=0,015$; $L3=0,01$

$$\begin{aligned}
 \text{Участок 1 (стержень):} \quad & l_1 = L_1 - \frac{L_2}{2} - \frac{L_3}{2}; \quad S_1 = \frac{\pi D_1^2}{4}. \\
 \text{Участок 2 (кольцо):} \quad & l_2 = \frac{(D_2 - D_1)}{2}; \quad S_2 = \frac{\pi(D_1 + D_2)}{2} \cdot L_2. \\
 \text{Участок 3 (цилиндр):} \quad & l_3 = L_1 - \frac{L_2}{2} - \frac{L_3}{2}; \quad S_3 = \frac{\pi(D_2 + D_3)}{2} \cdot \frac{(D_3 - D_2)}{2}. \\
 \text{Участок 4 (кольцо):} \quad & l_4 = \frac{(D_2 - D_5)}{2}; \quad S_4 = \frac{\pi(D_2 + D_5)}{2} \cdot L_3. \\
 \text{Участок 5 (кольцо):} \quad & l_5 = \frac{(D_5 - D_4)}{2}; \quad S_5 = \frac{\pi(D_5 + D_4)}{2} \cdot L_3. \\
 \text{Участок 6 (кольцо):} \quad & l_6 = \frac{(D_4 - D_1)}{2}; \quad S_6 = \frac{\pi(D_4 + D_1)}{2} \cdot L_3.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Магнитные сопротивления участков выражаются формулами:

$$\begin{aligned}
 R_{M1} &= \frac{l_1}{\mu\mu_0 S_1}; \quad R_{M2} = \frac{l_2}{\mu\mu_0 S_2}; \quad R_{M3} = \frac{l_3}{\mu\mu_0 S_3}; \\
 R_{M4} &= \frac{l_4}{\mu\mu_0 S_4}; \quad R_{M5} = \frac{l_5}{\mu_0 S_5}; \quad R_{M6} = \frac{l_6}{\mu\mu_0 S_6}.
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Магнитный поток равен:

$$\Phi = \frac{Iw}{\sum_{i=1}^{i=6} R_i}, \tag{2.3}$$

где Iw – магнитодвижущая сила (ампер·витки).

Магнитная индукция в зазоре выражается формулой:

$$B_5 = \frac{\Phi}{S_5} = \frac{Iw}{S_5 \cdot \sum_{i=1}^{i=6} R_i}, \text{ Тл.} \tag{2.4}$$

μ - относительная магнитная проницаемость железа «армко», из которого изготовлен магнитопровод; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума. Расчеты показали, что при номинальной длине воздушного зазора, равной 5 мм, его магнитное сопротивление практически на два порядка больше магнитного сопротивления магнитопровода. Поэтому можно записать:

$$B_5 \approx 8\pi \cdot 10^{-5} \cdot Iw. \tag{2.5}$$

Обмотка электромагнита имеет 400 витков. На рис. 2.6 приведена зависимость магнитной индукции в зазоре от силы тока в обмотке электромагнита. Для экспериментального определения значения магнитной индукции в зазоре использовался магнитометр АТЕ-8702 фирмы Актакон. Работа датчика магнитометра основана на эффекте Холла. Экспериментальные значения индукции практически совпадают с расчетными.

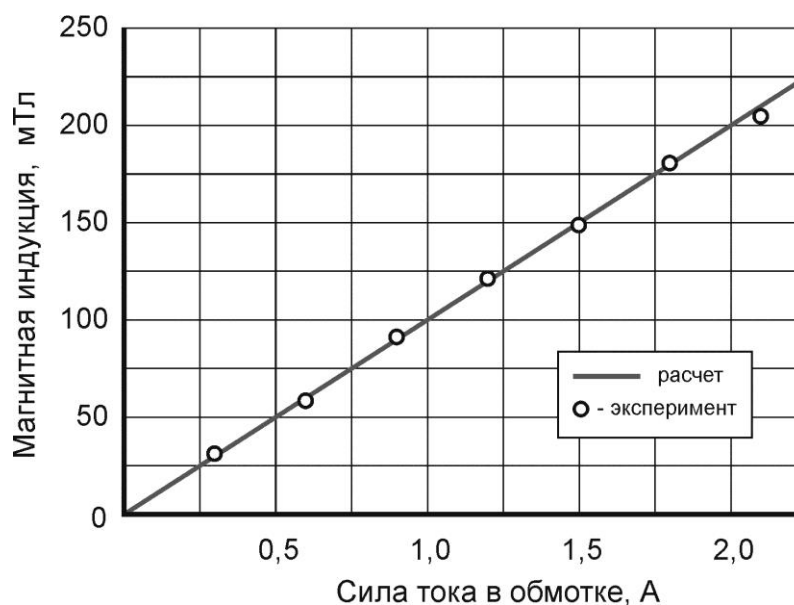


Рисунок 2.6 - Зависимость магнитной индукции от силы тока в обмотке электромагнита

Для питания обмотки электромагнита используется трёхфазный двухполупериодный выпрямитель (рис. 2.7), выполненный на трансформаторе Т1 и диодах V1...V6. Регулировка силы тока в обмотке осуществляется резистором R1. Для измерения силы тока используется амперметр А. Сигнал, пропорциональный силе тока в обмотке электромагнита, с резистора R2 подается в компьютер. Включение обмотки происходит с помощью контакта реле К1 по команде из компьютера. Диод V7 используется для исключения возникновения перенапряжений на обмотке при размыкании контакта К1.

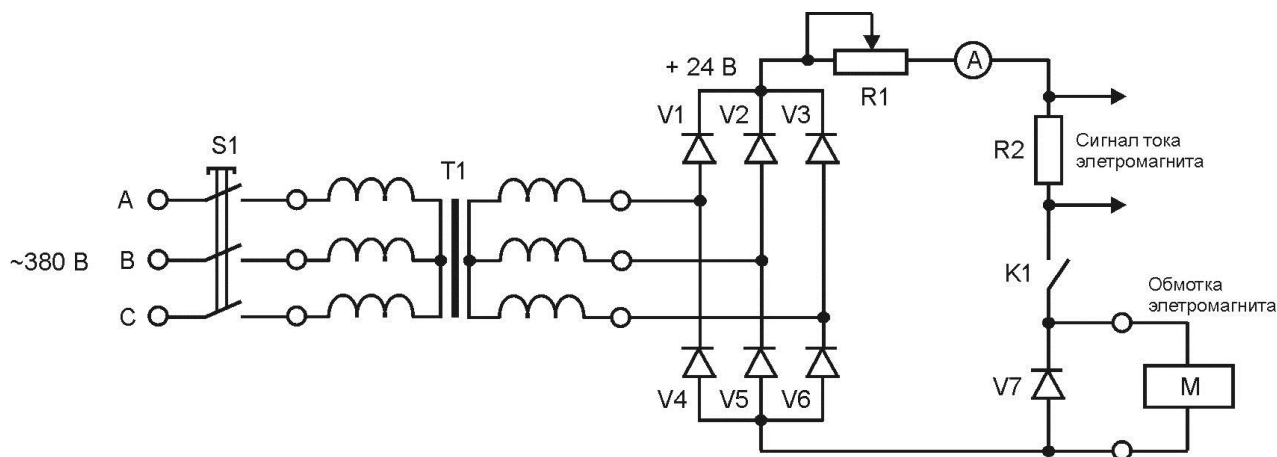


Рисунок 2.7 - Электрическая схема питания обмотки электромагнита

Электрическая схема питания дуги

Для питания электрической дуги постоянным током разработана и изготовлена схема, представленная на рис. 2.8.

Электрическая схема состоит из следующих функциональных частей:

- аккумуляторная батарея АКБ предназначена для питания электрической дуги постоянным током; батарея состоит из четырёх последовательно включённых стандартных аккумуляторных батарей с напряжением 12 В и ёмкостью 50 А·ч; кроме аккумуляторной батареи использовался сварочный ММА инвертор «ФОРСАЖ-315»;

- балластный реостат РБ типа РБ – 302 предназначен для регулировки силы тока дуги;

- транзистор VS1 является биполярным транзистором с изолированным затвором (IGBT-транзистор) и предназначен для включения и выключения тока дуги; в схеме использован транзистор GA200SA60U;

- схема управления транзистором содержит источник DC/DC изолированного напряжения ± 12 В, резисторы R3...R5 и реле K2;

- электрическая схема зажигания дугового разряда содержит двухполупериодный выпрямитель (трансформатор Тр.1 и диоды V1...V4), резисторы R1, R2 и конденсаторы C1, C2;

- диод V6 согласует работу аккумуляторной батареи и схемы зажигания дуги на общую нагрузку – дуговой промежуток между торцами труб.

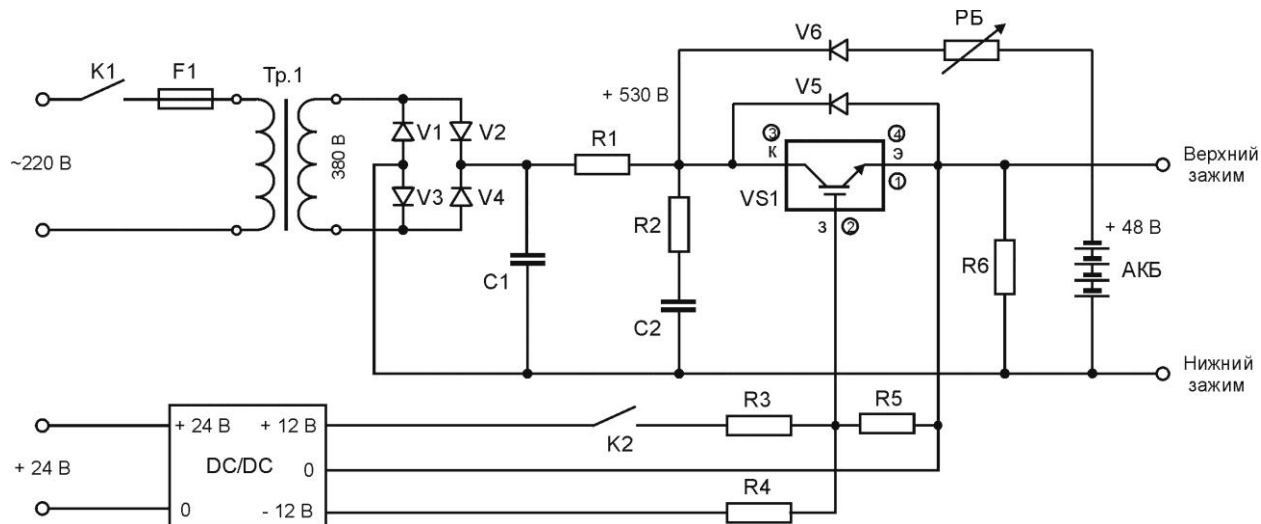


Рисунок 2.8 - Электрическая схема питания дуги

Схема работает следующим образом. В исходном состоянии транзистор VS1 заперт, так как на его затвор подано отрицательное напряжение относительно эмиттера от источника DC\DC.

По команде из компьютера происходит замыкание контакта реле K1. Это приводит к зарядке конденсаторов C1 и C2 до напряжения более 500 В. Включение дуги происходит по команде из компьютера путём замыкания контакта реле K2. При этом на затвор поступает напряжение от источника DC\DC и он открывается. В момент его открытия высокое напряжение с конденсатора C2 подаётся на дуговой промежуток. Происходит пробой промежутка и возбуждение дугового разряда, ток которого ограничивается резистором R2. При возбуждении дуги напряжение на дуговом промежутке составляет порядка 20 В. Поэтому дальнейшее питание дуги осуществляется от аккумуляторной батареи. Для выключения тока дуги по команде с компьютера отключается реле K2 и транзистор переходит в запертое состояние.

Система компьютерного управления экспериментом

Структурная схема системы компьютерного управления экспериментом приведена на рис. 2.9.

Система содержит компьютерный модуль, блок согласования сигналов управления, датчики контролируемых параметров и исполнительные устройства.

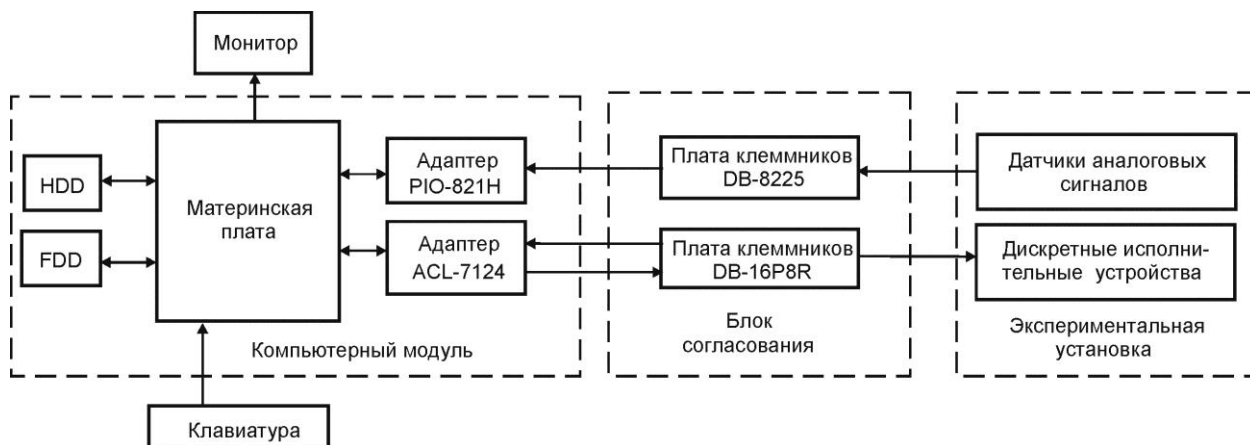


Рисунок 2.9 - Структурная схема компьютерного управления экспериментом

В компьютер установлена плата адаптера PIO-821H фирмы ICP DAS.

Адаптер PIO-821H используется для ввода в компьютер аналоговых сигналов датчиков – тока и напряжения дуги, тока обмотки электромагнита, сигналов оптических датчиков и датчиков температуры. Адаптер связан с датчиками через выносную DB-8225 той же фирмы.

В компьютере установлена также плата адаптера ACL-7124 фирмы ADLINK. Исполнительные устройства связаны с адаптером ACL-7124 через выносную плату клеммников DB-16P8R фирмы ICP DAS.

Плата DB-16P8R содержит 8 быстродействующих электромагнитных реле, которые используются для управления исполнительными устройствами – обмоткой электромагнита, блоком зажигания дуги, двигателем кинокамеры, отметчиком времени и др.

Программное обеспечение написано для DOS с использованием пакетов RHHIDE, GNU C/C++ и OpenGUI.

2.2 Исследование влияния поперечного магнитного поля на скорость движения катодных пятен

Для измерения скорости движения катодного пятна в поперечном магнитном поле разработана методика, основанная на регистрации излучения локального участка торца трубы-катода с помощью фотодиода. Для обоснования возможности ее использования предварительно проведены фото- и киносъемка процессов на катоде дуги низкого давления. Исследования проводились при абсолютном давлении аргона в камере равном 800 Па, которое применяется при стыковой сварке.

Фотосъемка процессов на катоде

Для фотосъёмки (рис. 2.10) использовался цифровой зеркальный фотоаппарат SIGMA со светофильтром Ноуа R72. Труба-катод была выполнена из стали 12X18H10T сечением $\varnothing 30 \times 2$ мм. Сила тока дуги составляла 50 А.

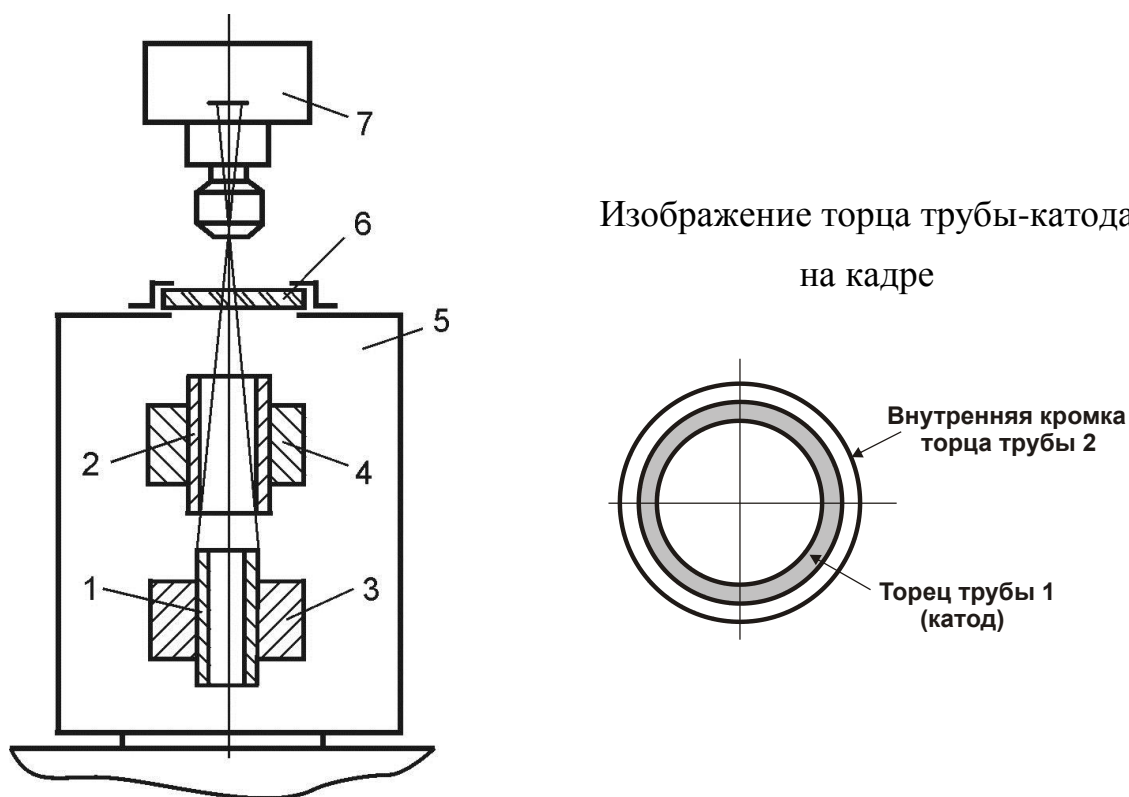


Рисунок 2.10 - Схема фотосъёмки процессов на катоде:
1, 2 - трубы; 3, 4 - зажимы; 5 - вакуумная камера; 6 - окно; 7 – фотокамера

Для регистрации изображения катодных пятен использовалась временная диаграмма фотосъёмки, представленная на рис. 2.11.

Сначала включалось питание электромагнита и блока зажигания дуги. Далее для очистки торца трубы-катода включались три импульса тока дуги длительностью 0,2 с с паузами между ними той же длительности. Далее через 0,5 с открывался затвор фотоаппарата на время экспозиции 1 с. Приблизительно в середине экспозиции между торцами труб зажигался дуговой разряд длительностью 0,1 с. При этом катодные пятна регистрировались на фотокадре.



Рисунок 2.11 – Временная диаграмма фотосъёмки катодных пятен

Использованный метод фотосъёмки катодных пятен по сути аналогичен методу автографов, который применяется при изучении процессов на катоде вакуумной дуги [51]. Автографы – это следы эрозии поверхности, образованные при блуждании катодных пятен. Аналогично, при фотосъёмке в процессе блуждания катодных пятен на фотокадре образуются следы засветки. По характеру, местоположению и площади следов засветки можно судить о площади, охваченной дуговым разрядом при блуждании катодных пятен.

На рис. 2.12-а представлена фотография торца трубы-катода при горении дуги без поперечного магнитного поля. Площадь блуждания катодных пятен составила около 30% общей площади торца трубы. Более светлые участки соответствуют меньшей скорости блуждания и большему размеру пятен.

При наложении поперечного магнитного поля характер фотоизображения катода резко изменяется.

На рис. 2.12-б представлена фотография торца трубы-катода при горении дуги в поперечном магнитном поле с индукцией 120 мТл. Площадь блуждания катодных пятен охватывает всю торцевую поверхность трубы. Это объясняется тем, что к хаотическому движению катодных пятен добавляется их направленное движение по окружности торца трубы.

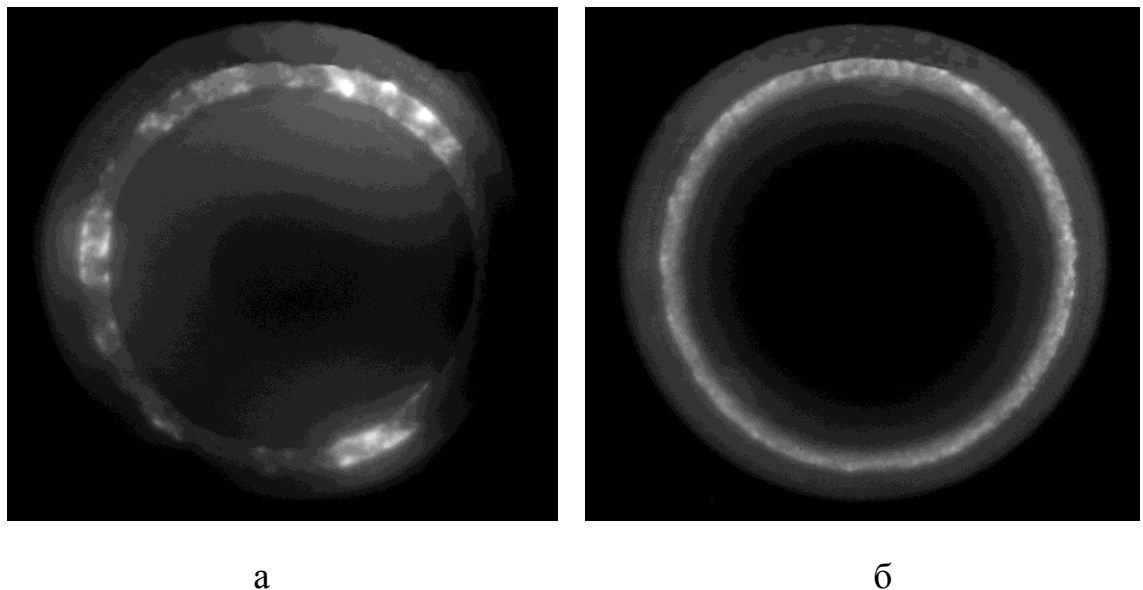


Рисунок 2.12 – Фотографии торца трубы-катода при силе тока дуги 50А
и длительности импульса 0,1 с:

а – магнитная индукция $B=0$; б – магнитная индукция $B=120$ мТл

Следует отметить практически одинаковую яркость следов засветки на всех участках торцевой поверхности, что свидетельствует о хорошей равномерности распределения дугового разряда по торцу трубы.

Киносъемка процессов на катоде

Для скоростной киносъемки катодных пятен использовалась камера СКС-1М [65]. Камера СКС-1М принадлежит к типу скоростных киносъемочных камер с оптической компенсацией и перемещением светочувствительного слоя при экспонировании. В качестве светочувствительного материала в камере СКС-1М применяется узкая 16-мм киноплёнка. На рис. 2.13 приведена оптическая схема камеры СКС-1М. Между действием компенсационной призмы в скоростной камере и obtюратора в обычной камере можно провести аналогию: они управляют временем экспонирования, то-есть играют роль затворов.

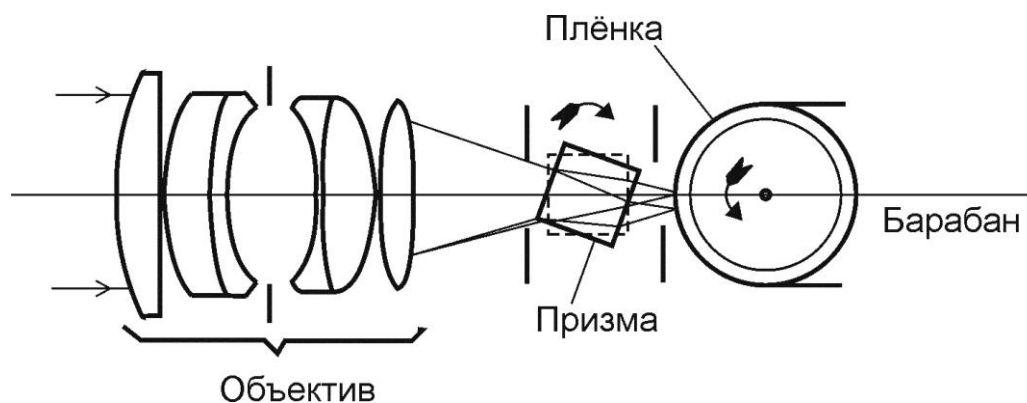


Рисунок 2.13 - Оптическая система камеры СКС-1М с четырёхгранной компенсационной призмой

Пленка транспортируется барабаном, который насажен на вал приводного двигателя. Другой однотипный двигатель наматывает пленку на принимающую бобину. Емкость бобины составляет 30 м.

Скорость транспортирования пленки зависит от напряжения. После включения двигателей она быстро увеличивается и через 0,4—1,2 сек достигает заданной рабочей величины. Остальное время съемки скорость пленки продолжает увеличиваться, но не так быстро, как в начальном периоде.

Камера снабжена отметчиком времени, который включается одновременно с подачей напряжения на двигатели камеры. Отметчик работает с частотой 100 Гц и формирует на киноплёнке снаружи перфорации линии засветки, по которым вычисляется частота киносъёмки.

Схема киносъёмки приведена на рис. 2.14.

Для киносъёмки использовалась негативная киноплёнка А2-МТ 16 мм светочувствительностью 310 ед. ГОСТ. Труба-катод и режим горения дуги были те же, что при фотосъёмке. Сила тока дуги, равная 50 А, приблизительно равна средней силе тока катодного пятна. Это позволяет наблюдать вращение по торцу трубы практически одного катодного пятна.

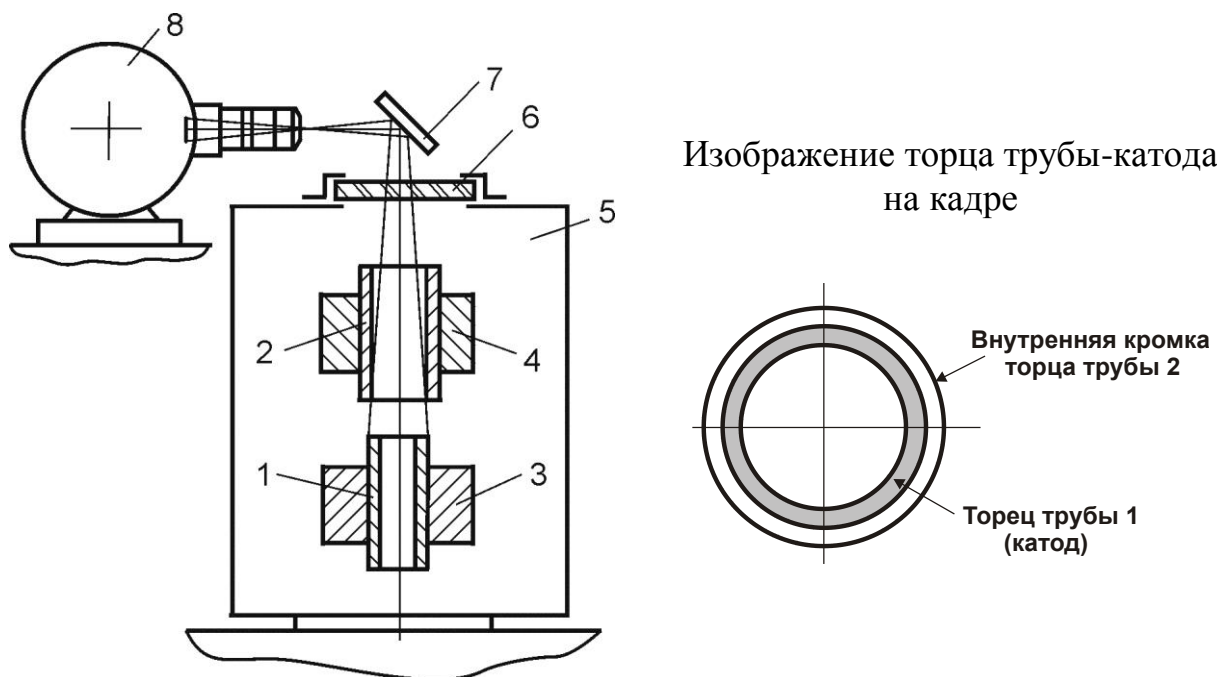


Рисунок 2.14 - Схема киносъёмки процессов на катоде:
1, 2 - трубы; 3, 4 - зажимы; 5 - вакуумная камера; 6 - окно; 7 – зеркало;
8 – кинокамера СКС-1

Для регистрации изображения катодных пятен использовалась временная диаграмма киносъёмки, представлена на рис. 2.15.

После включения питания электромагнита и блока зажигания дуги подается напряжение на двигатели кинокамеры. Использовалось переменное напряжение 130 В. При включении двигателя кинокамеры скорость движения

киноплёнки и, следовательно, частота кадров непрерывно возрастают. Дуга зажигалась в конечной стадии киносъёмки, когда частота кадров достигает 4500-5000 кадров в секунду.

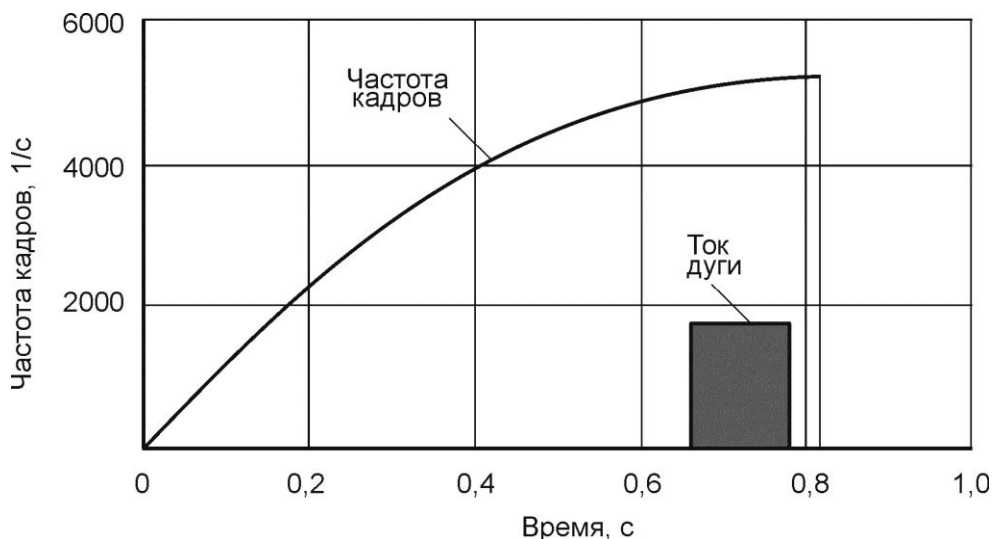


Рисунок 2.15 - Временная диаграмма киносъёмки катодных пятен

На рис. 2.16 приведены кадры киносъёмки катодных пятен при индукции магнитного поля 120 мТл. Показаны кинокадры, когда катодные пятна находились на различных участках торца трубы-катода. Частота вращения пятен по торцу трубы составила 180-200 с⁻¹, что соответствует скорости их движения 16-18 м/с.

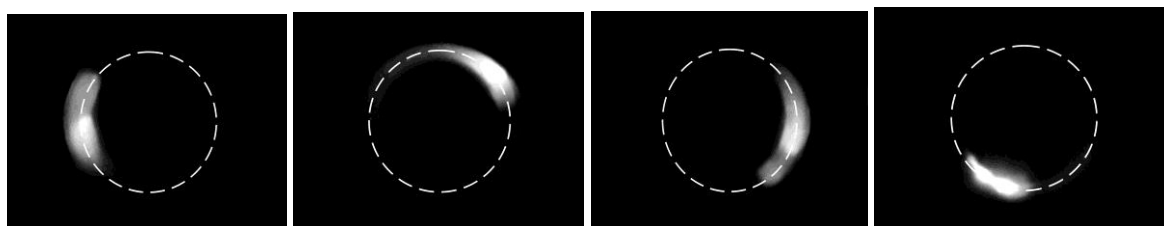


Рисунок 2.16 - Кадры киносъёмки катодных пятен

Киносъёмка торца трубы-катода показала, что при наложении на дугу поперечного магнитного поля катодные пятна достаточно равномерно вращаются по окружности торца трубы и не выходят на ее внутреннюю или наружную поверхность. Это свидетельствует о том, что регистрация

излучения локального участка торцевой поверхности с помощью фотодиода позволит достаточно точно определить зависимость скорости движения катодных пятен от значения магнитной индукции.

Измерение скорости движения катодного пятна с помощью фотодиода

Методика измерения скорости движения катодного пятна в поперечном магнитном поле состоит в следующем. Регистрируется выходной сигнал фотодиода, который воспринимает излучение из области торца трубы-катода, соизмеримой с толщиной стенки трубы (рис. 2.17).

Сила тока разряда приблизительно равна среднему току катодного пятна. Поэтому один импульс на осциллограмме выходного сигнала фотодиода соответствует одному обороту катодного пятна по торцу трубы-катода.

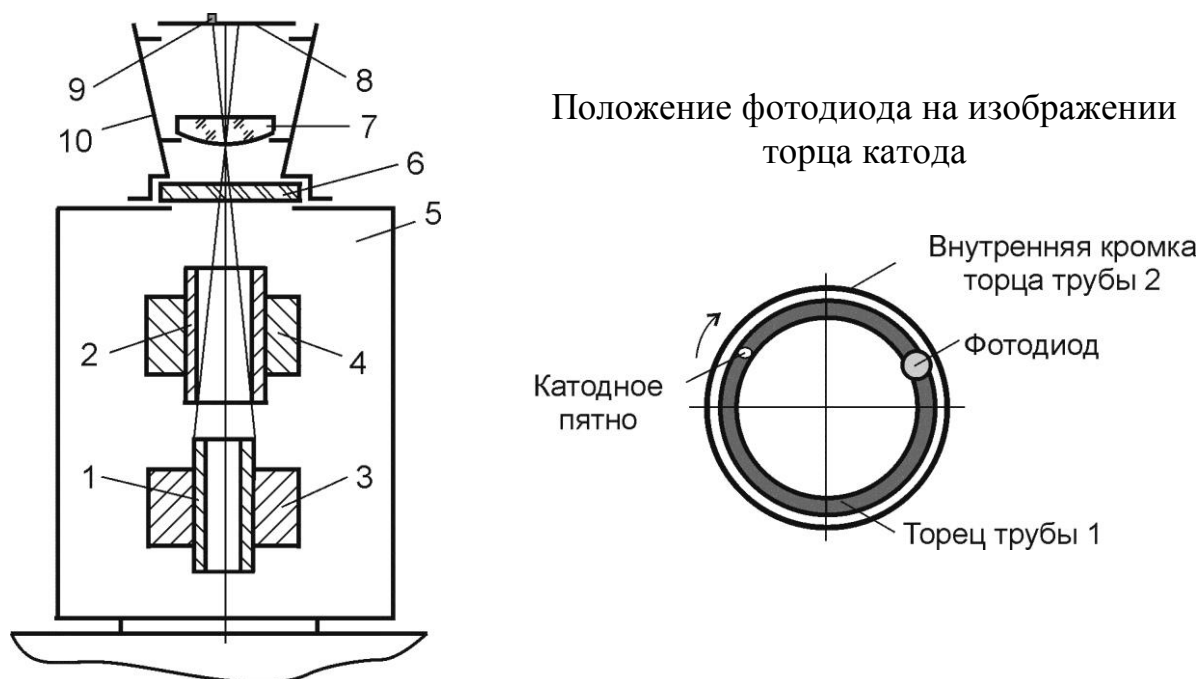


Рисунок 2.17 – Схема измерения скорости движения катодного пятна при помощи фотодиода: 1, 2 - трубы; 3, 4 - зажимы; 5 - вакуумная камера; 6 - окно; 7 –линза; 8 – матовое стекло; 9 – фотодиод; 10 – тубус

Эксперимент проводился в соответствии с временной диаграммой, представленной на рис. 2.18.

Сначала включалось питание электромагнита и блока зажигания дуги. Далее зажигался дуговой разряд длительностью 1 с. В течение этого времени происходила регистрация сигнала с фотодиода.



Рисунок 2.18 - Временная диаграмма регистрации сигнала фотодиода

Для иллюстрации методики на рис. 2.19 приведены осциллограммы сигнала фотодиода при горении дуги на торце трубы из стали 12Х18Н10Т сечением $\varnothing 30 \times 2$ мм при отсутствии магнитного поля и при индукции поля 120 мТл. Синусоидальный сигнал частотой 50 Гц использовался как отметчик времени. По частоте сигнала фотодиода рассчитывалась скорость движения катодного пятна.

При изучении скорости движения катодных пятен определен диапазон значений магнитной индукции, приемлемый для практического применения при стыковой сварке дугой низкого давления. Установлено, что при индукции поперечного магнитного поля более 200 мТл существенно увеличивается напряжение дугового разряда, усложняется возбуждение разряда и снижается стабильность его горения. Дальнейшее увеличение индукции приводит к направленному перемещению и разбрызгиванию жидкого металла на стадии оплавления торцов. Поэтому измерение скорости движения катодных пятен выполнено в диапазоне изменения индукции 0...200 мТл.

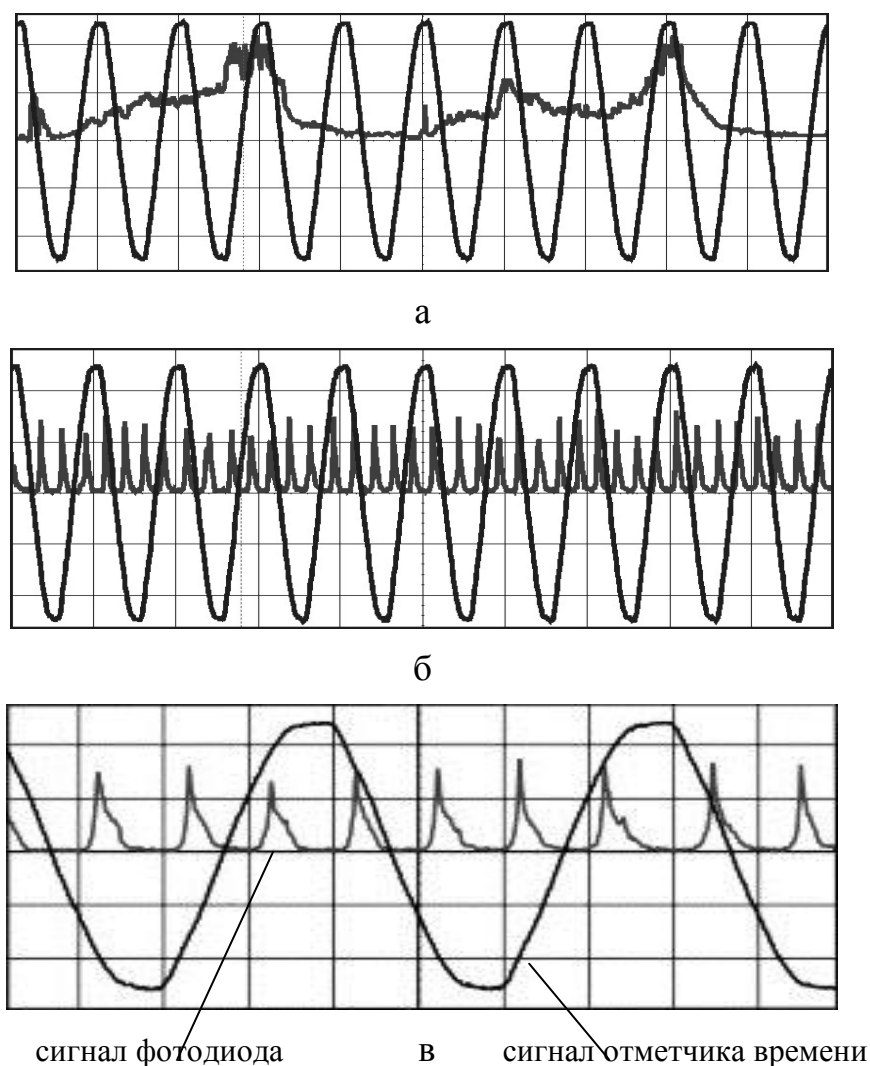


Рисунок 2.19 – Осциллограммы сигналов фотодиода:
а - магнитная индукция $B=0$ Тл; б, в - магнитная индукция $B=120$ мТл

Были проведены исследования зависимости скорости движения катодных пятен от величины магнитной индукции в зазоре между торцами труб для следующих материалов: 12Х18Н10Т, АД1, ВТ1, М1 (рис. 2.20). Эксперименты проводились так, чтобы на торце катода было одно устойчивое пятно.

Начальное значение тока составляло 50 А. Для обеспечения стабильного горения дуги при увеличении магнитной индукции потребовалось увеличение силы тока в интервале 50... 70 А.

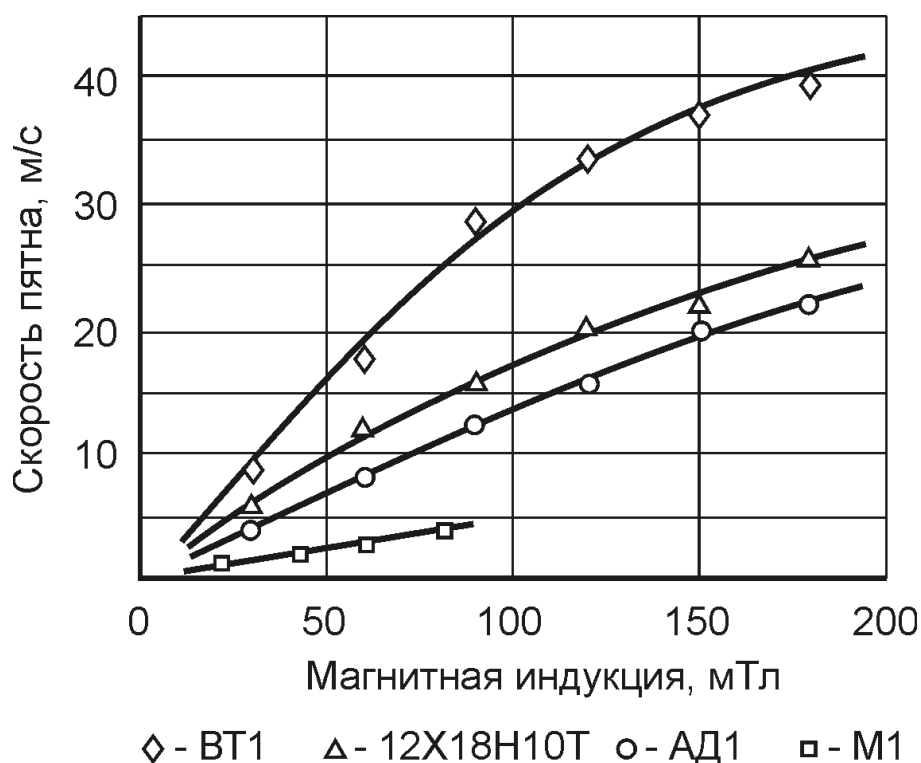


Рисунок 2.20 - Зависимость средней скорости перемещения катодных пятен по торцу трубы из различных металлов от магнитной индукции

Как видно из графиков скорость движения катодного пятна практически прямо пропорциональна значению магнитной индукции: $V_{\text{п}} = K \cdot B$, где K – подвижность пятна (табл. 2.1).

При индукции магнитного поля более 100 мТл скорость направленного движения катодных пятен на торце трубы-катода из титана, стали и алюминия соизмерима со скоростью хаотического блуждания пятен.

Таблица 2.1 – Подвижность катодных пятен в поперечном магнитном поле при абсолютном давлении аргона 800 Па

Катод	K , м/(с·Тл)
12X18H10T	170
АД1	140
VT1	280
М1	50

Измеренная скорость движения катодных пятен в поперечном магнитном поле в среде аргона с абсолютным давлением 800 Па существенно меньше скорости пятен на катоде вакуумной дуги (табл. 1.1).

Например, подвижность катодного пятна на нержавеющей стали в дуге низкого давления равна 170, а в вакуумной дуге 300 м/(с·Тл). Известно [55], при уменьшении давления паров металла или газа в прикатодной области возрастает степень компенсации объемного положительного заряда, что приводит к увеличению скорости хаотического блуждания катодных пятен. По-видимому, этим же объясняется более высокое значение скорости движения катодных пятен вакуумной дуги в поперечном магнитном поле по сравнению со скоростью их движения в дуге низкого давления.

2.3 Исследование влияния поперечного магнитного поля на равномерность нагрева торцов труб

Необходимым условием качественного формирования сварных соединений является равномерность нагрева и оплавления торцевых поверхностей свариваемых труб.

При сварке на переменном токе в одну полуволну тока торец трубы является катодом, а в другую – анодом. На торце-катоде теплота выделяется в катодных пятнах, имеющих малые размеры и хаотически с большой скоростью перемещающихся по торцевой поверхности. Число пятен зависит от природы металла и возрастает с увеличением силы тока дуги. Таким образом, распределение теплоты по поверхности торца-катода носит случайный характер и подчиняется определенным статистическим закономерностям.

Очевидно, что равномерность распределения теплоты дуги на торце-катоде должна улучшаться с увеличением числа катодных пятен, то есть при увеличении силы тока дуги, с увеличением скорости их хаотического перемещения и при увеличении длительности нагрева.

На торце-аноде теплота выделяется диффузным потоком электронов, поступающим из столба дуги. Поэтому по своей природе тепловыделение на торце-аноде имеет не локальный, а распределенный характер. При обеспечении достаточно равномерного тепловыделения на торце-катоде тепловыделение на поверхности торца-анода также будет равномерным.

Следует учитывать, что распределение температуры на торцевых поверхностях труб зависит не только от характера распределения на них тепловой мощности дуги, но также и от процесса теплопроводности, который развивается во времени.

При наложении поперечного магнитного поля на дугу, горящую в зазоре между торцами труб, характер тепловыделения на торце-катоде коренным образом изменяется. Киносъемка торца трубы-катода показала, что основным направлением перемещения катодных пятен является их вращение по окружности торца. Эксперименты по измерению скорости движения катодных пятен в поперечном магнитном поле свидетельствуют, что в любой локальной зоне торца тепловыделение имеет пульсирующий характер. При этом частота пульсаций, равная угловой скорости вращения пятен, выражается формулой:

$$\omega = \frac{K \cdot B}{\pi \cdot D_{\text{cp}}}, \quad (2.6)$$

где K – подвижность пятен, м/(с·Тл); B – магнитная индукция, Тл; D_{cp} – средний диаметр торца трубы, м.

В связи с этим можно ожидать, что также как при дуго-контактной сварке неравномерность распределения температуры на торце-катоде будет зависеть от частоты вращения катодных пятен.

Максимальную разность температур в поперечном сечении трубы на расстоянии x от торца при дуго-контактной сварке можно оценить по формуле [44]:

$$\Delta T_{\text{макс}} \leq \frac{2q_2 \cdot \psi}{\omega \cdot c\gamma \sqrt{4\pi at}}, \quad (2.7)$$

где q_2 – плотность теплового потока на торце; t – время нагрева; $c\gamma$ – удельная объемная теплоемкость металла трубы; a – коэффициент температуропроводности;

Безразмерный параметр $\psi(\alpha, \beta)$ рассчитывается в зависимости от значений α и β : $\alpha = \sqrt{\frac{x^2}{4at}}$; $\beta = \sqrt{\frac{D_{\text{ср}}^2}{4at}}$.

Таким образом, неравномерность нагрева торцевой поверхности уменьшается при увеличении частоты вращения катодных пятен, которая пропорциональна значению магнитной индукции, и при увеличении длительности нагрева.

Следует отметить, что приведенная формула (2.7) для значения $x=0$ практически неприменима, так как на торцевой поверхности максимальная разница температур $\Delta T_{\text{макс}}$ всегда будет большей из-за высокой температуры в катодном пятне. Поэтому $\Delta T_{\text{макс}}$ следует рассчитывать на некотором расстоянии от торца, например, при $x = 0,5$ мм.

Однако следует учитывать, что в отличие от дуго-контактной сварки, которая осуществляется обычной сварочной дугой - дугой высокого давления, имеющей на катоде одно устойчивой катодное пятно, в дуге низкого давления имеется ряд катодных пятен, число которых пропорционально току дуги. Можно ожидать, что благодаря этому равномерность распределения температуры на катоде дуги низкого давления будет выше.

Экспериментальное исследование влияния магнитной индукции на равномерность распределения температуры на торцевой поверхности трубы-катоде осуществлялось путем сканирование инфракрасного излучения поверхности торца вращающимся фотодиодом.

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 2.21, а его временная диаграмма на рис. 2.22.

Сканирующий фотодиод 9 закреплен на вращающейся втулке 8. Втулка 8 установлена внутри подшипника 10. При вращении втулки 8 фотодиод 9 перемещается по изображению торца трубы-катода 1.

Перемещение фотодиода 9 измеряется с помощью оптического датчика перемещения, который включает в себя линейку, лазер и фотодиод. Линейка расположена на цилиндрической поверхности втулки 8. Излучение лазера отражается от линейки и поступает на фотодиод 2. При вращении втулки 8 на выходе фотодиода 2 формируются импульсы, число которых пропорционально перемещению фотодиода 1 по окружности изображения торца трубы 1.

Вращение втулки 8 обеспечивается специальным устройством со спусковым механизмом, который срабатывает в момент выключения тока дуги. Полный оборот сканирующего фотодиода происходит в течение 0,1 с.

Предварительно была выполнена калибровка сигнала сканирующего фотодиода. В камеру на уровне торца трубы-катода было установлено плоское полукольцо из нихрома шириной 3 мм и толщиной 1 мм. Диаметр и ширина полукольца были равны диаметру и толщине стенки трубы их стали 12Х18Н10Т сечением $\varnothing 30 \times 3$ мм, которая использовалась в экспериментах по измерению распределения температуры на торце трубы-катоде. В середине полукольца к его нижней стороне была приварена ХА-термопара. Концы полукольца были подключены к токовводам в камеру.

Фотодиод был установлен в середине изображения полукольца, что соответствовало положению термопары на полукольце.

Во время калибровки через полукольцо из нихрома пропускался импульс тока от источника питания дуги. При этом сигналы термопары и фотодиода одновременно регистрировались с помощью компьютерной

системы управления экспериментом. Результаты калибровки фотодиода приведены в табл. 2.2.

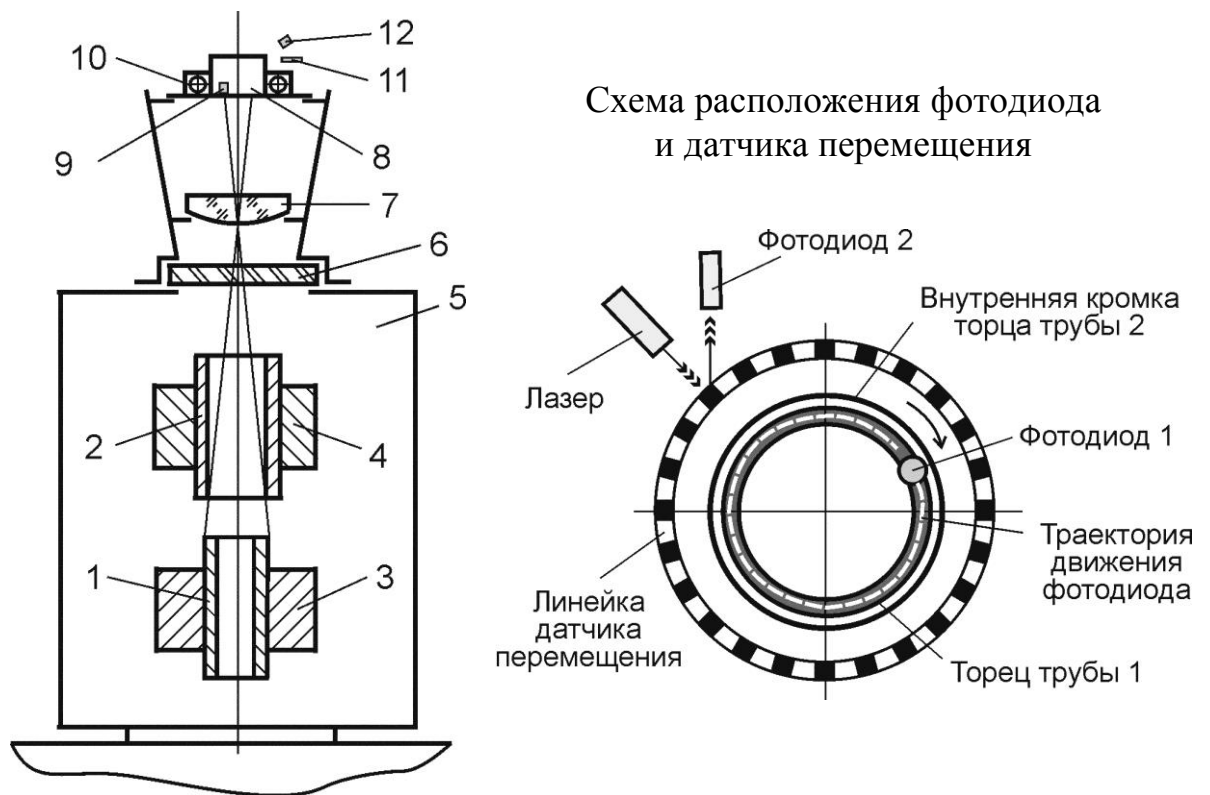


Рисунок 2.21 – Схема измерения распределения температуры по торцу трубы при помощи фотодиода:

- 1, 2 - трубы; 3, 4 - зажимы; 5 - вакуумная камера; 6 – окно; 7 – линза;
8 – втулка вращающаяся; 9 – фотодиод регистрации температуры;
10 – подшипник; 11 – фотодиод регистрации расстояния; 12 – лазер

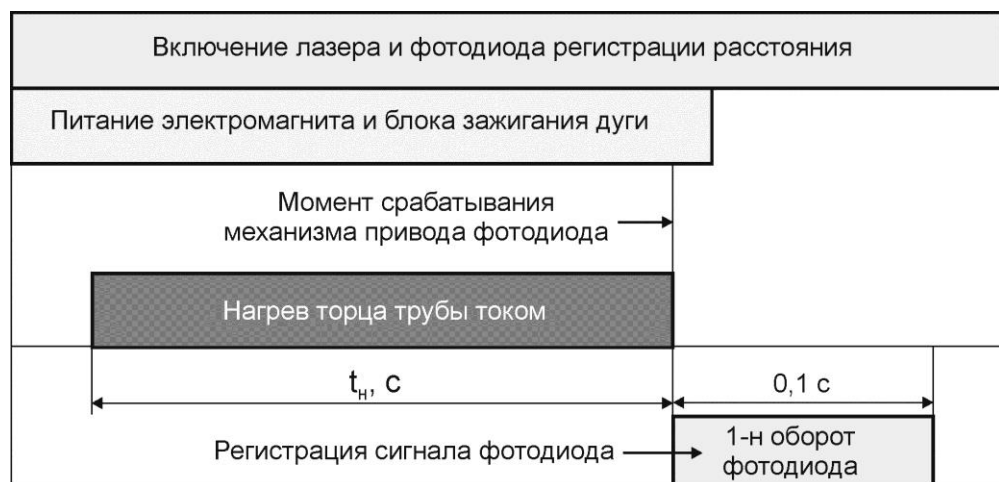


Рисунок 2.22 – Временная диаграмма сканирования излучения торцевой поверхности трубы-катода

Таблица 2.2 – Зависимость выходного сигнала фотодиода от температуры поверхности кольца из нихрома

T, °C	650	700	750	800	850	900
u, мВ	4	8	14	20	28	36
T, °C	950	1000	1050	1100	1150	1200
u, мВ	45	54	61	71	79	87

На рис. 2.23 приведен пример регистрации распределения температуры на торце трубы-катоде, а на рис. 2.24 – влияние магнитной индукции на равномерность этого распределения.

В качестве показателей, характеризующих равномерность распределения температуры на торце трубы, использованы среднее отклонение и размах температуры. При увеличении магнитной индукции в интервале 0...150 мТл оба эти показателя уменьшаются в 4-5 раз.

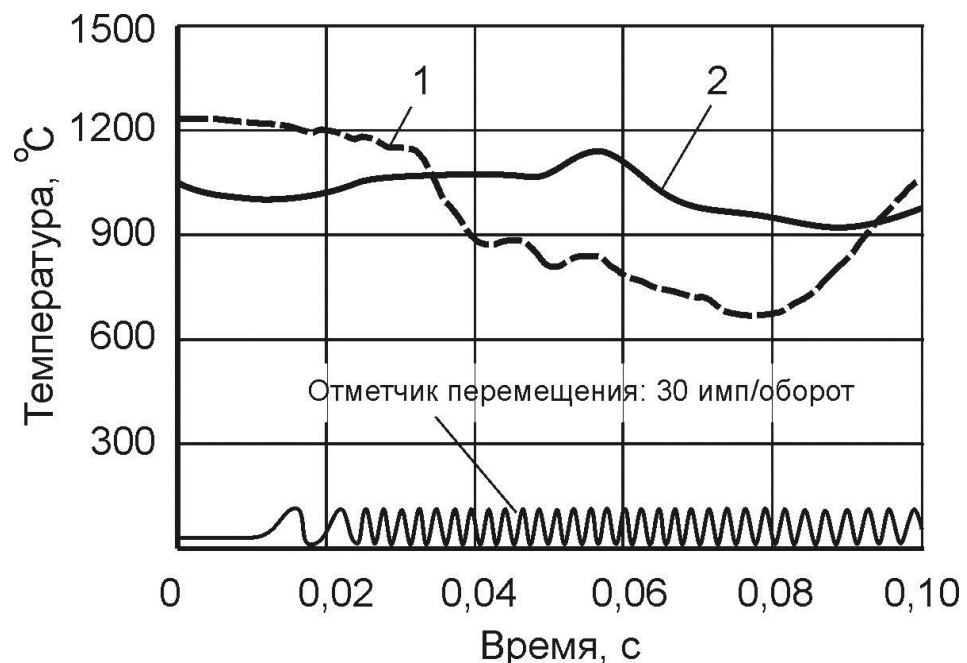


Рисунок 2.3 - Распределение температуры по торцу трубы-катода из стали 12X18H10T сечением $\varnothing 30 \times 3$ мм: а - магнитная индукция $B=0$; б - магнитная индукция $B=120$ мТл

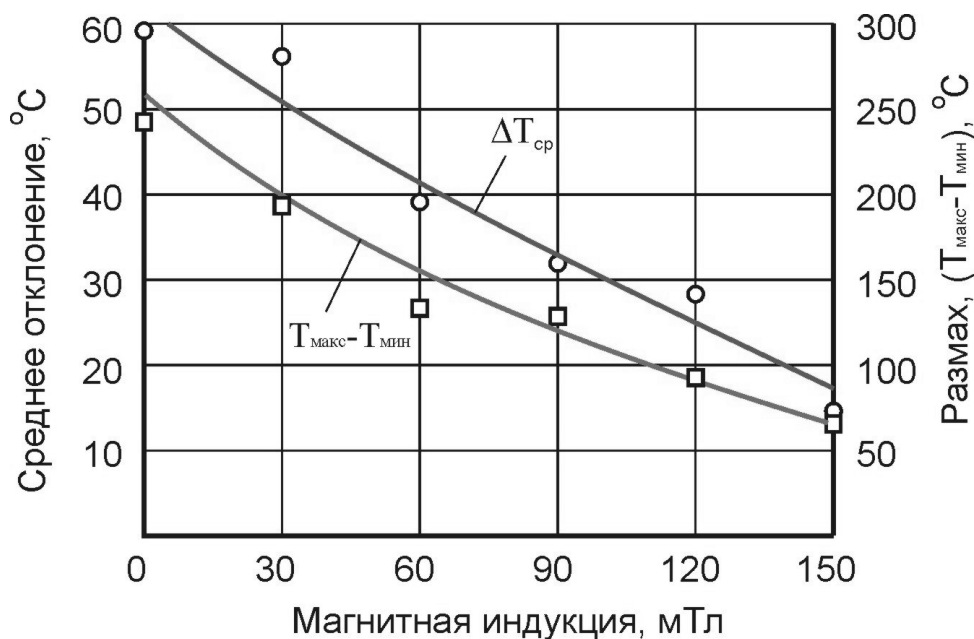


Рисунок 2.24 - Зависимость среднего отклонения и размаха температуры на поверхности торца трубы-катода от магнитной индукции

В таблице 2.3 приведены значения размаха температуры, рассчитанные по формуле (2.7), и полученные экспериментально. Несмотря на существенное различие в процессах на катоде представленные значения достаточно близки.

Таблица 2.3 – Расчетные и экспериментальные значения размаха температуры

B, мТл	30	60	90	120	150
$\Delta T_{\text{макс}}$ (расчет)	247	124	83	62	50
$\Delta T_{\text{макс}}$ (эксперимент)	194	134	129	95	66

С учетом выражения для средней температуры на торце:

$$T(0, t) = \frac{2q_2 \sqrt{at}}{\lambda \sqrt{\pi}}, \quad (2.8)$$

из формулы (2.7) можно получить выражение для размаха температуры в относительной форме:

$$\frac{\Delta T_{\text{макс}}}{T_{\text{cp}}} \leq \frac{\psi}{2\omega t} = \frac{\psi}{2n}, \quad (2.9)$$

где n – число оборотов за время t . Можно также записать:

$$n = \frac{vt}{\pi D} = \frac{t}{\pi D / v} = \frac{t}{t_0}, \quad (2.10)$$

где v – скорость движения катодных пятен; t_0 – время одного оборота.

Число оборотов n равно отношению времени t к его характерному для данного процесса значению t_0 . Его можно рассматривать как относительное время - безразмерный параметр, характеризующий подобие процессов во времени. В связи с этим можно ожидать, что при равенстве числа оборотов относительные параметры, характеризующие равномерность распределения температуры, будут иметь достаточно близкие значения.

В табл. 2.4 приведены результаты экспериментального определения размаха температуры на торце трубы-катода в относительной форме при нагреве трубы из стали 12X18H10T сечением $\varnothing 30 \times 3$ мм при различных значениях магнитной индукции для двух значений времени нагрева. В таблице приведены также значения числа оборотов катодных пятен по торцу трубы-катода при нагреве. При одинаковых значениях n размах температуры на торце в относительной форме практически одинаков. При $n > 300$ размах температуры в относительной форме становится менее 10%. Будем считать, что это характеризует достаточно равномерный нагрев торцов.

Таблица 2.4 – Размах температуры на торце трубы-катода при различных значениях магнитной индукции и времени нагрева

B , мТл	$t_H = 1$ с		$t_H = 2$ с	
	n	$\Delta T_{\text{макс}} / T_{\text{ср}}$	n	$\Delta T_{\text{макс}} / T_{\text{ср}}$
30	60	0,23	120	0,18
60	120	0,18	240	0,12
90	180	0,15	360	0,07
120	240	0,11	480	0,06
150	300	0,8	600	0,04

Результаты анализа равномерности нагрева торца трубы-катода диаметром 30 мм могут быть использованы при разработке режимов нагрева труб других диаметров. Например, при диаметре трубы $D_{\text{ср}}=70$ мм и магнитной индукции $B=100$ мТл число оборотов $n>300$, достаточное для равномерного нагрева торца трубы-катода, будет получено при условии:

$$t > 300 \cdot \frac{\pi D}{K B} = 300 \cdot \frac{\pi \cdot 0,07}{170 \cdot 0,1} = 3,9 \text{ с.}$$

Кроме измерения температуры на торце трубы-катоде также была измерена температура на торце трубы-аноде (табл. 2.5). При этом параметры дугового разряда были одинаковы.

Таблица 2.5 – Размах значений температуры на катоде и аноде

B , мТл	30	60	90	120	150
$\Delta T_{\text{макс}}$ на катоде	194	134	129	95	66
$\Delta T_{\text{макс}}$ на аноде	92	65	51	43	32

Измерения показали, что на торце-аноде температура всегда распределена значительно более равномерно, чем на торце-катоде.

Очевидно, при нагреве труб дугой переменного тока, когда торец трубы в одной полуволне является катодом, а в другой анодом, распределение температуры на торцевой поверхности труб будет более равномерным, чем на торце трубы-катоде при нагреве труб дугой постоянного тока.

Увеличение индукции поперечного магнитного поля сопровождается увеличением напряжения дугового разряда (рис. 2.25). Если предположить, что это вызвано потерями в столбе дуги, то увеличение магнитной индукции должно приводить к снижению эффективности нагрева торца трубы-катода.

Эффективность нагрева катода характеризуется коэффициентом – эффективным КПД нагрева катода $\eta_k = q_k / P_d$, где q_k – мощность теплового потока, поступающая на торец трубы-катода, а P_d – мощность дуги.

Для нагрева трубы из стали 12X18H10T сечением $\varnothing 30 \times 3$ мм рассчитана зависимость эффективного КПД нагрева катода от значения магнитной индукции поперечного магнитного поля (табл. 2.6).

Таблица 2.6 – Расчет зависимости эффективности нагрева катода от магнитной индукции

B, мТл	I _д , А	U _д , В	P _д , Вт	T _{ср} , °С	q _к , Вт	η _к
0	296,7	20,45	6067	893,3	2251	0,37
30	288,3	21,19	6109	870,3	2193	0,36
60	276,9	21,87	6055	899,3	2266	0,37
90	264,4	23,27	6152	857,0	2160	0,35
120	240,3	24,06	5782	845,7	2131	0,37
150	226,9	25,81	5856	828,7	2088	0,36

Значение q_k было рассчитано по средней температуре торцевой поверхности трубы с использованием расчетной схемы непрерывного плоского источника теплоты:

$$q_k = \frac{T_{cp} \cdot F \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi}}{2\sqrt{at}} = 2,52 \cdot T_{cp}; \quad (2.11)$$

Мощность дуги P_d рассчитывалась по записям сигналов датчиков тока и напряжения дуги. Установлено, что при увеличении магнитной индукции в интервале 0...150 мТл эффективность нагрева торца трубы-катода практически не изменяется (рис. 2.25). По-видимому, это связано с тем, что наряду с ростом падения напряжения в столбе дуги также увеличивается катодное падение потенциала.

Магнитное поле, создаваемое в области торцов труб, обеспечивает не только направленное движение катодных пятен по окружности торцов труб, но также стабилизирует разряд на торцевых поверхностях, так как задерживает распространение разряда по боковой поверхности труб.

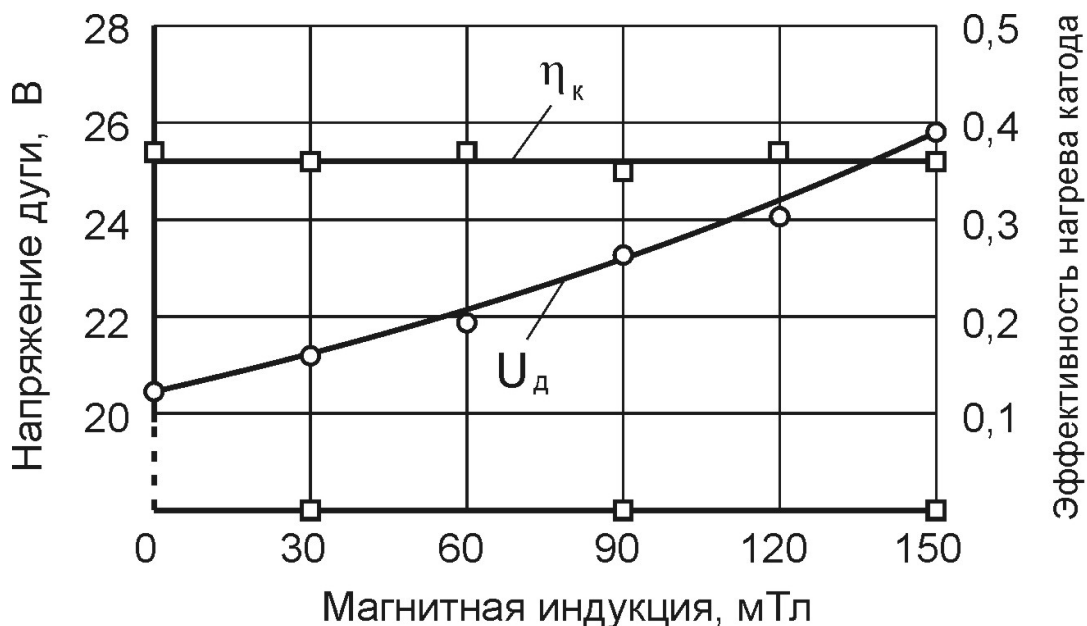


Рисунок 2.25 - Зависимость напряжения дуги U_d и эффективного к.п.д. нагрева катода η_k от магнитной индукции

На рис. 2.26-а приведена схема взаимодействия катодного пятна на внутренней поверхности трубы с магнитным полем.

При взаимодействии с компонентом магнитного поля B_x катодное пятно перемещается по нормали к осям x и r в направлении, обратном правилу Ампера (за плоскость рисунка). При его движении из-за наличия компонента магнитного поля B_r оно смещается по оси x в направлении острого угла α , образованного силовыми линиями магнитного поля с образующей боковой поверхности трубы, то-есть в направлении торца трубы. В результате этого уменьшается ширина полосы блуждания катодных пятен на боковой поверхности труб, что повышает плотность теплового потока на поверхности торцов и улучшает равномерность его распределения по окружности торцов.

На рис. 2.26-б приведен внешний вид торца трубы из АМг6 сечением $\varnothing 30 \times 1$ мм после нагрева дугой низкого давления без использования магнитного поля, а на рис. 2.26-в – с использованием магнитного поля с индукцией 120 мТл.

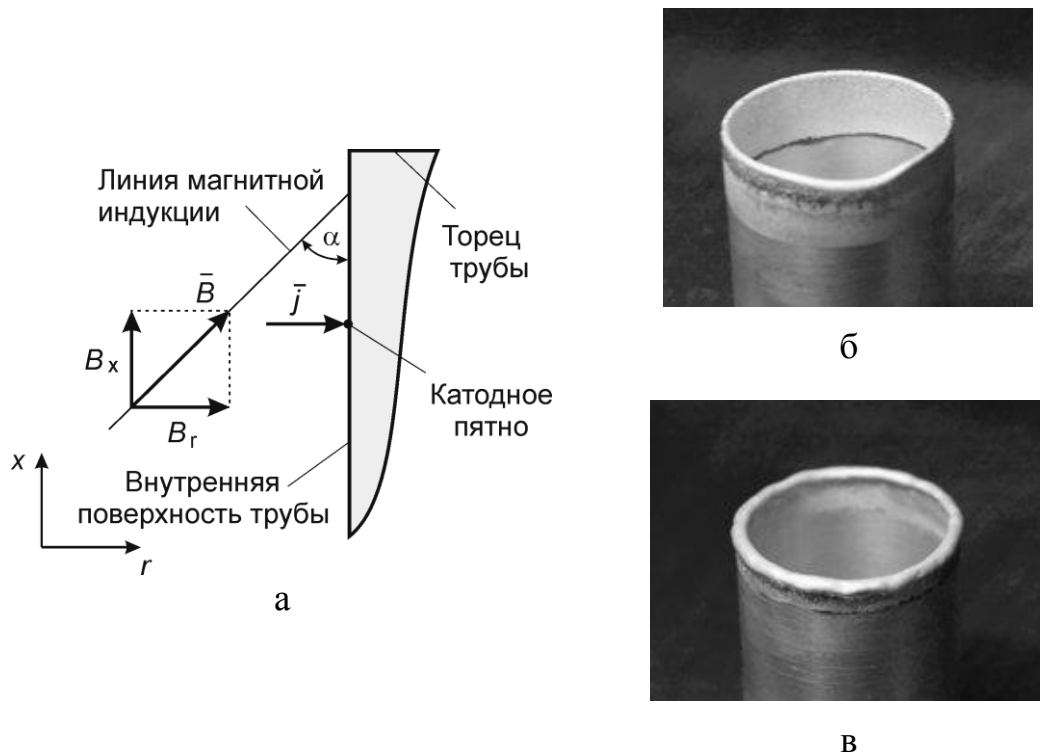


Рисунок 2.26 - Влияние магнитного поля на стабилизацию дугового разряда на торцах свариваемых труб

2.4 Разработка способов и устройств для создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами труб

Поперечное магнитное поле в зазоре между торцами свариваемых трубных заготовок может быть создано с помощью систем на основе электромагнитов. Схемы таких систем приведены на рис. 2.27.

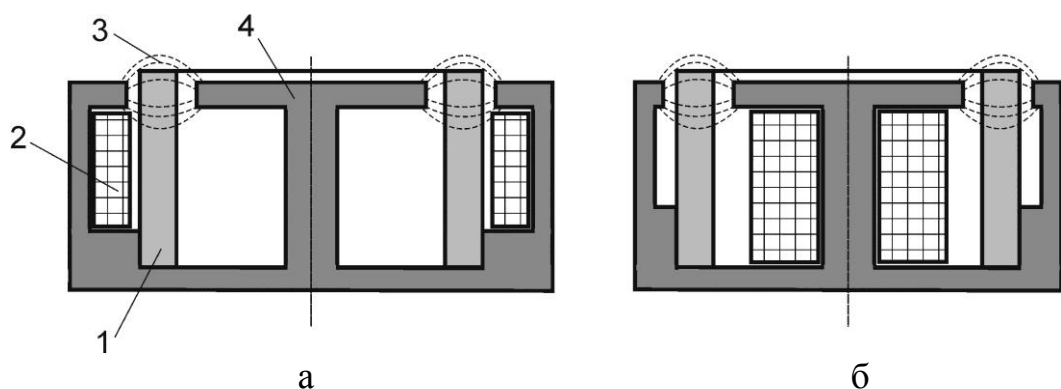


Рисунок 2.27 – Системы создания поперечного магнитного поля на основе электромагнитов: а – катушка электромагнита расположена снаружи трубной заготовки, б – катушка электромагнита расположена внутри заготовки (1- трубная заготовка, 2 – катушка, 3 – силовые линии, 4 – магнитопровод)

При проведении экспериментальных исследований влияния поперечного магнитного поля на катодные процессы использовалась магнитная система, показанная на рис. 2.27-а.

Вакуумная камера установки «СТЫК-3» имеет сравнительно небольшие размеры. Поэтому использование магнитных систем по этой схеме при сварке трубных заготовок диаметром более 50 мм затруднительно.

Первоначально было разработано цанговое зажимное устройство с магнитной системой, представленной на рис. 2.27-б. Его конструкция показана на рис. 2.28. Зажимное устройство состоит из цанги 9, вставки 11, стержня 13, внутреннего экрана 5, внешнего экрана 3 с держателем 2, изоляторов 6, 7 и 12. Корпус 8 и крышка 14, выполненные из капролона, служат для изоляции цангового зажима от зажимного устройства вакуумной камеры. Обмотка электромагнита 10 в изоляционной втулке располагается внутри трубной заготовки 1.

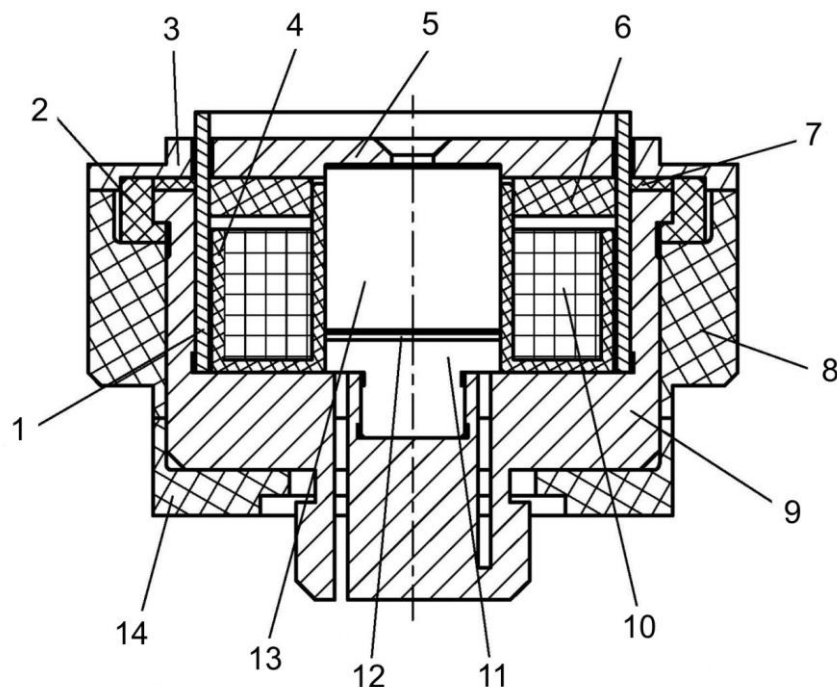


Рисунок 2.28 - Зажимное устройство с электромагнитом:
1 – трубная заготовка; 2 – держатель; 3, 5 – экран; 4 – втулка;
6, 7, 12 – изолятор; 8 – корпус; 9 – цанга; 10 – обмотка электромагнита;
11 – вставка; 13 – стержень; 14 - крышка

При сборке деталей и установке зажимных устройств электромагнит отключен. При включении электромагнита силовые линии поля существуют в замкнутом контуре, образованном деталями 9, 11, 13, 5 и 3, изготовленными из ферромагнитного материала (сталь 20). Питание электромагнита производится постоянным током, а необходимая величина магнитной индукции на торце трубы достигается путём регулировки тока в обмотке.

Достоинствами такого устройства являются:

- точная регулировка магнитной индукции на торце трубы в широких пределах с помощью силы тока в обмотке;
- возможность отключения электромагнита при сборке зажима и его установке в зажимное устройство.

Основным недостатком данной конструкции зажима является сложность обеспечения необходимых значений магнитной индукции на торце трубы из-за малых размеров катушки электромагнита. Кроме этого необходимо делать дополнительно токовводы в сварочную камеру и в цанговый зажим для питания электромагнита. Это накладывает определённые ограничения в использовании данного способа создания поперечного магнитного поля при сварке на установках, уже находящихся в эксплуатации.

Конструкция зажимных устройств значительно упростится, если вместо электромагнита использовать постоянный магнит.

Постоянные магниты являются изделиями различной формы из магнитотвёрдого материала с высокой остаточной магнитной индукцией. Свойства магнита определяются характеристиками размагничивающего участка петли магнитного гистерезиса материала магнита: чем выше остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c , тем выше намагниченность и стабильность магнита.

Для производства постоянных магнитов используются материалы, представленные в табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Некоторые свойства магнитных материалов постоянных магнитов [66-68]

Материал	B_r , Т	H_c , А/м	T_m , °С
Керамика (феррит)	0,40	$190 \cdot 10^3$	300
Альнико <i>Al-Ni-Co-Fe</i>	1,35	$110 \cdot 10^3$	540
<i>Sm-Co</i>	1,05	$730 \cdot 10^3$	320
Спеченные <i>Nd-Fe-B</i>	1,42	$990 \cdot 10^3$	200

Бариевые и стронциевые магнитотвердые ферриты. характеризуются высокой устойчивостью к размагничиванию в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью. Несмотря на низкие по сравнению с другими классами магнитные параметры и высокую хрупкость, благодаря низкой стоимости магнитотвердые ферриты наиболее широко применяются в промышленности.

Магниты *ALNICO* (русское название ЮНДК). Изготавливаются на основе сплава *Al-Ni-Co-Fe*. К их преимуществам можно отнести высокую температурную стабильность в интервале температур до 550 °С, высокую временную стабильность параметров в сочетании с большой величиной коэрцитивной силы, хорошую коррозионную устойчивость. Важным фактором в пользу их выбора может являться значительно меньшая стоимость по сравнению с магнитами из *Sm-Co*.

Редкоземельные магниты *SmCo* (Самарий-Кобальт). Изготавливаются методом порошковой металлургии из композиционного сплава *SmCo₅/Sm₂Co₁₇* и характеризуются высокими магнитными свойствами, отличной коррозионной устойчивостью и хорошей стабильностью параметров при температурах до 350°С, что обеспечивает им преимущества при высоких температурах перед магнитами *NdFeB*.

Магниты $NdFeB$ (неодим-железо-бор). Редкоземельные магниты, изготавливаемые прессованием или литьем из интерметаллида $Nd_2Fe_{14}B$. Преимуществами этого класса магнитов являются высокие магнитные свойства (B_r , H_c), а также невысокая стоимость. В связи со слабой коррозионной устойчивостью они обычно покрываются медью, никелем или цинком.

Конструкция выпускаемых магнитов разнообразны. Но для применения в зажимных устройствах наиболее целесообразно использование цилиндрических, дисковых и кольцевых магнитов.

Схемы магнитных систем зажимных устройств на основе постоянных магнитов приведены на рис. 2.29.

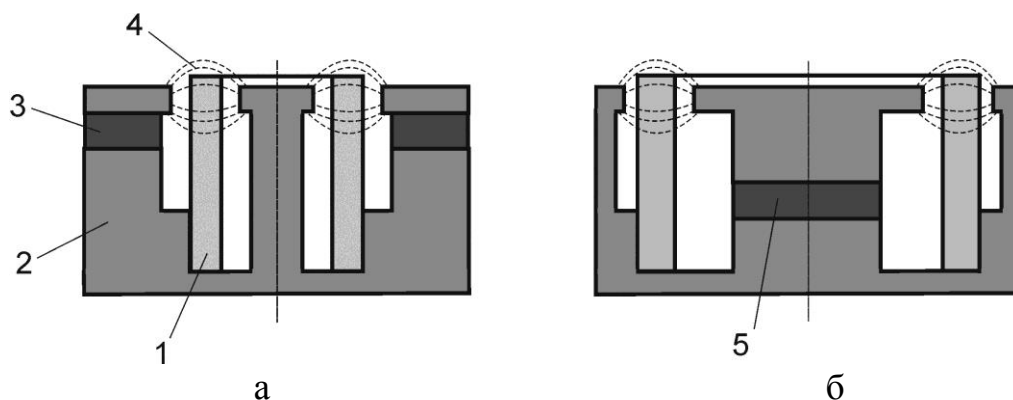


Рисунок 2.29 – Системы создания поперечного магнитного поля на основе постоянных магнитов: а – магнит расположен снаружи заготовки, б – магнит расположен внутри заготовки (1 – заготовка, 2 – магнитопровод, 3 – кольцевой магнит, 4 – силовые линии, 5 – дисковый магнит)

Для решения задачи создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами труб были выбраны неодимовые магниты $Nd-Fe-B$, имеющие наибольшее значение остаточной магнитной индукции.

Первоначальный вариант зажимного устройства с магнитной системой на основе постоянного магнита приведен на рис. 2.30. Регулировка магнитной индукции на торце труб обеспечивается изменением толщины прокладки 12, выполненной из изоляционного материала.

Важным достоинством цангового зажима с постоянным магнитом является возможность его использования в существующих установках без значительной доработки зажимных устройств.

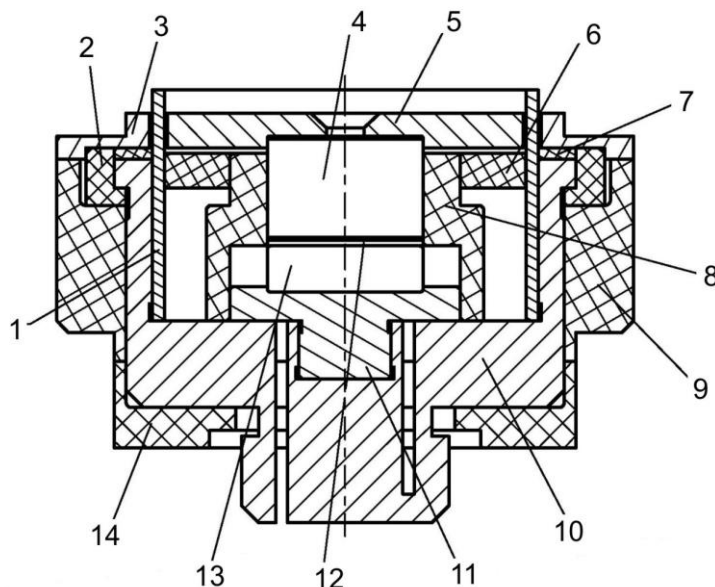


Рисунок 2.30 - Зажимное устройство с постоянным магнитом (вар. 1):
1 – трубная заготовка; 2 – держатель; 3, 5 – экран; 4 – стержень;
6, 7, 12 – изолятор; 8 – втулка; 9 – корпус; 10 – цанга; 11 - вставка;
13 – магнит постоянный; 14 – крышка

Однако было установлено, что в разработанной конструкции зажима с постоянным магнитом из-за намагничивания всей конструкции резко усложняется сборка зажимов и установка свариваемых деталей.

С целью упрощения устройств создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами труб в работе предложено использовать незамкнутую магнитную систему. В этом случае магнитная система вставляется внутрь трубы недалеко от ее торца (рис. 2.31).

Магнитная система состоит из магнита 4 и двух полюсных наконечников 3, 5. Полюсный наконечник 3 является также экраном, который защищает магнит 2 от воздействия дугового разряда, а наконечник 5 обеспечивает соосную установку магнита внутри трубы и равномерный зазор между полюсными наконечниками и внутренней поверхностью трубы.

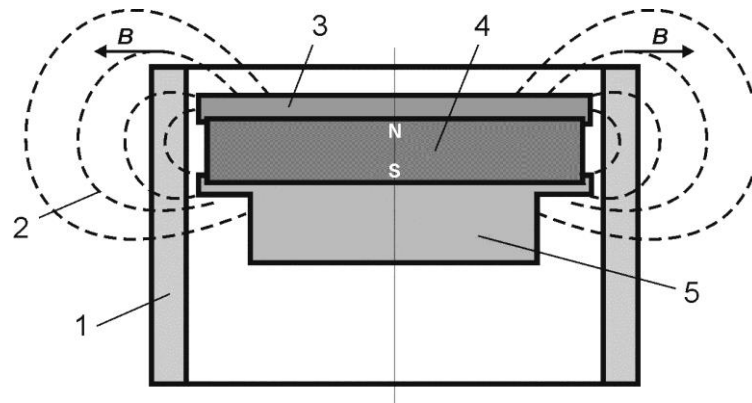


Рисунок 2.31 – Незамкнутая система создания поперечного магнитного поля на основе дискового неодимового магнита: 1 – трубная заготовка; 2 – силовые линии магнитного поля; 3, 5 – полюсные наконечники; 4 – магнит

На рис. 2.32 приведены результаты моделирования магнитного поля в незамкнутой магнитной системе с помощью магнитного порошка, а на рис. 2.33 – результаты измерения магнитной индукции. Магнитная индукция измерялась по направлению оси z (рис. 2.33), проходящей параллельно оси трубы через середину ее торца. Начало отсчета соответствует наружной поверхности верхнего полюсного наконечника.

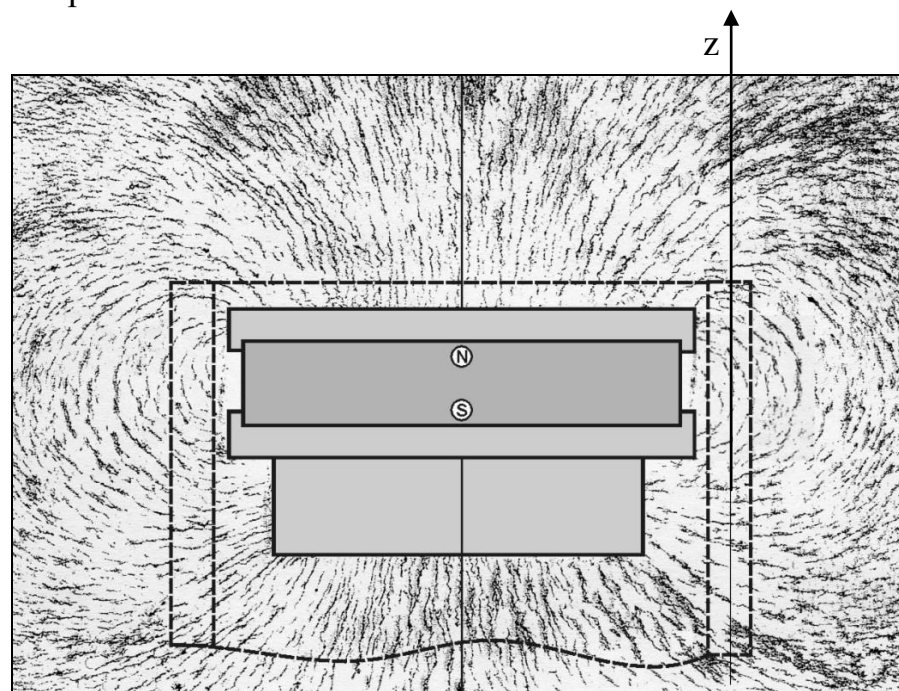


Рисунок 2.32 - Моделирование магнитного поля с помощью магнитного порошка (неодимовый дисковый магнит D52×8 мм N35H; труба Ø70×5 мм)

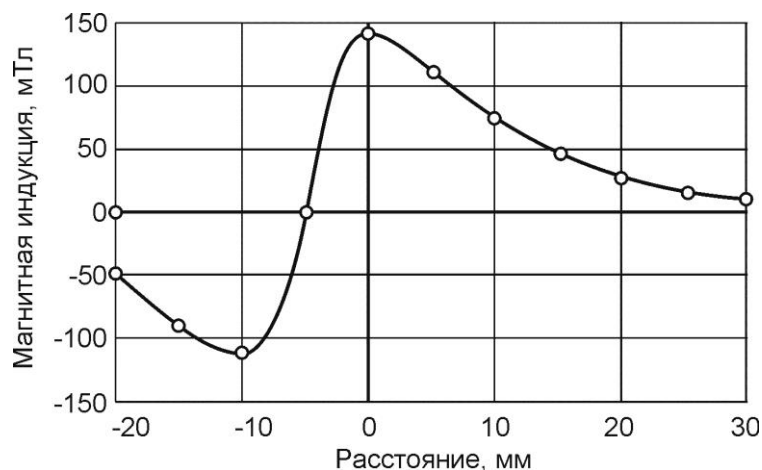


Рисунок 2.33 – Распределение магнитной индукции в направлении оси z

Магнитные вставки, содержащие дисковые магниты, размещаются в трубах одноимёнными полюсами навстречу друг другу (рис. 2.34-а).

На рис. 2.34-б приведено распределение радиального компонента магнитной индукции B_r в зазоре между торцами свариваемых труб.

Оптимальная величина магнитной индукции обеспечивается выбором магнита с определенными параметрами и регулируется расстоянием h от полюсного наконечника магнита до торца трубы.

Конструкция зажимного устройства с незамкнутой магнитной системой приведена на рис. 2.35.

Магнитная система состоит из магнита 2, внутреннего экрана 4, держателя 5 и кольца 6. Элементы 4 и 5 изготовлены из ферромагнитного материала (сталь 20) и являются полюсными наконечниками. Кольцо 6, изготовленное из немагнитного материала, служит для защиты магнита от брызг металла и столба дуги.

Регулировка величины магнитной индукции на торце трубы производится изменением толщины проставки 11.

Съём и установка магнитной системы в зажимное устройство производится с помощью съёмника, который примагничивается к экрану 4.

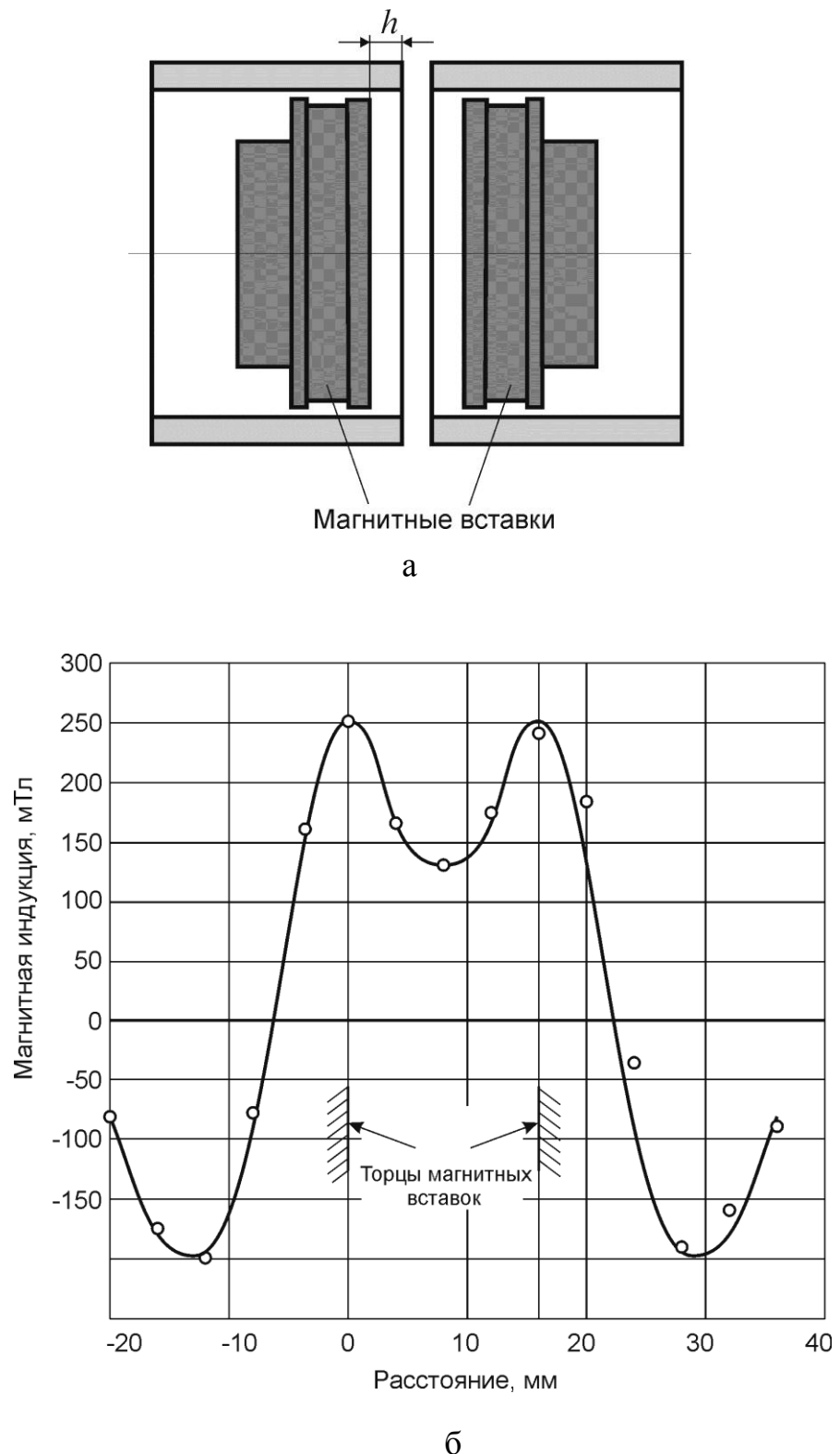


Рисунок 2.34 - Схема расположения постоянных магнитов внутри свариваемых труб (а) и распределение радиального компонента магнитной индукции B_r в зазоре между их торцами (б) (неодимовый дисковый магнит D52×8 мм N35H; труба $\varnothing 70 \times 5$ мм)

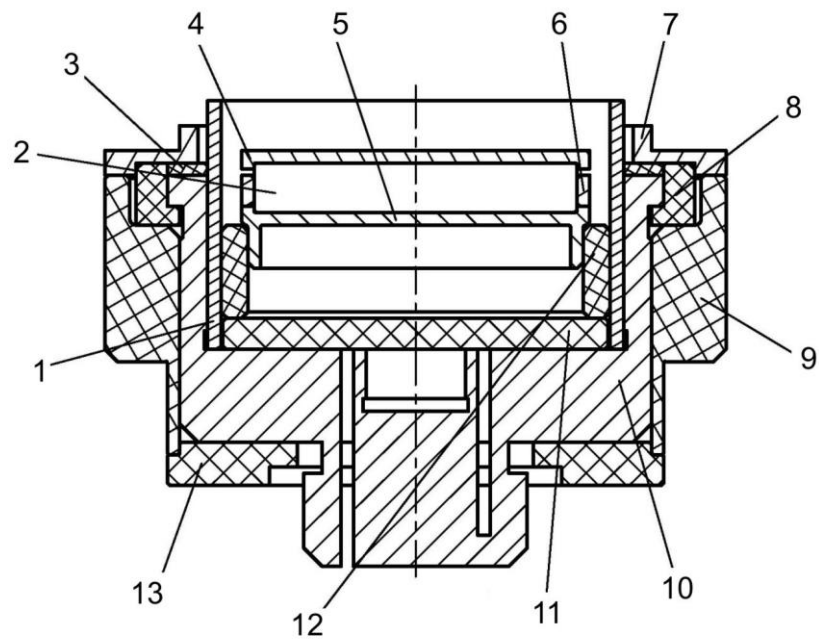


Рисунок 2.35 - Зажимное устройство с постоянным магнитом (вар. 2):
1 – трубная заготовка; 2 – магнит постоянный; 3, 12 – изолятор;
4, 7 – экран; 5, 8 – держатель; 6 – кольцо; 9 – корпус; 10 – цанга;
11 – проставка; 13 – крышка

Выводы по главе 2

1. Для проведения исследований разработана специальная установка, содержащая вакуумную камеру с устройствами для зажатия труб и создания поперечного магнитного поля в зазоре между их торцами, систему вакуумирования камеры и питания ее аргоном, электрическую силовую схему импульсного питания дуги постоянным током, систему контроля параметров и управления процессом проведения экспериментов на базе компьютера.

2. Разработаны специальные методики исследований:

- фото- и скоростная киносъемка торцевой поверхности трубы-катода;
- измерение скорости движения катодного пятна в поперечном магнитном поле путем регистрации излучения локального участка торца трубы-катода с помощью фотодиода;
- измерение распределения температуры на торцевой поверхности трубы в момент выключения дугового разряда путем сканирования инфракрасного излучения поверхности вращающимся фотодиодом.

3. Определен диапазон значений магнитной индукции, приемлемый для практического применения при стыковой сварке дугой низкого давления. Установлено, что при индукции поперечного магнитного поля более 200 мТл существенно увеличивается напряжение дугового разряда, усложняется возбуждение разряда и снижается стабильность его горения. Дальнейшее увеличение индукции приводит к направленному перемещению и разбрызгиванию жидкого металла на стадии оплавления торцов.

4. Для ряда металлов определена зависимость скорости движения катодного пятна от магнитной индукции поперечного магнитного поля. Исследования выполнены при абсолютном давлении аргона 800 Па, при котором осуществляется процесс стыковой сварки. В интервале значений магнитной индукции $B=0\dots150$ мТл скорость катодного пятна приблизительно

выражается линейной зависимостью $v=K \cdot B$, где K – подвижность пятна. Например, для трубы-катода из стали 12X18H10T $K=170$ м/(с·Тл).

Полученные значения подвижности катодных пятен в поперечном магнитном поле в аргоне при абсолютном давлении 800 Па на 30-50% меньше, чем в вакуумной дуге. Это можно объяснить уменьшением степени компенсации объемного положительного заряда ионов над катодным пятном в присутствии атомов аргона.

5. Равномерность распределения температуры на торцевой поверхности трубы-катода улучшается с увеличением магнитной индукции поперечного магнитного поля и времени нагрева.

Предложено в качестве обобщающего параметра, определяющего равномерность нагрева торцов, рассматривать отношение времени процесса нагрева к длительности одного оборота катодных пятен по торцу труб, то есть число оборотов катодных пятен. Получена эмпирическая формула для определения минимального времени нагрева, необходимого для достаточно равномерного распределения температуры на торцах труб. Размах температуры на торце в относительной форме менее 10% может быть достигнут при условии: $t > 300 \cdot \frac{\pi D}{K B}$ с, где D – диаметр трубы.

6. На торце трубы-аноде теплота выделяется потоком электронов, поступающим из диффузного столба дуги. Поэтому по своей природе тепловыделение на торце-аноде имеет не локальный, а распределенный характер. Установлено, что размах значений температуры на торце трубы-аноде не менее чем в два раза меньше, чем на торце трубы-катоде.

Очевидно, при нагреве труб дугой переменного тока, когда торец трубы в одной полуволне является катодом, а в другой анодом, распределение температуры на торцевой поверхности труб будет более

равномерным, чем на торце трубы-катоде при нагреве труб дугой постоянного тока.

7. Увеличение индукции поперечного магнитного поля вызывает увеличение напряжения дугового разряда. Например, при нагреве трубы из стали 12Х18Н10Т при увеличении индукции в интервале 0...150 мТл напряжение дуги изменяется в интервале 20,4...25,8 В. Установлено, что при этом эффективность нагрева торца трубы-катода практически не изменяется. По-видимому, это связано с тем, что наряду с ростом падения напряжения в столбе дуги также увеличивается катодное падение потенциала.

8. Установлено, что магнитное поле, создаваемое в области торцов труб, задерживает распространение разряда по боковой поверхности торцов. В результате этого уменьшается ширина полосы блуждания катодных пятен на боковой поверхности торцов труб, что повышает плотность теплового потока на поверхности торцов и улучшает равномерность их нагрева.

9. Разработаны и опробованы различные способы создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами свариваемых труб, основанные на использовании электромагнитов и постоянных магнитов. Разработанные магнитные системы конструктивно встроены в зажимы свариваемых труб.

Наиболее технологичными для решения задачи создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами труб являются предложенные в работе разомкнутые магнитные системы на основе неодимовых (*Nd-Fe-B*) постоянных магнитов дисковой формы с осевой намагниченностью.

10. Путем моделирования и экспериментальных измерений распределения магнитной индукции в зазоре между торцами труб определены необходимые параметры и типы постоянных магнитов.

Например, для сварки труб диаметром 70 мм выбран неодимовый дисковый магнит D52×8 мм N35H.

Глава 3 Разработка и модернизация сварочного оборудования

3.1 Установка «СТЫК-3» для стыковой сварки дугой низкого давления

Для сварки трубных заготовок из разнородных металлов используется установка «СТЫК-3» [34]. Ее структурная схема приведена на рис. 3.1.

Главным элементом установки является сварочный модуль, состоящий из вакуумной камеры, неподвижного и подвижного зажимов свариваемых деталей и механизма осадки. Другими элементами установки, обеспечивающими функционирование сварочного модуля, являются: система вакуумирования камеры, система газопитания, электрическая силовая схема и система управления.

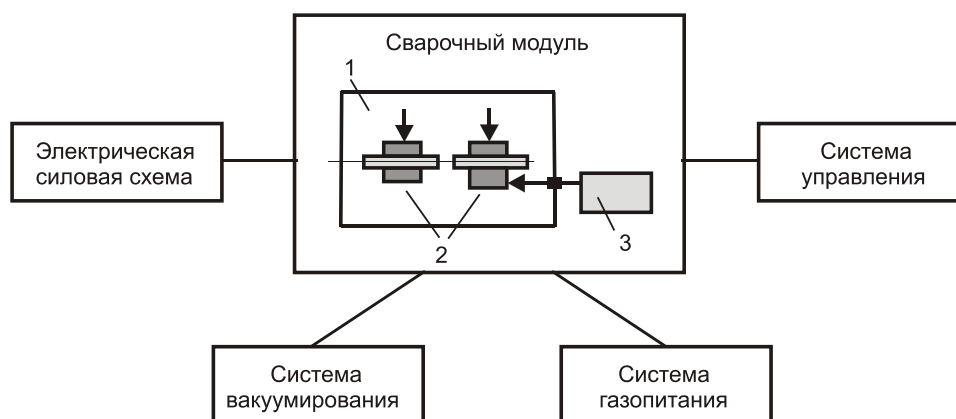


Рисунок 3.1 - Структурная схема установки «СТЫК-3» для стыковой сварки дугой низкого давления (1 – вакуумная камера, 2 – зажимы, 3 – механизм осадки)

Система вакуумирования обеспечивает вакуумирование камеры до остаточного давления воздуха порядка 1 Па, а система газопитания – наполнение камеры аргоном до абсолютного давления порядка 1000 Па.

Электрическая силовая схема предназначена для питания дуги переменным током в импульсном режиме и должна обеспечивать стабильное возбуждение дугового разряда в начале каждой полуволны тока.

Система управления обеспечивает функционирование систем вакуумирования и газопитания и осуществляет включение сварочного тока и механизма осадки.

Компоновка установки «СТЫК-3» приведена на рис. 3.2.

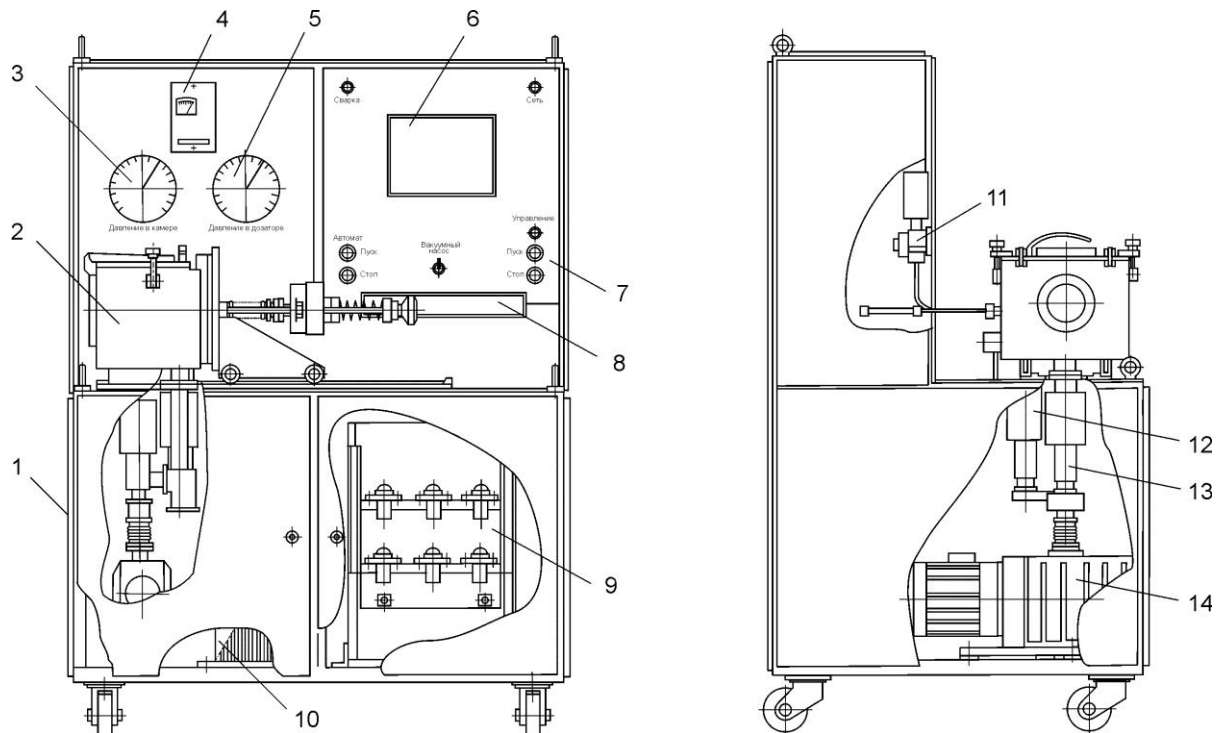


Рисунок 3.2 – Компоновка установки «СТЫК-3»

Корпус 1 имеет горизонтальный стол, на котором установлен сварочный модуль 2. На левой вертикальной панели размещены приборы системы вакуумирования и газопитания – образцовый вакуумметр 3, теплоэлектрический вакуумметр 4 и электроконтактный мановакуумметр 5. За этой панелью находится система 11 напуска аргона в вакуумную камеру. На правой вертикальной панели установлен монитор 6 системы компьютерного управления процессом сварки, панель управления 7 и клавиатура 8. Внутри корпуса размещены сварочный трансформатор 10, балластный реостат 9, вакуумный насос 14 и вакуумные клапаны 12, 13 системы вакуумирования камеры.

Установка «СТЫК-3» имеет следующую техническую характеристику:

Размеры свариваемых деталей, мм:

- диаметр труб	6 - 26
- толщина стенки	1 - 3

Электрическое питание установки:

- напряжение трехфазной электросети, В	380
- потребляемая мощность, кВА	60
- продолжительность включения, %	10

Диапазон изменения, силы сварочного тока, А

20 - 600

Число импульсов сварочного тока

1 - 99

Длительность импульсов тока, с

0,02 - 2

Длительность пауз, с

0,02 - 2

Объем вакуумной камеры, л

18,2

Давление в камере при вакуумировании, Па

1 - 3

Давление аргона при сварке, Па

800 - 1000

Расстояние между зажимами, мм

5 - 40

Тип механизма осадки:

электромагнитный с
пружинным

стабилизатором

Ход подвижного зажима при осадке, мм

0 - 12

Усилие осадки, кН

0,1 - 2

Тип зажимов:

рычажно - винтовой

Габаритные размеры, мм

1700x1100x800

Масса, кг

400

Целью модернизации установки «СТЫК-3» являлось обеспечение возможности сварки трубных заготовок диаметром до 100 мм.

При модернизации установки серьезной переработке подверглись следующие узлы и элементы:

- разработан вертикальный сварочный модуль с пневмодиафрагменным приводом осадки;
- разработана сборочно-сварочная оснастка, обеспечивающая возможность сборки трубных заготовок под сварку вне вакуумной камеры;
- разработаны зажимные устройства с созданием поперечного магнитного поля в зазоре между торцами трубных заготовок;
- разработана новая электрическая силовая схема питания дуги;
- модернизирована электрическая схема, система управления и контроля установки на современной элементной базе;
- разработано новое программное обеспечение системы компьютерного управления работой установки.

На рис. 3.3 показана установка «СТЫК-3» после модернизации.



Рисунок 3.3 – Сварочная установка «СТЫК-3» после модернизации

3.2 Разработка сварочного модуля для сварки трубных заготовок переходников диаметром до 100 мм

При увеличении диаметра свариваемых трубных заготовок свыше 30 мм с толщиной стенки более 4 мм необходимо переходить от горизонтального расположения заготовок к вертикальному. Это исключает неравномерность оплавления торцов свариваемых деталей, которая образуется из-за стекания жидкого металла под действием силы тяжести. Кроме того при сечениях заготовок более 300 мм² требуется увеличение усилия осадки выше 4 кН.

В модернизированной установке сварочный модуль располагается вертикально и используется пневмодиафрагменный механизм осадки, обеспечивающий усилие осадки до 10 кН.

Сварочный модуль (рис. 3.4) содержит следующие основные узлы: проставку 1, вакуумную камеру 2, в которой размещено установочное приспособление 5 с зажимами 3 и 4 свариваемых деталей, диафрагменную пневмокамеру 12 механизма осадки, датчик усилия осадки 11, шток 8. Ввод штока в камеру герметизирован с помощью сильфонного узла 9.

Направляющие, на которых установлен механизм осадки, закреплены на фланце 7 камеры.

Пневмокамера механизма осадки состоит из верхнего и нижнего корпусов, толкателя 13, диафрагмы и прижимных дисков.

В исходном состоянии шток 8, а, следовательно, и подвижный верхний зажим 4 находятся в крайнем верхнем положении. Перемещение штока вверх происходит под воздействием возвратной пружины 10, а верхнего зажима 4 – под воздействием возвратных пружин 14.

На рис. 3.5 приведена схема пневматической системы установки.

Система включает в себя следующие элементы: диафрагменную пневмокамеру 1, пневмоклапан быстрого выхлопа 2, пневмораспределитель 3, редукционный пневмоклапан 6, фильтр-влагодетелитель 5 и вентили 4, 7.

В исходном состоянии в нижнюю полость пневмокамеры через пневмораспределитель 3 и клапан 2 подается воздух под давлением пневмосети, а в верхнюю – под определенном давлением, соответствующем установочному значению усилия осадки. Это давление регулируется редукционным пневмоклапаном 6. При этом толкатель находится в верхнем исходном положении.

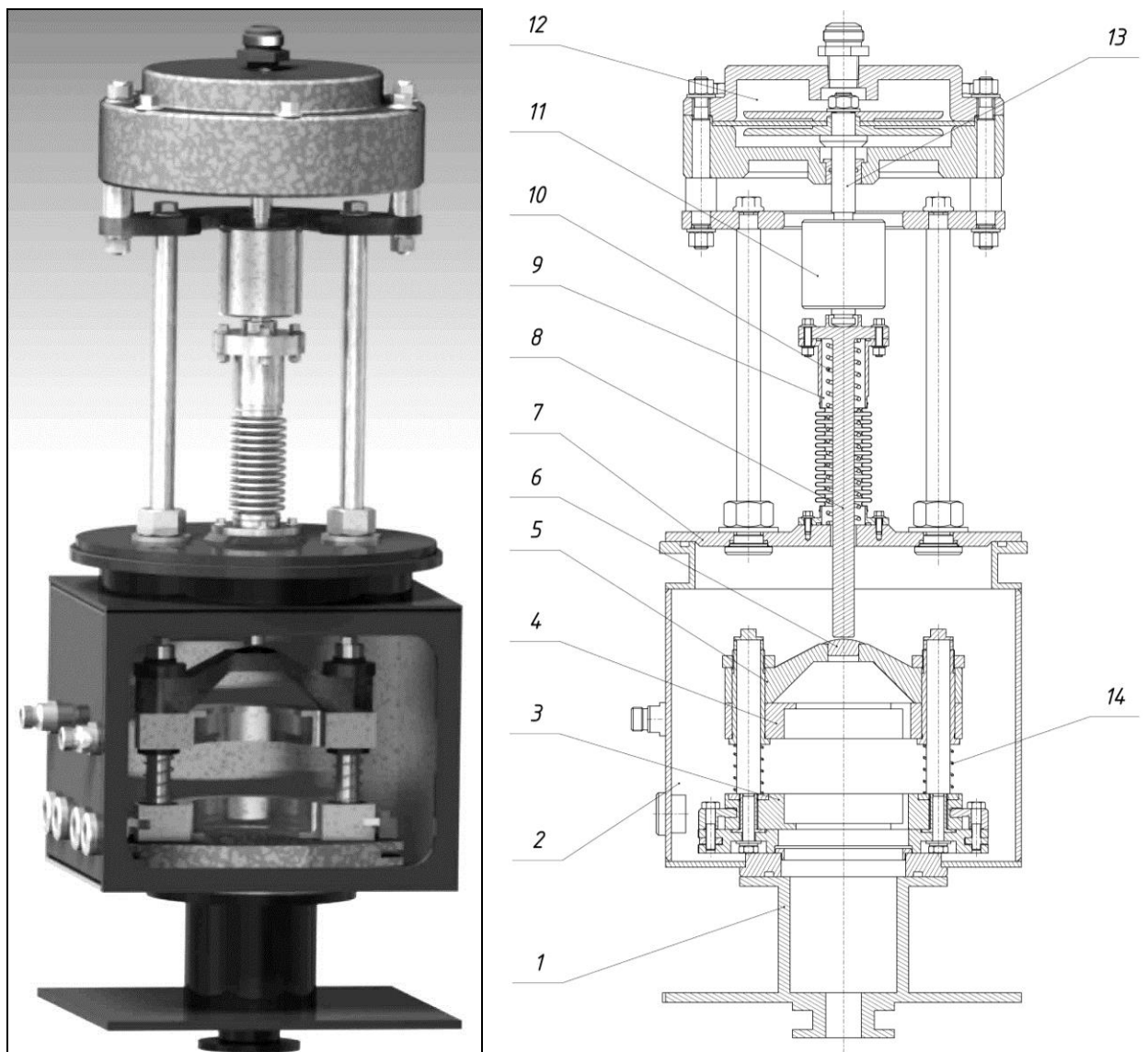


Рисунок 3.4 – Внешний вид и вертикальный разрез сварочного модуля

При поступлении сигнала на включение осадки воздух из нижней полости пневмокамеры через штуцер и уставленный на нем выхлопной

клапан 2 выбрасывается в атмосферу. При этом толкатель быстро перемещается вниз, передавая движение и усилие штоку 8. Шток через грибок 6 передает усилие осадки на подвижный зажим установочного приспособления.

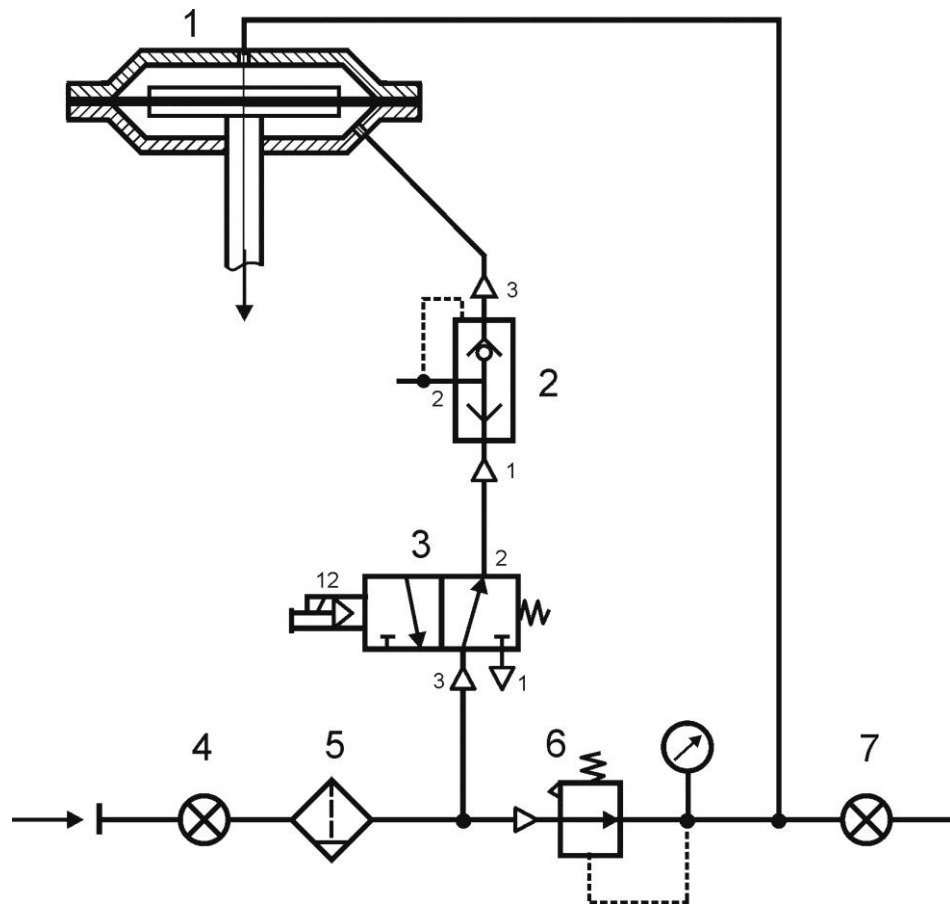


Рисунок 3.5 – Схема пневматической системы установки

(1 – диафрагменная пневмокамера привода осадки; 2- пневмоклапан быстрого выхлопа П-КБВ-16А; 3 – пневмораспределитель П-Р13Э-16/10; 4, 7 - вентиль; 5 – фильтр-влагодотделитель П-ФВ-16-1; 6 – пневмоклапан редуционный П-РК-16-1)

Благодаря малому объему нижней полости пневмокамеры (максимальный ход толкателя равен 15 мм) и значительно большему объему верхней полости, а также благодаря использованию выхлопного клапана, разработанный пневмодиафрагменный механизм осадки имеет высокое

быстродействие. Время закрытия зазора между торцами свариваемых деталей составляет около 0,02 с и достаточно стабильно.

Усилие осадки сохраняется в течение определенного времени, необходимого для остывания сварного стыка. Это время задается при настройке режима сварки. По истечении времени осадки клапан 3 выключается. При этом воздух под давлением пневмосети подается в нижнюю полость пневмокамеры и пневматическая система возвращается в исходное состояние.

Для облегчения процесса сборки свариваемых трубных заготовок разработано установочное приспособление, которое при сборке выводится из сварочной камеры. На рис. 3.6 представлен вертикальный разрез установочного приспособления, предназначенного для сборки трубных заготовок диаметром 70 мм.

Приспособление обеспечивает возможность регулировки соосности свариваемых трубных заготовок и установку зазора между их торцами в диапазоне 1...5 мм.

Приспособление включает в себя платформу 1, которая устанавливается непосредственно на дно сварочной камеры. На платформе закреплены две вертикальные направляющие 7 и 9, на которых располагаются нижний неподвижный и верхний подвижный зажимы свариваемых заготовок. Нижний зажим содержит ложемент 2, который фиксируется на платформе прижимами 3. Зазор между ложементом 2 и втулкой 4 обеспечивает возможность регулировки соосности свариваемых заготовок путем перемещения ложемента 2 по платформе 1. При подготовке к сварке в ложемент 2 устанавливается нижний цанговый зажим 11 со свариваемой трубной заготовкой.

На направляющие 7 и 9 установлен ложемент 6 верхнего подвижного зажима вместе с траверсой 8, на которую при осадке давит шток привода

осадки. При подготовке к сварке в ложемент 6 устанавливается верхний цанговый зажим 10 со второй свариваемой трубной заготовкой. Пружины 5 служат для возврата верхнего подвижного зажима в исходное положение после сварки.

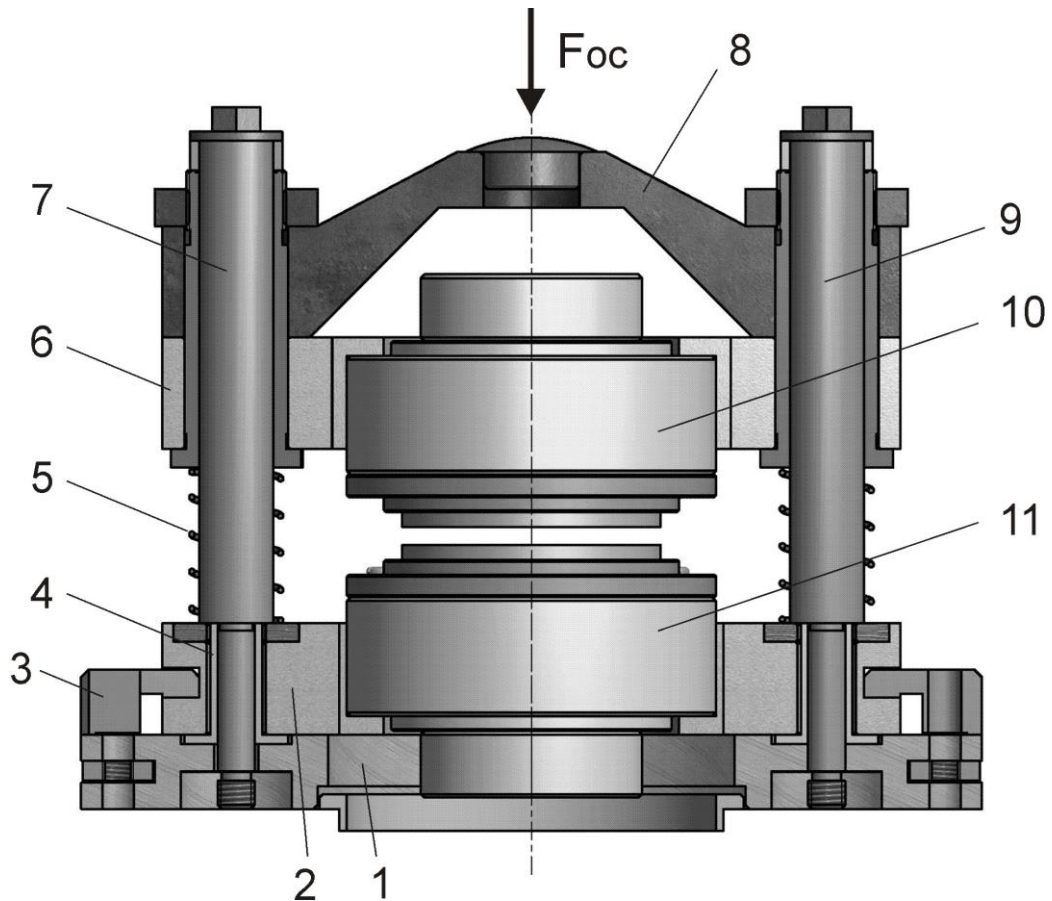


Рисунок 3.6 - Установочное приспособление для сварки трубных заготовок переходников диаметром 70 мм

(1 – платформа; 2, 6 – ложемент; 3 – прижим; 4 – втулка; 5 – пружина; 7, 9 – направляющие; 10, 11 – подвижный и неподвижный зажимы)

При разработке зажимного устройства для сварки трубных заготовок с магнитной системой на постоянных магнитах, расположенной внутри трубы, необходимо соблюдать ряд требований.

Главным требованием является предотвращение горения дуги при нагреве и оплавлении заготовок за пределами торцов свариваемых труб - на внутренней поверхности труб, на токоподводах, на цангах зажимов и т.д. Это

достигается полной изоляцией всех токоподводящих элементов, мест соединений токоподводов с зажимными устройствами, цапг зажимов, внутреннего и наружного защитных экранов. Поскольку дуга может загореться даже через узкую щель, то необходимо полностью исключить зазор между сопрягаемыми деталями.

На рис. 3.7 представлен разрез цапгового зажима. В корпусе 1 из капролона расположена цапга 2, в которую устанавливается свариваемая трубная заготовка 3. Неодимовый магнит 6 создает поперечное магнитное поле в зазоре между торцами труб. Используется магнит дисковой формы осесимметричной намагниченности из материала *Nd-Fe-B* диаметром 52 мм и толщиной 8 мм (магнит D 52×8, N35H, покрытие Ni).

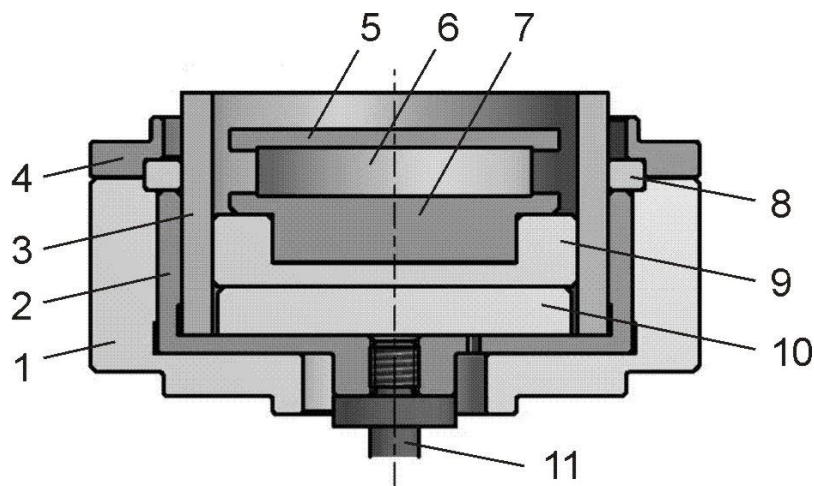


Рисунок 3.7 - Цапговый зажим

(1 – корпус; 2 – цапга; 3 – заготовка ($\varnothing 70 \times 5$); 4 – экран; 5, 7 – полюсный наконечник; 6 - магнит; 8 – кольцо; 9 - центратор; 10 – проставка; 11 – токоподвод)

Магнит расположен между полюсными наконечниками 5 и 7. Полюсный наконечник 5 служит также экраном, который защищает магнит от воздействия плазмы дугового разряда. Наконечник 7 обеспечивает соосную установку магнита внутри трубы. Стальной экран 4 защищает корпус зажима от воздействия дугового разряда. Кольцо 8 и проставка 9 изготовлены из фторпласта. Проставка 10 изготовлена из капролона и

используется для обеспечения определенного расстояния между полюсным наконечником 5 и торцом трубной заготовки. Кабельный наконечник 11 осуществляет токоподвод к цанге.

При расположении магнитных систем в обоих зажимных устройствах важным моментом является установка полярности магнитов. Нужно располагать магниты так, чтобы при установке устройств в ложементы магнитные системы отталкивались. Иначе возможно примагничивание магнитных систем друг к другу как во время установки зажимных устройств, так и во время сварки.

Съём и установка магнитной системы в зажимное устройство производится с помощью съёмника, который примагничивается к экрану 5. Съёмник изготовлен из ферромагнитной стали. Он состоит из центрального стержня, диаметром в 2 раза меньшим, чем диаметр верхнего полюсного наконечника, и ручки (Т - образный съёмник).

Для сборки трубных заготовок переходников диаметром 100 мм разработано установочное приспособление, представленное на рис. 3.8.

Верхнее и нижнее зажимные устройства имеют одинаковую конструкцию. В основании 6 на изоляционной проставке 4 с помощью держателя 7 установлена цанга 5. В магнитной системе используется магнит дисковой формы осесимметричной намагниченности из материала *Nd-Fe-B* диаметром 75 мм и толщиной 8 мм (магнит D 75x8, N35H, покрытие Ni).

Пружины 51 удерживают верхнее подвижное зажимное устройство в верхнем крайнем положении. Стальной экран 23 предохраняет диэлектрические элементы оснастки от плазмы дуги.

Токоподвод осуществляется непосредственно к цангам. Для этого на каждой цанге имеются по четыре токоввода, расположенные на равных расстояниях друг от друга.

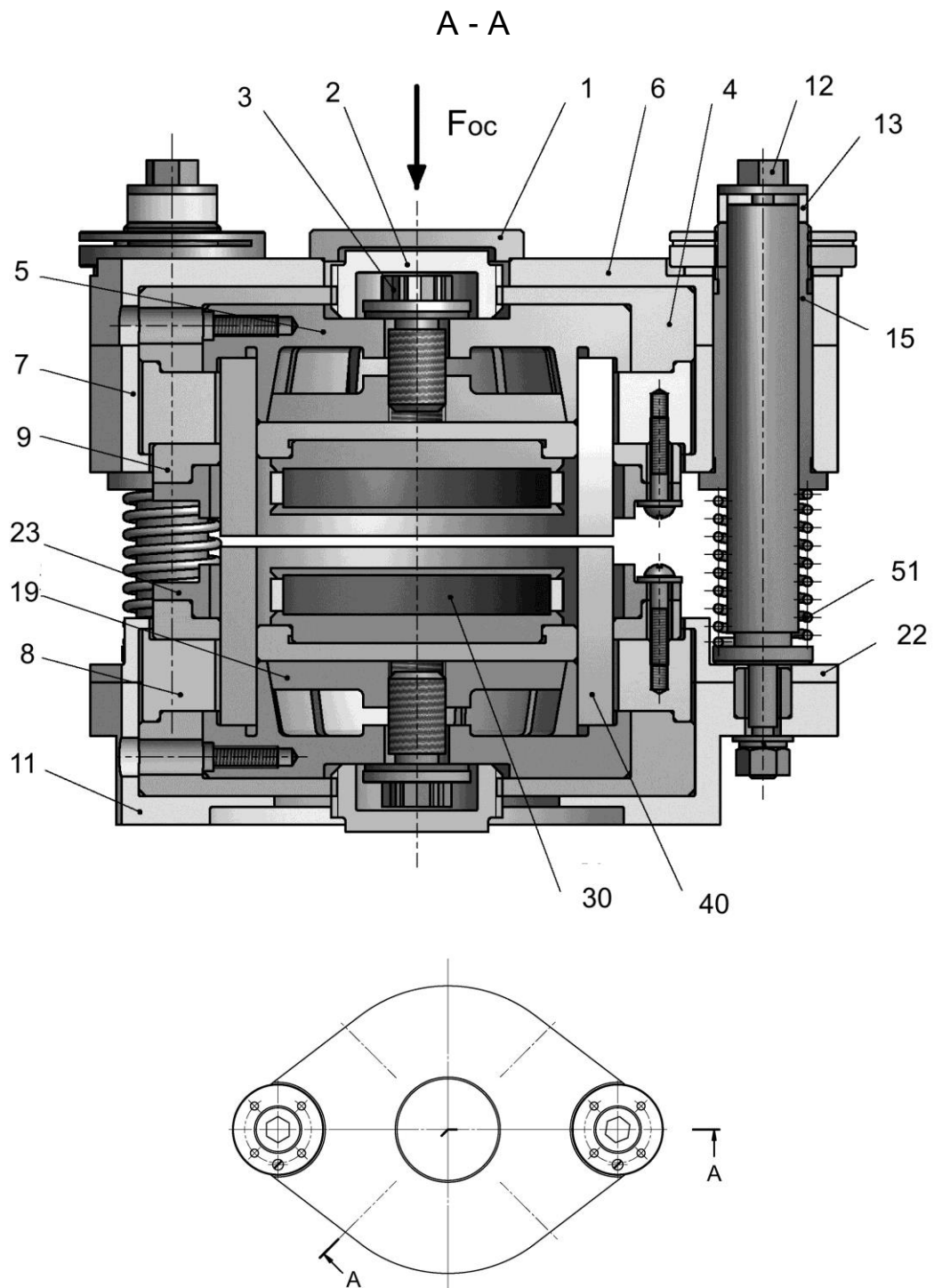


Рисунок 3.8 – Установочное приспособление для сварки трубных заготовок переходников диаметром 110 мм

(1 – площадка; 2 – крышка; 3, 12 – винт; 4, 8, 9 – изолятор; 5 – цанга; 6, 11 – основание; 7, 22 – держатель; 14 – направляющая; 15 – втулка; 19 – распор; 23 – экран; 30 – магнитная система; 40 – трубные заготовки; 51 – пружина)

Зазор между внутренней поверхностью свариваемой трубы и полюсным наконечником должен составлять не менее 2 мм. Это исключает замыкание зазора каплями металла при сварке. Нижний полюсный наконечник совместно с центратором обеспечивает установку магнита соосно с трубной заготовкой и удерживает магнитную систему внутри трубной заготовки за счет его притяжения к распору 19.

Установка трубной заготовки в зажимном устройстве производится следующим образом. Заготовка вставляется до упора в цангу 5. Затем путем вращения винта 3 с помощью конусного распора 19 производится ее зажатие в цанге. Далее устанавливается диэлектрическая крышка 2, препятствующая возбуждению дуги с обратной стороны цанги. Затем устанавливается магнитная система 30.

После установки трубных заготовок в зажимных устройствах производится общая сборка путем установки верхней части приспособления на направляющие 14. Затем осуществляется регулировка соосности труб и установка зазора между их торцами.

Соосность трубных заготовок регулируют следующим образом. После сборки устройства ослабляют гайки на направляющих 14. Сводят трубные заготовки вместе и совмещают торец верхней заготовки с торцом нижней заготовки. Далее гайки затягивают. Регулировка производится один раз с последующим контролем соосности перед каждой сваркой.

Зазор между торцами трубных заготовок регулируется винтами 12 в диапазоне от 1 до 10 мм.

Оснастка устанавливается в сварочную камеру так, чтобы шток привода осадки упирался без зазора в центр площадки 1.

Перед каждой сваркой необходимо очищать оснастку от прилипших брызг металла и протирать её от нагара салфеткой, смоченной спиртом.

3.3 Разработка источника питания электрической дуги низкого давления с током до 1500 А

Целью модернизации электрической силовой части сварочной установки «СТЫК-3» является увеличение средней силы тока дуги до 1500 А и повышение стабильности оплавления торцов трубных заготовок переходников.

Электрическая схема питания дуги установки «СТЫК-3» содержит сварочный трансформатор с жесткой характеристикой и балластный реостат, который служит для регулирования силы тока дуги. Сила тока дуги может дополнительно изменяться за счет регулирования угла включения силовых тиристорov, расположенных в цепи питания дуги.

Для увеличения силы тока дуги параллельно основному балластному реостату РБ-302, расположенному внутри корпуса установки, подключен дополнительный балластный реостат также типа РБ-302, который был доработан с целью уменьшения его полного сопротивления в четыре раза. При включении всех контактных ножей балластного реостата РБ-302 его сопротивление составляет 0,1 Ом. После доработки сопротивление реостата при включении всех контактных ножей составило 0,027 Ом.

Доработка реостата состояла в установке перемычек в каждой его секции. Схема доработок секций реостата представлена на рис. 3.9.

Каждую секцию реостата можно представить состоящей из четырех последовательно включенных резисторов, как это показано на 3.9-а.

Для уменьшения сопротивления секции в четыре раза ее части соединены в соответствии со схемой на рис. 3.9-б. При уменьшении сопротивления секции в четыре раза допустимая рассеиваемая мощность на ней возрастет также в четыре раза.

Схема установки перемычек в секции балластного реостат показана на рис. 3.9-в. Перемычки 1 и 2 соединяют концы секции с ее серединой, а перемычки 3 и 4 являются новыми выводами секции.

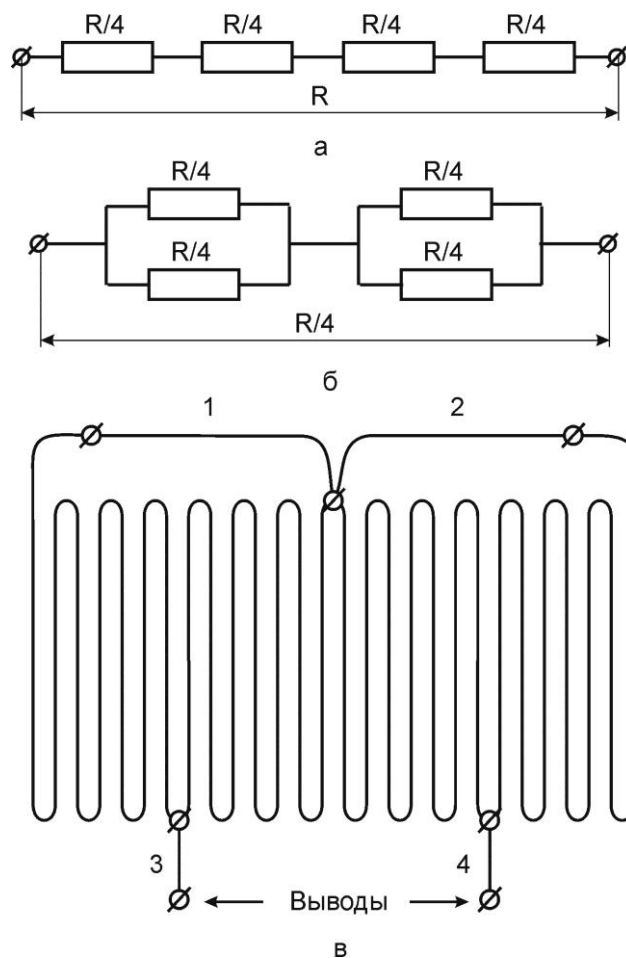


Рисунок 3.9 - Доработка балластного реостата РБ-302

Сопротивление секций балластного реостата после доработки представлено в табл. 3.1, а сила тока короткого замыкания для различных ступеней балластного реостата в табл. 3.2.

Нагрев трубных заготовок при стыковой сварке дугой низкого давления содержит две стадии. На первой стадии торцы труб нагреваются в твердом состоянии без оплавления. К концу этой стадии температура торцевой поверхности труб должна быть близка к температуре солидуса свариваемого металла. На второй стадии производится кратковременное оплавление – на торцах труб формируется слой расплавленного металла.

Большое значение на формирование качественных сварных соединений имеет равномерность распределения слоя жидкого металла на торцах труб и стабильность стадии оплавления.

Таблица 3.1 - Сопротивление ступеней балластного реостата

Ступени	Сопротивление, мОм
1	181,7
2	184,7
3	187,2
4	91,0
5	91,7
1+2	92,1
1+2+3	61,8
4+5	45,6
1+2+3+4	37,0
1+2+3+4+5	26,5

Таблица 3.2 - Сила тока короткого замыкания (максимальные значения) для различных ступеней балластного реостата

Ступени	Сила тока, А
1	750
2	750
3	750
4	1200
5	1200
1+2	1200
1+2+3	1500
4+5	1800
1+2+3+4	1950
1+2+3+4+5	2100

Ранее проведенными исследованиями установлено, что стабильность стадии оплавления сильно зависит от соотношения плотностей тепловых потоков, поступающих на торцы труб на стадиях нагрева и оплавления.

Плотности тепловых потоков определяются силой тока дуги на стадиях нагрева и оплавления. Достаточно стабильное оплавление имеет место, если средняя сила тока дуги при оплавлении превышает среднюю силу тока дуги при нагреве в 1,5-2 раза.

При сварке труб диаметром до 30 мм с толщиной стенки 1-3 мм это условие может быть реализовано при изменении силы тока дуги в соответствии с циклограммой, представленной на рис. 3.10-а.

На первой стадии применяется многоимпульсный нагрев, при котором короткие импульсы тока дуги длительностью 1-2 периода чередуются с паузами такой же длительности. При этом средняя мощность дуги при нагреве равна половине мощности дуги в импульсе тока.

При переходе к оплавлению ток дуги протекает непрерывно и средняя мощность дуги возрастает в два раза по сравнению со средней мощностью дуги на стадии нагрева. При этом мощность дуги при оплавлении может быть дополнительно увеличена путем уменьшения угла включения силовых тиристорov, стоящих в цепи питания дуги переменным током.

При сварке труб диаметром 40-70 мм с толщиной стенки 4-6 мм в связи с необходимостью значительного увеличения силы тока дуги при нагреве такая циклограмма тока дуги неприемлема. В этом случае целесообразно использовать изменение силы тока в соответствии с циклограммой, представленной на рис. 3.10-б.

На стадии нагрева импульсы тока длительностью 5-10 периодов чередуются с короткими паузами. При этом средняя мощность дуги приближается к мощности дуги в импульсе тока. Это обеспечивает нагрев торцов труб с площадью сечения 500-1000 мм². При переходе к оплавлению мощность дуги должна быть увеличена в 1,5-2 раза. Для этого на стадии нагрева параллельно основному балластному реостату подключается дополнительный балластный реостат.

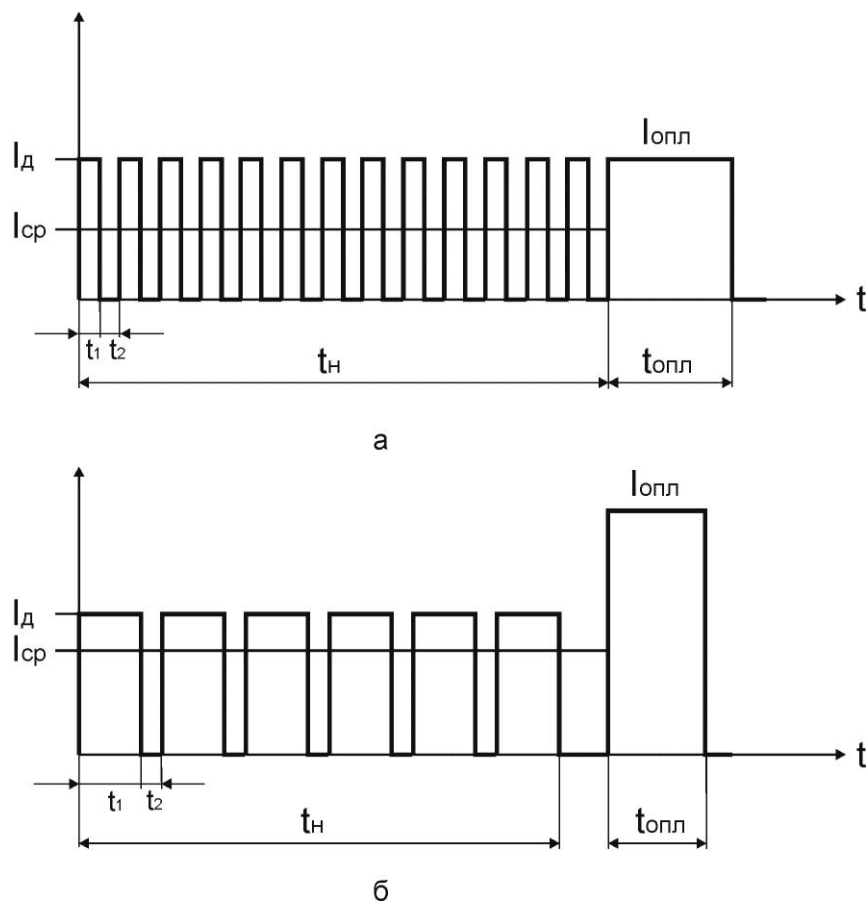


Рисунок 3.10 - Циклограммы тока дуги: I_d – сила тока дуги в импульсе при нагреве; I_{cp} – средняя сила тока дуги при нагреве; $I_{опл}$ – сила тока дуги при оплавлении; t_n , $t_{опл}$ – длительности стадий нагрева и оплавления; t_1 , t_2 – длительности импульсов и пауз на стадии нагрева

Подключение дополнительного балластного реостата происходит в паузе между последним импульсом тока на стадии нагрева и импульсом тока оплавления с помощью мощного электромагнитного контактора. Длительность этой паузы выбрана равной 200 мс, что исключает срабатывание контактора при включенном токе в цепи питания дуги.

В соответствии с циклограммой тока, представленной на рис. 3.10-б, выполнена доработка электрической схемы питания дуги (рис. 3.11).

Электрическая схема содержит основной балластный реостат РБ1 и дополнительный РБ3. В качестве дополнительного балластного реостата используется доработанный балластный реостат РБ-302.

Подключение ступеней балластного реостата РБ1 осуществляется с помощью контакторов К1...К4, которые управляются командами, поступающими из блока компьютерного управления сварочной установки.

Подключение ступеней балластного реостата РБ3 осуществляется вручную с помощью контактных ножей реостата при настройке установки на заданный режим сварки. Включение контактора К5, подключающего дополнительный реостат, производится по команде из блока управления установки.

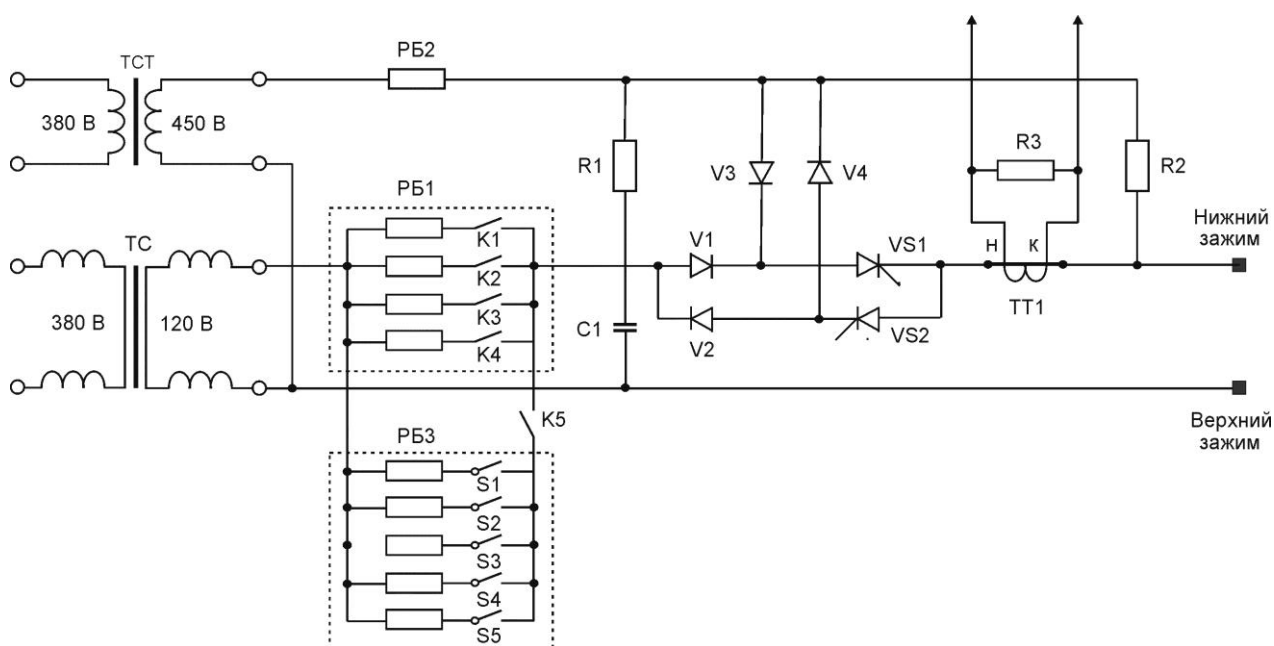


Рисунок 3.11 - Доработка электрической схемы питания дуги установки «СТЫК-3»

Установка «СТЫК-3» с модернизированной электрической схемой питания дуги обеспечила возможность сварки трубных заготовок переходников диаметром 70 мм с площадью сечения до 1000 мм². Однако при этом сильно проявился существенный недостаток силовой электрической схемы установки, основанный на использовании сварочного трансформатора с жесткой внешней характеристикой и регулировкой тока дуги с помощью балластного реостата. При токе дуги, равном 1200 А, который необходим для

нагрева таких заготовок, и напряжении дуги 20 В мощность дуги составила около 25 кВт. При этом мощность, потребляемая установкой из силовой электросети, превысила 120 кВА. Следует учитывать также, что при однофазном питании установки имеет место сильный перекося фаз. Очевидно, что при таких токах дуги использование существующей силовой электрической схемы установки «СТЫК-3» становится нецелесообразным.

В связи с этим в работе выполнена разработка нового источника питания дуги низкого давления, основанная на использовании сварочных инверторов.

Целесообразность использования сварочных инверторов при стыковой сварке дугой низкого давления объясняется их следующими технологическими и энергетическими достоинствами:

- возможность получения прямоугольной формы импульса в полуволне переменного тока, что улучшает равномерность нагрева торцов свариваемых деталей;
- стабильная сила тока инверторов стабилизирует нагрев торцов свариваемых деталей;
- возможность резкого увеличения силы тока дуги при переходе от стадии нагрева к оплавлению стабилизирует формирование слоя расплавленного металла на торцах труб;
- значительное расширение технологических возможностей процесса благодаря осуществлению практически любой циклограммы тока, возможности изменять частоту переменного тока, использовать переменный ток с различной длительностью положительных и отрицательных полуволн, переходить на постоянный ток той или иной полярности;
- значительное увеличение к.п.д. силовой схемы (более 80 %);
- равномерная загрузка фаз силовой электросети;
- резкое снижение массы электрической силовой части установки.

Какого-либо готового сварочного инвертора, который мог бы обеспечить ток дуги до 1500 А и импульсное питание дуги переменным и постоянным током не существует. Поэтому в работе потребовалось выполнить значительную работу по выбору инверторов и разработке способов и устройств их использования для питания дуги низкого давления при стыковой сварке.

Для питания дуги низкого давления, горящей в зазоре между торцами трубных заготовок, можно использовать сварочные инверторы постоянного тока, предназначенные для ручной дуговой сварки (ММА – инверторы).

Новый источник питания дуги при стыковой сварке дугой низкого давления разработан на основе инверторов «ФОРСАЖ-502» производства ОАО «Государственный Рязанский приборный завод». В настоящее время это самый мощный инвертор отечественной разработки. С целью применения этих инверторов при стыковой сварке дугой низкого давления в ООО «Силовая электроника» (г. Рязань) выполнена доработка инверторов – улучшены динамические характеристики и увеличен максимальный ток инверторов до 750 А. Максимальная сила тока дуги в 1500 А получена путем параллельного включения двух инверторов.

Для импульсного питания дуги переменным и постоянным током потребовалась разработка специального преобразователя.

Сначала была опробована схема преобразования постоянного тока в переменный, представленная на рис. 3.12. Был разработан мостовой преобразователь на IGBT модулях VT1...VT4. Использовались интеллектуальные модули типа PM300DSA120 с максимальным током 300 А и напряжением 1200 В. На приведенной схеме не показаны элементы защиты модулей от перенапряжений, возникающих при их коммутации.

В разработанном преобразователе имелись два источника тока – сварочный инвертор «ФОРСАЖ-301» с током 300 А и напряжением 60 В и

трехфазный выпрямитель с напряжением 700 В, который использовался для зажигания дуги. Испытания преобразователя показали его работоспособность на токах 50...200 А. Однако при токах дуги 300 А был пробит один IGBT модуль. По-видимому, это было вызвано перенапряжениями, возникающими при коммутации модулей, и связано с достаточно высоким напряжением источника зажигания дуги. Возникшая проблема могла быть решена улучшением защиты модулей от перенапряжений. Однако было решено попытаться разработать более надежную схему преобразования, в которой IGBT модули работали бы при пониженных напряжениях.

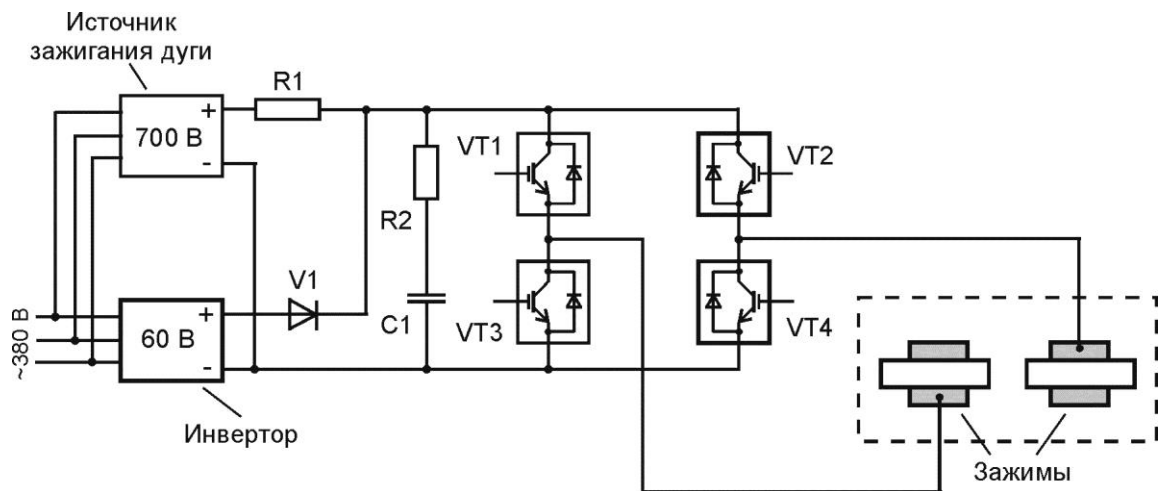


Рисунок 3.12 – Схема преобразователя на IGBT модулях

В результате была разработана схема преобразования постоянного тока в переменный на основе мостовой схемы на силовых тиристорах, а IGBT модули использовались для включения и выключения тока тиристорного преобразователя. При этом высокое напряжение источника зажигания дуги подавалось только на тиристорный преобразователь, а IGBT модули работали при напряжении инвертора.

На рис. 3.13 представлена электрическая схема источника питания сварочной дуги, разработанного на базе ММА инверторов. Она включает в себя следующие элементы:

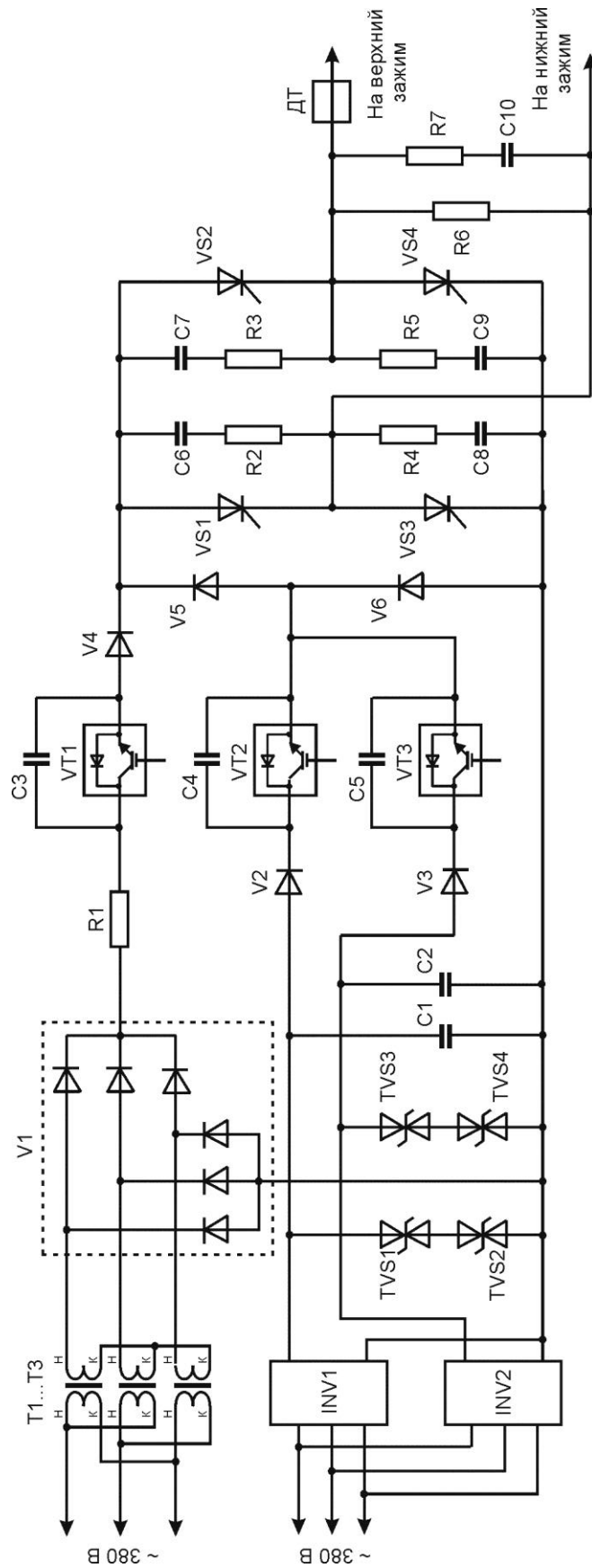


Рисунок 3.13 - Электрическая схема инверторного источника питания дуги низкого давления

- два сварочных инвертора «ФОРСАЖ-502» с максимальным током 750 А;
- преобразователь постоянного тока инверторов в переменный и импульсы постоянного тока различной полярности, который выполнен по мостовой схеме на тиристорах VS1...VS4;
- три интеллектуальных IGBT – модуля VT1...VT3, которые предназначены для управления включением и выключением тока сварочной дуги и для прерываний тока тиристором мостового преобразователя;
- источник постоянного тока с напряжением 700 В, который используется для зажигания дугового разряда;

В электрической схеме источника также имеются TVS-диоды (супрессоры), конденсаторы и RC – цепочки (снабберы), которые предназначены для защиты инверторов и полупроводниковых элементов схемы от перенапряжений, возникающих в процессе преобразований тока.

Управление работой источника питания дуги осуществляется сигналами из блока компьютерного управления, которым снабжена сварочная установка. Дискретные сигналы управляют работой IGBT – модулей и тиристором, а аналоговые задают силу токов инверторов.

На рис. 3.14 представлена циклограмма дискретных импульсов управления. Эта циклограмма соответствует формированию на выходе преобразователя переменного тока. При этом на стадии нагрева работает инвертор INV1, а на стадии оплавления работают оба инвертора.

Источник питания дуги работает следующим образом. По команде из блока управления подается трехфазное напряжение силовой электросети на инверторы и источник зажигания дуги. Далее поступают импульсы на модули VT1 и VT2. С небольшой задержкой импульсы управления подаются на тиристоры VS2 и VS3. Между торцами свариваемых деталей зажигается дуговой разряд с анодом на детали, установленной в верхнем зажиме. Возбуждение разряда обусловлено высоким напряжением на выходе модуля

VT1. Для стабилизации возбуждения разряда используется цепочка R3C1, которая обеспечивает кратковременное резкое увеличение силы тока в начальной стадии развития дугового разряда.

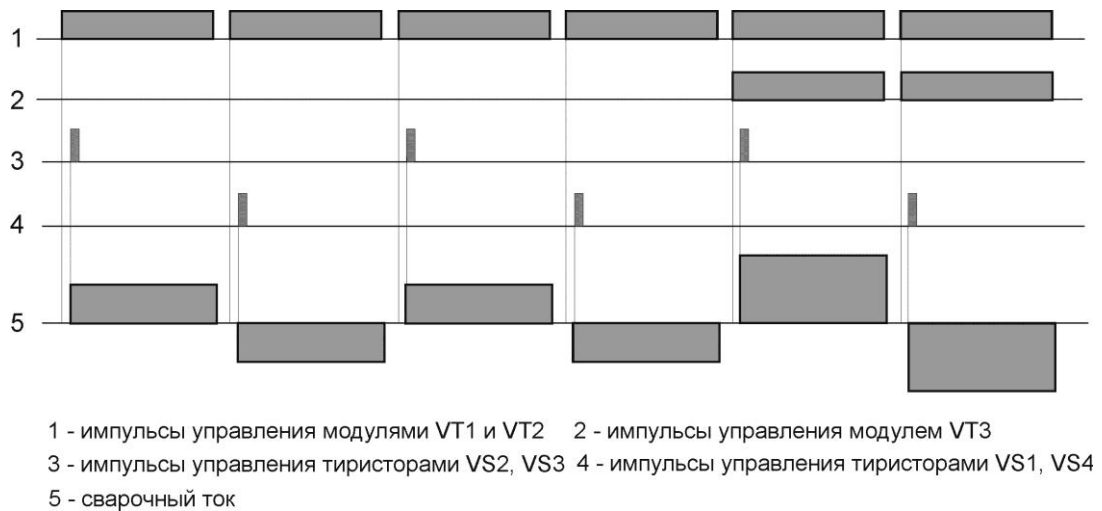
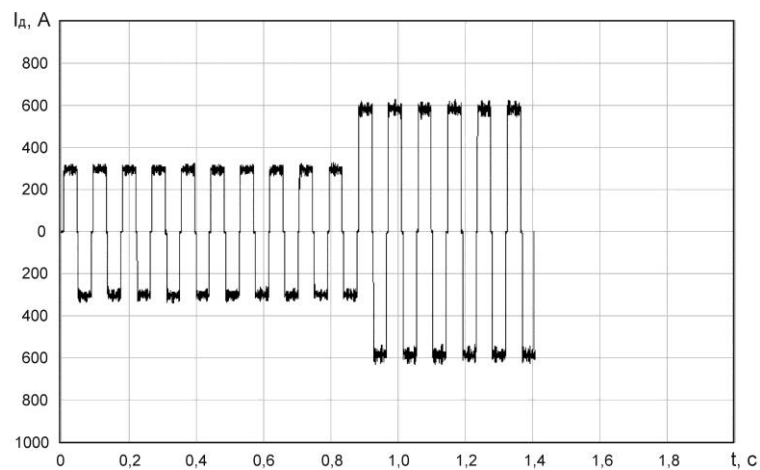


Рисунок 3.14 - Циклограмма импульсов управления IGBT – модулями и тиристорами

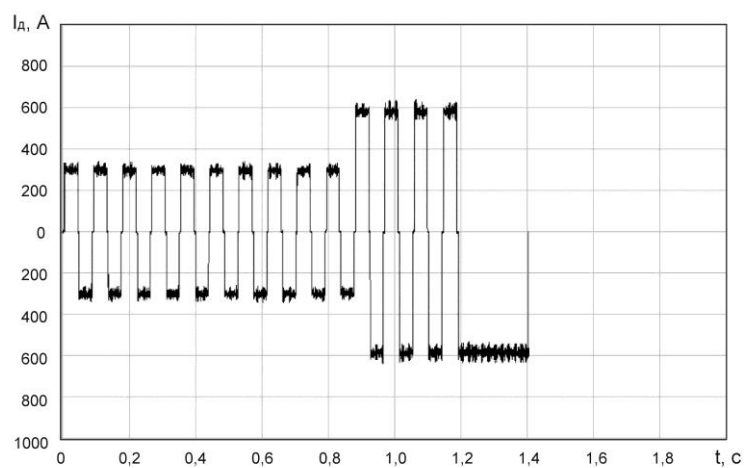
Длительность установившейся положительной полуволны тока определяется длительностью импульсов управления, поступающих на модули VS1 и VS2, а сила тока дуги – инвертором INV1. При отключении импульсов управления модулями происходит прерывание тока, текущего через тиристоры, и положительная полуволна тока дуги выключается.

Через определенное время на модули VT1 и VT2 вновь поступают импульсы управления, а с небольшой задержкой импульсы управления подаются на тиристоры VS1 и VS4. При этом между торцами свариваемых деталей зажигается дуговой разряд с анодом на детали, установленной в нижнем зажиме. При отключении импульсов управления модулями VT1 и VT2 отрицательная полуволна тока дуги также выключается. На стадии оплавления импульсы управления подаются также на модуль VT3. При этом сила тока дуги равняется сумме токов обоих инверторов.

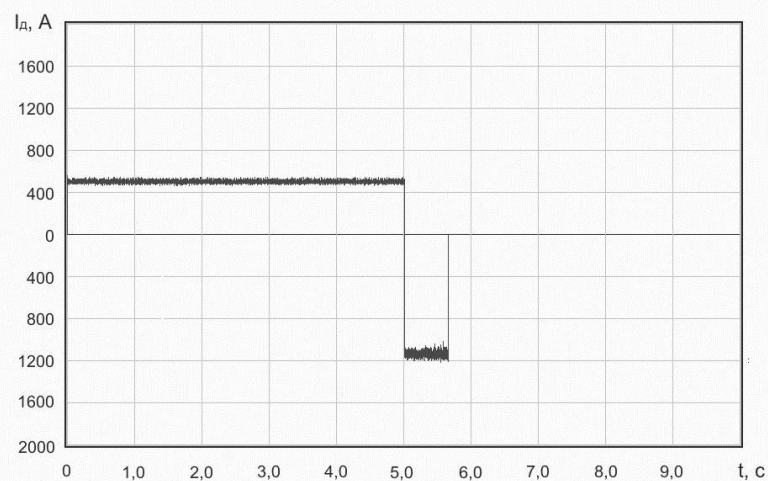
Осциллограммы тока дуги, представленные на рис. 3.15, иллюстрируют работу разработанного инверторного источника.



а



б



в

Рисунок 3.15 - Осциллограммы тока дуги:
а – переменный ток; б – переменный ток с переходом на постоянный ток в конечной стадии оплавления; в – постоянный ток

3.4 Модернизация системы управления и контроля на современной элементной базе

Модернизирована система компьютерного контроля и управления процессом сварки. Ее структурная схема представлена на рис. 3.16. Она включает в себя собственно сварочную установку «СТЫК-3» и блок компьютерного управления.

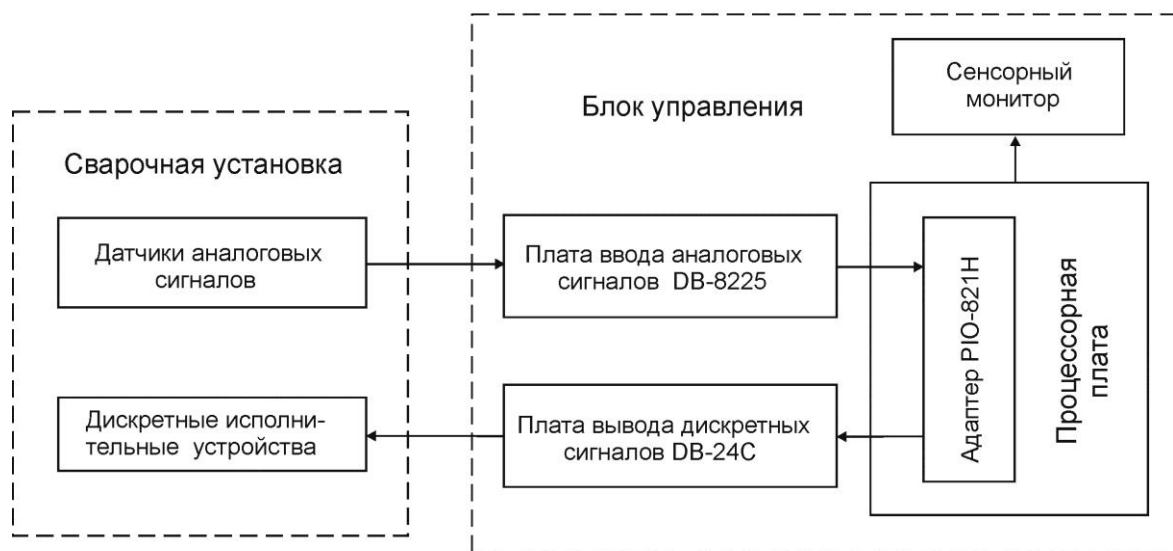


Рисунок 3.16 – Структурная схема системы компьютерного контроля и управления процессом сварки

В сварочной установке располагаются датчики контролируемых параметров процесса и исполнительные устройства.

Компьютер выполнен на базе x86 совместимой процессорной платы форм-фактора Mini-ITX. На процессорной плате установлен адаптер P10-821H фирмы ICP DAS.

Адаптер P10-821H используется для вывода дискретных сигналов управления и для ввода в компьютер аналоговых сигналов датчиков параметров процесса сварки. Адаптер связан с элементами электрической схемы установки через выносные платы DB-24C (вывод дискретных сигналов управления) и DB-8225 (ввод аналоговых сигналов датчиков).

Система компьютерного управления снабжена встраиваемым 15” LCD монитором ET1537L-6C с сенсорным экраном фирмы Elo Touch Solutions.

В процессе сварки происходит измерение и регистрация параметров процесса: давления газа в камере при вакуумировании, силы сварочного тока и усилия осадки.

В качестве датчика давления используется вакуумметр тепловой Мерадат-ВИТ12Т2/2Р/1А с аналоговым выходом фирмы Мерадат с преобразователем ПМТ-4М.

Для измерения усилия осадки используется датчик силы UU-1Т фирмы Dacell с нормализатором выходного сигнала датчика типа DSCA38-08Е фирмы Dataforth.

Сила сварочного тока измеряется датчиком LTS 1000-SF/SP20 фирмы LEM Components, основанным на эффекте Холла.

На рис. 3.17 представлены электрические схемы измерения давления в камере при вакуумировании, силы тока дуги и усилия осадки.

Программное обеспечение разработано с использованием компилятора GNU C/C++ и библиотеки GTK2+ для построения графических интерфейсов в операционной системе Linux.

Программное обеспечение состоит из программного модуля «СТЫК». Он предназначен для выполнения следующих работ:

- а) введение и запись в файл установочных параметров режима сварки;
- б) запись в файл параметров настройки системы управления;
- в) контроль работы отдельных узлов сварочной установки;
- г) осуществление процесса сварки в автоматическом режиме;
- д) запись установочных и контролируемых параметров выполненного процесса сварки в память компьютера;
- е) анализ процесса сварки по осциллограммам параметров процесса.

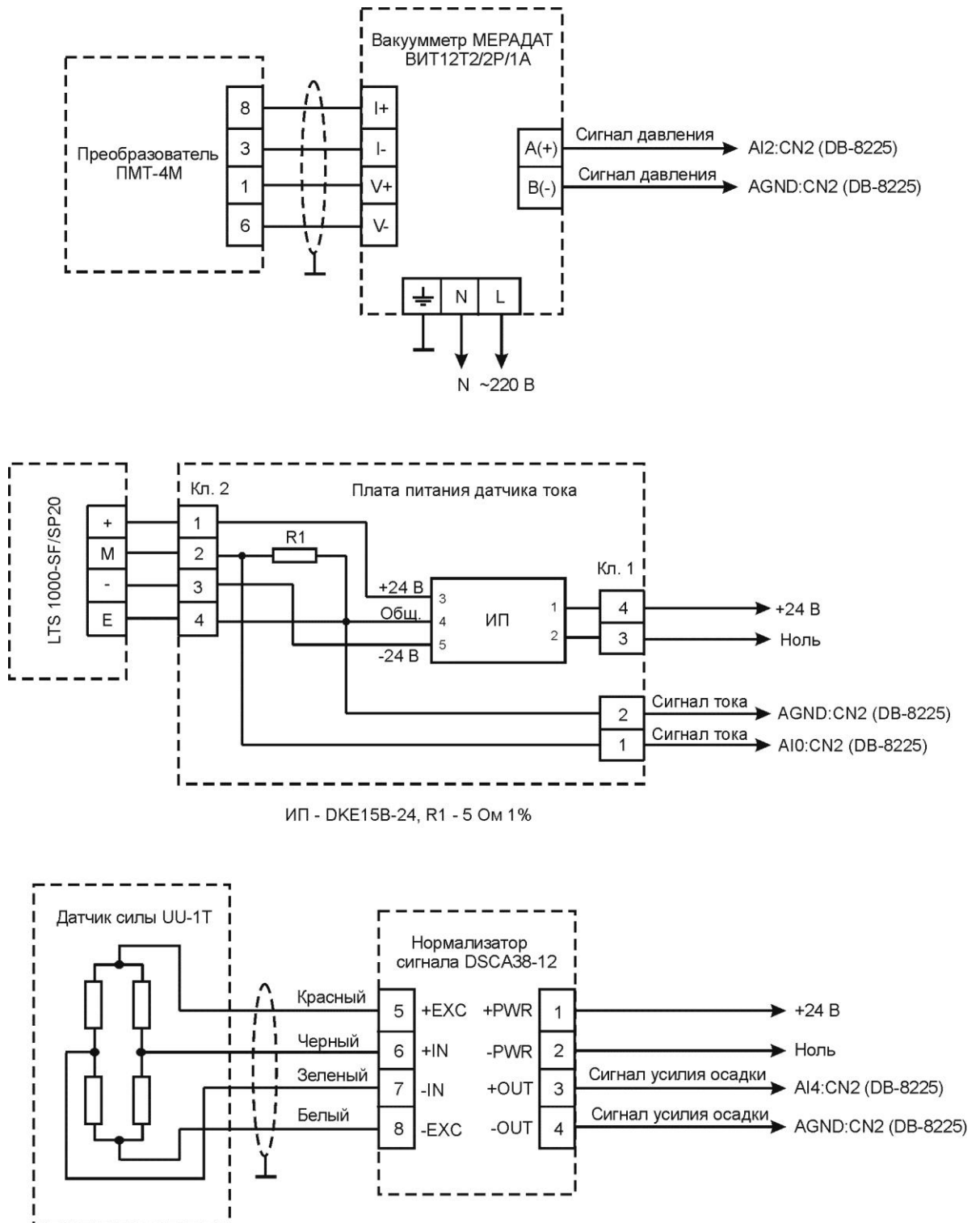


Рисунок 3.17 - Электрические схемы измерения давления в камере при вакуумировании, силы тока дуги и усилия осадки

При запуске программы на экране монитора появляется изображение

меню (рис. 3.18). Вид работы выбирается вводом соответствующей цифры.

При выборе пункта «4» открывается окно «Задание условий сварки» (рис. 3.19). Оно используется либо для создания нового файла режима сварки, либо для загрузки, чтения и корректировки файлов режимов, записанных ранее на диске. Загрузка файла режима и его сохранение на диске осуществляются путем нажатия соответствующих кнопок на экране задания режима – «Загрузить» и «Сохранить».

Для задания какого-либо параметра необходимо активировать соответствующее окно ввода и с помощью виртуальной клавиатуры ввести в окно значение параметра.

При выборе пункта «5» меню открывается окно «Настройка системы управления» (рис. 3.19). Оно используется для задания параметров настройки работы узлов установки, которые не относятся к параметрам режима сварки.

Пункт меню 2 - “Контроль работы установки” используется для проверки работоспособности отдельных узлов установки и выполнения сварки в полуавтоматическом режиме. При выборе этого пункта меню на мониторе изображается виртуальная панель управления сварочной установкой (рис. 3.18). На панели управления имеются кнопки включения и выключения основных исполнительных устройств сварочной установки.

Пункт меню 1 - “Управление процессом сварки” используется при работе сварочной установки в автоматическом режиме. При этом на экране монитора изображается мнемосхема установки.

В процессе работы установки включение и выключение отдельных исполнительных устройств сопровождается изменением их цвета. На экран выводятся также названия отдельных стадий процесса и пояснения к ним (рис. 3.20).



Рисунок 3.18 - Экран меню программного модуля «СТЫК» и виртуальная панель контроля работы установки

Задание условий сварки

Наименование режима: AMr3+12X18N10T.reg
 Нижняя деталь: AMr3 Верхняя деталь: 12X18N10T

Металл 1				Металл 2			
Диаметр D1, мм		30,0	▲▼	Диаметр D2, мм		32,0	▲▼
Толщина B1, мм		4,00	▲▼	Толщина B2, мм		6,00	▲▼
Вылет L1, мм		4,0	▲▼	Вылет L2, мм		4,0	▲▼

Установочные параметры режима:

Зазор G, мм				Число импульсов N			
Давление pAr, Па		800	▲▼	Импульс t1, пер		5	▲▼
Усилие Foc, кН		5,0	▲▼	Пауза t2, пер		5	▲▼
Ток при нагреве, А		400,0	▲▼	Оплавл. t3, пер		5	▲▼
Ток при оплавл., А		800,0	▲▼	Полупериод T/2, с		0,04	▲▼

Загрузить

Сохранить

Esc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	-	=	⇐	⇐ Backspace	
Tab	q	w	e	r	t	y	u	i	o	p	[]	Del		
Rus/Lat	a	s	d	f	g	h	j	k	l	;	'	Return			
⇧ Shift	z	x	c	v	b	n	m	,	.	/	\	↑	Ins		
Home	Space										End	←	↓	→	

Помощь

Меню

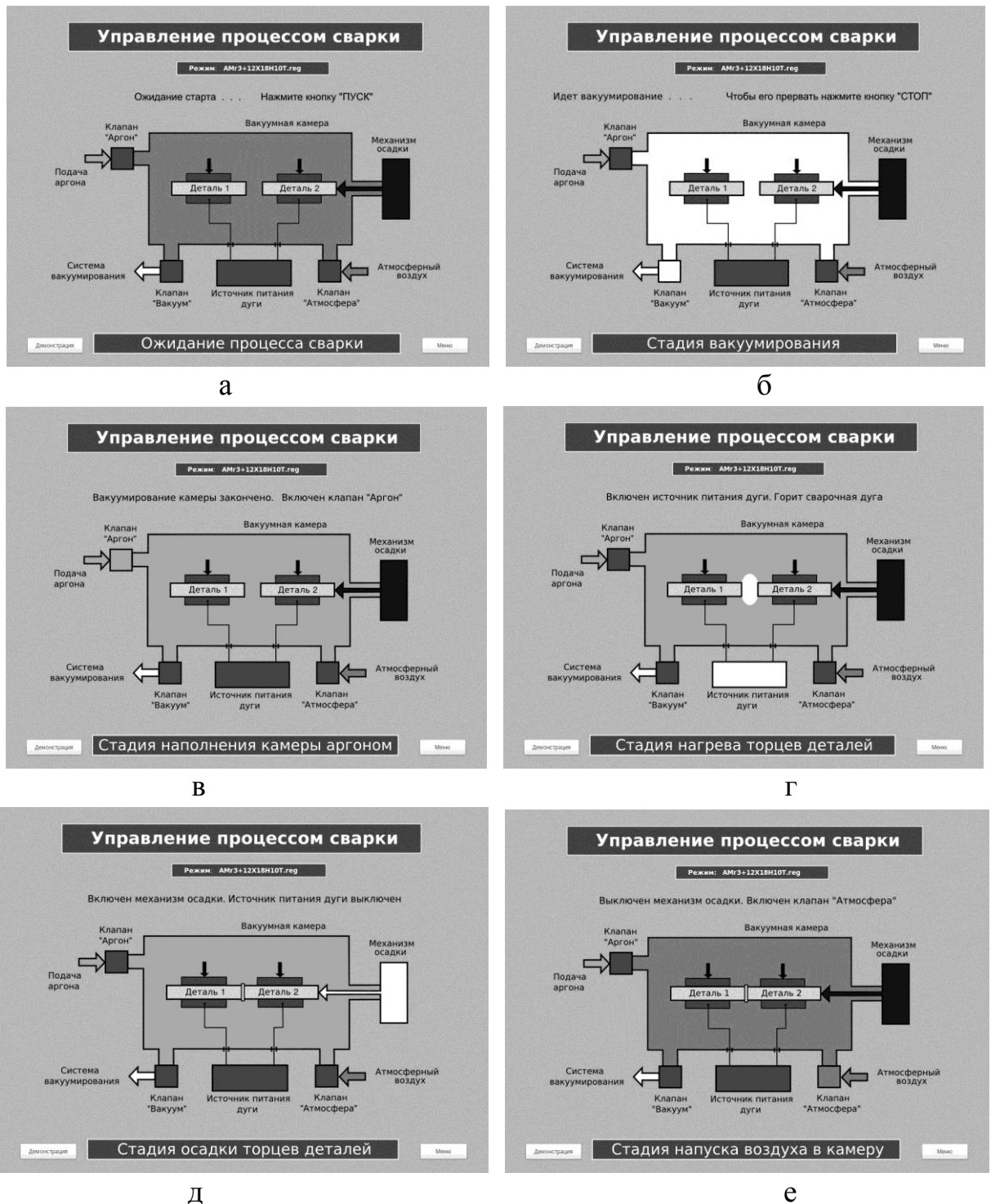
Настройка системы управления

Номинальный сигнал вакуумметра, Па			
Число промывок камеры аргоном		3	▲▼
Катодная очистка перед осадкой, пер		2	▲▼
Пауза между импульсами тока, мкс		2000,0	▲▼
Задержка включения тиристорov, мкс		300,0	▲▼
Задержка выключения тока, пер		2	▲▼
Длительность усилия осадки, с		7,0	▲▼
Время наполнения камеры воздухом, с		10,0	▲▼
Использ. клавиши Enter (Да - 1, Нет - 0)		0	▲▼
Автосохранение режима (Да - 1, Нет - 0)		1	▲▼
Сброс номера сварки на ноль		n = 0	

Esc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	-	=	⇐	⇐ Backspace	
Tab	q	w	e	r	t	y	u	i	o	p	[]	Del		
Rus/Lat	a	s	d	f	g	h	j	k	l	;	'	Return			
⇧ Shift	z	x	c	v	b	n	m	,	.	/	\	↑	Ins		
Home	Space										End	←	↓	→	

Меню

Рисунок 3.19 - Экраны задания условий сварки и настройки системы управления



а – ожидание процесса сварки
 в – наполнение камеры аргоном
 д – осадка торцов деталей

б – вакуумирование камеры
 г – нагрев торцов деталей дугой
 е – наполнение камеры воздухом

Рисунок 3.20 - Отображение основных этапов процесса сварки на мнемосхеме при сварке в автоматическом режиме

Выводы по главе 3

1. С целью обеспечения возможности сварки трубных переходников из разнородных металлов диаметром до 100 мм выполнена модернизация установки «СТЫК-3». В установке использован усовершенствованный способ сварки, при котором на дугу, горящую в зазоре между торцами трубных заготовок, накладывается поперечное магнитное поле.

При модернизации установки выполнены разработки:

- разработан новый сварочный модуль;
- разработана новая электрическая силовая схема питания дуги;
- разработана система контроля и управления процессом сварки на современной элементной базе.

2. Для исключения неравномерности оплавления торцов трубных заготовок, вызванной стеканием жидкого металла под действием силы тяжести, при модернизации сварочного модуля использована новая компоновка модуля, при которой сварочная камера с зажимами для свариваемых трубных заготовок и механизм осадки располагаются вертикально. При модернизации модуля выполнены разработки:

- разработан пневмодиафрагменный механизм осадки и пневматическая система с усилием осадки до 10 кН.
- разработаны установочные приспособления и цанговые зажимы трубных заготовок диаметром 70 и 100 мм с устройствами для создания поперечного магнитного поля; установочные приспособления обеспечивают возможность сборки трубных заготовок под сварку вне вакуумной камеры.

3. Разработан инверторный источник питания дуги низкого давления с током до 1500 А. Источник обеспечивает возможность изменять частоту переменного тока при сварке, использовать переменный ток с различной длительностью положительных и отрицательных полуволн, осуществлять сварку на постоянном токе.

Источник содержит два ММА инвертора «ФОРСАЖ-502» с улучшенной для дуги низкого давления динамической характеристикой и расширенным диапазоном токов 50...750 А.

Для импульсного питания дуги переменным и постоянным током разработан специальный преобразователь на основе мостовой схемы, выполненной на силовых тиристорах. Включение и выключение тока тиристорного преобразователя производится с помощью мощных IGBT модулей, через которые преобразователь подключен к инверторам.

Управление тиристорами и IGBT модулями, а также управление током инверторов, производится сигналами из блока компьютерного управления установки.

4. На основе современной элементной базы модернизирована система компьютерного контроля и управления процессом сварки:

- разработан новый блок управления, который содержит процессорную плату форм-фактора Mini-ITX с адаптером PIO-821H фирмы ICP DAS для ввода и вывода дискретных и аналоговых сигналов контроля и управления;

- установка снабжена новыми датчиками параметров процесса: датчиком остаточного давления газа Мерадат-ВИТ12Т2/2Р/1А фирмы Мерадат, датчиком тока LTS 1000-SF/SP20 фирмы LEM Components, основанным на эффекте Холла, и датчиком усилия осадки UU-1Т фирмы Dacell;

- разработано новое программное обеспечение в операционной системе Linux с использованием компилятора GNU C/C++ и библиотеки GTK2+ для построения графических интерфейсов;

- система компьютерного управления снабжена встраиваемым 15" LCD монитором ET1537L-6C с сенсорным экраном фирмы Elo Touch Solutions.

Глава 4 Разработка технологии сварки трубных заготовок переходников из сплавов АМгЗ + ОТ4

4.1 Характеристика сплавов АМгЗ и ОТ4

Свойства сплава АМгЗ [69, 70]

Химический состав алюминиевого сплава АМгЗ приведен в табл. 4.1.

Основным легирующим элементом сплава является магний. На диаграмме состояния Al-Mg этот сплав лежит до предела растворимости и при обычной температуре имеют гетерогенную структуру, состоящую из зерен α - твердого раствора и выделений β - фазы (Mg_2Al_3).

Таблица 4.1 – Химический состав сплава АМгЗ

Al	Mg	Mn	Si	Fe	Cu	Zn
				не более		
основа	3,2-3,8	0,3-0,6	0,5-0,8	0,5	0,05	0,2

Каждый процент магния увеличивает предел прочности сплава на 30 - 35 МПа. Небольшие присадки марганца вводятся для дополнительного упрочнения сплавов. Они увеличивают предел прочности на 20-25 МПа и не вызывают существенного изменения структуры сплава. Титан в небольших количествах (менее 0,1 %) способствует измельчению зерна в слитках, а также более равномерному выделению β - фазы, что уменьшает склонность сплавов к коррозии под напряжением.

При наличии марганца и кремния в сплаве образуются также различные марганцовистые фазы ($AlMg_2Mn$ и др.) и силицид магния (Mg_2Si). В связи с этим сплав подвергается гомогенизации. Большинство заготовок из сплава АМгЗ поступает в отожженном состоянии. В отожженном состоянии сплава β - фаза равномерно распределяется по всему зерну.

Механические свойства сплава в отожженном состоянии приведены в табл. 4.2. Некоторое дополнительное упрочнение (на 10-15%) можно получить путем холодной деформации.

В табл. 4.3 приведены физические свойства сплава АМГ3.

Таблица 4.2 - Механические свойства сплава АМГ3

σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	a , Дж/см ²
220	110	24	40

Таблица 4.3 - Физические свойства сплавов АМГ3

Плотность, г/см ³	2,67
Коэфф. линейного расширения, 10 ⁻⁶ 1/К (20-300 °С)	25,4
Уд. электросопротивление, мкОм·см	4,9
Коэфф. теплопроводности, Вт/(см·К) (20-400 °С)	1,46-1,59
Уд. теплоемкость, Дж/(г·К), (20-400 °С)	1,21
Скрытая теплота плавления, Дж/г	393
Интервал плавления-кристаллизации, °С	627-652

Свойства сплава ОТ4

Благодаря удачному сочетанию пластических и прочностных свойств сплав ОТ4 является наиболее распространенным титановым сплавом. Он основан на системе Ti-Al-Mn и является двухфазным ($\alpha+\beta$) - сплавом с преобладанием α - структуры. Сплав относится к сплавам мартенситного типа [71, 72]. В таблице 4.4 приведен химический состав сплава.

Таблица 4.4 – Химический состав сплава ОТ4

Al	Mn	Ti	Fe	Si	O ₂	N ₂	H ₂	C
			не более					
2,0-3,5	1,0-2,0	основа	0,4	0,15	0,15	0,05	0,015	0,1

Марганец является стабилизатором β -фазы, а алюминий стабилизирует α -фазу. Алюминий вводится в сплав для повышения

прочности и упругости при обычных и высоких температурах, а также для увеличения его коррозионной стойкости. Добавки марганца в количествах, близких к пределу растворимости в α -титане, наряду с увеличением прочности повышают технологическую пластичность сплава. Сплав ОТ4 используется для изготовления деталей, работающих при температурах до 450°C. В таблице 4.5 приведены механические свойства сплава при комнатной температуре.

При охлаждении из β -области в сплаве фиксируется α' -фаза, имеющая характерный вид игольчатой структуры. Параметры решетки α' -фазы незначительно отличаются от параметров α -фазы и поэтому мартенсит в титановых сплавах менее прочный и не такой хрупкий, как в сталях. При закалке сплава фиксируется также небольшое количество β -фазы.

Таблица 4.5 – Механические свойства сплава ОТ4

σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	a , Дж/см ²
900	550-650	12-20	35-65

Основным видом термической обработки сплава ОТ4 является отжиг. Оптимальные температуры рекристаллизационного отжига составляют 750-800°C. Однако, ввиду интенсивного окисления, температура отжига при нагреве на воздухе не должна превышать 670-720°C. Для получения максимальной пластичности отжиг необходимо проводить в вакууме [73]. На практике используется два типа отжига сплава ОТ4 [74]. Для снижения твердости, повышения пластичности и выравнивания структуры и свойств по сечению обрабатываемых деталей отжиг проводится при температуре 670±10°C. Более низкий отжиг с целью устранения только внутренних напряжений, возникших при механической обработке, листовой штамповке, сварке и других видах обработки, проводится при температуре 540±20°C в течение 30 минут.

Важнейшей особенностью титана и его сплавов является способность образовывать твердые растворы с атмосферными газами и водородом. Интенсивное поглощение водорода начинается при 300°C, кислорода при 600°C, азота при 700°C. С дальнейшим повышением температуры активность титана резко возрастает. Кислород образует в α и β -титане твердые растворы внедрения. Предельная растворимость кислорода в α -фазе составляет 14,5% в интервале температур 800-1700°C, а в β -фазе около 1,8% при 1740°C. При содержании кислорода более 14,5% образуются химические соединения - оксиды. Растворяясь в титане, кислород искажает кристаллическую решётку, повышает жесткость межатомных связей и, уменьшая способность кристаллитов к пластической деформации, приводит к повышению твердости и прочности титана и снижению его пластичности. При нагреве на воздухе титана или его сплавов образуется насыщенный кислородом твердый слой (альфированный), толщина которого зависит от продолжительности нагрева и от температуры. Это α -титан, стабилизированный кислородом. Образование альфированного слоя может вызвать хрупкое разрушение.

Также как и кислород, азот образует с α и β -фазами титана твердый раствор внедрения, только предельная растворимость азота в α -фазе несколько ниже - 7,5%. Азот также является сильным стабилизатором α -фазы.

Водород стабилизирует β -фазу титана и образует твердые растворы внедрения и гидрид TiH_2 . При содержании водорода менее 1,5-2,0% гидрид титана полностью растворяется при температуре выше 320°C и переходит в твердый раствор. С понижением температуры ниже 300-200°C растворимость водорода в α -фазе титана резко падает, составляя при комнатной температуре 0,0029%. Поэтому при охлаждении выпадает гидрид (γ -фаза). Гидрид титана может выделяться при быстром охлаждении в форме дисперсных частиц, а при медленном охлаждении в виде пластинок или

штриховых линий. Гидридное превращение в титане и его сплавах протекает со значительным увеличением объема и возникновением внутренних напряжений, что в условиях сварки может служить причиной холодных трещин. Но растворимость водорода в титане обратима, что позволяет почти полностью удалить примесь водород вакуумным отжигом.

Таким образом, при сварке сплава ОТ4 следует учитывать высокую активность титана по отношению к кислороду, азоту и водороду как в расплавленном состоянии, так и при температурах выше 650°C.

Другой важнейшей особенностью титана и его сплавов является высокая склонность к росту зерна β -фазы и перегреву. В связи с этим, пребывание металла в условиях термического цикла сварки при температурах выше температуры полиморфного превращения сопровождается значительным ростом β -зерна и приводит к снижению пластических свойств сварного соединения. В отличие от сталей в титане и его мартенситных сплавах из-за малого объемного эффекта превращения невозможно с помощью перекристаллизации при термической обработке влиять на величину зерна и единственным способом улучшения крупнокристаллической структуры является ее пластическая деформация.

Физические свойства сплава ОТ4 близки к свойствам технического титана (табл. 4.6). Низкотемпературная α -модификация титана имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку, которая при температурах выше 882°C переходит в β -модификацию, имеющую объемно-центрированную кубическую структуру. Температурный интервал фазового превращения $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ для сплава ОТ4 составляет 920-1000°C [75].

Плотность ОТ4 при комнатной температуре равна 4,55 г/см³. Плотность β -модификации титана - 4,32 г/см³. Коэффициент теплопроводности сплава при температуре 1500°C равен 0,27 Вт/см·К.

Удельная теплоемкость жидкого титана (перегрев 100-200 градусов) равна 1,17 Дж/г·К.

Таблица 4.6 – Физические свойства сплава ОТ4

Плотность, г/см ³	4,55
Коэфф. линейного расширения, 10 ⁻⁶ 1/К (20-300 °С)	8-9,6
Уд. электросопротивление, мкОм·см	101
Коэфф. теплопроводности, Вт/(см·К) (20-400 °С)	0,096-0,134
Уд. теплоемкость, Дж/(г·К), (20-400 °С)	0,58-0,67
Скрытая теплота плавления, Дж/г	394
Интервал плавления-кристаллизации, °С	1644-1652

4.2 Существующие технологические процессы изготовления трубных переходников алюминий-титан

Характер взаимодействия титана с алюминием описывается диаграммой состояния, относящейся к системам с перитектическим превращением [76]. В системе Ti - Al возможны три перитектические реакции. Первая протекает при температуре 1460 °С с образованием γ - фазы, представляющей собой химическое соединение TiAl (36,03% Al), вторая - при температуре 1340 °С (60-64% Al) сопровождается образованием соединения TiAl₃. В результате третьей реакции из сплава содержащего 0,15% Ti, образуется твердый раствор титана в алюминии. Предельная растворимость титана в алюминии имеет весьма малую величину и составляет 0,26-0,28% при температуре превращения, равной 665 °С. С понижением температуры растворимость уменьшается и достигает при 20 °С величины 0,07%. Алюминий в титане образует ограниченные области α - и β - растворов. В связи с этим, в случае расплавления титана и алюминия при сварке не представляется возможным получить металл шва в пределах взаимной растворимости этих элементов, при этом неизбежно образование химических

соединений, что приведет к получению хрупких швов, непригодных к эксплуатации.

Таким образом, анализ диаграммы состояния системы Al-Ti показывает, что для сварки алюминиевых сплавов с титаном возможны две схемы формирования соединений: в твердой фазе и с расплавлением лишь одного из соединяемых металлов - алюминия (сваркопайка) [77].

В настоящее время трубные биметаллические переходники из алюминиевых сплавов с титановыми сплавами изготавливают как методами сварки давлением, так и сваркой плавлением. Рациональная область использования того или иного способа сварки определяется свойствами свариваемых металлов, конструкцией переходника и условиями его эксплуатации.

Сварка давлением Для сварки алюминия с титаном использованы различные способы сварки давлением с формированием связей в твердой фазе: холодная сварка [78-80], сварка трением [81], клинопрессовая сварка [82], сварка взрывом [83], диффузионная сварка [84, 85], сварка прокаткой [86, 87]. Непосредственное соединение титана с алюминиево-магниевыми сплавами АМг3 и АМг6 не обеспечило высоких значений прочности и пластичности соединений и поэтому был сделан вывод о необходимости применения промежуточного слоя из алюминия [6, 88]. Промежуточный слой из алюминия при сварке в твердой фазе получают либо путем предварительного алитирования поверхности титана в жидкой ванне, либо применением фольги из алюминия.

При сварке в твердой фазе титана с алюминием лимитирующим процессом обычно является не образование интерметаллидной прослойки, а разрушение и удаление оксидных плен на алюминии, что достигается применением значительной пластической деформацией металлов в зоне соединения.

В производстве конструкций летательных аппаратов для изготовления трубных переходников из алюминиево-магниевых сплавов с титановыми сплавами наибольшее применение в настоящее время находят сварка трением, клинопрессовая и прокаткой.

Сварка трением является одним из наиболее распространенных способов сварки разнородных трудно свариваемых металлов. Сварка трением характеризуется кратковременностью технологического цикла, активным процессом удаления оксидов и сравнительно высокой технологичностью.

При сварки алюминиевых сплавов с титаном длительность нагрева должна быть достаточной для того, чтобы соединяемая поверхность титановой заготовки прогрелась и могла деформироваться хотя бы в микрообъемах. Вместе с тем, интенсификация тепловложения ограничивается образованием хрупкой интерметаллической прослойки в зоне соединения. Кроме того, при температуре, близкой к температуре солидуса сплавов АМгЗ и АМгб, механизм деформации меняется, и она происходит путем межзеренного скольжения. При этом в зоне контакта свариваемых металлов не создается необходимая для активации поверхностей плотность дислокаций. В связи с этим сварку трением этих сплавов с титаном осуществляют через алюминий АД1.

Заготовки под сварку представляют собой прутки или толстостенные трубы, которые после сварки обрабатываются до необходимых размеров.

Другой особенностью процесса сварки трением является изменение условий удаления оксидов по мере приближения к оси вращаемых заготовок. В центральной зоне наблюдается снижение эффективности удаления оксидных плен, поэтому при уменьшении диаметра проходного сечения вытачиваемого переходника менее 8 мм снижается вероятность получения бездефектного соединения.

В настоящее время для изготовления переходников из алюминиевых сплавов с титаном находит применение способ клинопрессовой сварки [15, 89].

Детали нагревают в защитной среде и далее заточенную на конус деталь из титана впрессовывают в алюминиевую деталь (рис. 4.1). Большое значение имеет предупреждение окисления соединяемых поверхностей.

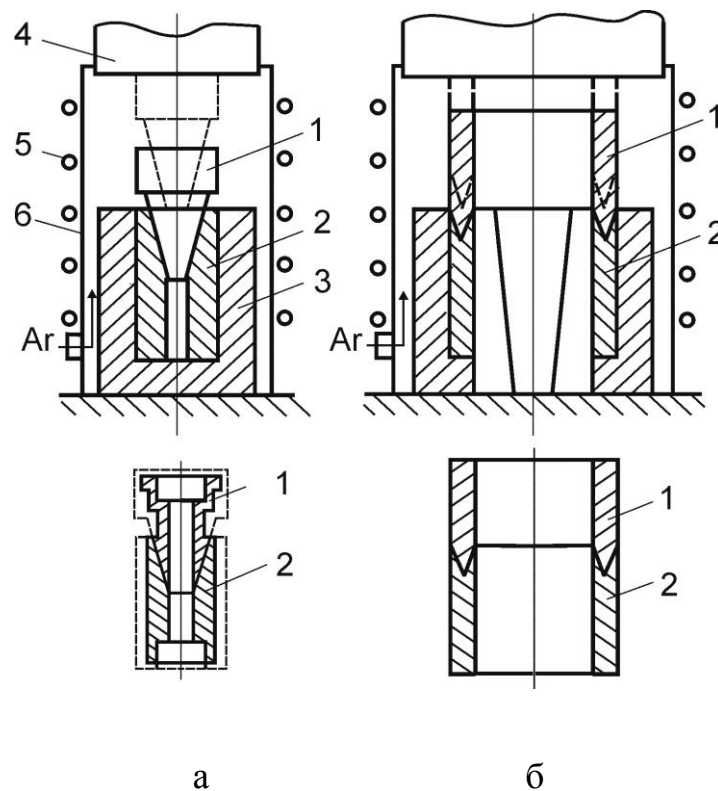


Рисунок 4.1 - Технологических схемы клинопрессовой сварки трубчатых переходников малого (а) и большого (б) диаметра: 1 - заготовка из титанового сплава; 2 - заготовка из алюминиевого сплава; 3 - пресс-форма; 4 - шток пресса; 5 - нагреватель; 6 - корпус камеры

Технологическая схема, показанная на рис. 4.1-б применяется в основном для сварки трубчатых заготовок диаметром 20...400 мм, в то время как по схеме рис. 4.1-а трубчатые переходники получают механической обработкой сплошной сварной заготовки.

При клинопрессовой сварке активация контактных поверхностей обеспечивается предварительным нагревом деталей перед сваркой

(термическая активация) и пластической деформацией соединяемых металлов в процессе сварки (механическая активация).

Соединение титановых сплавов с алюминиевыми сплавами АМц и АМгЗ при клинопрессовой сварке осуществляют непосредственно, а со сплавом АМгб через прокладку из АД1.

После сварки заготовки подвергаются механической обработке для получения переходников необходимых размеров и формы. Трубчатые переходники изготавливают с гладкой внутренней поверхностью и в виде телескопического соединения.

Разработан способ контроля качества сварных соединений [90, 91], который позволяет проводить проверку качества клинопрессового соединения каждой заготовки. Благодаря этому способу контроля клинопрессовая сварка применяется при изготовлении трубных переходников алюминий-титан для ответственных конструкций летательных аппаратов.

Для получения биметаллов алюминий-титан используется холодная сварка прокаткой. Для доброкачественного соединения слоев в биметалле требуется значительная деформация при прокатке и чистота соединяемых поверхностей, причем особенно важно отсутствие органических веществ.

Наличие на поверхности деталей даже небольшого количества трудно испаряющихся органических веществ может стать основным препятствием развитию процесса схватывания и образования соединения. Поэтому к качеству подготовки поверхности соединяемых материалов предъявляются самые высокие требования.

Прокатку биметалла алюминий-титан осуществляют в герметизированном пакете в среде аргона или в вакууме.

При сварке прокаткой соединение образуется в условиях принудительного деформирования и малой длительности взаимодействия. Вначале происходит смятие микронеровностей и увеличение контактных

поверхностей из-за значительной вытяжки, приводящей к утонению и частичному разрушению оксидных пленок. В отдельных местах контактирования между свариваемыми поверхностями образуются участки схватывания, между которыми остаются полости, содержащие газы. Возможность дальнейшего увеличения числа и площади участков схватывания определяется развитием процесса адсорбции остаточных газов металлом. При дополнительной пластической деформации по мере поглощения газа металлом участки схватывания расширяются, формируются зоны взаимодействия, граница соединения превращается в непрерывную межфазную границу.

Трубный переходник получают путем операций штамповки биметаллических листов и последующей механической обработки.

Характерными особенностями рассмотренных способов сварки давлением при использовании их для получения биметаллических трубчатых конструкций из алюминиево-магниевых сплавов с титановыми сплавами является использование в качестве промежуточного элемента прокладки из алюминия АД1, большие трудности при обеспечении формирования связей по всей площади соединения, низкий коэффициент использования металла и большой объем механических работ при обработке заготовок переходников.

Сварка плавлением Наряду со способами сварки давлением для получения биметаллических переходников алюминий-титан находят применение способы сварки плавлением - электроннолучевая сварка, аргонодуговая сварка и др. При этом формирование соединений осуществляют по схеме сваркопайки.

Для осуществления процесса сваркопайки алюминия с титаном основное значение имеет вопрос образования прослоек интерметаллидных соединений.

Экспериментальные и теоретические исследования [92, 93] влияния

температуры и времени взаимодействия металлов на процесс формирования переходной зоны между титаном и алюминием установили существование периода задержки образования прослойки химических соединений в контакте твердого титана с жидким алюминием.

В таблице 4.7 приведена зависимость длительности периода задержки образования интерметаллидов от температуры жидкого алюминия [5].

Таблица 4.7 - Длительность периода задержки образования интерметаллидов при взаимодействии твердого титана с жидким алюминием

Температура, °С	700	800	850	1400
Период задержки, с	123	11,4	4,25	0,03

Приведенные данные свидетельствуют о наличии сравнительно большого периода задержки образования интерметаллического соединения $TiAl_3$ при сварке титана с алюминием, что позволяет получить качественное соединение этих металлов даже методами сварки плавлением. При этом тепловые режимы процессов сварки должны выбираться таким образом, чтобы температура алюминия в месте контакта с титаном не превышала 800-850°С. Обычно температуру нагрева кромки детали из титана ограничивают путем смещения источника теплоты в сторону детали из алюминия.

Формирование соединений по схеме сваркопайки использовано при аргонодуговой сварке стыковых и нахлесточных соединений титана с алюминием [94-96]. Сварку плавлением титана со сплавами АМг3 и АМг6 осуществляют по слою алюминия, который предварительно наносят путем алитирования и последующей наплавки [6, 97].

Для получения телескопических титан-алюминиевых соединений применяют аргонодуговую сварку. Возможны два конструктивных варианта: с расположением алюминиевой трубы снаружи (рис. 4.2-а) и внутри (рис. 4.2-б) титановой трубы.

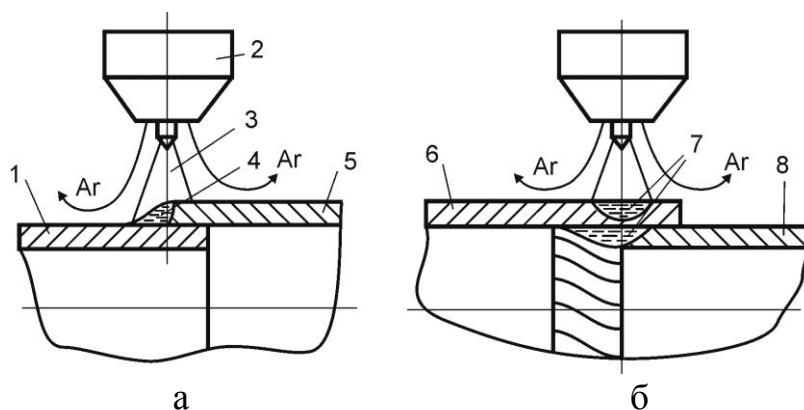


Рисунок 4.2 – Две схемы аргонодуговой сваркопайки трубных заготовок из алюминия и титана: 1, 6 – труба из титана; 2 – сварочная горелка; 3 – дуга; 4, 7 – ванны жидкого металла; 5, 8 – труба из алюминия

Вариант сваркопайки с расположением алюминиевой трубы снаружи обеспечивает удовлетворительное качество соединений в случае предварительного алитирования титановой трубы, что связано с необходимостью предотвращения прямого действия сварочной дуги на титан, приводящего к его расплавлению, и защиты от атмосферных газов.

При сварке с расположением алюминиевой трубы внутри титановой дуга воздействует на титан. При этом образуются две несоприкасающиеся сварочные ванны. За счет разности теплового расширения обеспечивается плотный контакт деталей, алюминий в результате теплопроводности расплавляется и смачивает внутреннюю поверхность титановой трубы. В условиях отсутствия свободного доступа воздуха в зазор между трубами при высоких температурах поверхность титановой трубы очищается в результате процессов растворения кислорода в титане.

Такая технология позволяет получать переходники из тонкостенных труб большого диаметра. Однако, качество сварных соединений сильно зависит от величины зазора между трубами. Отсутствие плотного контакта приводит или к проплавлению титана и образованию интерметаллидов или к непровару. При сварке труб небольшого диаметра для предотвращения перегрева необходимо точное программирование теплового режима сварки.

Другим недостатком этой технологии является отсутствие активного механизма удаления оксидов с соединяемых поверхностей, что создает опасность появления непровара в зоне соединения.

Для сваркопайки тонкостенных труб малого диаметра из алюминия с титаном находит применение способ стыковой сварки дугой низкого давления [39, 98, 99].

Здесь следует отметить важную особенность стыковой сварки дугой низкого давления – осуществление процесса в инертной среде низкого давления. В случае сварки алюминия с титановыми сплавами в условиях ограничения доступа кислорода удаление оксидов с поверхности титана облегчается за счет усвоения титаном кислорода из оксидов и их восстановления [100-102]. Кроме того, нагретая поверхность торца детали из титана, а также пары и мелкие капли титана, образующиеся в процессе катодной эрозии, играют роль геттера, снижая содержание кислорода в зоне сварки.

4.3 Выбор тепловых режимов, разработка конструкции сварного соединения, разработка режимов сварки

Выбор тепловых режимов При формировании соединений по схеме сваркопайки режим нагрева детали из алюминия выбирается таким, чтобы к концу стадии нагрева ее торец имел оплавленный слой толщиной 0,8-1,2 мм. Диапазон возможных температур поверхности торца детали из титана, остающейся в твердом состоянии, можно разбить на три области. При температурах ниже некоторого значения $T_{\text{мин}}$ не будут обеспечиваться условия межатомного взаимодействия, расплав алюминиевого сплава не смочит поверхность стального торца, и в соединении образуется непровар. При температуре выше другого критического значения $T_{\text{макс}}$ в результате чрезмерного объемного взаимодействия в стыке соединения образуется опасная прослойка интерметаллических соединений.

Очевидно, что на значение $T_{\text{макс}}$ будет влиять также и жесткость теплового режима сварки. Оптимальная область температур торца деталей из титана расположена между температурами $T_{\text{мин}}$ и $T_{\text{макс}}$.

Ранее в МАТИ проводились работы по определению оптимальных температурно-временных условий формирования соединений алюминий – титан при стыковой сварке дугой низкого давления [39, 98].

Сварные соединения АД1+ОТ4 при испытании на статическое растяжение во всем диапазоне изменения температуры торца из титана от 700°С до оплавления разрушались вдали от стыка по основному металлу АД1. При испытании на ударный изгиб (рис. 4.3) соединения, полученные при температуре торца из титана ниже 1200°С, также разрушались по АД1. Прочность сварных соединений АМг6+ОТ4 при статическом растяжении находится на уровне прочности сплава АМг6 вплоть до температуры торца из ОТ4, равной 1200°С (рис. 4.4). При температурах выше 1300°С прочность падает. Ударная вязкость сварных соединений АМг6+ОТ4 при температурах торца из ОТ4 ниже 1000°С имеет сравнительно высокий уровень и резко снижается при повышении температуры. При температуре торца из ОТ4 650-700°С механические свойства имеют повышенный разброс значений.

Анализ поверхности разрушения соединений АМг6+ОТ4 показал, что по мере уменьшения температуры торца образца из титана количество алюминия, оставшегося после разрушения на титановой части соединения, увеличивается. Если торец из ОТ4 был оплавлен, то поверхность разрушения выглядит гладкой с небольшими участками покрытыми алюминием. Если температура торца была ниже 1000°С, то его поверхность после разрушения практически полностью покрыта алюминием (рис. 4.5).

Анализ представленных результатов исследований показывает, что максимальные механические свойства соединений алюминий-титан могут быть получены, если температура торца из титана составляет 850-1000°С.

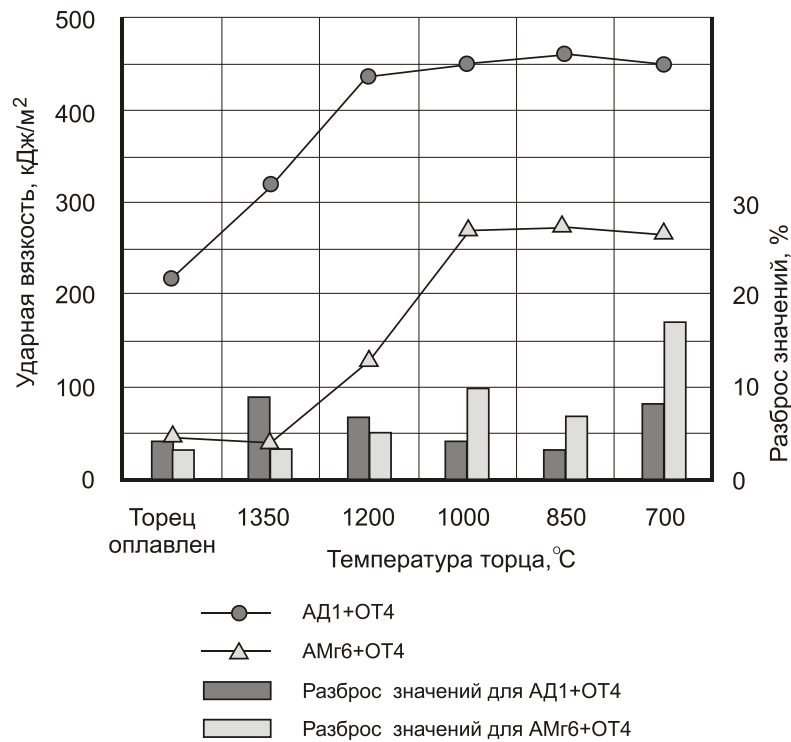


Рисунок 4.3 - Зависимость ударной вязкости сварных соединений АД1+ОТ4 и АМг6+ОТ4 от температуры торца образца из титана перед осадкой

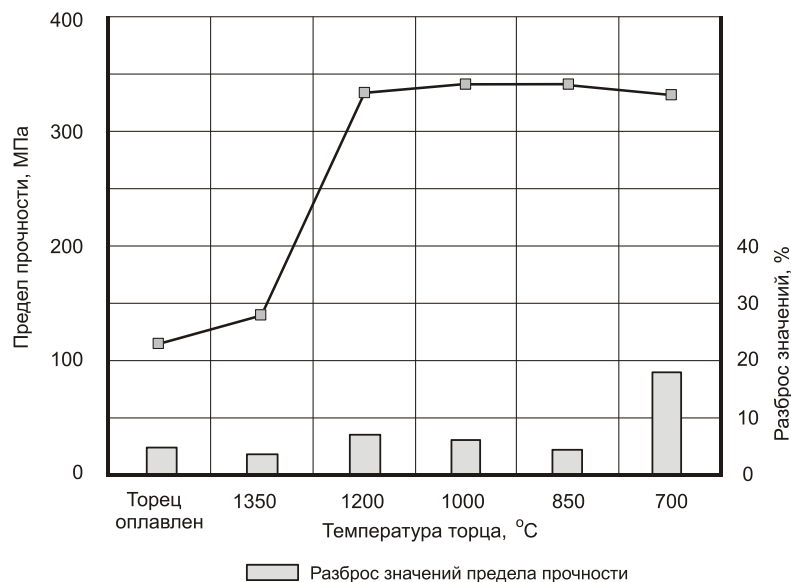


Рисунок 4.4 - Зависимость предела прочности при статическом растяжении сварных соединений АМг6+ОТ4 от температуры торца образца из титана перед осадкой

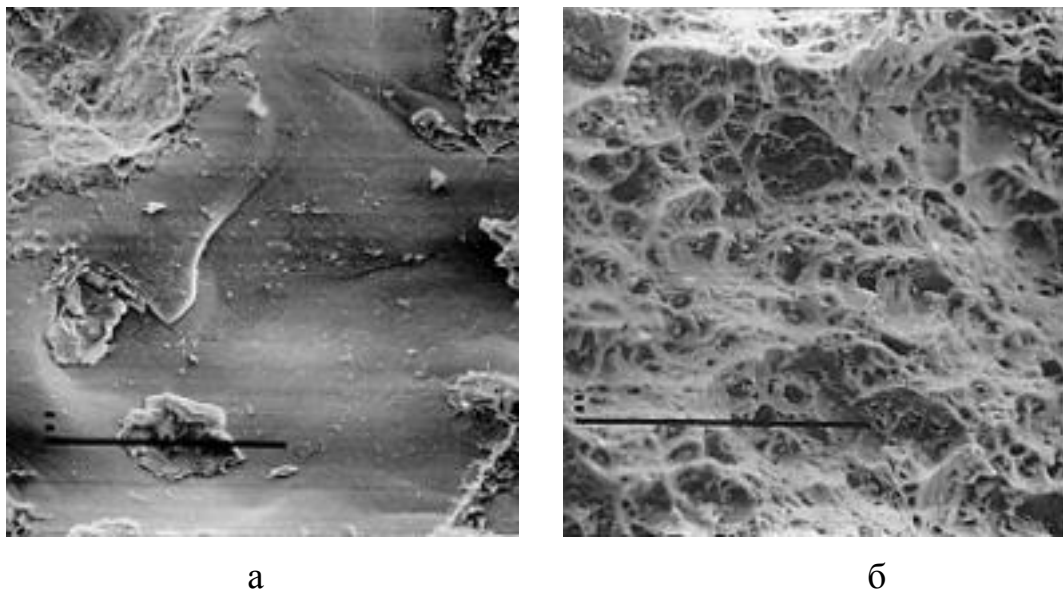


Рисунок 4.5 - Электронная фрактография ($\times 400$) поверхностей разрушения сварных соединений АМГ6+ОТ4:
а – торец из ОТ4 оплавлен; б – температура торца 850-1000°C

Разработка конструкции сварного соединения При разработке технологии сварки трубных заготовок из сплавов АМГ3 и ОТ4 исходили из необходимости выполнения двух условий:

1) при нагреве торец заготовки из АМГ3 должен быть оплавлен, а торец заготовки из ОТ4 нагрет до температуры 850-1000 °С; это обеспечит формирование соединения по схеме сваркопайки и ограничит объемное взаимодействие свариваемых металлов;

2) прочность при статическом растяжении трубного переходника АМГ3+ОТ4, изготовленная из сварных заготовок, должна быть выше прочности трубы из АМГ3.

Рассмотрим нагрев труб из разнородных металлов, имеющих одинаковые наружные диаметры и толщины стенок. Для установления наиболее общих закономерностей используем уравнение температурного поля для одномерного процесса [103]. Температура торца равна:

$$T(0, t_n) = \frac{2q_2 \sqrt{at_n}}{\lambda \sqrt{\pi}} = \frac{2q_2 \sqrt{t_n}}{\varepsilon \sqrt{\pi}}, \quad (4.1)$$

где q_2 – плотность теплового потока на торце, t_n – длительность нагрева, $\varepsilon = \sqrt{\lambda c \gamma}$ – коэффициент тепловой активности металла, λ – коэффициент теплопроводности, $c\gamma$ – коэффициент удельной объемной теплоемкости.

При сварке на переменном токе мощности тепловых потоков, поступающих на торцы труб практически равны между собой. Поэтому отношение температур торцов выразится формулой:

$$\frac{T_1(0, t_n)}{T_2(0, t_n)} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} . \quad (4.2)$$

Таким образом, при одинаковых диаметрах и толщинах стенок температуры торцов труб из разнородных металлов жестко взаимосвязаны между собой – они обратно пропорциональны коэффициентам тепловой активности свариваемых металлов. Это не позволяет получить оптимальные значения температур торцов, необходимых для формирования качественных сварных соединений.

Так, в случае сварки труб из сплава АМгЗ и сплава ОТ4 при оплавлении торца трубы из сплава АМгЗ температура торца трубы из сплава ОТ4 достигнет температуры плавления. Это объясняется тем, что коэффициент тепловой активности сплава АМгЗ в 2,5 раза больше коэффициента тепловой активности сплава ОТ4.

Регулировать температуру торцов труб можно путем изменения соотношения толщин их стенок [32]. Рассмотрим нагрев труб из разнородных металлов с различной толщиной стенок, но имеющих одинаковый средний диаметр $D_{cp} = D - \delta$.

Температура торца трубы запишется:

$$T(0, t_n) = \frac{q \sqrt{t_n}}{\varepsilon \sqrt{\pi} \cdot D_{cp} \delta} , \text{ где } q \text{ – эффективная мощность дуги.}$$

Тогда отношение температур торцов выразится формулой:

$$\frac{T_1(0, t_n)}{T_2(0, t_n)} = \frac{\varepsilon_2 \cdot \delta_2}{\varepsilon_1 \cdot \delta_1}. \quad (4.3)$$

Следовательно, если задана толщина стенки δ_1 одной из труб, то толщина стенки второй трубы, необходимая для получения оптимальных температур торцов, может быть рассчитана по формуле:

$$\delta_2 = \delta_1 \cdot \frac{\varepsilon_1 \cdot T_1^*}{\varepsilon_2 \cdot T_2^*}, \quad (4.4)$$

где T_1^* и T_2^* - оптимальные значения температур торцов.

Коэффициент тепловой активности сплава АМгЗ в 2,5 раза больше коэффициента тепловой активности сплава ОТ4. Поэтому, при сварке труб из сплавов АМгЗ и ОТ4, когда торец трубы из сплава АМгЗ должен быть оплавлен, температура торца трубы из сплава ОТ4 будет находиться в оптимальном диапазоне температур 1000-850°C, если толщину ее стенки увеличить в 1,5-1,7 раза по сравнению с толщиной стенки трубы из сплава АМгЗ.

Чтобы прочность при статическом растяжении трубного переходника АМгЗ+ОТ4, изготовленного из сварных заготовок, была выше прочности трубы из сплава АМгЗ, толщину стенки трубного переходника в зоне стыка необходимо увеличить. При толщине стенки трубы из АМгЗ, равной 2 мм, толщину стенки переходника в зоне стыка целесообразно сделать равной 4 мм (рис. 4.6-а). В этом случае прочность сварного стыка трубного переходника при статическом растяжении будет в 1,8-2 раза выше прочности трубы из АМгЗ.

Сварные соединения трубных заготовок АМгЗ+ОТ4 проходят механическую обработку, которая необходима для удаления выдавленного при осадке металла снаружи и внутри заготовок, и для размерной обработки в соответствии с чертежом на трубный переходник. Поэтому толщина стенки трубной заготовки из АМгЗ выбрана равной 5 мм.

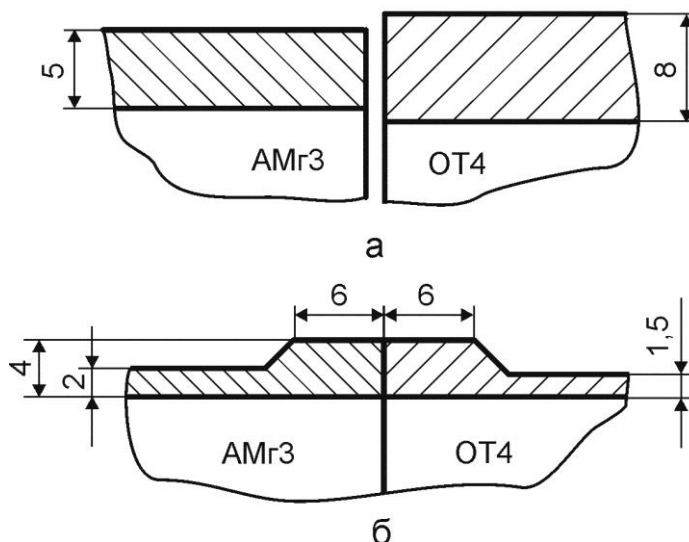


Рисунок 4.6 - Толщина стенок в зоне стыка трубных заготовок (а) и переходника (б)

Чтобы температура торца трубной заготовки из сплава ОТ4 составила 850-1000°C при толщине стенки трубной заготовки из АМг3 равной 5 мм, толщина стенки заготовки из сплава ОТ4 выбрана равной 8 мм (рис. 4.6-б).

Разработка режимов сварки Усовершенствование процесса сварки путем наложения поперечного магнитного поля на дуговой разряд, горящий в зазоре между торцами свариваемых труб, и разработка инверторного источника питания дуги обеспечили возможность по-новому подойти к разработке режимов сварки.

При обычной схеме стыковой сварки дугой низкого давления нагрев торцов труб производится в две стадии. На первой стадии – при импульсном нагреве, когда импульсы тока дуги чередуются с паузами, детали прогреваются на определенную глубину до пластического состояния. Наличие пауз имеет большое значение для выравнивания температуры на торцевых поверхностях. На второй стадии производится кратковременное оплавление торцов.

При сварке дугой низкого давления в поперечном магнитном поле благодаря вращению катодных пятен по торцам труб равномерный нагрев торцов можно получить при непрерывном горении дуги.

При обычной схеме стыковой сварки дугой низкого давления нагрев торцов труб производится дугой переменного тока промышленной частоты 50 Гц. Использование переменного тока вызвано необходимостью катодной очистки торцов обеих труб.

Стабильное горение дуги переменного тока при низком абсолютном давлении аргона обеспечивается специальным устройством зажигания дуги. Зажигание дуги осуществляется в начале каждой полуволны переменного тока, то-есть 100 раз в секунду. Зажигание дугового разряда происходит путем возбуждения тлеющего разряда с последующим переводом его в дуговой разряд при увеличении силы тока.

При проведении работ по разработке режимов сварки на переменном токе промышленной частоты обнаружилось, что с увеличением диаметра свариваемых трубных заготовок и площади их торцов возникает нестабильность зажигания разряда – наблюдались пропуски полуволн тока. Причем нарушения стабильности процесса усиливались к концу стадии нагрева.

Анализ обнаруженного явления показал, что его причиной является повышенная проводимость газопаровой среды в зазоре между торцами трубных заготовок, которая наблюдается в течение некоторого времени после окончания полуволны тока. В результате шунтирования дугового промежутка нарушается работа устройства зажигания разряда и требуется время для его восстановления.

При использовании разработанного инверторного источника питания дуги эта проблема может быть сравнительно легко решена, например, снижением частоты переменного тока и увеличением промежутка времени между полуволнами тока.

При сварке на переменном токе промышленной частоты катодная очистка торцов трубных заготовок имеет циклический характер – очистка в

течение 10 мс, когда торец является катодом дуги, с последующей паузой такой же длительности, когда торец становится анодом дуги. Когда торец трубной заготовки является анодом, происходит напыление на его поверхность металла трубы, которая является катодом. При этом на поверхность торца трубы-анода возможно также осаждение оксидов и других соединений, которые образуются в дуговой промежутке и загрязняют его поверхность.

В последующей полуволне тока, когда торец трубной заготовки становится катодом, происходит разрушение и удаление оксидов и других загрязнений, которые находились на исходной поверхности торца. Кроме того, удаляются осаждения, которые образуются на его поверхности в полуволны тока, когда он являлся анодом.

Очевидно, что при использовании инверторного источника питания дуги процесс катодной очистки торцов трубных заготовок можно улучшить. Для этого следует увеличить длительность полуволн переменного тока, либо осуществлять катодную очистку торцов импульсами постоянного тока.

При использовании дуги постоянного тока в процессе нагрева необходимо изменять полярность дуги. Это требуется для катодной очистки торцов обеих свариваемых трубных заготовок.

Для сварки трубных заготовок переходников сплав АМгЗ – сплав ОТ4 разработана следующая циклограмма процесса сварки (рис. 4.7).

Сварка трубных заготовок из АМгЗ и ОТ4 выполняется на постоянном токе при непрерывном горении дуги. При этом на стадии нагрева катод дуги располагается на торце трубы из АМгЗ, а при оплавлении – на торце трубы из ОТ4. Таким образом, на стадии нагрева осуществляется катодная очистка торцевой поверхности трубы из АМгЗ, а при кратковременном оплавлении – катодная очистка торца трубы из ОТ4. То, что на первом этапе процесса сварки – при нагреве, было решено располагать катод на торце заготовки из

АМгЗ, обусловлено наличием на его поверхности трудно удаляемой оксидной пленки. При этом учитывалось, что торец заготовки из ОТ4 в условиях вакуума при высоких температурах очищается от оксидов в результате процессов растворения кислорода в титане.

Катодная очистка торца трубной заготовки из ОТ4 на стадии оплавления предназначена для удаления загрязнений, которые осаждались на его поверхность на стадии нагрева.

Оплавление торца трубной заготовки из АМгЗ производится в режиме анода. Установлено, что оплавление торца трубы из АМгЗ в режиме анода улучшает равномерность формирования на нем слоя жидкого металла по сравнению с оплавлением в режиме катода. По-видимому, это объясняется тем, что нагрев анода осуществляется потоком электронов, а тепловыделение на катоде происходит локально – в катодных пятнах.

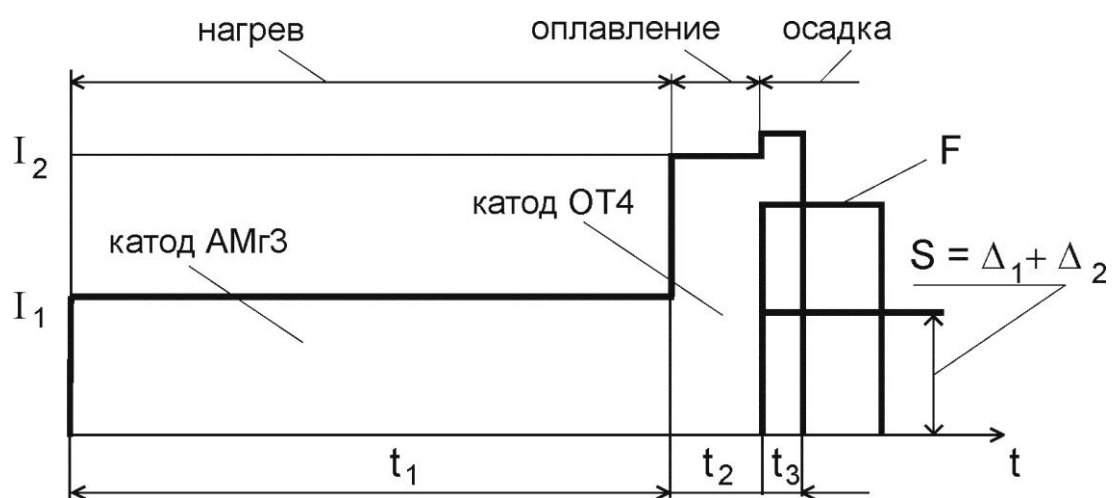


Рисунок 4.7 – Циклограмма процесса сварки:

I_1 , I_2 – силы токов при нагреве и оплавлении; t_1 , t_2 – длительности импульсов тока при нагреве и оплавлении; t_3 – длительность задержки выключения тока при осадке; Δ_1 – зазор между торцами при нагреве; Δ_2 – величина осадки торцов; F – усилие осадки; S – перемещение зажима

При разработке режимов сварки основное значение имеет расчет стадии нагрева. Длительность нагрева определяет ширину зоны пластической

деформации торца трубной заготовки из АМгЗ при осадке. Сила тока при заданной длительности нагрева должна обеспечивать нагрев торца заготовки из АМгЗ до температуры, близкой к температуре солидуса.

Ширина зоны пластической деформации выбирается из условия выдавливания жидкого металла при осадке за пределы стыка трубного переходника.

При переходе к стадии оплавления сила тока увеличивается не менее чем в два раза по сравнению с силой тока при нагреве, а длительность оплавления уточняется экспериментально при анализе характера оплавления торца трубной заготовки из АМгЗ.

В табл. 4.8 приведены режимы, на которых выполнялась сварка трубных заготовок из АМгЗ и ОТ4.

Таблица 4.8 - Ориентировочные режимы сварки трубных заготовок переходника сплав АМгЗ - сплав ОТ4 диаметром 70 мм

Параметры режима	Значение
Магнитная индукция на торце трубы из АМгЗ, мТл	120
Вылет трубы из АМгЗ из зажима, мм	4
Вылет трубы из ОТ4 из зажима, мм	4
Зазор между торцами, мм	3
Давление газа в камере при вакуумировании, Па	2
Абсолютное давление аргона, Па	800
Сила тока дуги при нагреве, А	500 Катод – АМгЗ
Длительность стадии нагрева, с	4,8
Сила тока дуги при оплавлении, А	1400 Катод - ОТ4
Длительность импульса тока при оплавления, с	0,4
Усилие осадки, кН	9,5
Длительность усилия осадки, с	10

Магнитная индукция в зазоре между торцами трубных заготовок также является установочным параметром процесса сварки. Она измеряется на торце трубы из АМгЗ магнитометром «Актаком» АТЕ-8502.

На рис. 4.8 приведен внешний вид сварных соединений



Рисунок 4.8 – Сварное соединение трубных заготовок переходников АМгЗ+ОТ4 диаметром 70 мм

Контроль качества сварки состоит из контроля качества процесса сварки и неразрушающего контроля сварных соединений.

Контроль качества процесса сварки производится путем измерения и регистрации установочных и контролируемых параметров процесса с помощью компьютерной системы контроля и управления процессом, которым снабжена сварочная установка. Значения параметров, полученные при сварке трубных заготовок, сравниваются с эталонными значениями, полученными при сварке образцов-свидетелей.

Неразрушающий контроль сварных соединений включает в себя:

а) внешний осмотр и измерения соединений, б) рентгенографический контроль, в) контроль герметичности.

При внешнем осмотре контролируется соосность сваренных заготовок и характер формирования шва, выявляются наружные дефекты сварных швов.

Следует отметить большую информативность визуального контроля сварных соединений, полученных стыковой сваркой дугой низкого давления. Сварные соединения трубных переходников из разнородных металлов формируются по схеме сваркопайки. Поэтому необходимым условием отсутствия непровара в соединениях является смачивание и растекание расплавленного металла трубы из сплава АМгЗ по торцу трубы из сплава ОТ4. Отсутствие этих характерных признаков качественного формирования соединений легко выявляется внешним осмотром.

С целью оценки толщины слоя расплавленного металла необходимо измерять длину свариваемых заготовок до сварки и длину полученной сварной заготовки. Величина укорочения сварной заготовки позволяет судить о толщине слоя расплавленного металла. Она должна составлять 3,0-4,0 мм.

При рентгенографическом контроле проверяется отсутствие в зоне соединения трещин и несплошностей усадочного происхождения.

4.4 Изучение структурной и химической неоднородности сварных соединений

На рис. 4.9 приведена макроструктура сварного соединения трубных заготовок АМгЗ+ОТ4. В рабочей зоне стыка, которая останется после размерной обработки сварной заготовки при изготовлении переходника, литая структура практически отсутствует. При осадке в процессе деформации приторцевой области трубы из АМгЗ жидкий металл был выдавлен из стыка. Он смочил и растекся по наружной и внутренней поверхностям трубы из ОТ4. Характер нагрева и деформации торца трубы из АМгЗ при осадке можно проследить по искривлению волокон текстуры деформации этого сплава.

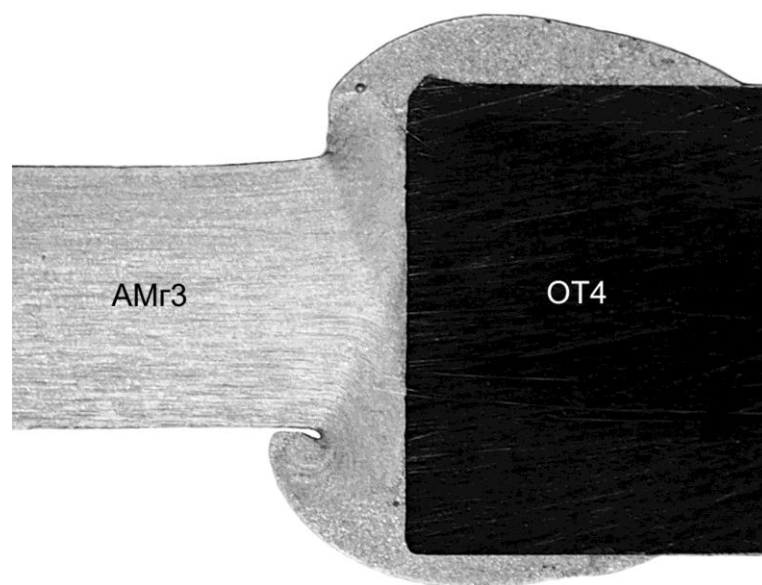


Рисунок 4.9 - Макроструктура сварного соединения ($\times 4$)

Структура сварного соединения исследована методами световой микроскопии (рис. 4.10 и 4.11), растровой электронной микроскопии (электронный микроскоп КУКУ-2800В) и микрорентгеноспектрального анализа (спектрометр NORAN) – рис. 4.12.

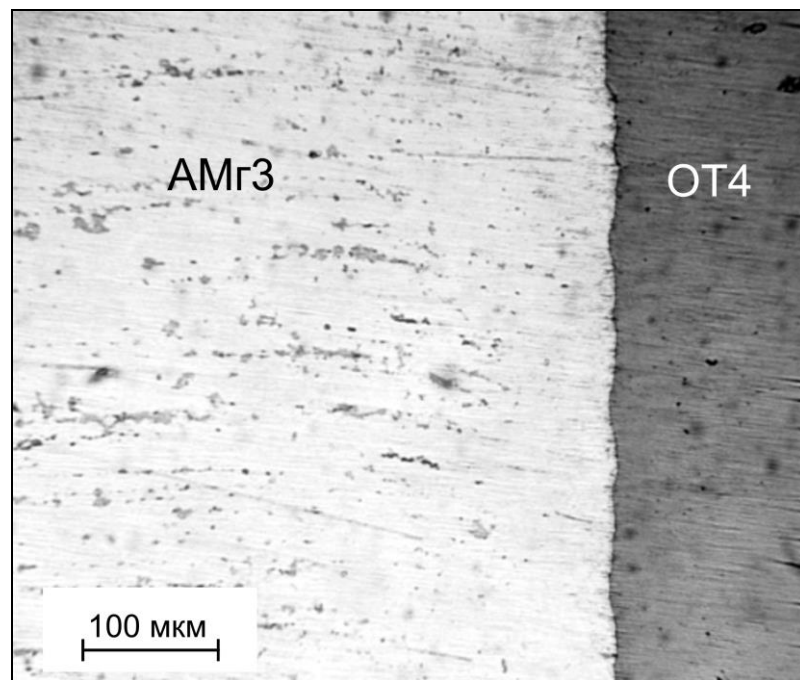


Рисунок 4.10 - Микроструктура сварного соединения АМг3+ОТ4 (световая микроскопия)

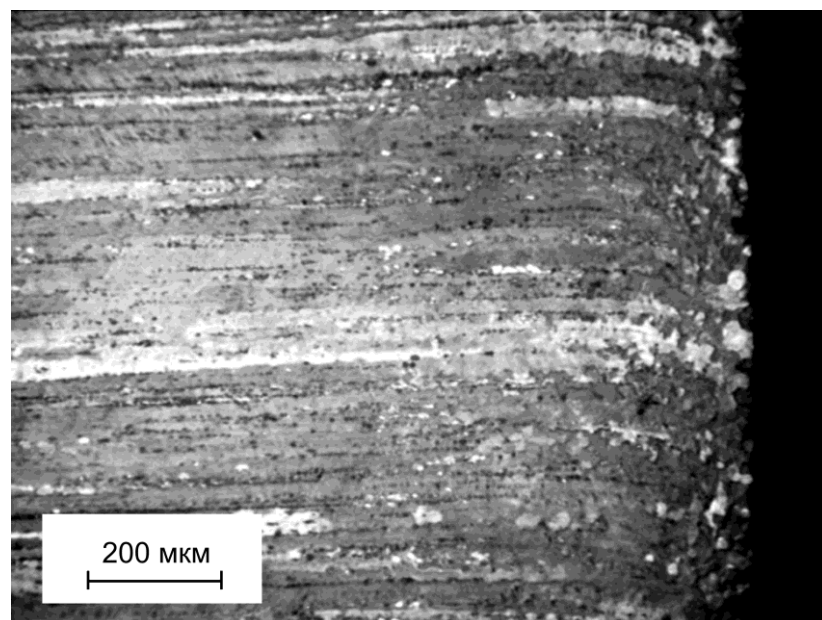
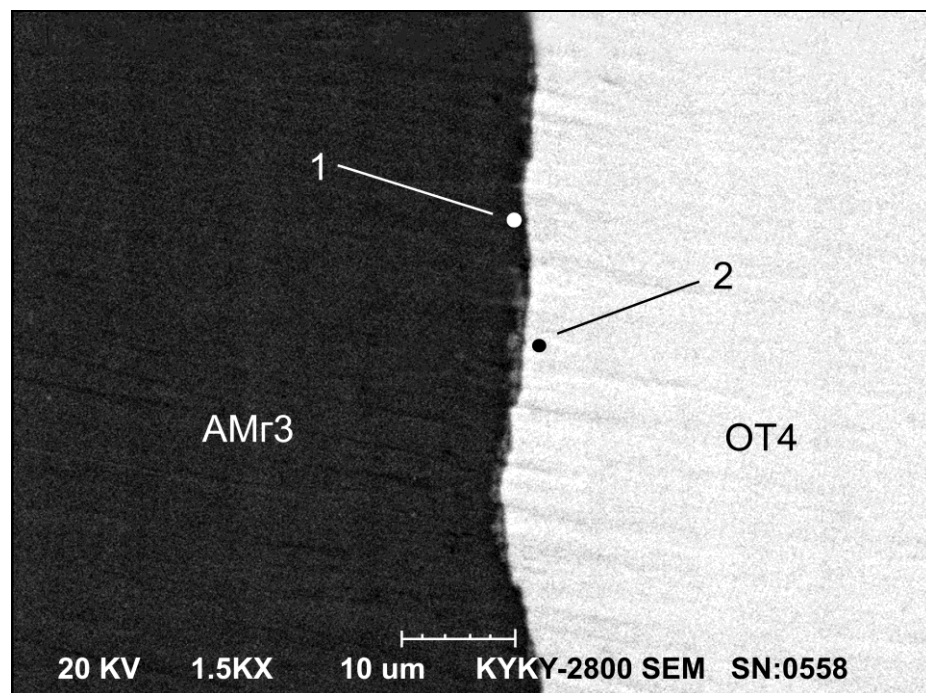
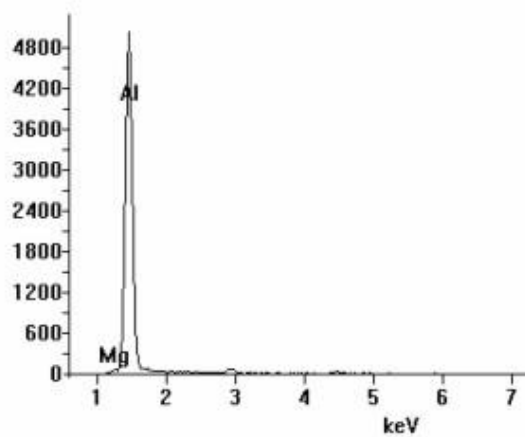


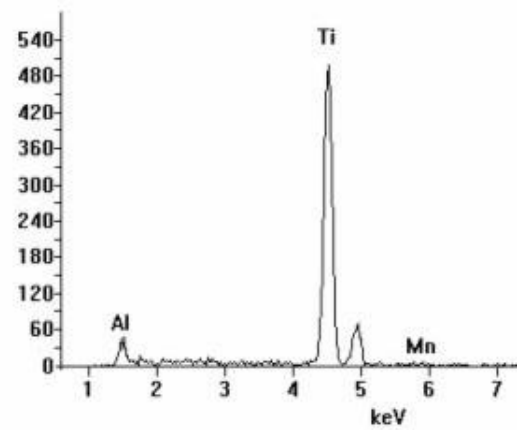
Рисунок 4.11 - Зёрненная структура алюминиевой части сварного соединения АМг3+ ОТ4 (световая микроскопия, поляризованный свет)



а



б



в

Рисунок 4.12 - Приграничные области сварного соединения АМг3+ОТ4:
а – растровая электронная микроскопия ($\times 1500$); б, в – микроспектральный анализ соответственно в точках 1 и 2

В зоне стыка в алюминиевой части сварного соединения наблюдается мелкозернистая структура без каких-либо дефектов, характерных для литой структуры и перегрева металла. Химический состав металла вблизи границы соединения со стороны алюминиевой части соответствует составу сплава АМгЗ, а со стороны титановой части – составу сплава ОТ4. В стыке отсутствует прослойка интерметаллидных соединений.

4.5 Исследование механических свойств и работоспособности сварных соединений

Сварные соединения испытаны на прочность при статическом растяжении. Предварительно токарной обработкой удалялось усиление снаружи и внутри сварной заготовки в зоне стыка. Испытывались образцы, вырезанные вдоль оси сварной заготовки. Результаты испытаний приведены в табл. 4.9. Средняя прочность составила 182 МПа, что составляет 80% от прочности сплава АМгЗ. Такой уровень прочности сварного соединения может обеспечить равнопрочность переходника с трубой из сплава АМгЗ, если толщину стенки в зоне стыка сделать в 1,5 раза больше толщины стенки трубы из АМгЗ.

Испытания на статический изгиб проводились по ГОСТ 14019-2003. Схема и результаты испытаний приведены на рис. 4.13 и в табл. 4.9.

Образование трещины наблюдалось в сплаве АМгЗ. Уменьшение угла изгиба при испытании сварного соединения по сравнению с основным металлом обусловлено уменьшением зоны пластического течения сплава АМгЗ при изгибе соединения.

Механические испытания показали, что прочность сварного соединения переходника выше прочности трубы из сплава АМгЗ. При статическом растяжении образцы, вырезанные из биметаллического переходника, разрушается по трубе из сплава АМгЗ. При испытании

переходника на прочность внутренним давлением разрушение происходит по образующей трубы из сплава АМгЗ при давлении 18,5 МПа (рис. 4.14).

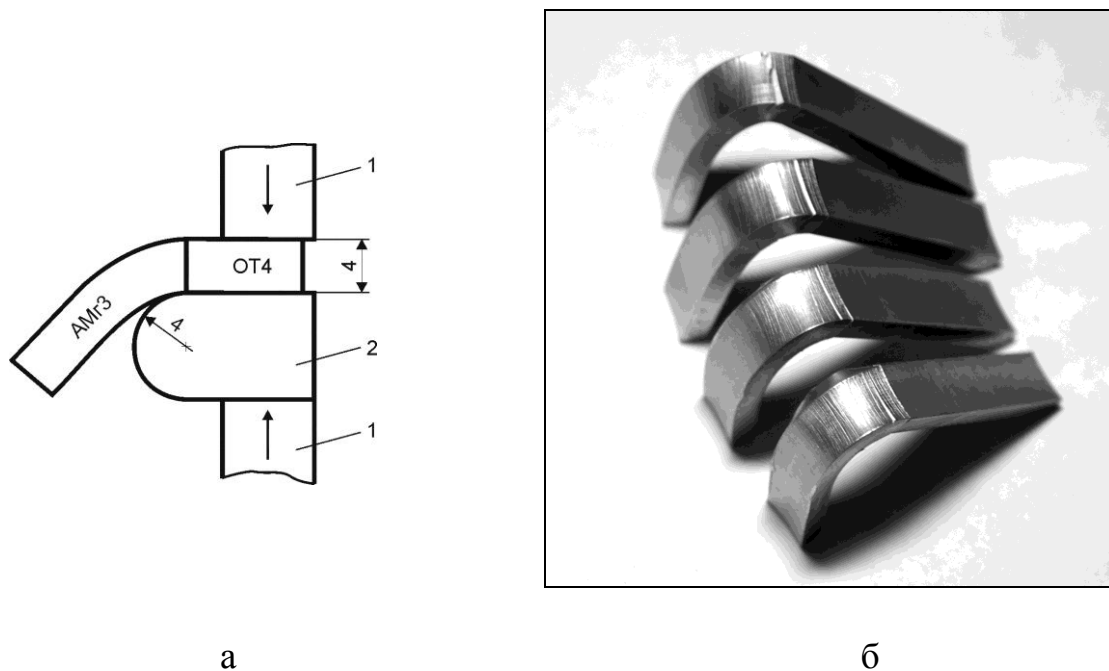
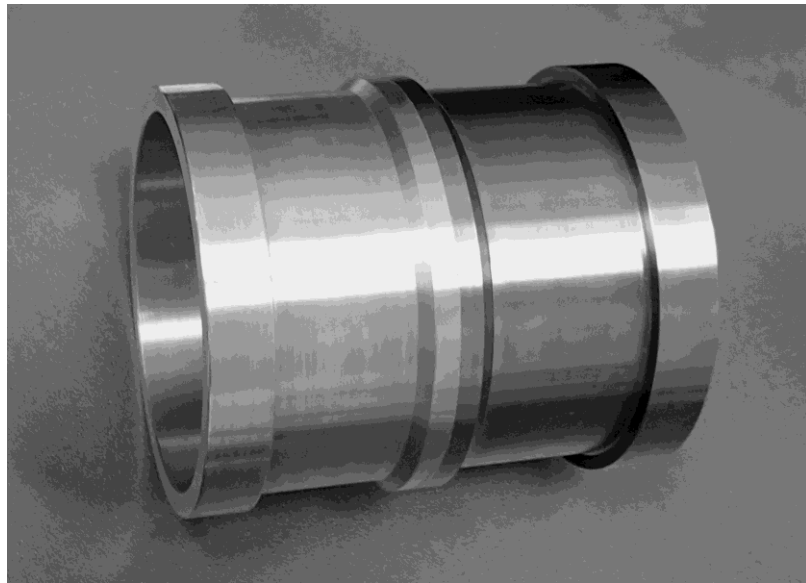


Рисунок 4.13 - Испытания сварных соединений АМгЗ+ОТ4 на статический изгиб: а – схема испытаний (1-тиски, 2-оправка); б – образцы соединений после испытаний

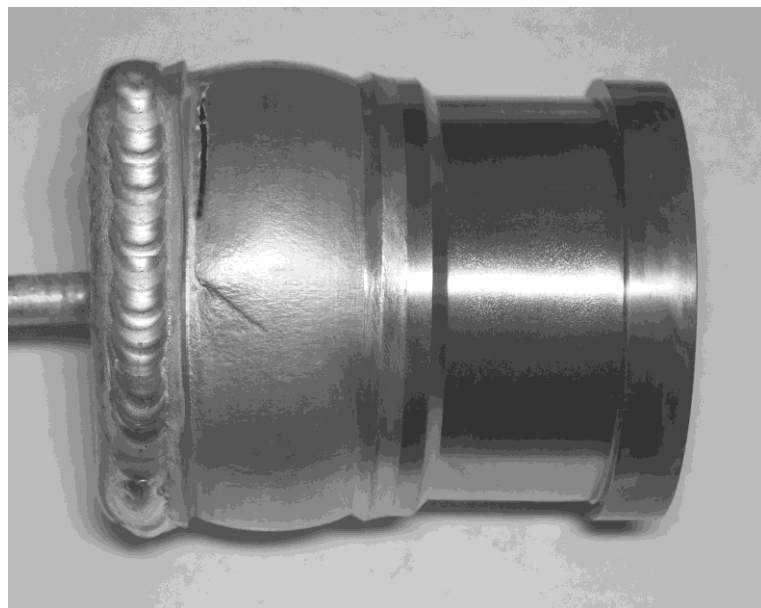
Таблица 4.9 - Результаты испытаний на статическое растяжение и изгиб образцов из сплава АМгЗ и сварных соединений АМгЗ+ОТ4

Тип образца	Предел прочности, МПа	Угол изгиба, град.
Основной металл АМгЗ	$\frac{229-231}{230}$	180
Сварное соединение АМгЗ+ОТ4	$\frac{174-186}{182}$	$\frac{120-132}{127}$

Испытания на герметичность воздушно-гелиевой смесью трубных переходников АМгЗ-ОТ4, полученных стыковой сваркой дугой низкого давления, показали, что герметичность соединений не хуже 10^{-8} м³·Па/с.



а



б

Рисунок 4.14 - Внешний вид переходника АМгЗ+ОТ4 (а) и переходник после испытаний внутренним давлением до разрушения (б)

Выводы по главе 4

1. С целью ограничения объемного взаимодействия алюминия с титаном при изготовлении трубных переходников наиболее широко используются способы сварки давлением – трением, клинопрессовая и прокаткой, при которых соединения формируются без расплавления металлов с применением значительных пластических деформаций.

Этими способами сваривают прутки, компактные заготовки или листы, а затем из полученных биметаллических заготовок обработкой резанием, штамповкой и др. изготавливают трубные переходники.

Такая технология характеризуется низким коэффициентом использования металлов и большой трудоемкостью операций.

2. Для изготовления трубных переходников алюминий-титан целесообразно применение нового способа сварки давлением - стыковой сварки дугой низкого давления в поперечном магнитном поле, при которой сварные соединения формируются по схеме сваркопайки с расплавлением торца только одной трубной заготовки – из алюминия. Целесообразность его применения обусловлена его достоинствами:

- сварка производится в инертной среде низкого давления, что снижает окисление и позволяет сваривать металлы, активно взаимодействующие с атмосферными газами;

- эффективно решается вопрос удаления поверхностных оксидных пленок путем катодной очистки торцов свариваемых деталей в электрическом дуговом разряде;

- на стадии нагрева детали не контактируют друг с другом и, следовательно, теплового и диффузионного взаимодействия свариваемых металлов при нагреве не происходит;

- при осадке жидкий металл выдавливается из стыка и осуществляется пластическая деформация высокотемпературной зоны соединения.

3. Разработана конструкция стыка трубного переходника АМгЗ-ОТ4 с проходным сечением $d_y=60$ мм и определены оптимальные геометрические размеры трубных заготовок из АМгЗ и ОТ4:

- толщина стенки трубного переходника в зоне стыка выбрана, исходя из условия равнопрочности переходника и трубы из АМгЗ при статическом растяжении; при толщине стенки трубы из АМгЗ равной 2 мм толщина стенки переходника в зоне стыка должна быть не менее 4мм;

- толщина стенок трубных заготовок выбрана, исходя из условий формирования сварных соединений по схеме сваркопайки и ограничения температуры торцов из сплава ОТ4 значениями 850-1000°C;

- регулирование температуры торцов труб из АМгЗ и ОТ4 обеспечивается выбором определенного соотношения толщин их стенок в зависимости от значений коэффициентов тепловой активности этих металлов; с учетом значений коэффициентов тепловой активности сплавов АМгЗ и ОТ4 и необходимости механической доработки сварных соединений толщины стенок трубных заготовок выбраны 5 мм для АМгЗ и 8 мм для ОТ4.

4. Усовершенствование процесса сварки путем наложения поперечного магнитного поля на дуговой разряд, горящий в зазоре между торцами свариваемых труб, и разработка инверторного источника питания дуги обеспечили возможность повысить качество и стабильность процесса формирования соединений.

Сварка трубных заготовок из АМгЗ и ОТ4 выполняется на постоянном токе при непрерывном горении дуги. При этом на стадии нагрева катод дуги располагается на торце трубы из АМгЗ, что обеспечивает катодную очистку его поверхности от оксидных плен. При последующем кратковременном оплавлении на повышенной мощности дуги катод дуги располагается на торце трубы из ОТ4, производится катодная очистка торца трубы из ОТ4 и оплавление торца трубы из АМгЗ.

Оплавление торца трубы из АМгЗ в режиме анода улучшает равномерность формирования на нем слоя жидкого металла.

5. Исследована структурная и химическая неоднородность сварных соединений с использованием световой и растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа.

В зоне стыка в алюминиевой части сварного соединения наблюдается мелкозернистая структура без каких-либо дефектов, характерных для литой структуры и перегрева металла. Химический состав металла вблизи границы соединения со стороны алюминиевой части соответствует составу сплава АМгЗ, а со стороны титановой части – составу сплава ОТ4. В стыке отсутствует прослойка интерметаллидных соединений.

6. Сварные соединения трубных заготовок, полученные стыковой сваркой дугой низкого давления в поперечном магнитном поле, имеют удовлетворительную прочность и пластичность при статических испытаниях. Средняя прочность при статическом растяжении составила 182 МПа, что составляет 80% от прочности сплава АМгЗ. Такой уровень прочности сварного соединения может обеспечить равнопрочность переходника с трубой из сплава АМгЗ, если толщину стенки в зоне стыка сделать в 1,5 раза больше толщины стенки трубы из АМгЗ. При статическом изгибе образование трещины происходит в сплаве АМгЗ.

При испытании переходника на прочность внутренним давлением разрушение происходит по образующей трубы из сплава АМгЗ при давлении 18,5 МПа.

7. Необходимым условием отсутствия непровара в соединениях является смачивание и растекание расплавленного металла трубы из сплава АМгЗ по торцу трубы из сплава ОТ4. Отсутствие этих характерных признаков качественного формирования соединений легко выявляется внешним осмотром.

С целью оценки толщины слоя расплавленного металла необходимо измерять длину свариваемых заготовок до сварки и длину полученной сварной заготовки. Величина укорочения сварной заготовки позволяет судить о толщине слоя расплавленного металла и может свидетельствовать о формировании соединений по схеме сваркопайки. Величина укорочения сварной заготовки должна составлять 3,0-4,0 мм.

Общие выводы

1. При стыковой сварке дугой низкого давления нагрев торцов труб осуществляется в процессе хаотического блуждания катодных пятен по их поверхности. С увеличением диаметра труб более 40 мм снижается равномерность нагрева торцевых поверхностей, что проявляется в снижении стабильности формирования соединений.

С целью повышения равномерности нагрева торцов свариваемых труб предложена новая схема процесса сварки, при которой на дугу, горящую в зазоре между торцами труб, накладывается поперечное магнитное поле, что изменяет характер движения катодных пятен – на хаотическое блуждание катодных пятен накладывается направленное движение по окружности торцов труб.

2. Определен диапазон значений магнитной индукции, приемлемый для практического применения при стыковой сварке дугой низкого давления. Установлено, что при индукции поперечного магнитного поля более 200 мТл значительно увеличивается напряжение дугового разряда, усложняется возбуждение разряда и снижается стабильность его горения.

3. С использованием разработанной экспериментальной установки и специальных методик фото- и скоростной киносъемки торца трубы-катода и регистрации излучения локального участка торца трубы-катода исследована зависимость скорости движения катодных пятен от магнитной индукции. Исследования выполнены для ряда металлов катода при абсолютном давлении аргона 800 Па, при котором осуществляется процесс стыковой сварки. В интервале значений магнитной индукции $B=0\dots150$ мТл скорость катодного пятна выражается линейной зависимостью $v=K\cdot B$, где K – подвижность пятна. Например, для стали 12X18H10T $K=170$ м/(с·Тл).

Установлено, что в аргоне подвижность катодных пятен в поперечном магнитном поле на 30-50% меньше, чем в вакуумной дуге. Это можно

объяснить уменьшением степени компенсации объемного положительного заряда ионов над катодным пятном в присутствии атомов аргона.

4. С использованием разработанной методики измерения температуры на торце трубы-катода путем сканирования инфракрасного излучения его поверхности в момент выключения дуги исследовано влияние магнитной индукции на равномерность распределения температуры.

Установлено, что неравномерность нагрева торцевой поверхности трубы-катода, выраженная в относительной форме – отношением размаха температуры к ее среднему значению, обратно пропорциональна числу оборотов катодных пятен по торцу трубы. Достаточно равномерный нагрев торца трубы-катода с относительным размахом температуры менее 10% может быть получен при условии: $t > 300 \cdot \frac{\pi D}{KB}$, где t – время нагрева, с; D – диаметр трубы, м.

5. Наиболее технологичными для создания поперечного магнитного поля являются предложенные в работе разомкнутые магнитные системы на основе постоянных неодимовых магнитов дисковой формы с осевой намагниченностью. Путем моделирования и экспериментальных измерений распределения магнитной индукции в зазоре между торцами труб определены необходимые параметры и типы постоянных магнитов.

6. На базе двух ММА инверторов постоянного тока «ФОРСАЖ-502» разработан инверторный источник питания дуги низкого давления с током до 1500 А. Источник обеспечивает возможность осуществлять сварку на переменном токе с частотой до 50 Гц, изменять частоту тока при сварке, использовать переменный ток с различной длительностью положительных и отрицательных полувольт, осуществлять сварку импульсами постоянного тока различной полярности.

7. С целью обеспечения возможности сварки трубных заготовок диаметром до 100 мм выполнена модернизация установки «СТЫК-3». Установка оснащена новым сварочным модулем, источником питания дуги и системой компьютерного контроля и управления процессом сварки.

8. Разработана новая схема формирования соединений и технология сварки трубных заготовок переходников из АМг3 и ОТ4 диаметром 70 мм. Сварка выполняется на постоянном токе при непрерывном горении дуги. На стадии нагрева катод дуги располагается на торце трубы из АМг3, что обеспечивает катодную очистку его поверхности от оксидных плен. При последующем кратковременном оплавлении катод дуги располагается на торце трубы из ОТ4, производится его катодная очистка и оплавление торца трубы из АМг3 в режиме анода.

9. Исследована структурная и химическая неоднородность сварных соединений АМг3+ОТ4. В зоне стыка в алюминиевой части сварного соединения наблюдается мелкозернистая структура без каких-либо дефектов, характерных для литой структуры. В стыке отсутствует прослойка интерметаллидных соединений.

Сварные соединения трубных заготовок имеют удовлетворительную прочность и пластичность при статических испытаниях. Средняя прочность при статическом растяжении составила 182 МПа, что составляет 80% от прочности сплава АМг3. При статическом изгибе образование трещины происходит в сплаве АМг3. При испытании переходника на прочность внутренним давлением разрушение происходит по образующей трубы из сплава АМг3 при давлении 18,5 МПа.

Герметичность соединений не хуже 10^{-8} м³·Па/с.

10. Опробование новой технологии на предприятии ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» подтвердило перспективность ее применения для сварки трубных переходников из разнородных металлов при изготовлении элементов конструкций космических аппаратов.

Литература

1. Стрижевская Л.Г., Старова Л.Л. Сварка плавлением некоторых разнородных металлов // Сварочное производство. 1966. № 1.
2. Стрижевская Л.Г. и др. Сварка разнородных металлов с использованием биметаллических переходников // Сварочное производство. 1969. № 8. С. 18-19.
3. Рабкин Д.М., Дзыкович И.Я., Рябов В.Р., Гордань Г.Н. О распределении элементов в зоне сплавления при сварке алюминия со сталью // Автоматическая сварка. № 1. 1966. С. 10-14.
4. Рябов В.Р., Юматова В.И. Влияние химического состава присадочных проволок на прочность сталеалюминиевых соединений // Автоматическая сварка. 1966. № 12. С. 17-21.
5. Рябов В.Р., Рабкин Д.М., Курочко Р.С., Стрижевская Л.Г. Сварка разнородных металлов и сплавов / М.: Машиностроение, 1984. 239 с.
6. Фринлянд Л.А., Зиновьева Т.Н., Конов Ю.К. Сварка алюминия с титаном // Сварочное производство. 1963. № 11. С. 5-8.
7. Дьяченко В.В., Сивов Е.Н., Морозов Б.П. Сварка молибдена и ниобия с нержавеющей сталью // Сварочное производство. 1966. № 1.
8. Рябов В.Р., Дупляк В.Д. Механизм образования диффузионного слоя при алитировании стали перед сваркой // Сварочное производство. 1968. № 8. С. 10-12.
9. Сивов Е.Н., Дьяченко В.В. Влияние термического цикла электроннолучевой сварки на формирование шва сварных соединений ниобия со сталью // Сварочное производство. 1973. № 4. С. 11-13.
10. Красулин Ю.Л., Шоршоров М.Х. О механизме образования соединения разнородных металлов в твердом состоянии // Физика и химия обработки материалов. 1967. № 1. С. 89-97.
11. Красулин Ю.Л. Дислокации как активные центры в топохимических реакциях // Теоретическая и экспериментальная химия. 1967 № 3. С. 58-85.

12. Каракозов Э.С., Карташкин Б.А., Шоршоров М.Х. О кинетике процесса образования соединения при сварке в твердом состоянии однородных материалов // Физика и химия обработки материалов. 1968. № 3. С. 113-122.
13. Гельман А.С. К вопросу о механизме образования соединений при сварке давлением металлов // Сварочное производство. 1969. № 2. С. 46-48.
14. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе / М.: Металлургия, 1976. 264 с.
15. Клинопрессовая сварка давлением разнородных металлов / Шоршоров М.Х. и др. М.: Металлургия, 1982. 112 с.
16. Сахновская Е.Б., Седых В.С., Трыков Ю.П. Свойства соединений аустенитной стали с алюминиевыми сплавами при сварке взрывом // Сварочное производство. 1971. № 7. С. 34-36.
17. Ерохин А.В. и др. Свойства сталеалюминиевых соединений, полученные сваркой взрывом // Сварочное производство. 1972. № 7. С. 26-27.
18. Черненко И.А. и др. Сварка трением алюминия АД1 со сталью 12Х18Н10Т // Автоматическая сварка. 1988. №5. С. 60-65.
19. Голованенко С.А. Сварка прокаткой биметалла / М.: Металлургия, 1977. 160 с.
20. Белоусов В.П., Седых В.С., Трыков Ю.П. Механические свойства титаностальных соединений (с промежуточными слоями), сваренных взрывом // Сварочное производство. 1971. № 9. С. 19-21.
21. Кусков Ю.Н., Сапрыгин В.Д., Седых В.С. и др. Влияние низких температур на работоспособность сваренных взрывом титаностальных соединений // Сварочное производство. 1975. № 11. С. 20-21.
22. Биметаллические соединения / Чарухина К.Е., Голованенко С.А., Мастеров В.А. и др. М.: Металлургия, 1970. 280 с.
23. Получение прочных соединений титан-сталь прокаткой в вакууме / Амоненко В.М., Годин В.М., Ковалева Е.А. и др. //

- Цветные металлы. 1967. № 12. С. 38-41.
24. Фролов Н.Г. и др. Сварка совместным прессованием нержавеющей стали с циркониевым сплавом // Сварочное производство. № 5. 1974. С. 14-16.
 25. Сидякин В.А. Стыковая сварка оплавлением дугой низкого давления // Новое в технологии контактной сварки. М.: Машиностроение. 1981. С. 25-44.
 26. Сидякин В.А. Технология и оборудование стыковой сварки дугой низкого давления трубных переходников из разнородных металлов // Технология машиностроения. 2007. № 9. С. 27-32.
 27. Новый способ стыковой сварки труб малого диаметра / А.Н. Сабанцев, Б.Д. Орлов, В.А. Сидякин, Е.А. Мачнев // Сварочное производство. 1977. №2. С. 13-14.
 28. Сабанцев А.Н. Исследование процесса и разработка технологии стыковой сварки оплавлением дугой низкого давления трубопроводов малого диаметра из алюминиевых сплавов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. 1977. 22 с.
 29. Сидякин В.А., Мачнев Е.А., Редкач А.К. Стыковая сварка дугой низкого давления переходников труб композиции сплав АМг2 + сталь 12Х18Н10Т // Повышение качества и эффективности сварочного производства на предприятиях г. Москвы. М.: МДНТП. 1984. С. 50-55.
 30. Мачнев Е.А., Сидякин В.А. Стыковая сварка дугой низкого давления труб из разнородных металлов // Материалы VIII Всесоюзного совещания по сварке разнородных, композиционных и многослойных материалов. Киев.: ИЭС им. Е.О. Патона. 1983. С. 68-74.
 31. Мачнев Е.А. Разработка процесса и оборудования стыковой сварки дугой низкого давления труб малого диаметра из алюминиевых сплавов со сталью. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук М. 1984. 16 с.
 32. Сидякин В.А., Мачнев Е.А. Стыковая сварка дугой низкого давления разнородных металлов // Сварочное производство. 1985.

- №2. С. 9-11.
33. Сидякин В.А., Мачнев Е.А., Гусев В.А., Сосенков В.И. Установка УДСТ-3 для стыковой сварки дугой низкого давления труб малого диаметра // Сварочное производство. 1981. № 6. С. 37-38.
 34. Сидякин В.А., Сабанцев А.Н., Орлов В.В., Мачнев Е.А. Установка "Стык-3" для стыковой сварки с нагревом электрической дугой низкого давления // Электротехническая промышленность. Сер. Электросварка. 1984. вып. 4(85). С. 8-10.
 35. Боков Д.Н., Сидякин В.А., Мачнев Е.А.. Стыковая сварка дугой низкого давления переходников трубопроводов из алюминиевых сплавов с нержавеющей сталью 12Х18Н10Т и титаном ВТ1 // Материалы НТК «Теплофизика технологических процессов», Раздел III «Теплофизика процессов сварки и пайки», г. Тольятти, 1988. С.137-138.
 36. Боков Д.Н., Сидякин В.А. Совершенствование технологии стыковой сварки дугой низкого давления переходников трубопроводов // Материалы Всесоюзной НТК «Ресурсосберегающие технологии в сварочном производстве для машиностроительного комплекса». М.: ДНТП, 1989.
 37. Веселов В.А., Сидякин В.А., Боков Д.Н., Рябов В.Р. и др. Стыковая сварка с нагревом дугой низкого давления трубных сталеалюминиевых переходников для криогенных систем и аппаратов // Автоматическая сварка. 1990. № 4. С. 50-55.
 38. Боков Д.Н. Совершенствование процесса, разработка оборудования и контроля качества процесса стыковой сварки дугой низкого давления трубных биметаллических переходников из алюминиевых сплавов со сталью 12Х18Н10Т и титановым сплавом ОТ4. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. 1996. 17 с.
 39. Стыковая сварка дугой низкого давления кронштейнов из разнородных сплавов АМг6 + ОТ4 / Сидякин В.А., Боков Д.Н., Арбузов В.М., Хаустов В.С. // Технология машиностроения. 2001. № 6. С. 29-33.
 40. Сидякин В.А., Арбузов В.М., Хаустов В.С. Стыковая сварка разнородных металлов электрической дугой в инертной среде

низкого давления. Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов. Сборник научных трудов. Вып. 7. Калуга. Полиграф-Информ. 2009. С. 437-447.

41. Сидякин В.А., Пономарев К.Е., Хаустов В.С., Арбузов В.М. Некоторые особенности стыковой сварки трубных переходников сталь-титан электрической дугой в инертной среде низкого давления // Вестник «ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина». 2011. № 1. С. 49-54.
42. Стыковая сварка трубных переходников сталь-титан / В.А. Сидякин, Д.К. Печенкин, В.С. Хаустов, В.М. Арбузов // Сварочное производство. 2004. № 7. С. 17-22.
43. Кочановский Н.Я., Федер Е.С., Катлер С.М. Сварка электрической дугой, вращающейся в магнитном поле // Сварочное производство. 1959. № 8. С. 1-4.
44. Гаген Ю.Г., Таран В.Д. Сварка магнитоуправляемой дугой. М.: Машиностроение, 1970. 159 с.
45. Кочановский Н.Я., Федер Е.С., Катлер С.М. Сварка электрической дугой, вращающейся в магнитном поле // Сварочное производство. 1959. № 8. С. 1-4.
46. Гельман А.С. Основы сварки давлением. М.: Машиностроение, 1970. 312 с.
47. Кучук-Яценко С.И., Кузнецов П.В., инж., Бернадский В.Н., Журавков В.В. Сварка дугой, вращающейся в магнитном поле (Обзор) // Автоматическая сварка. 1981. № 7. С. 36-42.
48. Кучук-Яценко С.И., Кузнецов П.В., Бернадский В.Н., Журавков В.В. Состояние и тенденции развития сварки дугой, вращающейся в магнитном поле / Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1981. 27 с.
49. Кочинский В.С., Игнатенко В.Ю., Головченко С.И. Прессовая сварка трубчатых деталей с нагревом дугой, управляемой магнитным полем (оборудование и технология) // Автоматическая сварка. 1997. №7. С. 39-41.
50. Кучук-Яценко С.И., Юматов В.В., Игнатенко В.Ю., Сорокина Л.Ю., инженеры. Прессовая сварка разнородных цветных металлов с нагревом дугой, движущейся под действием магнитного поля //

- Автоматическая сварка. 1987. № 1. С. 17-19.
51. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
 52. Бейлис И.И., Любимов Г.А., Раховский В.И. Диффузионная модель прикатодной области сильноточного дугового разряда // ДАН СССР. 1972. Т. 203. № 1. С. 71-74.
 53. Гвоздецкий В.С. Об электрическом поле объемного заряда у катода электрической дуги // Автоматическая сварка. 1965. № 6. С. 16-20.
 54. Гвоздецкий В.С., Мечев В.С. Перемещение электрической дуги в магнитном поле // Автоматическая сварка. 1963. №10.
 55. Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А., Мечев В.С. Блуждание катодного пятна электрической дуги // Автоматическая сварка. 1966. № 6.
 56. Соколов Б.А., Соколова Н.Б. Монтаж электрических установок. М.: Энергоатомиздат, 1991. 592 с.
 57. Кобайн Дж., Эккер Г., Фаррелл Дж. и др. Под ред. Лафферти Дж. Вакуумные дуги: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 432 с.
 58. Sethuraman S. K., Chatterton P. A., Barrault M. R. A study of the erosion rate of vacuum arcs in transverse magnetic field // J. Nucl. Mater. 1982. Vol. 111&112. P. 510-516.
 59. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 624 с.
 60. Валуев В.П., Рыбников С.И., Кузнецов В.Г. Нанесение вакуумно-дуговых покрытий на крупногабаритные изделия и изделия сложной формы // Инструмент и технологии. 2004. № 17-18. С. 33-39.
 61. Блинов И.Г., Дороднов А.М., Минайчев В.Е., и др. Вакуумное сильноточные плазменные устройства и их применение в технологическом оборудовании микроэлектроники. Обзоры по электронной технике. Москва, ЦНИИ «Электроника», 1974. Вып. 7(268). 84 с.
 62. Wroe H. The Magnetic Stabilization of Low Pressure D.C. Arcs. - Brit.

- J. Appl. Phys. 1958. vol. 9. № 12. p. 488-491.
63. Кесаев И.Г., Пашкова В.В. Электромагнитная фиксация катодного пятна // ЖТФ. 1959. Т. 9. вып. 3. С. 287-298.
64. Перский Н.Е., Сысун В.И., Хромой Ю.Д. Динамика катодных пятен импульсного вакуумного разряда //Тезисы доклада V Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. Томск. 1984. Ч. 1. С. 12-14.
65. Лаврентьев В.И., Пелль В.Г. Скоростная киносъемка камерой СКС-1. М.: Искусство, 1963. 224 с.
66. Постоянные магниты: Справочник / Альтман А.Б., Герберг А.Н., Гладышев П.А. и др.; Под ред. Пятин Ю.М. 2-е изд., перераб. и доп. М. Энергия, 1980. 488 с.
67. Куневич А.В., Подольский А.В. Сидоров И.Н. Ферриты: Энциклопедический справочник. В 5 томах. Т. 1. Магниты и магнитные системы. СПб.: Информационно-издательское агентство "Лик", 2004. 358 с.
68. Февралева Н.Е. Магнитотвердые материалы и постоянные магниты. Киев: Наукова думка, 1969. 232 с.
69. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справочник. Под. ред. Ливанов В.А., Добаткин В.И. и др. М.: Металлургия, 1974. 432 с.
70. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / Мальцев В.М. М.: Металлургия, 1970. 368 с.
71. Титановые сплавы в машиностроении / Чечулин Б. Б., Ушков С. С., Разуваева И. Н., Гольдфайн В. Н. Л., Машиностроение (Ленингр. отд.), 1977. 248 с.
72. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов / Аношкин Н.Ф. М.: Металлургия, 1980. 464 с.
73. И.И.Корнилов, В.С.Михеев, Т.С.Чернова. Влияние отжига на воздухе и в вакууме на пластические свойства листовых материалов из титановых сплавов А13, АТ4, ОТ4-І и ОТ4. сб. "Титан и его сплавы". АН СССР, 1962 г., вып.7.

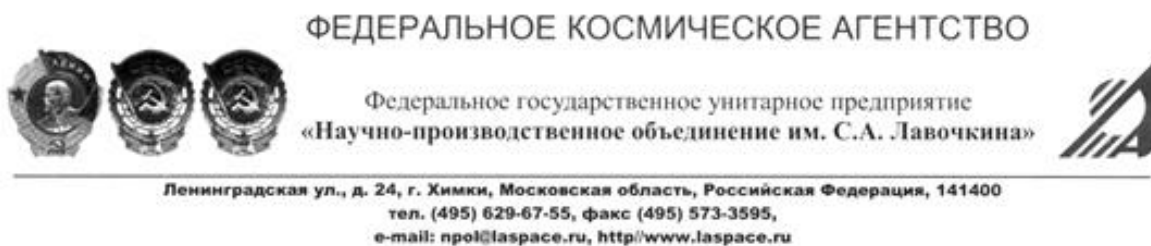
74. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов / Лясоцкая В. С. М.: Экомет, 2003. 352 с.
75. Справочник по конструкционным материалам. Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьёва, С.А. Герасимов и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 640 с.
76. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. М.: Metallurgizdat, 1962. 157 с.
77. Metallurgy and technology of titanium and its alloys. Под ред. Гуревича С.М. Киев: Наукова думка, 1979. 300 с.
78. Гриценко А.Ф., Шестаков А.И., Ермоленко О. Е. Холодная сварка давлением разнородных металлов // Сварочное производство. 1963. № 2. С. 32-33.
79. Сапрыгин В.Д., Каракозов Э.С., Березников Ю.И. Сварка давлением алюминиево-стальных и титан-алюминиевых элементов для работ при низких температурах // Сварочное производство. 1975. № 6. С. 21-22.
80. Сапрыгин В.Д., Лоцманов С.Н., Березников Ю.И. Сварка давлением алюминиево-стальных и титан-алюминиевых переходных элементов. В кн.: Лекции по сварке разнородных и разноименных металлов. М., МДНТП, 1973. Ч. 1. С. 72-77.
81. Сварка трением: Справочник / Под общ. ред. Лебедева В.К., Черненко И.А., Вилля В.И. М.: Машиностроение, 1987. 236 с.
82. Колесниченко В.А., Шнырев Г.Д., Алехин В.П. Клинопрессовая сварка разнородных металлов, резко отличающихся и близких по твердости. В кн.: Лекции по сварке разнородных и разноименных металлов. М., МДНТП, 1973. Ч. 1. С. 68-71.
83. Свойства титан-алюминиевых соединений, полученных сваркой взрывом / Ерохин А.В., Казак Н.Н., Седых В.С. и др. // Сварочное производство. 1972. № 7. С. 26-27.
84. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.

85. Диффузионная сварка материалов. Справочник / Под ред. Н.Ф. Казакова. М.: Машиностроение, 1981. 271 с.
86. Ланкина Л.В., Коренюк Ю.М. Исследование процессов на границе соединения при нагреве биметалла титан-алюминий // Сварочное производство. 1974. № 8. С. 4-6.
87. Гуревич С.М., Замков В.П., Сабокаръ В.К. Сварка биметалла титан-алюминий // Автоматическая сварка. 1974. № 4. С. 49-50.
88. Трутнев В.В., Шоршоров М.Х., Якушин А.К. Взаимодействие алюминия и его сплавов с нержавеющей сталью, титаном и никелем при сварке в твердом состоянии // Физика и химия обработки материалов. 1967. № 6. С. 53-59.
89. Никифоров Г.Д., Лукин В.И. Технология клинопрессовой сварки титаноалюминиевых переходников // Повышение качества и эффективности сварочного производства на предприятиях г. Москвы. М. 1984. С. 44-50.
90. Лукин В.И. и др. Разработка способа контроля теплопрессовой сварки // Производственно-технический опыт. 1978. №3. С. 20-22.
91. Способ контроля качества сварного соединения / Попов А С., Борисова В.А., Лукин В.И. и др. Патент SU 620866
92. Рыкалин Н.Н., Шоршоров М.Х., Красулин Ю.Л. Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов. Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1965. Т.1. №1. С. 29-36.
93. Постников В.С. Релаксационные явления в твердых телах. В кн.: Релаксационные явления в металлах и сплавах. М.: Металлургиздат, 1963. С.15-18.
94. Беседный В.А., Шеленков Г.М. Сваркопайка алюминия с титаном // Сварочное производство. 1970. № 3. С. 45-46.
95. Коренюк Ю.М., Иванов В.В., Дивисенко И.Ф. Взаимодействие жидкого алюминия и твердого титана при сварке плавлением // Сварочное производство. 1975. № 6. С. 3-4.
96. Нестеров А.Ф. и др. Особенности выполнения телескопических титан-алюминиевых сварно-паяных соединений // Сварочное

производство. 1988. №12. С. 10-11.

97. Долгов Ю.С, Хаджи Д.Л., Гришин В. Л. Нанесение алюминиевого слоя на сплав ОТ4 для осуществления процессов пайки титановых сплавов с алюминиевыми // Цветные металлы. 1962. № 5. С. 66-69.
98. Боков Д.Н., Сидякин В.А. Совершенствование технологии стыковой сварки дугой низкого давления переходников трубопроводов // Материалы Всесоюзной НТК «Ресурсосберегающие технологии в сварочном производстве для машиностроительного комплекса», М.: ДНТП, 1989.
99. Исследование и разработка технологических процессов стыковой сварки труб из разнородных материалов. Отчет МАТИ № 1613. № гос. регистрации У38698. 1988. 141 с.
100. Осокин А.А. и др. Роль химической активности титана при сварке его с алюминием // Сварочное производство. 1978. №12. С. 7-8.
- 101 Пульцин Н.М. Взаимодействие титана с газами. М.: Металлургия, 1969. 217 с.
102. Окисление титана и его сплавов / Бай А.С., Лайнер Д.И., Слесарева Е.Н., Цыпин М.И. М., Металлургия, 1970. 320 с.
- 103 Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 501 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Акт № 1 от 04.02.2015 г.
на № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер
ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»
Климушин В.И.
«04» февраля 2015г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы

Мы, нижеподписавшиеся, главный сварщик ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» Пономарёв К.Е. и начальник сектора сварки Бабичев О.В., составили настоящий акт в том, что результаты исследований и разработок, выполненные в диссертационной работе Люкса Дмитрия Игоревича «Исследование и разработка процесса и технологии стыковой сварки трубных переходников дугой низкого давления в поперечном магнитном поле» прошли опытное опробование в ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» при сварке трубных переходников алюминий – титан диаметром 70 мм.

Полученные положительные результаты свидетельствуют о перспективности их использования в изделиях ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина».

Главный сварщик
ФГУП «НПО им.С.А.Лавочкина»


Пономарёв К.Е.

Начальник сектора сварки
ФГУП «НПО им.С.А. Лавочкина»

Бабичев О.В.

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер
ОАО «ВПК «НПО машиностроения»



Чушкин Г.И.
«04» _____ 2015 г.




АКТ

использования результатов диссертационной работы

Мы, нижеподписавшиеся, главный сварщик ОАО «ВПК «НПО машиностроения» Бакуло А.В. и заместитель главного сварщика Глотов И.С., составили настоящий акт в том, что способ стыковой сварки электрической дугой низкого давления в поперечном магнитном поле, разработанный в диссертационной работе Люкса Дмитрия Игоревича «Исследование и разработка процесса и технологии стыковой сварки трубных переходников дугой низкого давления в поперечном магнитном поле» использован на нашем предприятии при разработке опытной технологии сварки трубных переходников сплав 1201 – сталь 12Х18Н10Т диаметром 100 мм.

Полученные положительные результаты свидетельствуют о перспективности применения усовершенствованного способа сварки при изготовлении трубных переходников на нашем предприятии.

Главный сварщик
ОАО «ВПК «НПО машиностроения»



(Бакуло А.В.)

Заместитель главного сварщика
ОАО «ВПК «НПО машиностроения»



(Глотов И. С.)