

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2018

Работа выполнена на кафедре «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: - **Сидякин Виталий Александрович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: - **Люшинский Анатолий Владимирович**,
доктор технических наук, профессор,
АО «Раменское приборостроительное
конструкторское бюро» (РПКБ)
- **Ходаков Дмитрий Вячеславович**,
кандидат технических наук,
ОАО «Научно производственное объединение
Центральный научно-исследовательский
институт технологии машиностроения
(НПО «ЦНИИТМАШ»)

Ведущее предприятие - ФГУП Научно производственное объединение
технологии машиностроения («НПО «Техномаш»)

Защита диссертации состоится 12 декабря 2018 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.16 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория № 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Палтиевичу Андрею Романовичу и по электронной почте paltievichar@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <https://mai.ru/events/defence/>.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,



Палтиевич А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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 межзатомных 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.

При изготовлении 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 торцовой 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 совершенствование способа и технологии стыковой сварки дугой низкого давления с целью распространения применения этого способа на сварку трубных заготовок переходников диаметром до 100 мм.

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 АМг3 + титановый сплав ОТ4 диаметром 70 мм.

7) Разработать технологию сварки и исследовать свойства и работоспособность сварных соединений трубных заготовок переходника АМг3+ОТ4.

Научная новизна

1. Предложена новая схема процесса стыковой сварки дугой низкого давления, при которой на дугу, горящую в зазоре между торцами труб, накладывається поперечное магнитное поле, что повышает равномерность нагрева торцов и изменяет характер движения катодных пятен – на хаотическое блуждание катодных пятен накладывається 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. 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 $B=0\dots 200$ мТл скорость катодного пятна выражается линейной зависимостью $v=K\cdot B$, где K – подвижность пятна.

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. 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).

Теоретическая и практическая значимость

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.

Методология и методы исследования

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.

Положения, выносимые на защиту

1. Новая схема процесса стыковой сварки дугой низкого давления.
2. Закономерности диапазона значений магнитной индукции, приемлемого для практического применения при стыковой сварке дугой низкого давления.
3. Зависимость скорости движения катодных пятен в интервале значений магнитной индукции $B=0 \dots 200$ мТл поперечного магнитного поля при абсолютном давлении аргона 800 Па.
4. Закономерность равномерного нагрева торца трубы-катода с относительным размахом температуры менее 10%.

Степень достоверности результатов

Все результаты получены на сертифицированном и поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Испытания и измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ, достоверность результатов подтверждается хорошим совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов, использованием методов математической статистики при обработке результатов.

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 Основное содержание диссертации опубликовано в 11 печатных работах, в том числе 5 в журналах из перечня, рекомендованных ВАК и изданиях, включенных в базу данных Scopus..

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, отражена новизна и практическая ценность работы.

В первой главе

В первой главе приведён анализ особенностей применения различных способов сварки разнородных металлов при изготовлении трубных переходников. Показана перспективность применения способа стыковой сварки электрической дугой низкого давления. Изложены основные ограничения его применения и предложено усовершенствовать этот способ сварки путём наложения поперечного магнитного поля на дуговой разряд в зазоре между торцами свариваемых труб. Приведён анализ применения магнитного поля при сварке и в других технологических процессах.

В отличие от дуго-контактной сварки, при которой имеет место контрагированный дуговой разряд, при стыковой сварке дугой низкого давления на катоде дуги существует множество катодных пятен и при наличии поперечного магнитного поля на их хаотическое блуждание накладывается направленное движение по окружности торца трубы. При этом сохраняются такие важные достоинства этого способа сварки как эффективная катодная очистка торцевых поверхностей труб и малая окислительная способность среды, в которой осуществляется процесс сварки.

Сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе изложены результаты исследований влияния поперечного магнитного поля на свойства дуги низкого давления при стыковой сварке и результаты разработки устройств для его создания.

Для проведения экспериментальных исследований разработана специальная вакуумная установка (рис.1-а), в которой расположены зажимные устройства для труб с электромагнитом для создания поперечного магнитного поля в зазоре между их торцами (рис. 1-б). Труба-катод располагается в нижнем зажиме. В крышке вакуумной камеры имеется окно, которое позволяет наблюдать торцевую поверхность трубы-катода.

Питание дуги осуществлялось от источника постоянного тока. Использовались аккумуляторная батарея и инвертор «ФОРСАЖ-315».

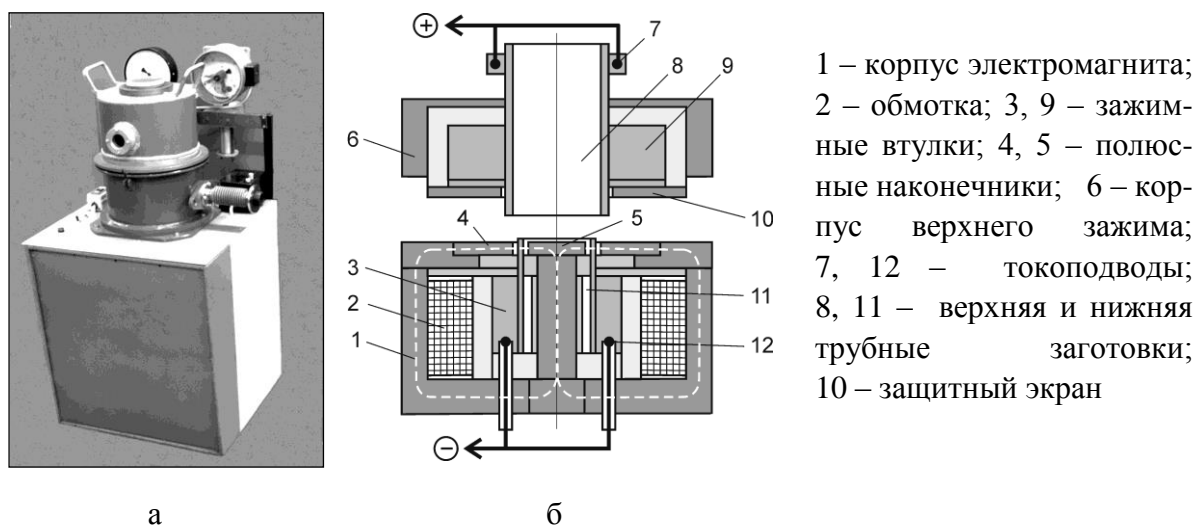


Рисунок 1 - Экспериментальная установка (а) и схема зажимных устройств с электромагнитом для создания поперечного магнитного поля (б)

Для измерения скорости движения катодного пятна разработана методика, основанная на регистрации излучения локального участка торца трубы-катода с помощью фотодиода (рис. 2). Для обоснования возможности ее использования предварительно проведены фото- и киносъемка процессов на катоде. Исследования проводились при абсолютном давлении аргона равном 800 Па, которое применяется при стыковой сварке.

Для скоростной киносъемки использовалась камера СКС-1М. Труба-катод была выполнена из стали 12Х18Н10Т сечением $\varnothing 30 \times 2$ мм. Сила тока дуги, равная 50 А, приблизительно равна средней силе тока катодного пятна. Это позволяло наблюдать вращение по торцу трубы практически одного катодного пятна. Дуга зажигалась в конечной стадии киносъемки, когда частота кадров достигает 4500-5000 кадров в секунду.

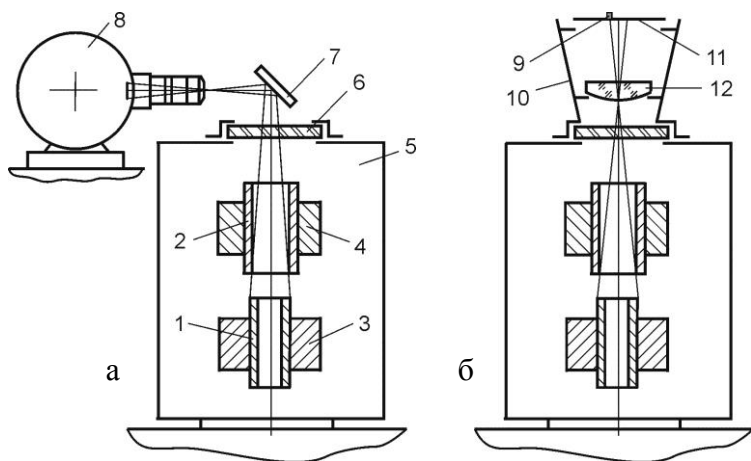


Рисунок 2 - Схемы кино съемки катодных пятен на торце трубы (а) и измерения яркости излучения катода с помощью фотодиода (б):
 1, 2 - трубы; 3, 4 - зажимы; 5 - вакуумная камера; 6 - окно; 7 - зеркало; 8 - кинокамера; 9 - фотодиод; 10 - тубус; 11 - матовое стекло; 12 - линза

На рис. 3-а приведены кадры кино съемки катодных пятен при индукции магнитного поля 120 мТл. Частота вращения пятен по торцу трубы составила $180-200 \text{ с}^{-1}$, что соответствует скорости их движения 16-18 м/с.

На рис. 3-б, приведена осциллограмма сигнала фотодиода при отсутствии магнитного поля, а на рис. 3-в - при индукции поля 120 мТл. По частоте сигнала рассчитывалась скорость движения катодного пятна.

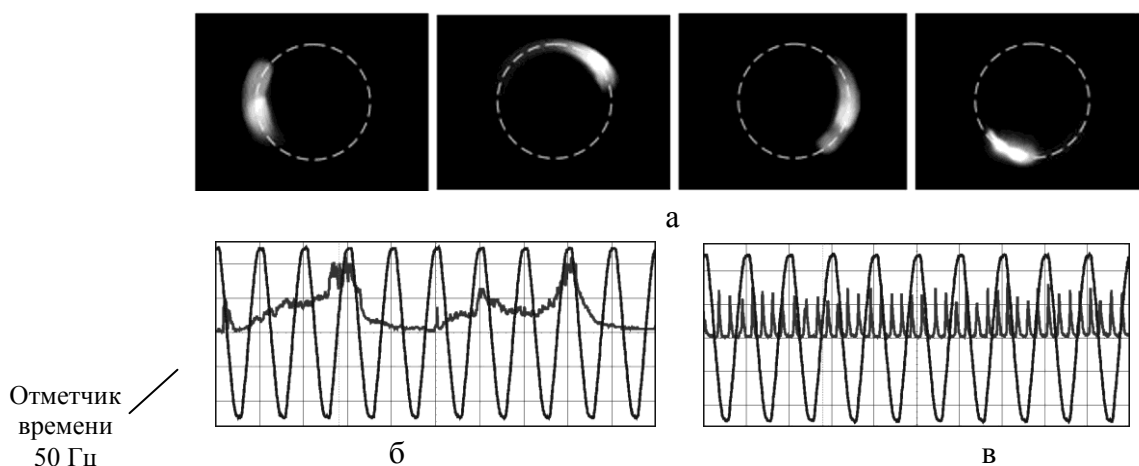
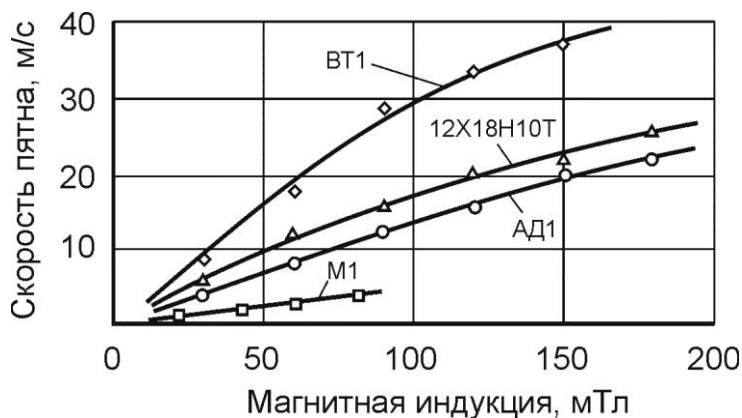


Рисунок 3 - Кадры кино съемки катодных пятен (а) и осциллограммы сигнала фотодиода (б, в)

Установлено, что при индукции поперечного магнитного поля более 200 мТл значительно 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 $0 \dots 200 \text{ мТл}$ (рис. 4).

Скорость катодного пятна приближенно выражается линейной зависимостью $v=K \cdot B$, где K – подвижность пятна.



Катод	К, (м/с)/Тл
12Х18Н10Т	170
АД1	140
ВТ1	280
М1	50

Рисунок 4 - Зависимость скорости движения катодных пятен от магнитной индукции

Влияние магнитной индукции на равномерность распределения температуры на торцевой поверхности трубы-катода исследовалось следующим образом. В момент выключения дуги проводилось сканирование инфракрасного излучения поверхности торца вращающимся фотодиодом. Предварительно была выполнена калибровка сигнала фотодиода путем регистрации излучения поверхности плоского кольца из нихрома, нагреваемого проходящим током. Движение фотодиода по изображению торца трубы-катода регистрировалось оптическим датчиком перемещения.

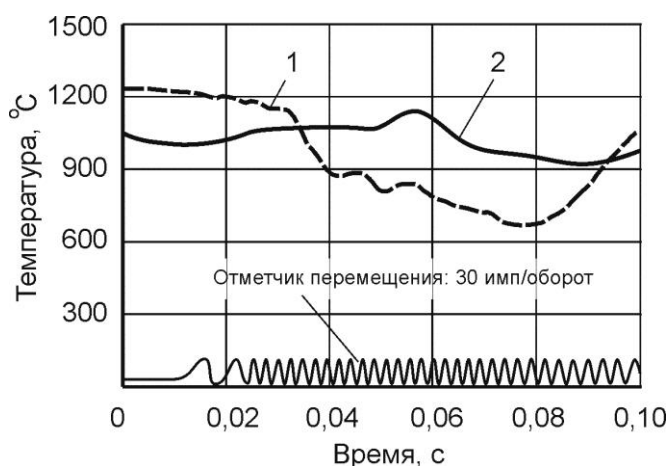


Рисунок 5 - Распределение температуры по торцу трубы-катода из стали 12Х18Н10Т сечением $\varnothing 30 \times 3$ мм: 1 - магнитная индукция $V=0$; 2 - $V=120$ мТл

На рис. 5 приведен пример регистрации распределения температуры на торце, а на рис. 6 – влияние магнитной индукции на равномерность распределения температуры. В качестве показателей, характеризующих равномерность распределения температуры использованы среднее отклонение и размах температуры. При увеличении магнитной индукции в интервале $0 \dots 150$ мТл оба эти показателя уменьшаются в 4-5 раз.

Анализ результатов измерений температуры показал, что изменение неравномерности распределения температуры со временем целесообразно рассматривать в виде зависимости неравномерности распределения температуры в относительной форме от относительного времени.

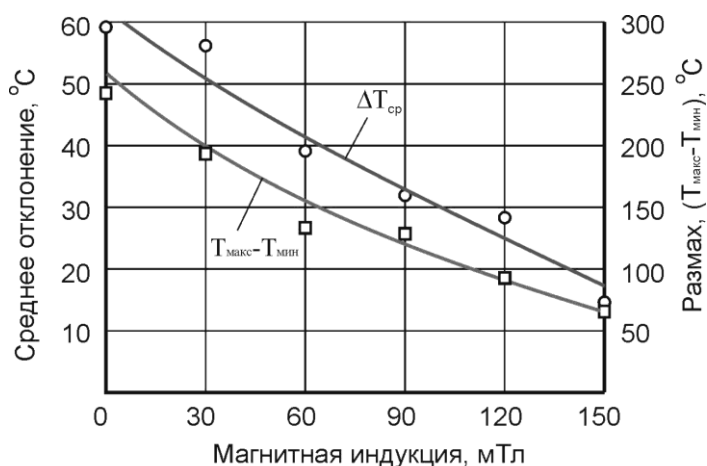


Рисунок 6 - Зависимость среднего отклонения и размаха температуры на поверхности торца трубы от магнитной индукции

Неравномерность распределения температуры в относительной форме характеризуется отношением $\Delta T_{\text{макс}} / T_{\text{ср}}$, где $\Delta T_{\text{макс}}$ - размах температуры, а $T_{\text{ср}}$ - среднее

значение температуры. Относительное время равно отношению времени к его характерному значению – времени одного оборота катодных пятен по окружности торца трубы, то-есть равно числу оборотов n .

Установлено, что размах температуры в относительной форме менее 10% может быть достигнут при $n > 300$. Поэтому время, необходимое для достижения достаточно равномерного нагрева, выражается формулой:

$$t > 300 \cdot \frac{\pi D}{KB} \text{ с, где } D \text{ – диаметр трубы.}$$

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

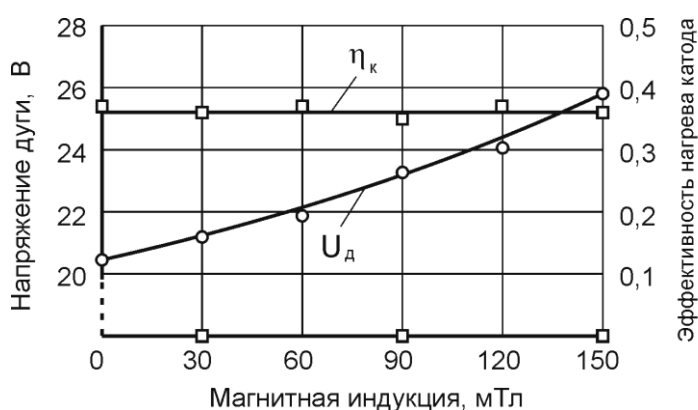


Рис. 7. Зависимость напряжения дуги U_d и эффективного к.п.д. нагрева катода η_k от магнитной индукции

Увеличение индукции магнитного поля вызывает повышение напряжения дуги. При этом эффективность нагрева торца трубы-катода практически не

изменяется (рис. 7). По-видимому, это связано с тем, что наряду с ростом падения напряжения в столбе дуги также увеличивается катодное падение потенциала.

Разработаны и опробованы различные способы создания поперечного магнитного поля в зазоре между торцами свариваемых труб, основанные на использовании электромагнитов и постоянных магнитов. Наиболее

технологичными являются предложенные в работе разомкнутые магнитные системы на основе неодимовых (Nd-Fe-B) постоянных магнитов дисковой формы с осевой намагниченностью.

Магнитные вставки, содержащие дисковые магниты, размещаются в трубах одноимёнными полюсами навстречу друг другу (рис. 8-а).

Полюсный наконечник 1 является экраном, который защищает магнит 2 от воздействия дугового разряда, а наконечник 3 обеспечивает соосную установку магнита внутри. Величина магнитной индукции обеспечивается выбором магнита с определенными параметрами и регулируется расстоянием h от полюсного наконечника магнита до торца трубы.

На рис. 8-б приведено распределение радиального компонента магнитной индукции B_r в зазоре между торцами свариваемых труб.

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

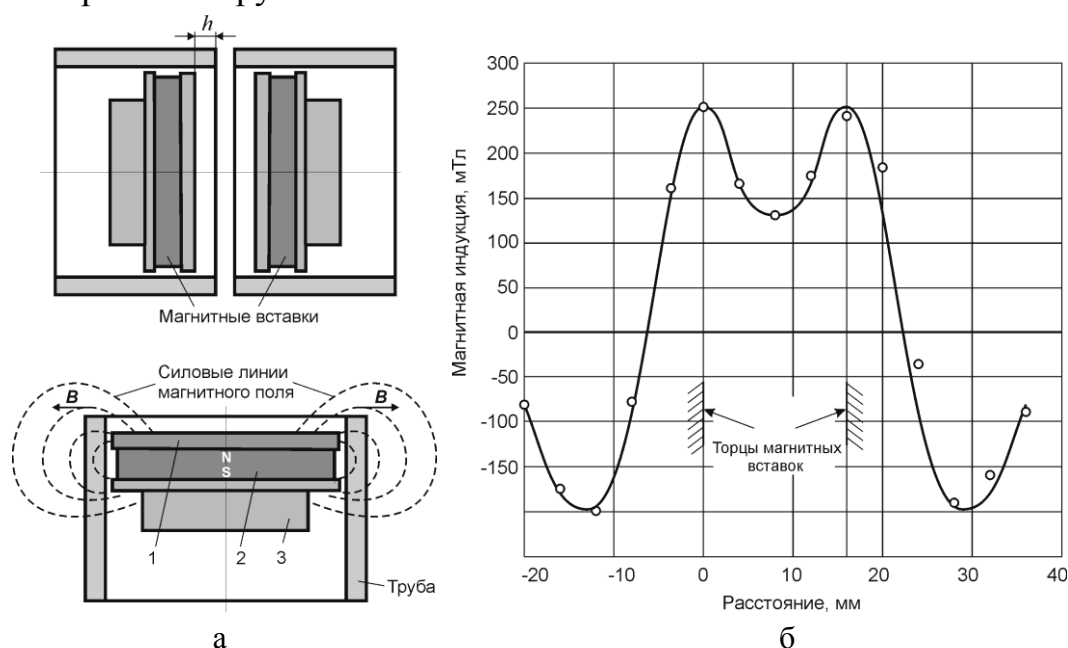


Рисунок 8 - Схема расположения постоянных магнитов внутри свариваемых труб (а) и распределение радиального компонента магнитной индукции B_r в зазоре между их торцами (б) (неодимовый дисковый магнит $D52 \times 8$ мм $N35H$; труба $\varnothing 70 \times 5$ мм)

В третьей главе изложена модернизация опытно-промышленной установки «СТЫК-3», которую потребовалось выполнить для обеспечения возможности сварки трубных переходников диаметром до 100 мм.



Рисунок 9 – Сварочная установка «СТЫК-3» после модернизации

В установке (рис. 9) использован усовершенствованный способ сварки, при котором на дугу, горящую в зазоре между торцами трубных заготовок, накладывается поперечное магнитное поле.

При модернизации установки разработаны новый сварочный модуль, новая электрическая силовая схема питания дуги, система контроля и управления процессом сварки на современной элементной базе.

Для исключения неравномерности оплавления торцов трубных заготовок, вызванной стеканием жидкого металла под действием силы тяжести, использована новая компоновка модуля, при которой вакуумная камера с

зажимами для свариваемых трубных заготовок и механизм осадки располагаются вертикально. При модернизации модуля разработаны:

- пневмодиафрагменный механизм осадки и пневматическая система с усилием осадки до 10 кН;
- установочные приспособления и цанговые зажимы для 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.

Разработан инверторный источник питания дуги низкого давления (рис. 10) с током до 1500 А. Источник содержит два ММА инвертора постоянного тока «ФОРСАЖ-502» (INV1, INV2) с расширенным диапазоном токов 50...750 А.

Для импульсного питания дуги переменным и постоянным током разработан преобразователь на основе мостовой схемы, выполненной на силовых тиристорах VS1...VS4. Включение и выключение тока тиристорного преобразователя производится с помощью мощных IGBT модулей VT1...VT3, через которые преобразователь подключен к инверторам.

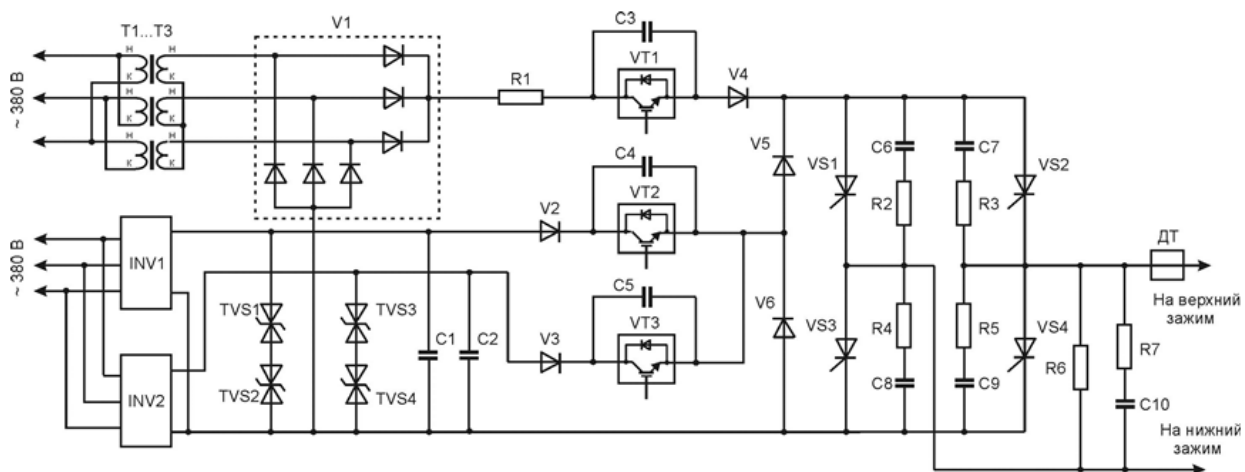


Рисунок 10 - Электрическая схема инверторного источника питания дуги низкого давления

Управление тиристорами и IGBT модулями, а также управление током инверторов, производится сигналами из блока компьютерного управления установки. Осциллограммы тока дуги, представленные на рис.11, иллюстрируют работу инверторного источника.

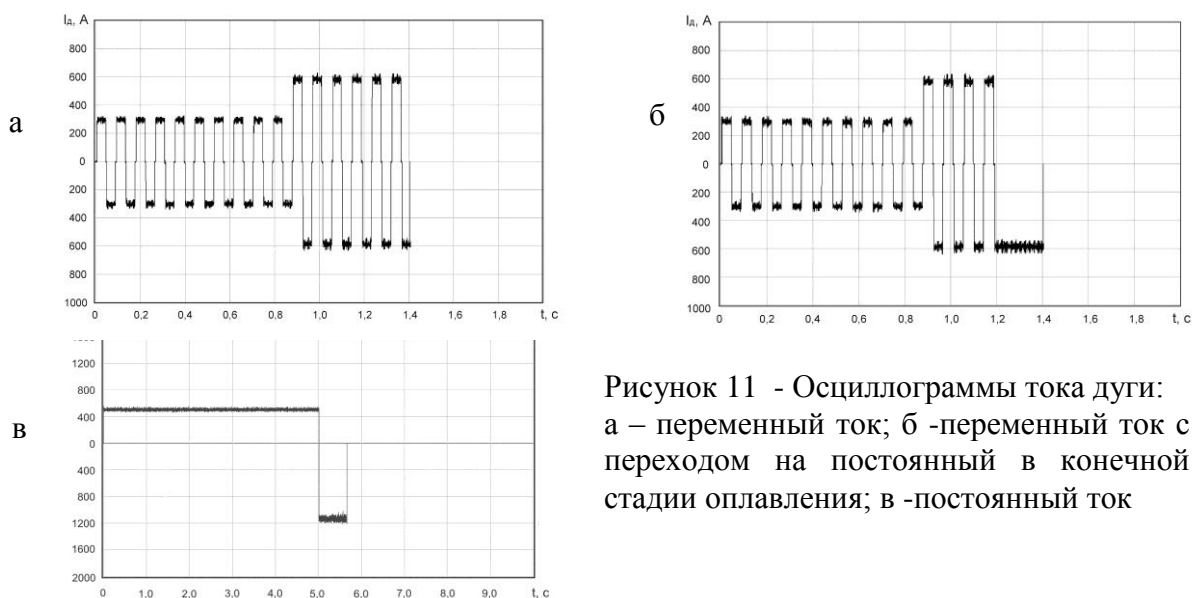


Рисунок 11 - Осциллограммы тока дуги: а – переменный ток; б -переменный ток с переходом на постоянный в конечной стадии оплавления; в -постоянный ток

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 P10-821H 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, датчиком усилия осадки UU-1T фирмы Dacell;

- разработано программное обеспечение в операционной системе Linux;
- система компьютерного управления снабжена встраиваемым 15" LCD монитором ET1537L-6C с сенсорным экраном фирмы Elo Touch Solutions.

Четвёртая глава посвящена разработке технологии стыковой сварки дугой низкого давления в поперечном магнитном поле трубных переходников из алюминиевого сплава АМг3 с титановым сплавом ОТ4 диаметром 70 мм.

Разработана конструкция стыка трубного переходника АМг3-ОТ4 с проходным сечением $d_y=60$ мм и определены оптимальные геометрические размеры трубных заготовок из АМг3 и ОТ4:

- толщина стенки трубного переходника в зоне стыка выбрана, исходя из условия равнопрочности переходника и трубы из АМг3 при статическом растяжении; при толщине стенки трубы из АМг3 равной 2 мм толщина стенки переходника в зоне стыка должна быть не менее 4 мм;

- толщина стенок трубных заготовок выбрана, исходя из условий формирования сварных соединений по схеме сваркопайки и ограничения температуры торца из сплава ОТ4 значением $850...1000^{\circ}\text{C}$.

Регулирование температуры торцов труб из АМг3 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 и необходимости механической доработки сварных соединений толщины стенок трубных заготовок из АМг3 и ОТ4 выбраны соответственно 5 и 8 мм (рис. 12).

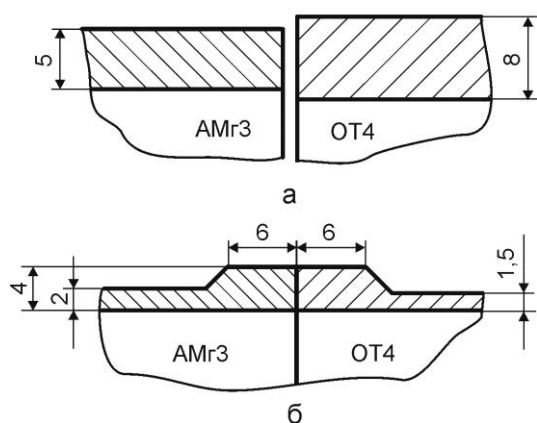


Рисунок 12 - Толщина стенок в зоне стыка трубных заготовок (а) и переходника (б)

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, повысить стабильность процесса формирования соединений.

Сварка трубных заготовок из АМг3 и ОТ4 выполняется на постоянном токе при непрерывном горении дуги (рис. 13). 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 в режиме анода. Оплавление торца трубы из АМгЗ в режиме анода улучшает равномерность формирования на нем слоя жидкого металла.

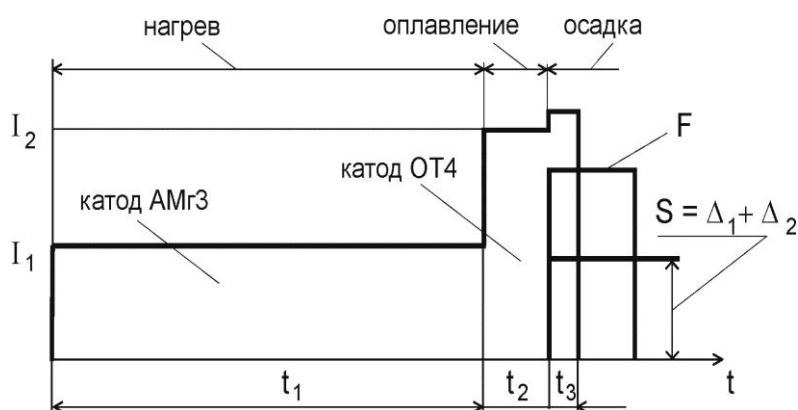


Рисунок 13 – Циклограмма процесса сварки:

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

В таблице 1 приведен режим сварки, а на рис. 14 внешний вид сварных соединений трубных заготовок АМгЗ+ОТ4 диаметром 70 мм.

Таблица 1 - Параметры режима 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

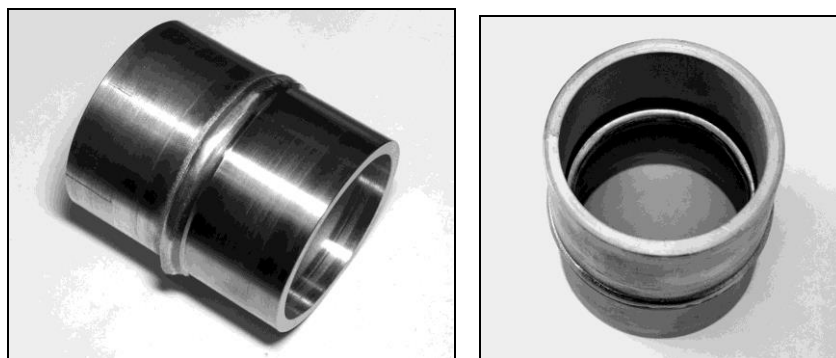


Рисунок 14 - Внешний вид сварного соединения трубных заготовок АМг3+ОТ4

Исследована структурная и химическая неоднородность сварных соединений с использованием световой и растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа. На рис. 15 приведена макро- и микроструктура сварных соединений.

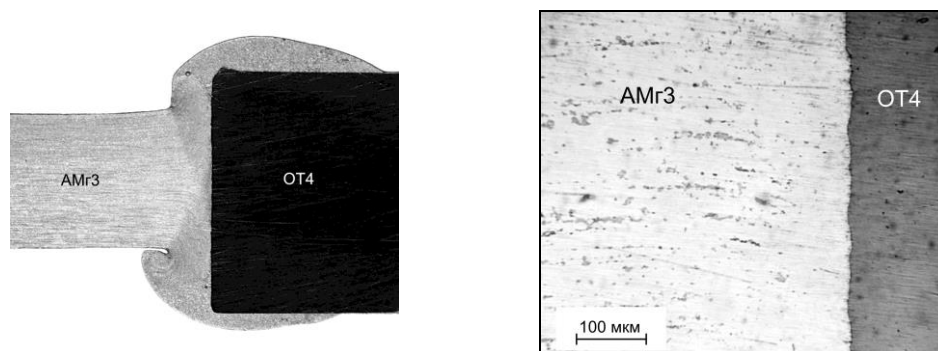


Рисунок 15 - Макро- (а) и микроструктура (б) сварного соединения

В зоне стыка в алюминиевой части сварного соединения наблюдается мелкозернистая структура без каких-либо дефектов, характерных для литой структуры. Химический состав металла вблизи границы соединения со стороны алюминиевой части соответствует составу сплава АМг3, а со стороны титановой части – составу сплава ОТ4. 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 (табл. 2). Такой уровень прочности сварного соединения может обеспечить равнопрочность переходника с трубой из сплава АМг3, если толщину стенки в зоне стыка сделать в 1,5 раза больше толщины стенки трубы из АМг3. При статическом изгибе образование трещины происходит в сплаве АМг3 (рис. 16).

Таблица 2 - Результаты испытаний сварных соединений на статическое растяжение и изгиб

Тип образца	Предел прочности, МПа	Угол изгиба, град.
Основной металл АМгЗ	<u>229-231</u> 230	180
Сварное соединение АМгЗ+ОТ4	<u>174-186</u> 182	<u>120-132</u> 127



Рисунок 16 - Испытания сварных соединений на статический изгиб

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

Герметичность соединений не хуже $10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$.

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 $B=0...200$ 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 полуволн, 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 АМгЗ и ОТ4 диаметром 70 мм. Сварка выполняется на постоянном токе при непрерывном горении дуги. На стадии нагрева катод дуги располагается на торце трубы из АМгЗ, 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 АМгЗ в режиме анода.

9. Исследована структурная и химическая неоднородность сварных соединений АМгЗ+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 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. 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.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Сидякин В.А., Люкс Д.И. Стыковая сварка труб электрической дугой низкого давления в поперечном магнитном поле // Сварочное производство. 2014. № 7. С. 13-19.
2. Сидякин В.А, Люкс Д.И. Установка для стыковой сварки трубных переходников дугой низкого давления в поперечном магнитном поле и инверторным источником питания дуги // Технология машиностроения. 2015. № 2. С. 25-29.
3. Люкс Д.И., Сидякин В.А, Пономарев К.Е. Стыковая сварка дугой низкого давления трубного переходника из разнородных сплавов АМгЗ+ОТ4 диаметром 70 мм // Сварочное производство. 2015. № 3. С. 29-33.
4. V.A. Sidyakin & D.I. Lyuks. Butt welding of pipes with a low-pressure electric arc in a transverse magnetic field // Welding International. Volume 29, Issue 7, July 2015, pages 548-553.
5. V.A. Sidyakin, D.I. Lyuks & K.E. Ponomarev. Low-pressure arc butt welding of 70 mm diameter pipe adapters made of АМg3+ОТ4 dissimilar alloys // Welding International. Volume 30, Issue 3, March 2016, pages 232-235.

Статьи и материалы конференций:

6. Люкс Д.И., Сидякин В.А. Влияние поперечного магнитного поля на формирование соединений при стыковой сварке дугой низкого давления. Новые материалы и технологии – НМТ-2010. Материалы Всероссийской научно – технической конференции в 3 томах. Т 1. – М.: ИЦ МАТИ, 2010. С. 18.
7. Люкс Д.И. Разработка установки для изучения влияния поперечного магнитного поля на катодные процессы при стыковой сварке дугой низкого давления. XXXVII ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодёжной научной конференции в 8 томах. Москва, 5-8 апреля 2011г. М.: МАТИ, 2011. Т.8. С. 226.

8. Люкс Д.И. Измерение скорости движения катодного пятна дуги низкого давления по торцу труб в поперечном магнитном поле. XXXVIII ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодёжной научной конференции в 8 томах. Москва, 10-14 апреля 2012г. М.: МАТИ, 2012. Т.1. С. 292.
9. Люкс Д.И., Сидякин В.А. Исследование применения поперечного магнитного поля при стыковой сварке дугой низкого давления. Новые материалы и технологии – НМТ-2012. Материалы Всероссийской научно – технической конференции. Москва, 20 – 22 ноября 2012 г. – М.: МАТИ, 2012 – 410с. С. 29.
10. Люкс Д.И. Исследование условий равномерности нагрева торцов труб при стыковой сварке дугой низкого давления в поперечном магнитном поле. XXXIX ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодёжной научной конференции в 9 томах. Москва, 9-13 апреля 2013г. Т.1. С. 235-237.
11. Люкс Д.И. Применение постоянных магнитов для создания поперечного магнитного поля при стыковой сварке труб дугой низкого давления. XL ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодёжной научной конференции в 9 томах. Москва, 7-11 апреля 2014г. Т.1. С. 295-297.