

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»
Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент

Должность, место работы

Подпись И.О. Фамилия
« ____ » _____ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ М.А. Иванов

« ____ » _____ 2018 г.

Совершенствование технологии гибридной лазерно-дуговой сварки труб диаметром 1420 мм

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ)

Руководитель ВКР

Уланов А.М.,,

Подпись И.О., Фамилия
« ____ » _____ 2018 г.

Автор ВКР

магистрант группы П-246

_____ Булыгин Алексей
Александрович
« ____ » _____ 2018 г.

Нормоконтролёр
преподаватель

_____ Ю.В. Безганс
« ____ » _____ 2018 г.

Челябинск, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ.....	4
1.1 Анализ конструкции изделия.....	4
1.2 Материал изделия и его свариваемость.....	5
1.3 Условия эксплуатации изделия.....	5
2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	6
2.1 Базовый вариант технологического процесса.....	6
2.2 Проектируемый вариант технологического процесса.....	15
2.3 Выбор способа сварки.....	17
2.4 Выбор сварочных материалов.....	18
2.5 Расчет режимов сварки.....	18
2.6 Выбор сборочного и сварочного оборудования.....	21
2.6.1 Описание конструкции сборочной установки.....	21
2.6.2 Описание конструкции сварочной установки (стенда)....	23
3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ.....	25
3.1 Актуальность.....	25
3.2 Состояние вопроса исследования (литературный обзор).....	28
3.3 Цель и задачи исследования.....	41
3.4 План эксперимента.....	42
3.5 Методика обработки эксперимента.....	47
3.6 Результаты проведенных исследований.....	49
3.7 Выводы по разделу.....	52

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	54
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	57

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		2

ВВЕДЕНИЕ

Добыча и транспортировка углеводородов является основной отраслью экспорта Российской Федерации, при этом спрос на углеводороды растёт, а условия их добычи становятся всё суровее – происходит освоение морского дна и Арктического шельфа для добычи. Поэтому предъявляются всё более высокие требования к качеству трубопроводов. Традиционная технология производства труб большого диаметра заключается в формовке трубной заготовки и многодуговой сварки под флюсом. Данный способ сварки имеет свои недостатки – низкая производительность и большая погонная энергия, приводящая к разупрочнению основного металла, заставляют искать более эффективные способы производства. Таким способом производства является гибридная лазерно-дуговая сварка, которая является более производительной, а также позволяет получить более качественный шов. У данного способа сварки есть характерные дефекты – ввиду высоких скоростей охлаждения, пузырьки газа не успевают выйти из сварочной ванны и остаются в застывшем сварном шве в виде одиночных и протяженных газовых пор, кроме того, такие швы имеют высокую твердость, по сравнению с дуговой сваркой.

Целью данной работы является подбор оптимальных параметров сварки с целью нейтрализации указанных дефектов.

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		3

1 КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1 Анализ конструкции изделия

Изделие представляет собой стальную трубу (рисунок 1.1) с одним продольным сварным швом, диаметром 1420 мм, длиной 12000 мм и толщиной стенки 21,6 мм. Данная труба относится к группе труб большого диаметра.

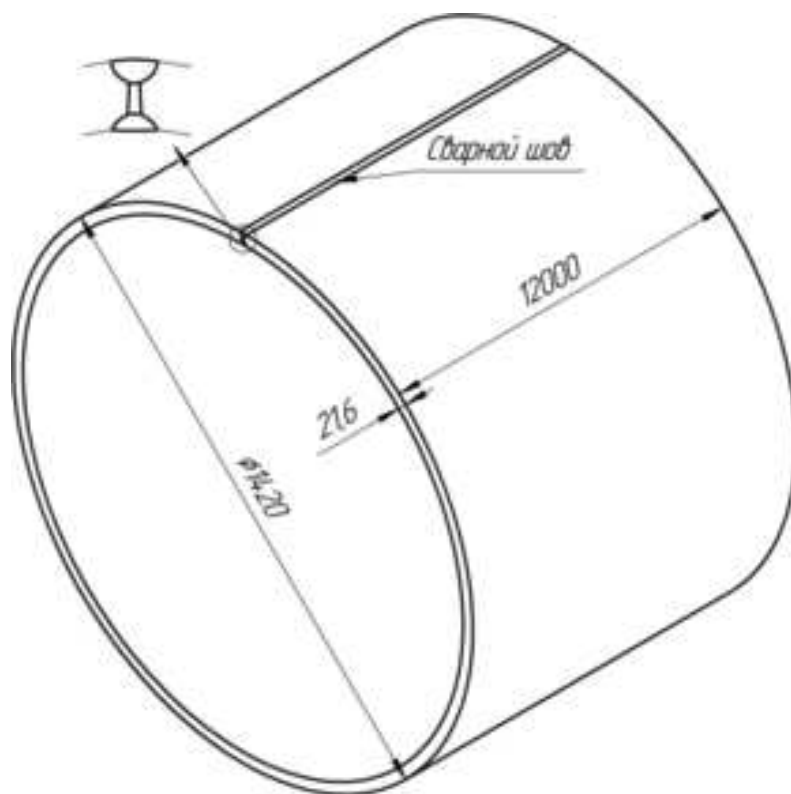


Рисунок 1.1 – Труба сварная прямошовная

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

1.2 Материал изделия и его свариваемость

Данная труба относится к классу прочности К60 и изготавливается из стали марки 10Г2ФБЮ, данная сталь является легированной и обладает улучшенной свариваемостью.

Таблица 1.1 – Химический состав материала в %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
0.08 - 0.13	0.15 - 0.35	1.6 - 1.8	до 0.3	до 0.035	до 0.03	до 0.3
V	N	Nb	Ti	Al	Cu	As
0.05 - 0.12	до 0.012	0.02 - 0.06	0.01 - 0.035	0.02 - 0.05	до 0.3	до 0.08

1.3 Условия эксплуатации изделия

Данная труба применяется в магистральных газопроводах на рабочее давление до 10,3 Мпа и предназначена для транспортировки некоррозионноактивных газов при температуре стенки трубопровода при эксплуатации не ниже минус 25 °С.

						Лист
					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

2.1 Базовый вариант технологического процесса

Производство сварных прямошовных труб большого диаметра начинается с проведения входного ультразвукового контроля на установке УЗК поступившего листового проката (листа) на наличие дефектов – вмятин, раковин, расслоений, рисок или царапин. В случае удовлетворительных результатов контроля, листовая прокат передается далее в технологический поток для осуществления контроля геометрических параметров на установке автоматизированного контроля геометрии листа. При помощи лазерных триангуляционных датчиков осуществляется измерение длины, ширины, толщины, серповидности и волнистости (плоскостности) листа.

В случае прохождения контроля геометрии, лист передается далее в технологический поток на проведение дробеметной очистки – подачи дроби (абразивного материала) кучным потоком на обрабатываемую поверхность дробеметной турбиной в специальной изолированной установке. Таким образом очищается поверхность металла от окалины, ржавчины, облоя. Очистка происходит на большой скорости благодаря направленному попаданию на большой скорости дроби (абразивного материала). После проведения дробеметной очистки, лист маркируют (наносят порядковый номер трубы) с помощью маркировочной машины путём аэрозольного распыления и задают далее в поток. Лист, не прошедший контроль геометрии, выводится из технологического потока на участок вывода дефектного листа из потока, далее лист может быть отправлен на вторичную переработку с менее требовательными условиями.

После этого, один или несколько листов отправляют на специальный участок изготовления технологических пластин (выводных планок). Этот этап включает в себя вырезку пластин газовой резкой из листа и фрезерование кромок пластин под сварку. Газовую вырезку пластин

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

выполняют с применением природного газа и кислорода. При этом толщина и марка стали листа, применяемого для изготовления пластин, должны соответствовать толщине и марке стали трубы, к которой данные пластины будут привариваться.

После резки пластины передаются на фрезерование с применением фрезерных станков с ЧПУ.

После изготовления технологических пластин осуществляется их приварка к листу при производстве стальных электросварных прямошовных труб. Станция осуществляет приварку четырех технологических пластин по углам листа в продольном направлении с помощью полуавтоматической сварки в среде газа (рисунок 2.1).

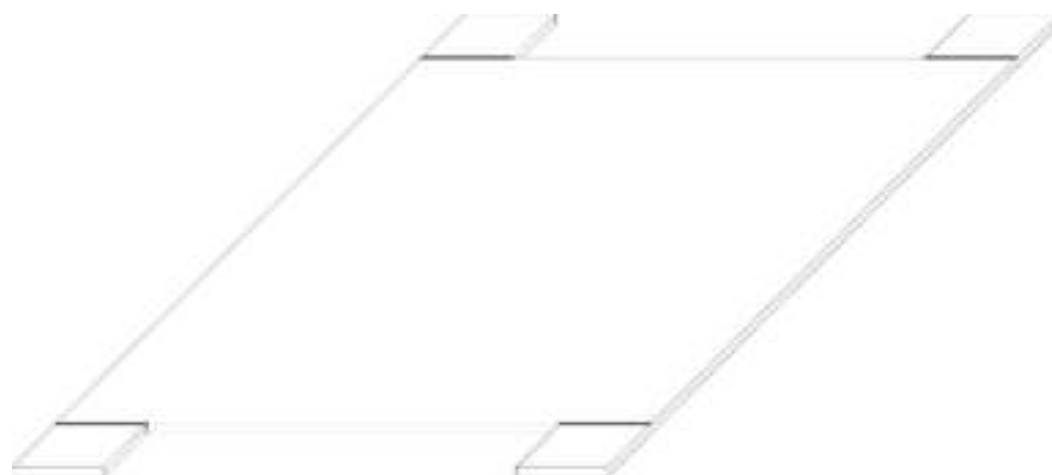


Рисунок 2.1 – Лист с приваренными технологическими планками

Затем осуществляют подготовку (фрезерование) продольных кромок листа под сварку на кромкофрезерной установке в автоматическом режиме (рисунок 2.2).

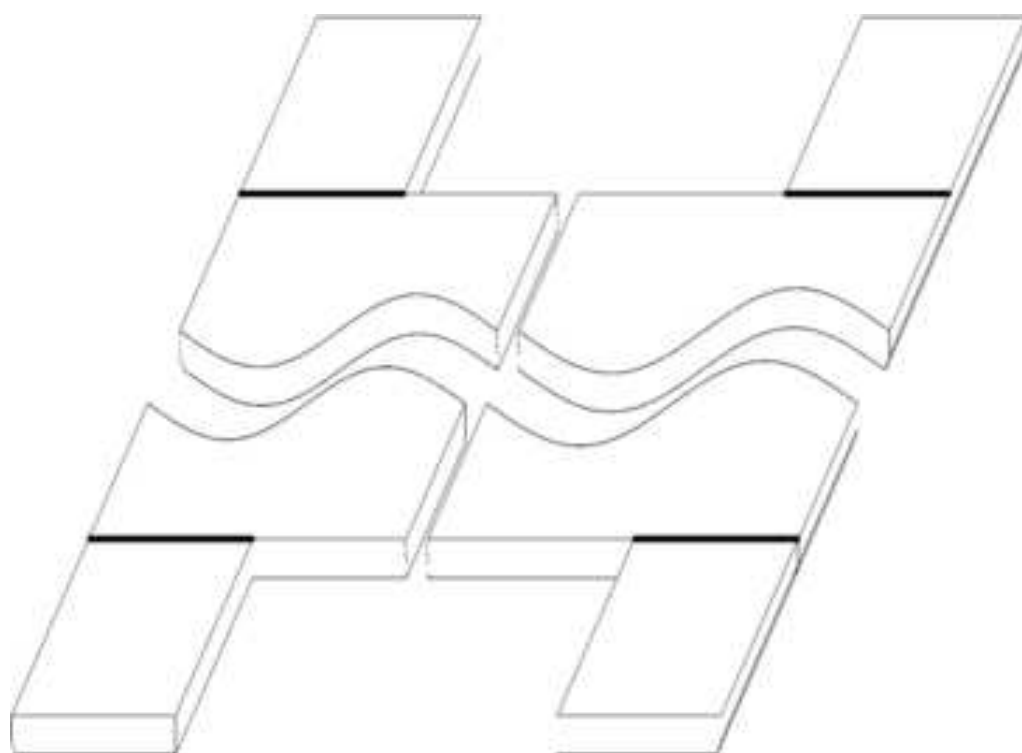


Рисунок 2.2 – Лист с приваренными технологическими планками и подготовленный под сварку

Затем осуществляют подгибку прикромочной зоны листа для получения на них профиля (радиуса) заготовки с помощью кромкогибочного прессы. При этом, процесс гибки кромок происходит одновременно с двух сторон с подачей в зону подгибки шагами (рисунок 2.3).

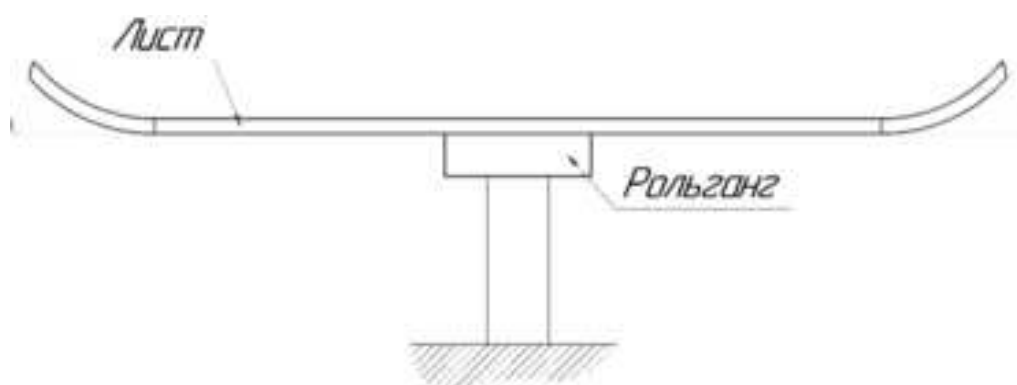


Рисунок 2.3 – Лист после операции подгибки кромок

Затем производят формовку листовой заготовки на трубоформовочном прессе – лист подается в зону прессы с помощью подающего рольганга.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Корректировка положения листа осуществляется боковыми манипуляторами. Пресс осуществляет вдавливание с установленным радиусом (рисунок 2.4)

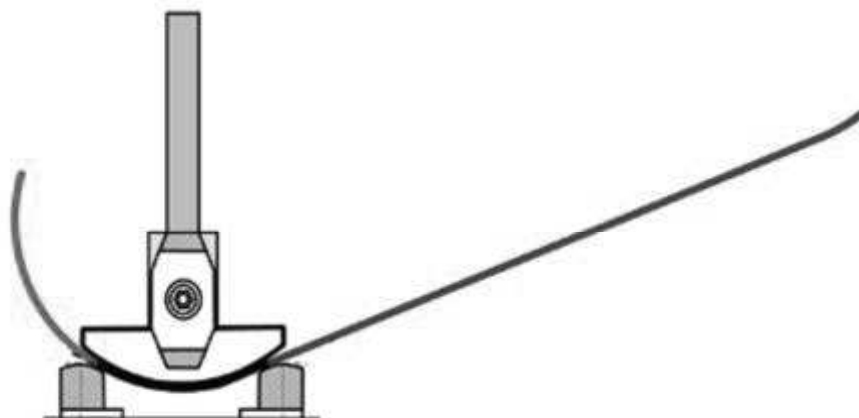


Рисунок 2.4 – Пошаговая формовка трубы

Затем пресс поднимается, лист опускается на рольганги, манипуляторы корректируют положение листа, и операция повторяется (рисунок 2.5)

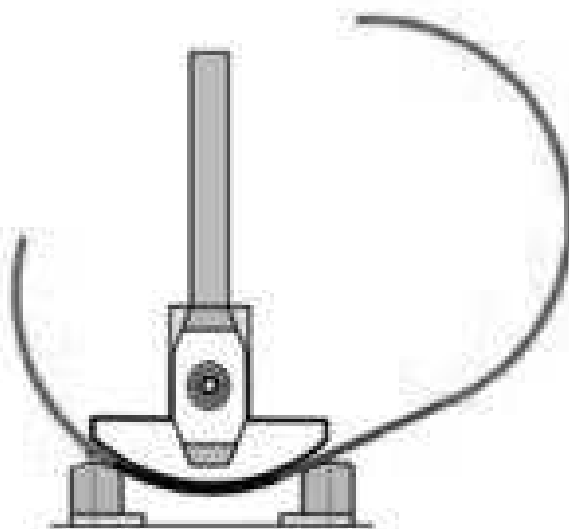


Рисунок 2.5 – Формовка правой половины трубы

Полностью сформированная заготовка представлена на рисунке 2.6.

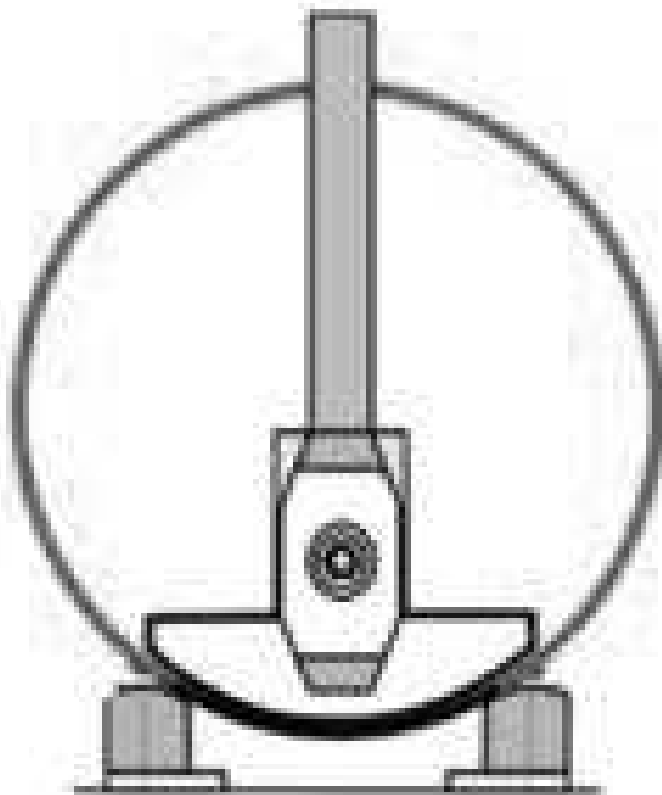


Рисунок 2.6 – Трубная заготовка после формовки

После этапа формовки, сформированная трубная заготовка подается на сборочно-сварочный стан (рисунок 2.7), на котором происходит смыкание кромок с помощью прижимных роликов (рисунок 2.8) и наложение методом полуавтоматической дуговой сварки технологического шва (рисунок 2.9) на свариваемые кромки с целью избегания их коробления при последующих сварочных операциях. Процесс сварки начинается и заканчивается на выводных технологических пластинах.

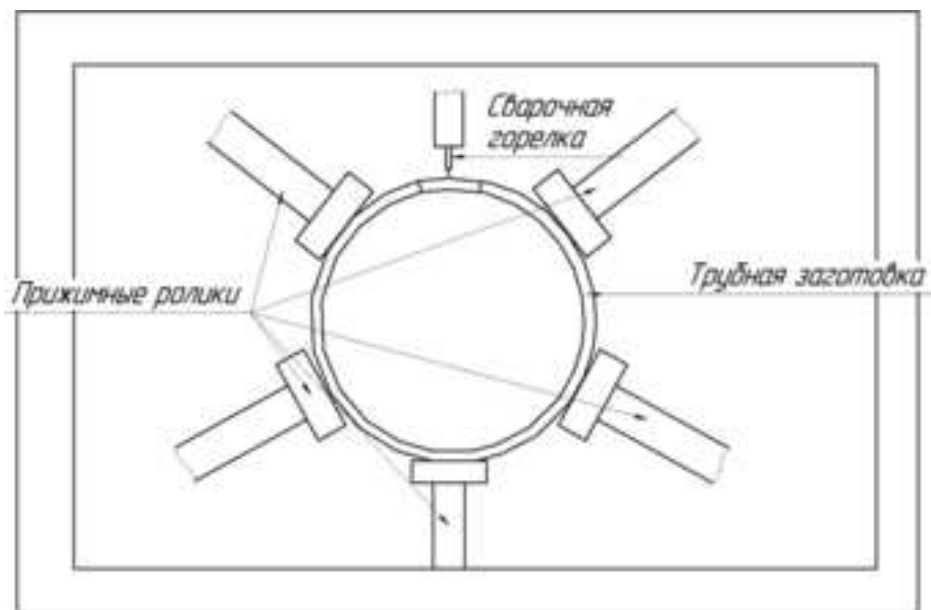


Рисунок 2.7 – Сборочно-сварочный стан

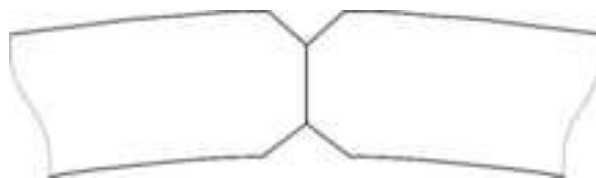


Рисунок 2.8 – Кромки заготовки после формовки

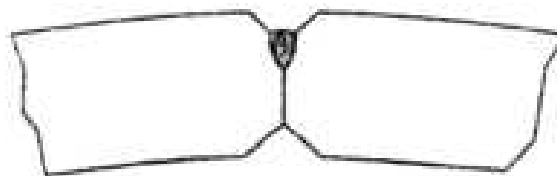


Рисунок 2.9 – Кромки после сборки (нанесения технологического шва)

Следуя в технологическом потоке, трубная заготовка поступает на ремонтную площадку для проведения визуально-измерительного контроля технологического шва, и в случае необходимости, ремонта.

Далее трубная заготовка поступает на стан для сварки рабочего шва. Стан представляет собой установку для гибридной лазерно-дуговой сварки (ГЛДС), осуществляющей одновременное воздействие сварочной дугой плавящимся электродом и лазерным лучом (рисунок 2.10)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

сварки осуществляют ремонт шва. Затем трубную заготовку отправляют на стан для очистки от шлаковой корки.

Затем трубную заготовку отправляют на участок обрезки выводных технологических пластин. Обрезку выполняют методом плазменной резки, для этого трубную заготовку поворачивают сварным швом в положение на 6 часов, таким образом, резка выполняется по сварному шву, соединяющему пластины и тело трубной заготовки.

Следуя в технологическом потоке, трубная заготовка поступает на участок для автоматизированного контроля геометрических параметров труб. Измеряется наружный и внутренний диаметр, максимальная овальность, максимальная локальная кривизна и общая кривизна и отклонения от правильной цилиндрической формы.

Затем заготовка подается на участок проведения автоматизированного технологического ультразвукового контроля сварного шва. В случае необходимости уточнения местоположения и характера дефектов, трубная заготовка отправляется на рентгенотелевизионный контроль. Затем труба отправляется на ремонтный участок с целью ликвидации обнаруженных дефектов сварного шва. После ремонта шва, ультразвуковой контроль проводится повторно с целью проверки наличия ранее обнаруженных дефектов.

Затем заготовка подается на участок экспандирования труб с целью получения нормативных геометрических параметров труб, обеспечения требования нормативной документации в величине наружного диаметра, овальности, цилиндричности, отклонению по профилю околошовной зоны и кривизны.

Затем, после экспандирования проводят контроль геометрических параметров трубы на участке измерительного стенда экспандера, находящегося на технологической цепочке после участка экспандирования

										Лист
										14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2018.205.00 ПЗ					

труб. В случае превышения допусков, труб отправляют на повторное экспандирование.

После повторного экспандирования трубу направляют на проведение гидравлического контроля с последующим проведением сдаточного ультразвукового контроля.

Далее в технологическом потоке, трубу передают на установку для снятия усиления внутреннего и наружного шва методом шлифовки.

После снятия усиления проводят механическую обработку торцов трубы путём токарной обработки на торцевой машине для последующей сварки кольцевых швов при монтаже трубопроводов.

Затем проводят предварительную приемку труб – контролер осматривает наружную и внутреннюю поверхность трубы и измеряет геометрические параметры трубы и сварного шва, а также торцов трубы. В случае обнаружения отклонений от нормы, труба отправляется на повторное экспандирование и торцевание.

После повторного экспандирования труба проходит повторный рентгенотелевизионный контроль и гидростатическое испытание. Затем проводят окончательную приемку труб и маркировку [1].

2.2 Проектируемый вариант технологического процесса

Этапом производства, на который направлена данная работа является этап 11 (остальные этапы являются неизменными), а именно способ сварка рабочего шва методом гибридной лазерно-дуговой сварки (ГЛДС) (рисунок 2.14).

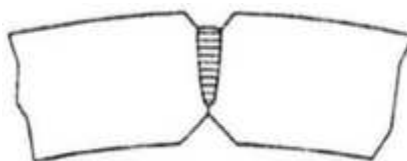


Рисунок 2.14 – Свариваемые кромки с рабочим (корневым) швом

Суть проектируемого варианта технологического процесса заключается в том, что в способе лазерно-дуговой сварки, включающем одновременное воздействие на свариваемую поверхность 5 (рисунок 2.15) в среде защитного газа 4, с образованием общей сварочной ванны 3, лазерного луча 1, сфокусированного над кромками свариваемой поверхности, и дуги плавящегося электрода 2 в виде проволоки, поступающей из сварочной горелки, при этом лазерный луч фокусируют перед точкой воздействия дуги на нормируемом заданном расстоянии, кроме того, лазерный луч и дуговую горелку наклоняют в противоположные стороны относительно нормали к поверхности свариваемых кромок.

Отличием от базовой технологии является то, что расстояние между центром сфокусированного пятна лазерного излучения и точкой дугового контакта нормируется и составляет 10 - 15 мм, при этом лазерный луч наклоняют в сторону, противоположную направлению движения кромок свариваемой поверхности на нормируемый угол $20 - 25^\circ$ относительно нормали к поверхности свариваемых кромок, а дуговую горелку наклоняют в сторону направления движения кромок свариваемой поверхности на нормируемый угол $30 - 35^\circ$ относительно нормали к поверхности свариваемых кромок [2].

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

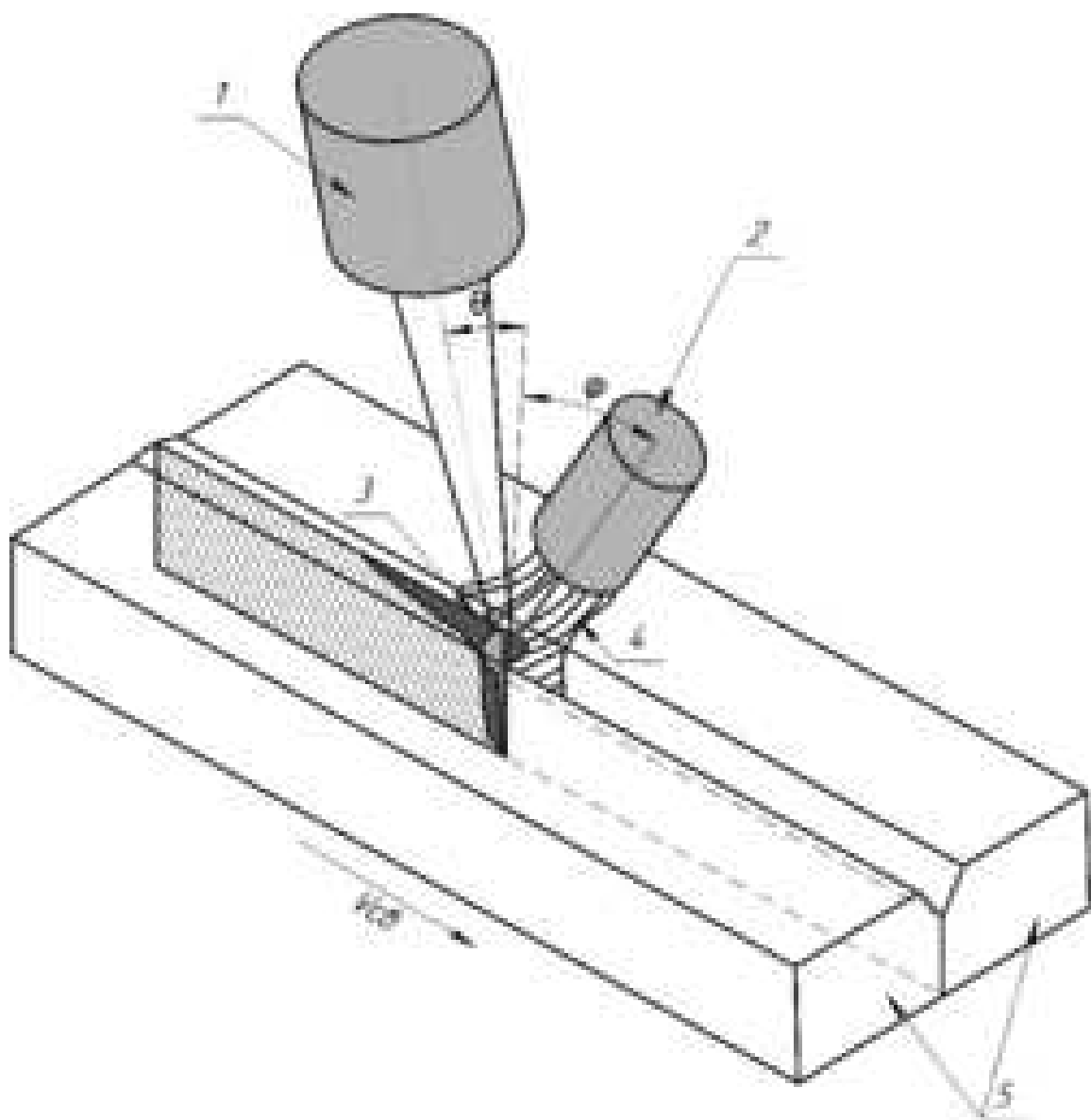


Рисунок 2.15 – Схема процесса ГЛДС

2.3 Выбор способа сварки

Способ заключается в проведении гибридной лазерно-дуговой сварки, включающей одновременное воздействие на свариваемую поверхность в среде защитного газа, с образованием общей сварочной ванны, лазерного луча, сфокусированного над кромками свариваемой поверхности, и дуги плавящегося электрода в виде проволоки, поступающей из сварочной горелки, при этом лазерный луч фокусируют перед точкой воздействия дуги на нормируемом заданном расстоянии, кроме того, лазерный луч и дуговую

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2018.205.00 ПЗ

Лист

17

горелку наклоняют в противоположные стороны относительно нормали к поверхности свариваемых кромок.

2.4 Выбор сварочных материалов

Свариваемая деталь – 10Г2ФБЮ, сварочная проволока – СВ-08Г2С (диам. 1,6 мм), защитный газ – смесь Ar (15%) и CO₂ (85%).

2.5 Расчет режимов сварки

К параметрам гибридной лазерно-дуговой сварки относятся:

- 1 мощность лазерного луча;
- 2 скорость сварки;
- 3 фокусное расстояние линзы;
- 4 диаметр пятна лазера;
- 5 угол наклона лазерного луча;
- 6 угол наклона проволоки;
- 7 сила тока дуги;
- 8 напряжение дуги;
- 9 вылет сварочной проволоки;
- 10 расстояние между дугой и лазером.

- Мощность лазерного луча назначается экспериментально, в зависимости (рисунок 2.16) от скорости сварки, достаточная для сквозного проплавления) – 25 кВт.

										Лист
										18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2018.205.00 ПЗ					

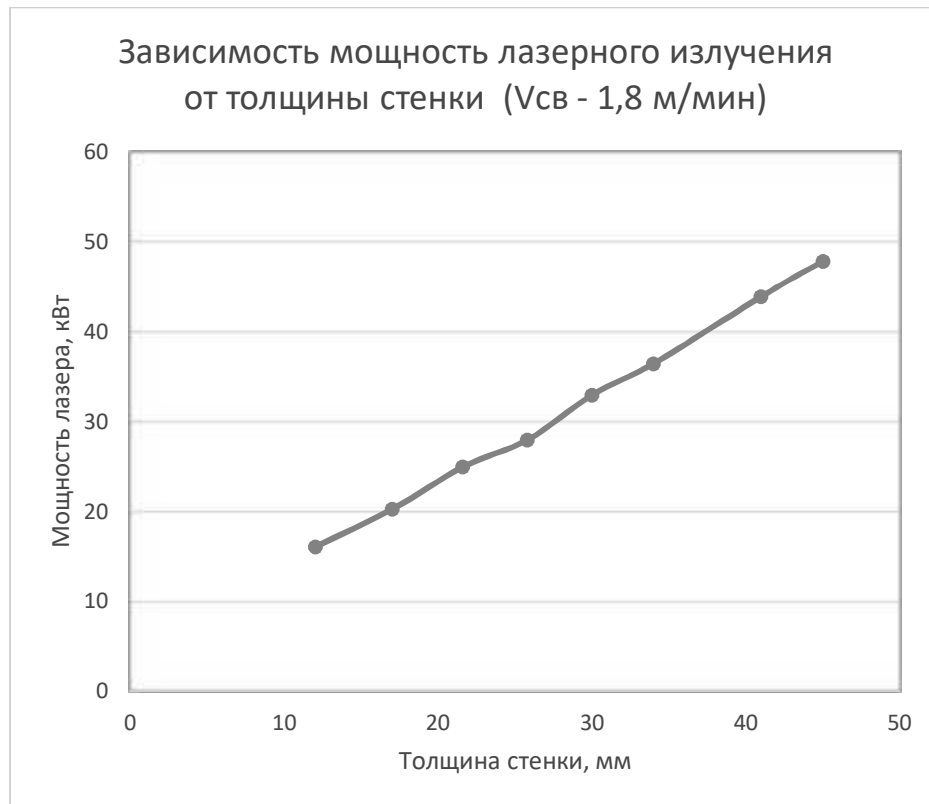


Рисунок 2.16 – Зависимость мощности лазерного луча от скорости сварки

- Скорость сварки назначается экспериментально, взаимосвязана с мощностью лазера, зависит от механических свойств и класса стали, конструктивных особенностей оборудования – 1,8 м/мин. При увеличении скорости сварки необходимо увеличивать мощность лазерного луча, силу тока и напряжения и вылет с целью обеспечения эффективного проплавления.
- Фокусное расстояние линзы назначается экспериментально, в зависимости от необходимого диаметра пятна лазера. Измеряется от лазерной головки до свариваемой поверхности – 598 мм.
- Диаметр пятна лазера подбирается в зависимости от толщины свариваемого изделия, зазора между кромками и требуемых размеров сварочной ванны) – 02 – 0,4 мм.
- Угол наклона лазерного луча подбирается экспериментально исходя из требуемой глубины проплавления, качества сварного шва и механических свойств, необходимости обеспечения синергетического эффекта – 20°.

- Угол наклона проволоки подбирается экспериментально исходя из требуемой глубины проплавления, качества сварного шва и механических свойств) – 30°.
- Диаметр проволоки назначается следующим образом - исходя из необходимости при сварке рабочего (корневого шва) методом гибридной лазерно-дуговой сварки оставить кромки невредимыми, диаметр проволоки должен быть достаточным для проплавления на глубину 5-7 мм, при этом диаметр проволоки должен быть достаточным для проведения сварки деталей другого типоразмера – удовлетворять требованиям универсальности. Поэтому назначается диаметр проволоки $d = 1,6$ мм. Назначим требуемую глубину проплавления $H = 5 \dots 7$ мм.
- Рассчитаем сварочный ток (1):

$$I_{св} \approx (80 - 90) \times H \quad (1)$$

$$I_{св} \approx 420 \dots 470 \text{ A}$$

- Рассчитаем напряжение дуги (2):

$$U_{д} = 20 + \frac{50 \times 10^{-3}}{d_3^{0,5}} I_{св} \pm 1 \quad (2)$$

$$U_{д} = 20 + \frac{50 \times 10^{-3}}{1.26} 420 \pm 1 \approx 37 \text{ В}$$

При расчетном значении напряжении, ширина получившегося сварного шва превышает допустимую на 25 – 40%, поэтому назначим напряжение 22...27 В.

- Вылет сварочной проволоки назначается в зависимости от диаметра проволоки и силы тока и подтверждается экспериментально – 13 мм (3):

$$L_3 \approx 10 \times d_3 \quad (3)$$

$$L_3 \approx 1,3 \text{ см}$$

- Расстояние между дугой и лазером назначается из конструктивных ограничений сварочной установки, требуемой глубины проплавления и требуемых механических свойств) – 12 мм.

Исходя из разделки кромок и необходимой глубины проплавления – назначается режим для дуги – дуга переплавляет основной металл на глубину 5-7 мм, при этом валик не должен выходить за свариваемые комки для стабильной работы системы слежения за кромкой. Форма разделки представлена ниже - технологический шов уже нанесен (рисунок 2.17).

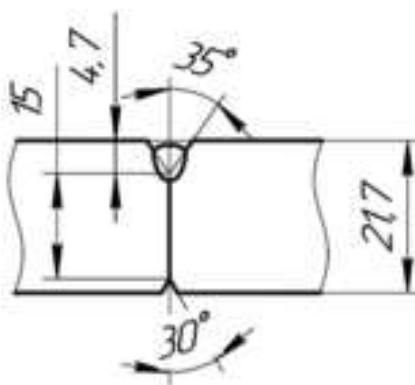


Рисунок 2.17 – Форма разделки

2.6 Выбор сборочного и сварочного оборудования

2.6.1 Описание конструкции сборочной установки

В данной работе рассматривается технология сварки рабочего шва методом ГЛДС – сборочная установка представляет собой портал с высокоточными рельсами для перемещения и вращений трубной заготовки с установленной на них телегой с поворотными роликами, на портале установлена сварочная система (рисунок 2.18).

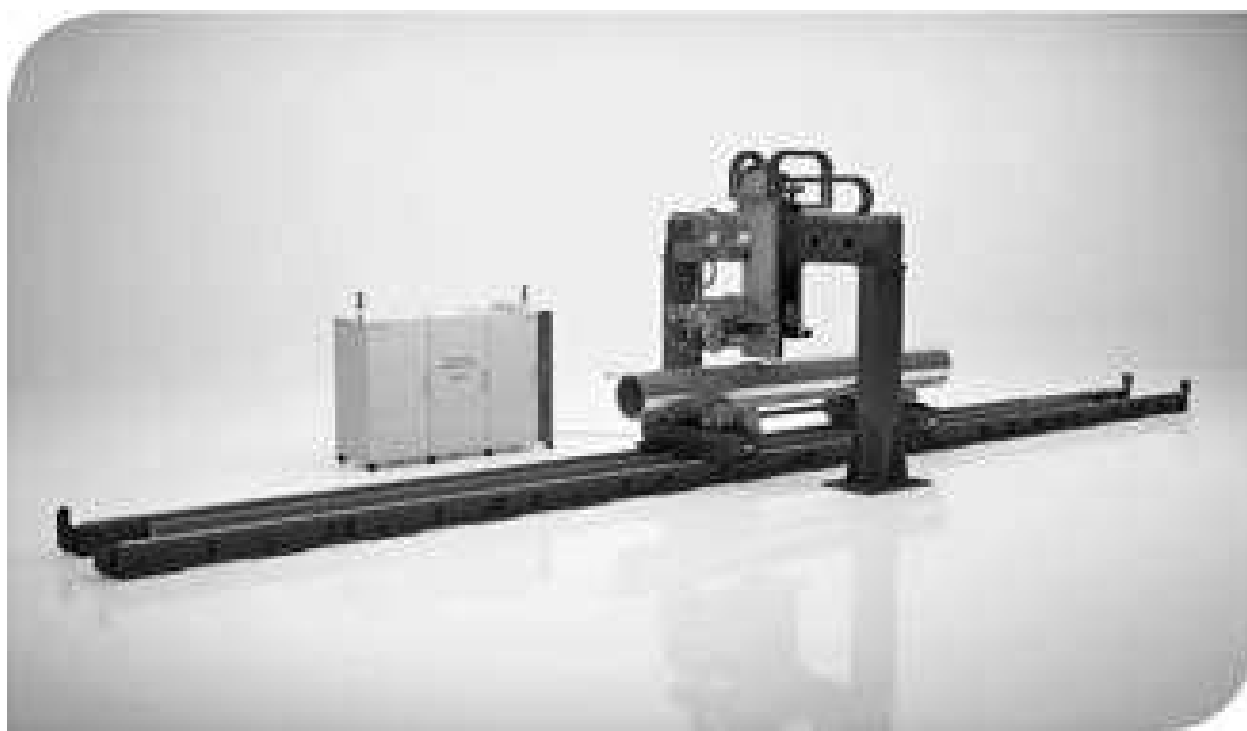


Рисунок 2.18 – Портальная установка для гибридной лазерно-дуговой сварки

Таблица 2.1 – Технические характеристики портальной установки для гибридной лазерно-дуговой сварки

Мощность волоконного лазера, кВт	от 10 до 50
Максимальная скорость подачи присадки, м/мин	1-15
Ширина зоны слежения, мм	62
Диаметр свариваемых заготовок, мм	500-1500
Скорость перемещения по оси X, мм/мин	0-4000
Длина обечайки/трубы (без учёта выводных планок), мм	2000-5000
Диаметр сварочной проволоки, мм	1,2-2,4
Регулировка MIG/MAG горелок по горизонтали относительно лазерного луча, мм	0-35
Наклон оптической головы (ось вращения, градусы)	0-35

Конструкция портальной установки представлена на рисунке 2.19.

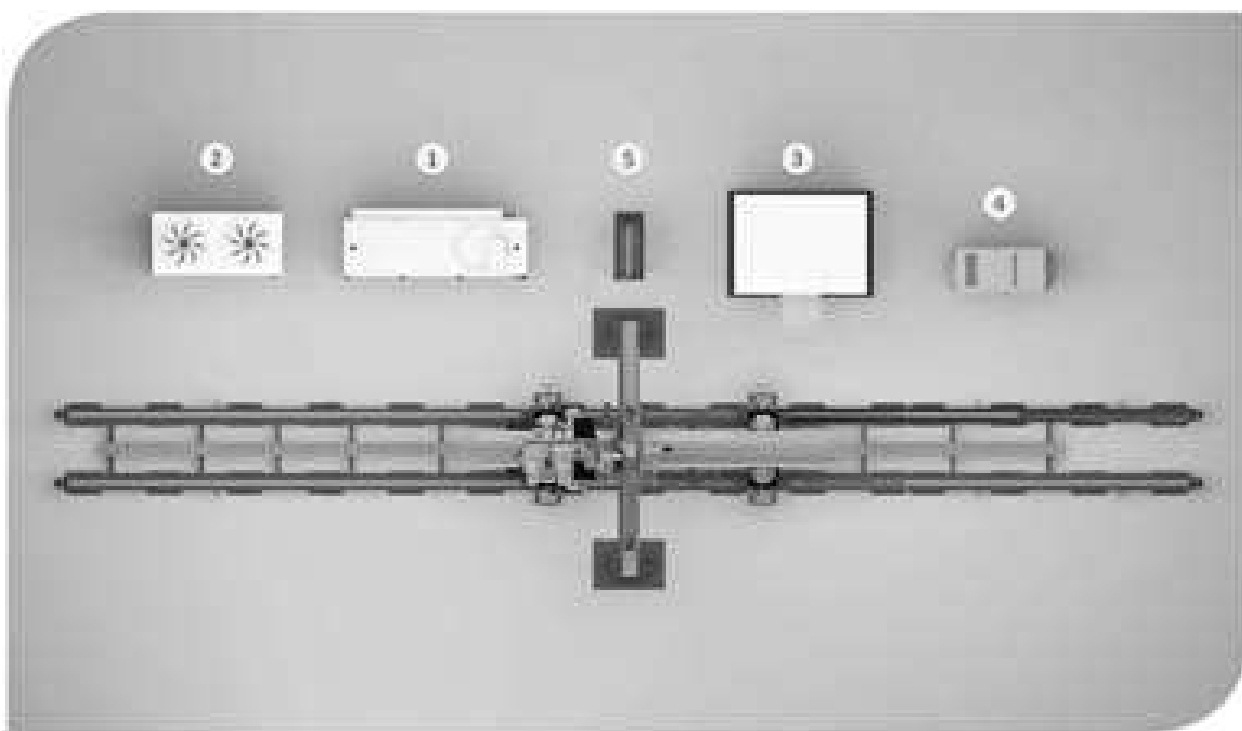


Рисунок 2.19– Портальная установка для ГЛДС

где: 1 – волоконный лазер, 2 – система охлаждения лазера, оптическая голова для сварки IPG (не отмечена на схеме), подачник проволоки (не отмечен на схеме), датчик слежения (не отмечен на схеме), 3 – фильтровентиляционная установка, 4 – компрессор, портал с координатной системой (не отмечен на схеме), система MIG/MAG сварки (не отмечена на схеме), 5 – дуговой аппарат, система управления (не отмечена на схеме), консоль оператора (не отмечена на схеме).

2.6.2 Описание конструкции сварочной установки (стенда)

Сварочная установка представляет из себя оптическую лазерную сварочную голову, размещенную комбинированно со сварочной горелкой (рисунок 2.20).

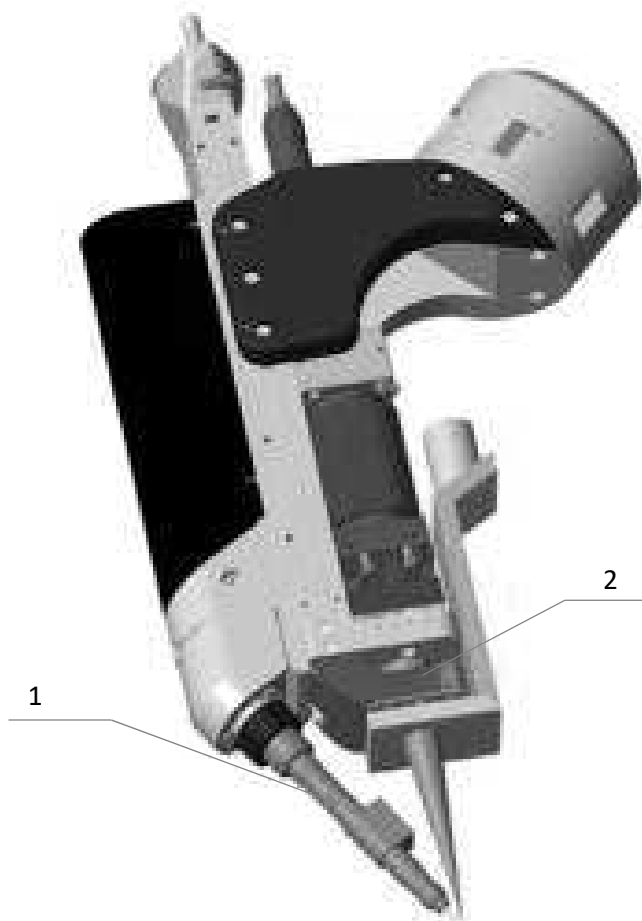


Рисунок 2.20 – Установка для гибридной лазерно-дуговой сварки
где: 1 – дуговая сварочная горелка, 2 – оптическая лазерная голова

3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

3.1 Актуальность

Развитие технологии производства труб большого диаметра (ТБД) зависит от требований, которые предъявляет потребитель. К сожалению, традиционные месторождения нефти и газа истощаются, в то время, как рынок сбыта ТБД продолжают расти. В связи с этим компании-производители топливно-энергетического комплекса прибегают к добыче нефти и газа в новых, более сложных к адаптации, условиях: пониженная температура окружающей среды, присутствие сероводорода в окружающей среде, а также высокое давление на стенки трубы и воздействие морской воды. Кроме того, к трубам, производимыми для эксплуатации в условиях морского дна, предъявляют повышенные требования.

Традиционная технология производства труб большого диаметра заключается в пошаговой формовке трубной заготовки из листового проката с последующей фиксацией кромок трубы (сборкой) дуговой сваркой с последующей многодуговой сваркой под флюсом (МДСФ) внутреннего и наружного шва (см. п. 2.1). Данная технология не отличается высокой производительностью ввиду низкой скорости МДСФ.

Недостатками традиционной технологии также является то, что при производстве толстостенных труб большого диаметра (ТБД) (от 25 мм и более) требуется большая погонная энергия для проплавления стенки на всю глубину, что ухудшает структуру и механические свойства околошовной зоны., кроме того, сварку приходится вести в несколько проходов, что значительно снижает производительность.

Ввиду необходимости соответствия указанным суровым условиям и нивелирования указанных недостатков принято решение добавить дополнительную технологическую операцию – сварку с использованием лазерного луча корневого шва ТБД.

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

Целью применения лазерной сварки (гибридной лазерно-дуговой сварки) является повышение производительности процесса изготовления труб, снижение погонной энергии сварки, уменьшение зоны термического влияния, повышение механических свойств металла шва и околошовной зоны, уменьшение уровня остаточных напряжений, улучшение геометрии трубы и формы шва.

Высокая концентрация излучения, присущая лазерной сварке (10^{10} - 10^{12} Вт/см²), обеспечивает минимальную ширину шва, исчисляемую единицами миллиметров и глубину проплавления до 20 мм. Это обуславливает, как минимум, на порядок снижение погонной энергии сварки и уменьшение зоны термического влияния более чем в 2 раза и, как следствие - минимальные термическую деформацию околошовной зоны и уровень остаточных напряжений, стабильность механических свойств за счет уменьшения разупрочнения основного металла.

С увеличением толщины стенки и диаметра трубы лазерная/лазерно-дуговая сварка позволяет сваривать трубы без существенного роста затрат ввиду того, что, в первую очередь увеличивается высота рабочего шва, выполненного с применением луча.

Также, при использовании лазерного луча снижается расход флюса на 25 – 50%, расход сварочной проволоки снижается на 30 – 70%, расход электроэнергии снижается на 30 – 60%. К примеру, площадь сварного шва, полученного лазерной сваркой (ЛС) меньше площади шва МДСФ для трубы 1420*21,7 в 2,3 раза (рисунок 3.1)

										Лист
										26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2018.205.00 ПЗ					

канал проплавления неравномерно, что приведет к дефектам сварного шва в процессе его формирования.

Потому задача ликвидации газовых пор в сварном шве и высокой некомпенсируемой твердости является актуальной задачей.

3.2 Состояние вопроса исследования (литературный обзор)

В настоящее время, исследования в области лазерной сварки активно продолжаются, например, известная статья [3], в которой проводились исследования параметров режимов гибридной лазерно-дуговой сварки, а именно мощности лазерного луча, мощности сварочной дуги, расстояния между дугой и лазером на форму и размеры сварного шва. Данная статья позволяет установить лишь общие зависимости, без привязки каким-либо численным значениям, например, «увеличение мощности сварочной дуги приводит к увеличению ширины шва (рисунок 3.2)» ввиду того, что влияние оказывает достаточно большое количество факторов – химический состав свариваемой детали и присадочного материала, тип лазерного излучения, длина волны, диаметр фокального пятна, угол наклона луча относительно заготовки, расстояние между дугой и лазерным пятном, сила тока, напряжение дуги, угол наклона сварочной проволоки, её диаметр и вылет, скорость её подачи, наличие и химический состав защитного газа, его напор и даже степень разрежённости в области сварки. Поэтому данная статья является малоинформативной.

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

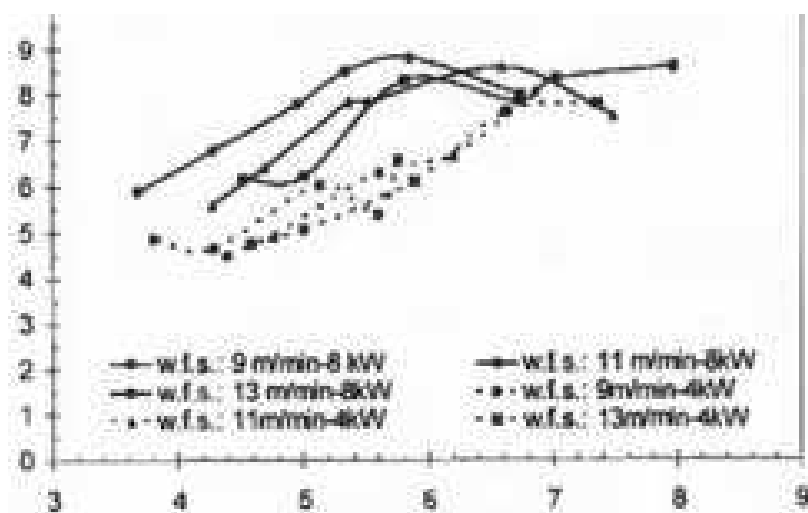


Рисунок 3.2 – Зависимость ширины шва, мм (ось ординат) от мощности дуги, кВт (ось абсцисс)

Известен доклад [4], на котором была представлена специализированная сварочная горелка, подсоединенная к лазерной оптической головке; в данную горелку уже интегрирована система подачи сварочной проволоки для осуществления дуговой сварки, а также система подачи защитного газа непосредственно в зону сварки. Как заявляют разработчики данной сварочной горелки (рисунок 3.3), данная горелка позволяет увеличить глубину проплавления лазерного луча. Недостатком данной сварочной горелки является ограничение максимально возможного расстояния между электрической дугой и лазерным лучом, а также угла её наклона, что может ограничить возможности гибридной лазерно-дуговой сварки.

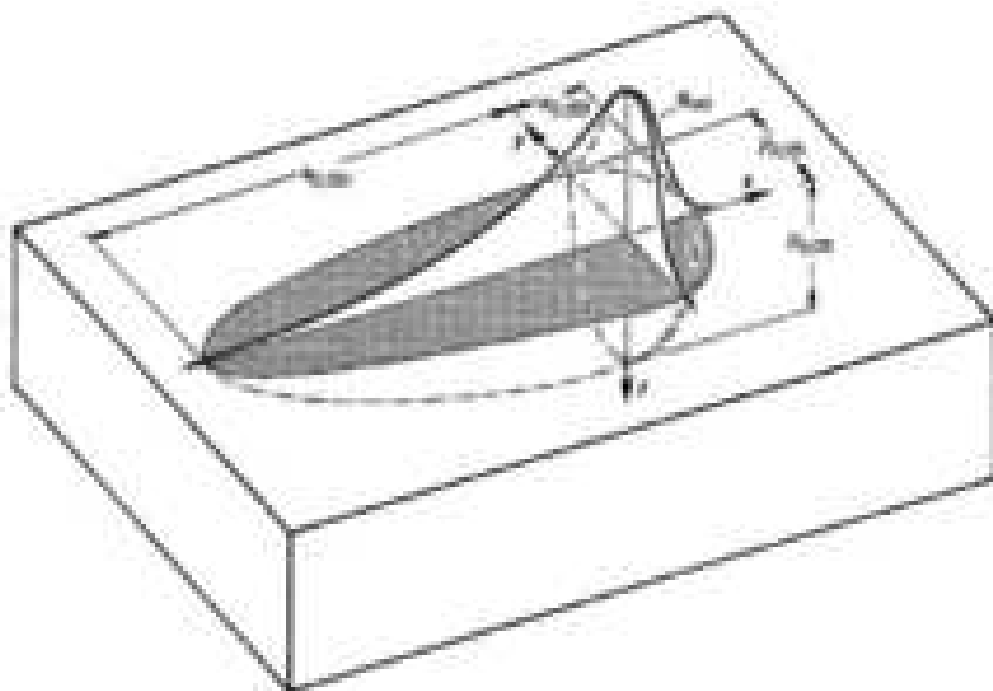


Рисунок 3.4 – Моделирование тепловложения ГЛДС

Данная идея (проводить индукционный подогрев) является перспективной, но только для производства негабаритных деталей, так как использование индукционного подогрева для производства крупногабаритных деталей, например, труб большого диаметра, нецелесообразно ввиду высоких затрат на реализацию данного проекта и его высокой себестоимости.

Известна статья [7], в которых были исследованы модели теплообмена и течения жидкого металла (рисунок 3.5) при сквозном проплавлении для лазерно-дуговой сварки.

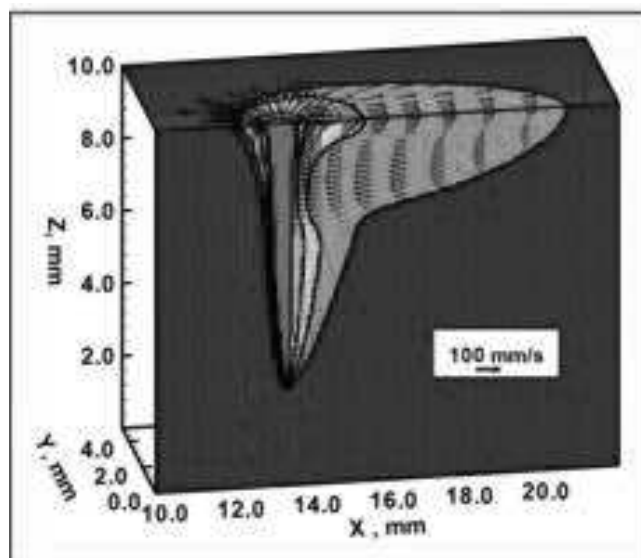


Рисунок 3.5 – Модель теплообмена жидкого металла в шве

Данные исследования являются довольно перспективными и полезными для моделирования процесса сварки толстостенных деталей, так как это способствует изучению образования газовых пор в сварном шве.

Известна статья [8], в которой проведены численные и экспериментальные исследования (рисунок 3.6) термических остаточных напряжений при ГЛДС.

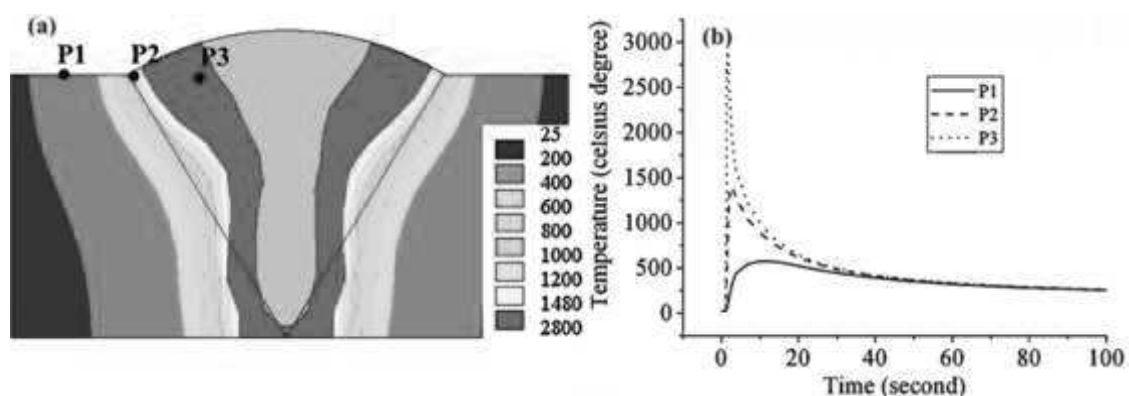


Рисунок 3.6 – Моделирование остаточных напряжений при ГЛДС

Согласно данным исследованиям, увеличение скорости сварки и снижение мощности лазерного луча снижает количество остаточных напряжений в сварном шве и ЗТВ. Данные исследования являются достаточно полезными и могут быть использованы при подборе режимов

формовки протяженной трубной заготовки с целью снижения остаточных напряжений в трубной заготовке после сварки.

Известна статья [9], в которой исследована ГЛДС высокопрочных толстостенных сталей, а также влияние окислов на качество сварного шва. При этом эксперимент (сварка) проводился на образцах-листах, подготовленных методом лазерной или плазменной резки. Целью данной работы являлась подборка режимов сварки (рисунок 3.7, оценка влияния химического состава защитной газовой смеси, а также оценка влияния оксидной пленки на качество сварного соединения. Данные исследования полезны для производства труб большого диаметра в общем, и ГЛДС шва в частности. Недостатком данной работы является то, что диапазон толщин свариваемых деталей ограничен 12 мм, в то время, как толщина труб большого диаметра достигает 45 мм.



Рисунок 3.7 – Сварные швы, полученные при разных режимах сварки.

Известна статья [10], в которой исследована тема (УЗК) лазерной сварки тонкостенных деталей из алюминия. Ультразвуковой контроль приводился с применением датчиков с размещенными в них фазированными решетками. Полученные данные позволяют определять группы газовых пор в сварном шве по затуханию амплитуды эхо-сигнала, вызванному рассеянием волн из-за наличия микропор (рисунок 3.8); данное рассеяние позволяет определить наличие данных пор, несмотря на то, что данные дефекты (рисунок) размером ниже разрешающей способности оборудования для УЗК.

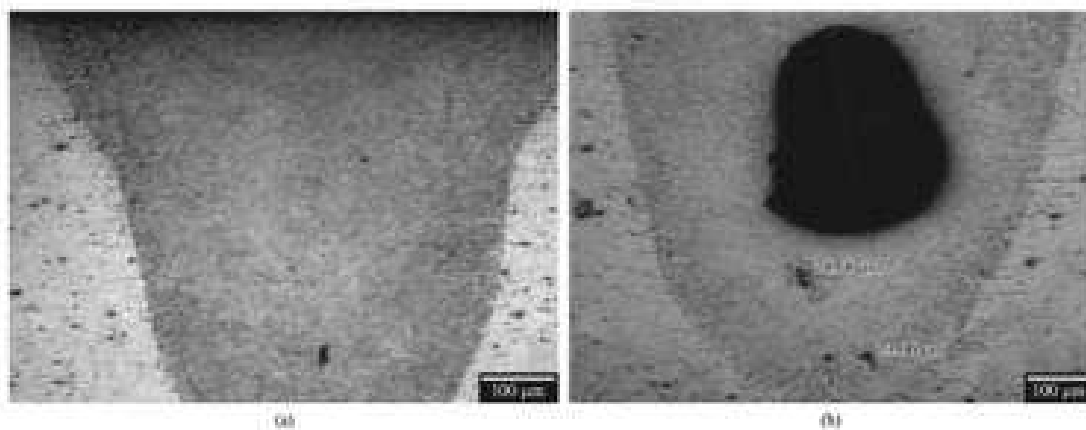


Рисунок 3.8 – Газовые поры в сварном шве

Данный опыт возможно применить и к УЗК ТБД.

Известна статья [11] в которой освещена ГЛДС высокопрочных толстостенных сталей (рисунок 3.9).

	EH36	RQT701
15 mm		
20 mm		
25 mm		

Рисунок 3.9 – Швы, полученные ГЛДС на стенке 15, 20 и 25 мм

В данной статье рассмотрены различные методы сварки толстостенных сталей:

- применение специализированной сварочной горелки (описана ранее) с регулированием скорости подачи проволоки для заполнения разделки при различном зазоре между кромками – недостатки данной горелки уже описаны выше;
- Применение системы откачки воздуха для создания разряженной среды, а также подача чистого гелия для улучшения формирования валика – недостатком данного способа является высокая себестоимость гелия и низкая эффективность данного инженерного решения.
- Проведение сварки с двух сторон детали – снаружи и внутри одновременно лазером и двумя электрическими дугами – недостатком данного способа является его достаточно серьезная сложность в реализации при производстве ТБД методом ГЛДС.
- Проведение многопроходной ГЛДС больших толщин – недостатком этого способа является его низкая производительность, сравнимая с производительностью МДСФ, что минимизирует преимущества ГЛДС перед МДСФ.

Подводя итог, данная статья может быть полезна при разработке ГЛДС ТБД, но после проведения дополнительных исследований.

При ЛС и ГЛДС, высокие скорости охлаждения приводят к высокой твердости сварного шва и ЗТВ, нивелировать это возможно, имея достаточно высокие показатели ударной вязкости. Известна статья [12], согласно которой для увеличения ударной вязкости вводят в сварной шов мелкодисперсные оксиды и сульфиды марганца и кальция, что приводит к значительному замедлению роста зерна (рисунок 3.10) и, как следствие, росту ударной вязкости.

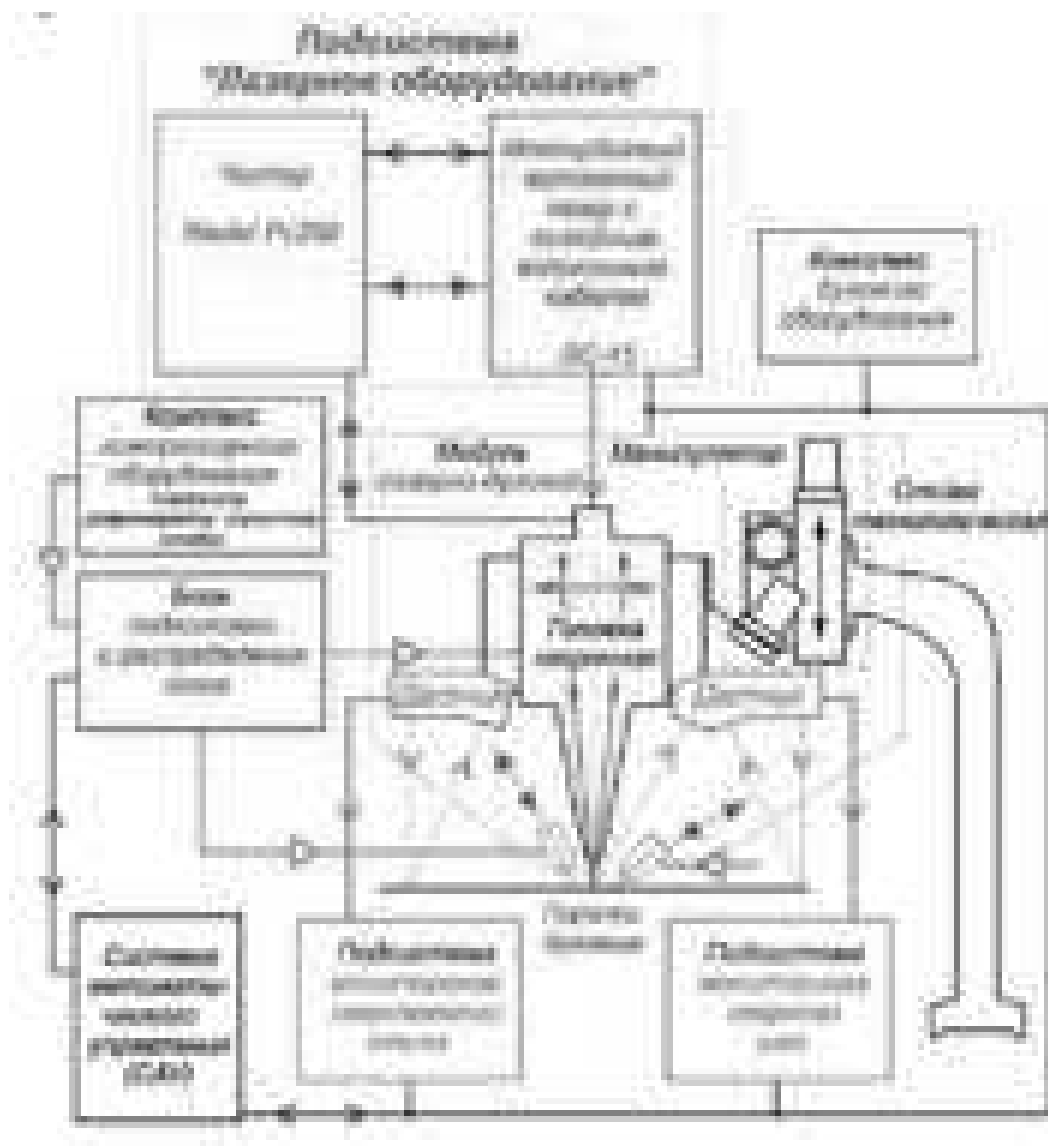


Рисунок 3.11 – Схема работы лазерного оборудования

При последующей разработке и модернизации данную систему возможно применять для сварки толстостенных (до 45 мм) деталей.

Известная статья [3], в которой рассматривается сварка с использованием лазерного луча нахлесточного соединения – дело в том, что лазерная сварка предъявляет высокие требования не только к качеству сборки (зазору) горизонтальных соединений, но и вертикальных (рисунок 3.14).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Рисунок 3.14 – Схема горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) сборки под сварку

При наличии зазора, выходящего за пределы допуска (при сварке в нахлест), лазерный шов вытягивается и истончается, не образуя при этом качественного соединения (Рисунок 3.15)

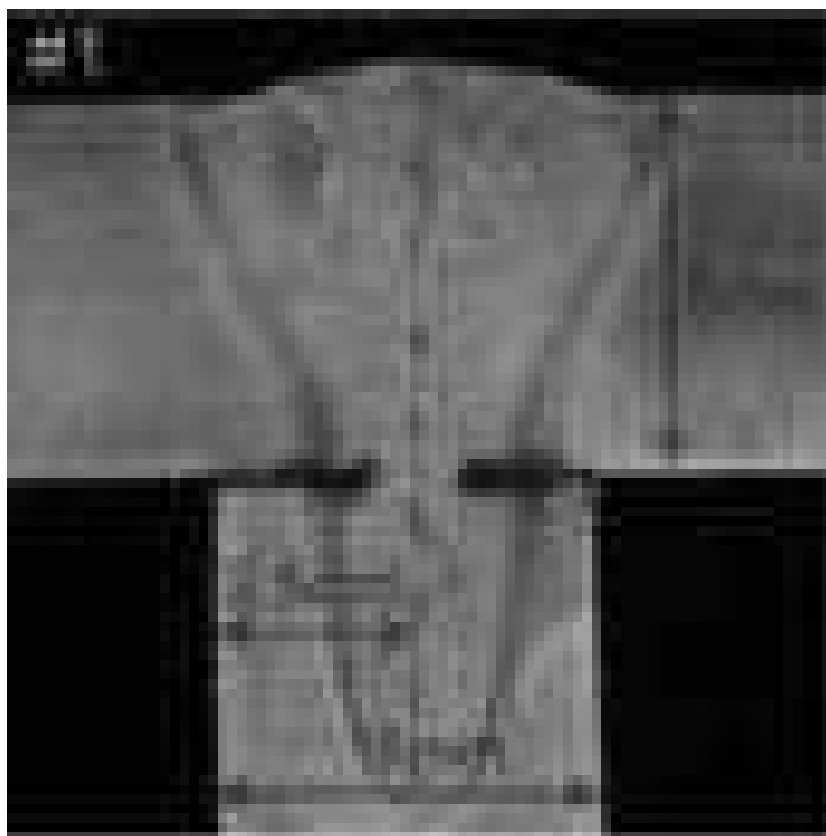


Рисунок 3.15 – ЛС нахлесточного соединения с зазором

Для решения снижения требований к зазору при сборке свариваемых деталей в нахлест, а вторые статьи предложили вести сварку с использованием не только лазерного луча, но и электрической дуги, то есть вести гибридный сварочный процесс – в одну сварочную ванну, в результате чего снизилась скорость охлаждения и в сварочную ванну начал вноситься дополнительный

присадочный металл, увеличивая общий объем расплавленного металла, заполняющего зазор, тем самым нивелируя превышение предела допуска на зазор (рисунок 3.16).

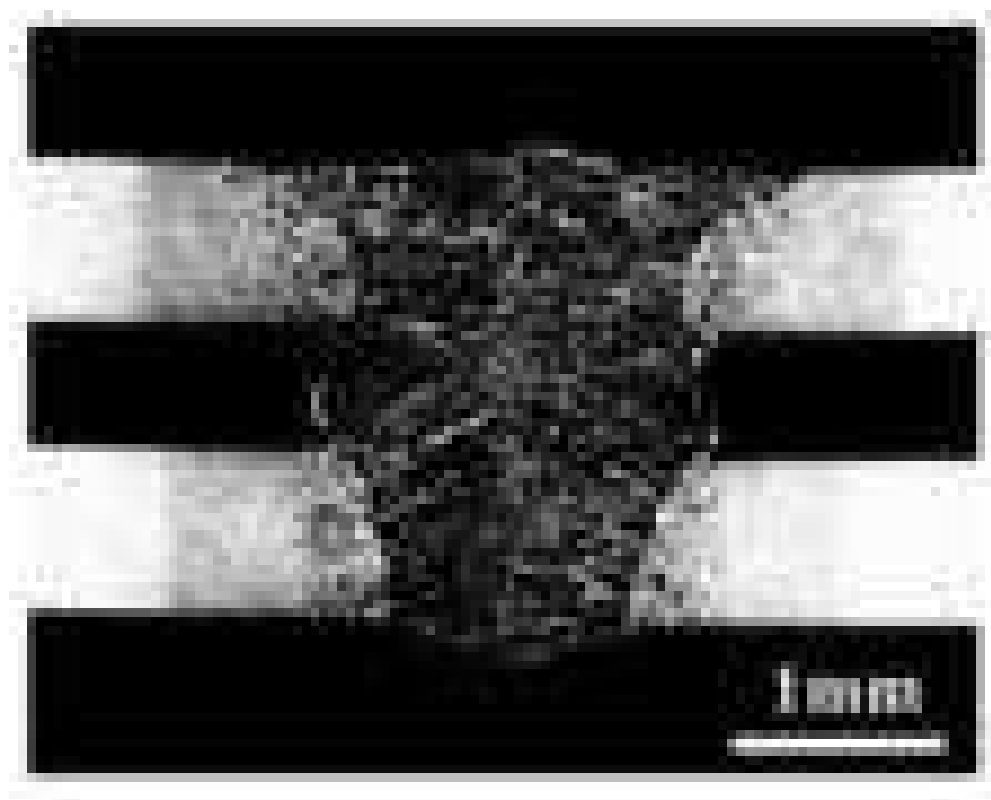


Рисунок 3.16 – ГЛДС сварка с зазором.

Данный способ снижения требований к зазору эффективен лишь на малых свариваемых толщинах, так как при лазерной сварке больших толщин, увеличение объема расплавленного металла приводит к затруднению дегазации сварочной ванны и образованию пор в сварном шве.

Известна статья [16], в которой было экспериментально исследовано поведение приповерхностной плазмы и плазмы каверны, образующихся во время лазерной сварки металлов, при разных показателях мощности лазерного луча, расхода защитного газа, толщины свариваемой заготовки, а также скорости сварки. Для проведения исследований, в данной статье применялся углекислый газ в качестве активной среды – лазеры с данным типом накачки обладают меньшим КПД по сравнению с волоконными лазерами, они сложнее в эксплуатации и ремонте, кроме того, поведение

плазмы при использовании волоконного лазера несколько отличается от поведения плазмы при использовании углекислотного лазера (отличаются параметры луча, длина волны и тд.). Поэтому лазер, на углекислом газе в качестве активной среды, менее предпочтителен волоконному лазеру.

Известна статья [17], в которой рассмотрена стационарная и динамическая модель, позволяющие смоделировать ЛС и ГЛДС с использованием мощных волоконных лазеров с высокой точностью; кроме того, заключено, что нестабильное поведение парогазового канала при сварке с применением волоконного лазера связано с величиной радиуса луча и распределением его интенсивности; выбор параметров режима сварки позволяет стабилизировать поведение сварочной ванны при ГЛДС. Также утверждается, что использование металлопорошковой проволоки позволяет сваривать трубную сталь с зазором 2 мм без потери качества – исследования по данному вопросу недостаточны для утверждения значительной пользы порошковой проволоки. Статья полезна может быть полезна при конструировании установок для производства сварочной продукции с использованием лазера.

Известна статья [18], в которой описан способ двухлучевой лазерной сварки, позволяющий за счет воздействия лучи, тем самым значительно повысить эффективность лазерной сварки.

Известна статья [19], в ходе установлен объем выгорающих легирующих элементов в разных частях лазерного ГЛДС шва, установлена недостаточная эффективность лазерной сварки для сварки металлов большой толщины, а так же эффект «размывания» зон электродугового процесса и зоны лазерного излучения с неблагоприятной структурой сварного соединения.

Известна статья [20], в которой, как заявлено, экспериментально установлено влияние скорости сварки, энергии дуги и присадочного

материала на сварочный процесс и формирование шва при ГЛДС, смоделировано динамическое поведение сварочной ванны при ГЛДС с помощью квазистационарной модели ЛДС с последующим экспериментальным подтверждением полученных данных, при этом получена динамическая модель процесса формирования шва при ГЛДС, позволяющая подобрать наиболее стабильный режим сварки.

Известна статья [21] в которой кратко описана проблематика освоения технологии ГЛДС ТБД: адаптация технологии ГЛДС для серийного производства ТБД со стенкой, толщиной от 2-25 до 45-50 мм является достаточно сложным процессом, затрагивающим целый ряд производственно-технологических задач, кроме того, требуется модернизация участка формовки и сборки ТБД для роста производительности и качества производимой продукции, так же требуется проведение поиска оптимальных параметров новой технологии с целью получения максимально эффективных характеристик нового сварного соединения.

Анализ литературы, приведенной в обзоре, показывает, что способ гибридной лазерно-дуговой сварки весьма актуален, активно ведутся исследования в данной области – конструируется новое, более функциональное сварочное оборудование, ведутся поиски способа снижения требований к зазору, исследуется влияние параметров режима сварки на качество шва. Для более ясного понимания процесса ГЛДС требуются дальнейшие исследования.

3.3 Цель и задачи исследования

Целью данного НИР является подбор оптимального режима гибридной лазерно-дуговой сварки в рамках имеющейся конструкции, который позволит получить качественный шов без таких дефектов, как газовые поры

или шлаковые включения, при этом обеспечивая высокие механические свойства.

Задачами являются установление оптимальных:

- расстояний между электрической дугой и лазерным лучом;
- угла наклона электрода;
- угла наклона лазерного луча (рисунок 32).

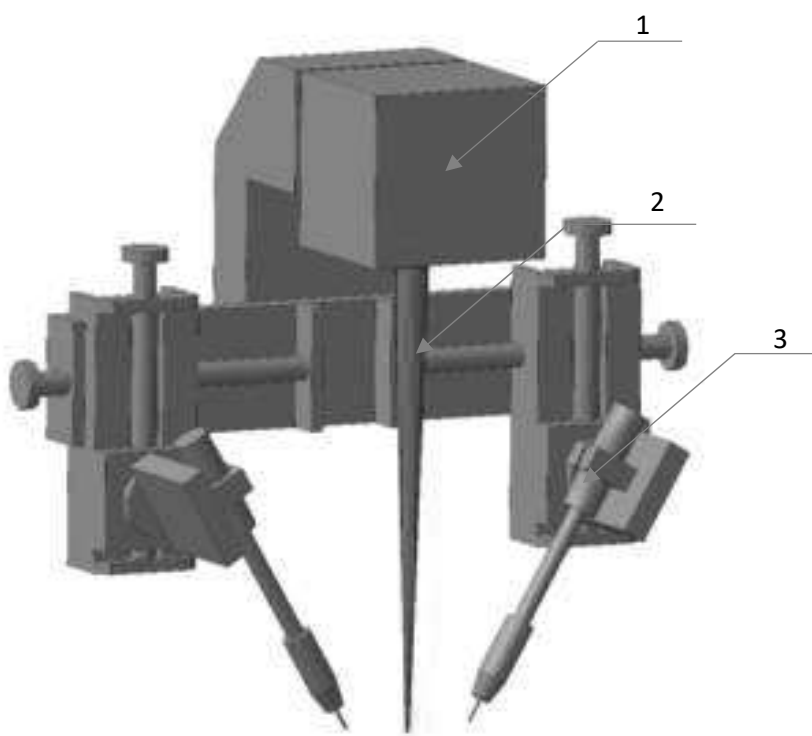


Рисунок 3.17 – Система для сварки, 1 – лазерная оптическая сварочная головка, 2 – лазерный луч, 3 – электрическая сварочная горелка

3.4 План эксперимента

Первичная оценка годности режима ГЛДС сварки проводится по критериям:

1. проседание сварного шва
2. наличие пор в сварном шве

Затем оценивается ударная вязкость сварного шва и околошовной зоны, их твердость, временное сопротивление, предел текучести, стойкость к раскрытию трещины и другие.

Нередки случаи, когда бездефектный шов имеет неудовлетворительные механические показатели и наоборот – шов с дефектами имеет высокие механические показатели из-за неправильно подобранного режима.

Назначение расстояния между точкой дугового разряда и лазерным пятном:

- 0...2 мм: не допускается, так как при таком расстоянии расплавленный металл от электрической дуги попадает в парогазовый канал, что приводит к его искривлению и затруднению выхода пузырьков газа на поверхность, что приводит к образованию пор и интенсивному выплеску металла из сварочной ванны, в результате чего образуется подрез сварного шва;
- 3...7 мм: не допускается, так как экспериментально установлено, что при расстоянии 3-7 мм глубина проплавления максимальна при той же мощности лазера и силе тока - данные расстояния характерны для сварки толстостенных деталей (от 25 мм и выше; при малой толщине стенки – при сварке на данном расстоянии наблюдается проседание сварного шва, что незначительно при сварке деталей толщиной от 25-30 мм, но недопустимо при сварке деталей, толщиной до 25 мм;
- 8...14 мм: исследования о качестве сварного шва при данном режиме не проводились;
- 15...25 мм: не допускается, так как экспериментально установлено, что при расстоянии, превышающем 15 мм – синергетический эффект, выраженный комбинацией высокой температуры шва после дуговой сварки (до 800°С) и высокой пластичности сварного шва, выполняющих функцию предварительного подогрева и упрощения провара лазерным лучом, не проявляется.

При ГЛДС изменение расстояния (до 10 мм) между дугой и лазером на ± 1 мм приводит к значительным изменениям в процессе сварки; при расстоянии

									Лист
									43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2018.205.00 ПЗ				

от 12 мм между дугой и лазером значительные изменения могут вызвать лишь изменения на ± 2 мм.

Назначение угла наклона лазерного луча:

- 0...10 °: не допускается, так как при сварке больших толщин происходит периодическое схлопывание парогазового канала, что затрудняет выход газа на поверхность - это приводит к образованию пор.
- 11...24 °: допускается, так как экспериментально установлено, что для устранения газовых пор в шве необходимо расширить канал для улучшения дегазации, то есть выхода газа на поверхность.
- 25...35 °: не допускается, так как экспериментально установлено, что при превышении угла наклона свыше 25 ° эффективность применения наклона лазерного луча для расширения канала снижается, кроме того значительно снижает глубина проплавления.

Назначение угла наклона электрода:

- 0...15 °: не допускается, так как при угле наклона электрода от 0 до 15 °, в силу конструктивных ограничений сварочной установки, не возникает необходимого синергетического эффекта ввиду удаленности электрода от зоны расплава (рисунок 3.18).

										Лист
										44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2018.205.00 ПЗ					

Параметры сварки (рисунок 3.19):

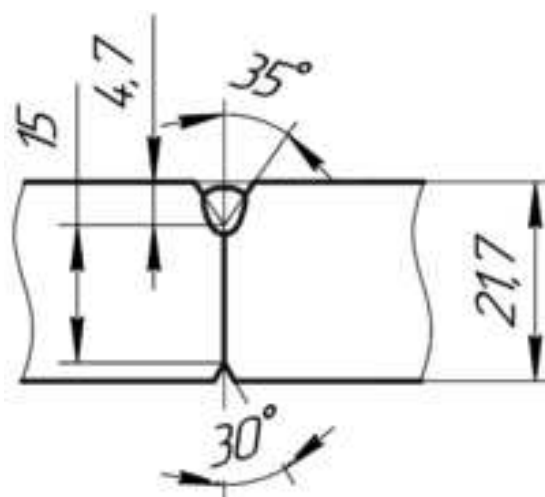


Рисунок 3.19 – Форма разделки.

- 1 Марка стали свариваемых образцов – сталь К60 10Г2ФБЮ, марка сварочной проволоки диам. 1,6 мм СВ-08Г2С, защитный газ – смесь Ar (15%) и CO₂ (85%);
- 2 мощность лазерного луча – 25 кВт;
- 3 скорость сварки – 1,8 м/мин;
- 4 фокусное расстояние – 598 мм;
- 5 диаметр пятна лазера – 0,2-0,4 мм;
- 6 угол наклона лазерного луча относительно нормали – изменяется, зависит от номера эксперимента;
- 7 угол наклона электрода-проволоки – изменяется, зависит от номера эксперимента;
- 8 сварочный ток – 420-470 А;
- 9 напряжение дуги – 22-27 В;
- 10 вылет электрода-проволоки – 13 мм.
- 11 расстояние между точкой дугового разряда и лазерным пятном – изменяется, в зависимости от номера эксперимента.

3.5 Методика обработки эксперимента

В рамках данной работы было проведено 27 опытов в соответствии с приложенной ниже таблицей.

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

Таблица 3.1 – Результаты эксперимента

Номер опыта п/п		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	26	24	25	26	27
Параметр режима ГЛДС	Расстояние между точкой дугового разряда и лазерным пятном, мм	8									11									14								
	Угол наклона лазерного луча, °	12			17			22			12			17			22			12			17			22		
	Угол наклона электрода, °	23	28	32	23	28	32	23	28	32	23	28	32	23	28	32	23	28	32	23	28	32	23	28	32	23	28	32

Красным отмечены эксперименты (с 1 по 16, с 19 по 25) с неудовлетворительным результатом.

Желтым отмечены эксперименты (17, 26) с условно удовлетворительным результатом.

Зеленым отмечены эксперименты (18, 27) с полностью удовлетворительным результатом.

3.6 Результаты проведенных исследований

1. В результате опытов с 1 по 9 был проведен визуальный осмотр, по результатам которого было обнаружено проседание сварного шва ввиду того, что происходило вытекание расплавленного металла из зоны сварки вследствие недостаточного времени кристаллизации расплавленного электрической дугой металла.
2. В результате с 10 по 16 был проведен визуальный осмотр, не выявивший дефектов. После обнаружения дефектов методом УЗК, был выполнен поперечный (рисунок 3.20) продольный шлиф (рисунок 3.21) из плоскости ГЛДС шва – на шлифе четко видны полости, образовавшиеся вследствие недостаточной дегазации расплава.

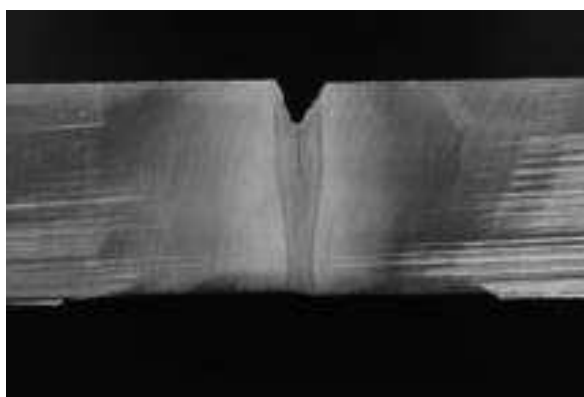


Рисунок 3.20 – Поперечный шлиф

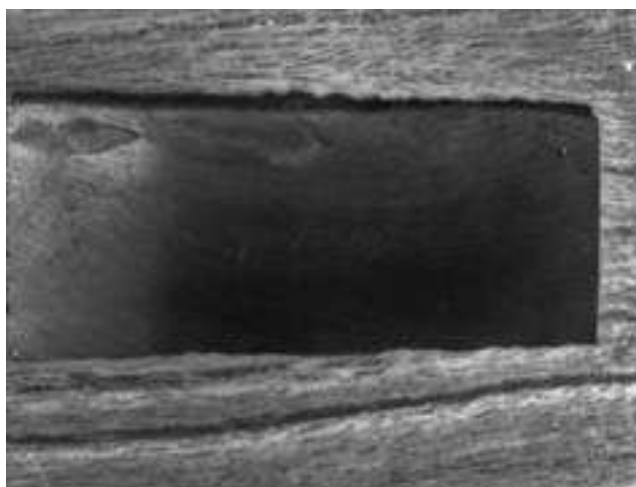


Рисунок 3.21 – Продольный шлиф

3. В результате опыта 17 был проведен визуальный, уз-контроль не выявившие дефектов. Проведение испытаний на ударный изгиб ГЛДС шва (центр) по ГОСТ 6996 (KCV -40 °C) показало ударную вязкость 150...160 Дж/см², что соответствует верхней планке для швов МДСФ при тех же условиях испытаний. Твердость в середине шва ГЛДС по ГОСТ 2999-75 на уровне 200...220 HV10, что превышает твердость МДСФ швов при тех же условиях испытаний.

Данный опыт успешнее предыдущих, но его результатов недостаточно для решения поставленной задачи.

4. В результате опыта 18 был проведен визуальный, уз-контроль не выявившие дефектов. Проведение испытаний на ударный изгиб ГЛДС шва (центр) по ГОСТ 6996 (KCV -40 °C) показало ударную вязкость 270...370 Дж/см², что превышает лучшие показатели МДСФ на 50...70% при тех же условиях испытаний. Твердость в середине шва ГЛДС по ГОСТ 2999-75 на уровне 230...260 HV10, что превышает твердость МДСФ швов при тех же условиях испытаний, но компенсируется высокой ударной вязкостью.

Данный опыт считается полностью успешным.

5. В результате с 19 по 25 был проведен визуальный осмотр, не выявивший дефектов. После обнаружения дефектов методом УЗК, был выполнен продольный шлиф из плоскости ГЛДС шва – на шлифе были обнаружены протяженные газовые поры, образовавшиеся вследствие недостаточной дегазации расплава.

6. В результате опыта 26 был проведен визуальный, уз-контроль не выявившие дефектов. Проведение испытаний на ударный изгиб ГЛДС шва (центр) по ГОСТ 6996 (KCV -40 °C) показало ударную вязкость 180...200 Дж/см², что несколько превышает верхнюю планку для швов МДСФ при тех же условиях испытаний. Твердость в середине шва

										Лист
										50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2018.205.00 ПЗ					

ГЛДС по ГОСТ 2999-75 на уровне 240...250 HV10, что превышает твердость МДСФ швов при тех же условиях испытаний.

Данный опыт успешнее предыдущих, но его результатов недостаточно для решения поставленной задачи.

7. В результате опыта 27 был проведен визуальный, уз-контроль не выявившие дефектов. Проведение испытаний на ударный изгиб ГЛДС шва (центр) по ГОСТ 6996 (КСV -40 °С) показало ударную вязкость 300...340 Дж/см², что превышает лучшие показатели МДСФ на 50...70% при тех же условиях испытаний. Твердость в середине шва ГЛДС по ГОСТ 2999-75 на уровне 230...260 HV10, что превышает твердость МДСФ швов при тех же условиях испытаний, но компенсируется высокой ударной вязкостью.

Данный опыт считается полностью успешным.

Удачные эксперименты были проведены повторно (рисунок 3.22) с другими режимами сварки, но с сохранением зависимостей, полученных в ходе удачных экспериментов, а именно:

1. расстояние между центром сфокусированного пятна лазерного излучения и точкой дугового контакта составляло 10 - 15 мм (опираясь на опыты 17, 18, 26, 27);
2. лазерный луч наклонен в сторону, противоположную направлению движения кромок свариваемой поверхности на 20 – 25° относительно нормали к поверхности свариваемых кромок (опираясь на опыты 17, 18, 26, 27);
3. дуговая горелка наклонена в сторону направления движения кромок свариваемой поверхности на угол 30 – 35° относительно нормали к поверхности свариваемых кромок (опираясь на опыты 18, 27).



Рис. 3.22 – Шлифы сварных швов, полученных согласно полученным зависимостям

Швы, указанные на рисунок 36 имеют высокое качество и высокие механические характеристики на уровне опытов 18 и 27.

3.7 Выводы по разделу

Исходя из проведенных экспериментов и опираясь на прошлый опыт в данной сфере были получены диапазоны параметров режимов сварки ГЛДС, позволяющих получить бездефектные сварные соединения с высокими механическими свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проделанной работы был проведен эксперимент по отработке оптимальных параметров режима гибридной лазерно-дуговой сварки, в результате которого были установлены оптимальные значения таких параметров, как угол наклона электрода, угол наклона лазерного луча и расстояние между точкой дугового контакта и пятном лазерного луча. При использовании режима с оптимальными параметрами было установлено отсутствие в сварном шве такого дефекта, как газовые поры, кроме того механические свойства обеспечены на высоком уровне.

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технологическая инструкция «ТИ 158-Тр.ТС3-1-2016» производства сварных прямошовных труб большого диаметра в цехе «Высота 239».
2. Заявка на патент РФ 2017123641. Способ лазерно-дуговой сварки сформованных трубных заготовок.
3. M. Ono, Y. Shinbo, A. Yoshitake, M. Ohmura. Development of Laser-arc Hybrid Welding. NKK TECHNICAL REVIEW No.86 (2002). p. 8-12.
4. D. Petring, C. Fuhrmann, C. Picalo. Recent progress and innovative solutions for laser-arc hybrid welding. 1st Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics. : April 19 - 21, 2004. p.7-10.
5. Alexander F.H.Kaplan, J. Frostevarg, T. Ilar, H.-S. Bang, H.-S. Bang. Evolution of a Laser Hybrid Welding Map. Physics Procedia V.78, 2015, p. 2-13.
6. J. Neumeyer, M. Mach, B. Nacke. Numerical simulation of induction assisted hybrid welding processes. International scientific colloquium modelling for material processing, Riga, September 16-17, 2010.
7. С. М. Келли, Р.Р. Мартуканиз, Р. Рай, Т. Деброй. Экспериментальные и расчетные исследования геометрии зоны сварки при лазерной сварке в газе со сквозным проплавлением. Conference on Lasers and Electro-Optics. 21-26 May 2006.
8. F. Kong, J. Ma, R. Kovacevic. Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process. Journal of Materials Processing Technology 211 (2011) p. 1102–1111.
9. H. Engström, K. Nilsson, J. Flinkfeldt, T. Nilsson, A. Skirfors. Laser hybrid welding of high strength steels.
10. A. Passini, A. Capella de Oliveira, R. Riva, D. N. Travessa, K. R. Cardoso. Ultrasonic inspection of AA6013 laser welded joints. Materials Research V. 14, 2011, p. 199-249.
11. S. Webster, J. K. Kristensen, D. Petring. Joining of thick section steels using hybrid laser welding. Ironmaking & Steelmaking 2013 p. 496-504.

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

12. A. Kojima, A.Kiyose, R. Uemori, M. Minagawa, M. Hoshino, T. Nakachima. Super high HAZ toughness technology with fine microstructure imparted by fine particles.
13. Разработка технологий и оборудования для лазерной и гибридной сварки на базе Центра коллективного пользования «Лазерные оптические технологии» в рамках инновационно-технологического Кластера «Промышленные лазерные технологии» (Промтехлазер). Срок реализации проекта 22 сентября 2008 - декабрь 2011 гг.
14. К.Пауль, Ф.Ридель. Гибридная лазерная сварка. Объединяя усилия. Технологическое оборудование и технологии. Фотоника 1/2009.
15. А.И. Цибаульский, О.И. Гринин. Разработка технологического оборудования для гибридной-лазерно-дуговой сварки металлов больших толщин. Изд. 40 год 2009.
16. А.Н.Грезев. Плазмообразование при лазерной сварке с глубоким проплавлением. Сборник трудов ИПЛИТ РАН с. 228-235.
17. Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, Е. А. Валдайцева. Теория и технология гибридной сварки металлов больших толщин. 6-я Международная конференция. «Лучевые технологии и применение лазеров». Санкт-Петербург, 2009. с. 11-18.
18. А.Г. Григорьянц, А.Н. Грезев, Н.В. Грезев. Технология двухлучевой лазерной сварки и ее применение в промышленности. Технология машиностроения. 2005. № 10. С. 28-31.
19. И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов, В.В. Сомонов. Технология лазерно-гибридной сварки металлов больших толщин. Сборник трудов ИПЛИТ РАН с. 245-249.
20. Исследование и моделирование гибридной лазерно-дуговой сварки металлов больших толщин. Материалы XIV Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах» 2010 с. 30-53.

21. П. Ках, А. Салминен, Дж. Мартикаинен. Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки (обзор). Автоматическая сварка № 6, 2010.
22. К. П. Марусенко, И.С. Морозов. Гибридные технологии сварки. Особенности и применение. Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2017. Том 1, с. 409 – 411.

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

ПРИЛОЖЕНИЯ

					15.04.01.2018.205.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57