

На правах рукописи

Шамов Евгений Михайлович

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ЛАЗЕРНОЙ
СВАРКИ НЕПОВОРОТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА
ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Специальность: 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Шиганов Игорь Николаевич**

доктор технических наук, профессор
МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»

Официальные оппоненты: **Доронин Юрий Викторович**

доктор технических наук,
начальник лаборатории сварки Аттестационного центра городского хозяйства (ООО «АЦГХ»)

Петровский Виктор Николаевич

кандидат физико-математических наук, доцент
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра «Лазерная физика»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится 06 июня 2019 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1 и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63

Автореферат разослан: «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук

М.А. Прилуцкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Задачи создания уникальных газотранспортных систем потребовали использования труб большого диаметра с высокими показателями эксплуатационных свойств. Вместе с тем, новые проекты трубопроводов сухопутной и морской транспортировки газа характеризуются более высокими техническими требованиями, в частности сверхвысокими рабочими давлениями, использованием труб большого диаметра от 720 до 1420 мм категорий прочности K60 с толщиной стенки до 16 мм и более. Одним из основных положений нормативных документов являются требования к сварным соединениям по ударной вязкости.

В настоящее время существуют достаточно надёжные и отработанные технологии соединения таких неповоротных стыковых трубопроводов дуговыми методами сварки. Однако, эти технологии связаны с введением большого количества тепла и высокой погонной энергией, что приводит к перегреву металла в зоне термического влияния. Швы имеют большой объём наплавленного металла, который по составу может отличаться от основного. Необходимость выполнения большого количества проходов для заполнения разделки снижает производительность. Требуется достаточно большой размер разделки и значительное количество проволоки для её заполнения, что увеличивает расходы на материалы.

Указанные трудности могут быть преодолены при использовании для сварки лазерных источников энергии. Применение лазерного излучения для орбитальной сварки магистральных трубопроводов позволяет увеличить производительность, получать более благоприятные структуры, как в шве, так и в переходной зоне, обеспечивать высокий уровень механических свойств и плотности швов. Температурно-деформационные условия в зоне сварного соединения способствуют снижению вероятности образования горячих и холодных трещин. В настоящее время имеется определённый опыт применения лазерной сварки для стыковки труб. Однако все эти методы лазерной сварки имеют целый ряд недостатков, связанных со сложностью оборудования, необходимостью применения высоких мощностей лазерного излучения или дополнительных источников и неотработанностью технологий.

Предлагаемый метод устраняет эти недостатки и даёт возможность решить важную задачу создания уникальных газотранспортных систем. В связи с этим тема данной работы является актуальной.

Цель работы - разработка технологии и оборудования для лазерной сварки орбитальных швов магистральных трубопроводов многослойными швами с присадочной проволокой.

Основными задачами исследования являются:

1. Изучить механизмы формирования отдельных элементов комбинированного сварного шва, состоящего из трех зон: корневого, заполняющего и облицовочного проходов.
2. На основе исследования влияния параметров режимов сварки различных участков шва на формирование геометрии соединений и регрессионного анализа полученных результатов, определить оптимальные диапазоны этих режимов.
3. Экспериментально и теоретически определить влияние термических циклов нагрева и охлаждения в различных зонах сварного соединения на формирование соответствующих структур и их твердость.
4. Разработать концепт оборудования адаптивного к новой технологии сварки и изготовить опытный образец установки лазерной сварки неповоротных кольцевых стыковых соединений труб.
5. Исследовать качество полученных сварных соединений на возможность образования внешних и внутренних дефектов.
6. Провести комплекс механических испытаний сварных соединений, регламентированный в СТО ПАО «Газпром», на полноразмерных образцах труб.
7. Подготовить технологическую инструкцию на технологию и оборудование.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях, выносимых на защиту:

1. Теоретически и экспериментально показано, что для получения качественных сварных соединений при сварке неповоротных стыков толстостенных труб большого диаметра лазерным излучением целесообразно применять заполнение разделки несколькими проходами с применением присадочной проволоки и колебаний лазерного луча с частотой 200 Гц и амплитудой 2,5 мм. Это обеспечивает минимальные объём сварочной ванны и тепловложение, что особенно актуально для сталей класса прочности К60.
2. Установлено, что соотношение между силами поверхностного натяжения и силой тяжести, при формировании корня шва, можно регулировать за счёт изменения температуры ванны при подаче в её хвостовую часть

присадочной проволоки. Определено, что при скорости подачи проволоки 3,5 м/мин под углом от 30° до 45° под углом от 30° до 45° и оптимальных режимах сварки происходит полное расплавлению конца проволоки и формирование превышения корня шва над поверхностью.

3. Установлено, что для снижения твёрдости металла шва, образующейся за счёт жёсткости термических циклов лазерной сварки с присадкой, необходимо применять подогрев до температуры 170-180 °С. Это позволяет получать бейнитную структуру металла шва с размером пакетов около 40-50 мкм, что обеспечивает необходимую твёрдость и повышает прочность соединений на 12-20% по сравнению с дуговой технологией.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Механизмы и условия качественного формирования корневого, заполняющего и облицовочного проходов комбинированного шва лазерного сварного соединения толстостенных труб.
2. Оптимизация режимов сварки корневого, заполняющего и облицовочного проходов методами регрессионного анализа.
3. Методика и исследование влияния термических циклов сварки на структуру и свойства различных участков комбинированного сварного соединения.

Практическая значимость работы определяется следующими результатами:

1. Впервые разработан технологический процесс многослойной сварки неповоротных толстостенных труб большого диаметра для магистральных трубопроводов излучением волоконного лазера с присадочной проволокой и колебаниями луча.
2. Путём обработки экспериментальных результатов методом регрессионного анализа, определены диапазоны режимов сварки корневого, заполняющего и облицовочного швов, обеспечивающих требуемое качество формирования сварных соединений из стали 08ГФБАА класса прочности К60.
3. Разработана концепция оборудования для новой технологии и изготовлен опытный образец манипулятора для установки лазерной сварки неповоротных кольцевых стыковых соединений труб.
4. Подготовлена и выпущена технологическая инструкция на разработанную технологию и оборудование, утверждённая руководством ПАО «Газпром».

Методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием теоретических и экспериментальных методов исследований. Для оптимизации режимов сварки использованы математические методы регрессионного

анализа. Для математического моделирования тепловых процессов использовали стандартный программный продукт MATLAB 7.11. Измерения температуры осуществляли тепловизером TESLO855. Контроль внутренних дефектов осуществляли ультразвуковым дифракционно-временным методом ToFD с применением комплекса цифровой радиографии Eresco 65 VF4 и компьютерной 3D-томографии на установке X-Cube XL 225. Испытания механических свойств проводили по методикам DNV-OS-F101 и ГОСТ 6996. Для металлографических исследований использовали оптический микроскоп марки «Meiji-Techno» и электронный микроскоп марки Phenom ProX.

Достоверность работы обеспечена корректным использованием общих положений фундаментальных наук (уравнения баланса энергии, теплопереноса, массопереноса и т.д.), проверена по известным критериям изучаемых процессов и подтверждена экспериментальными данными.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры Лазерных технологий в машиностроении и кафедры Сварки и диагностики МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, 2017, 2018 гг., 2-й международной научно-практической конференции «Современные технологии сварки, оборудование и материалы для строительства и ремонта магистральных промысловых трубопроводов», Москва, 2016 г., 9 международной конференции «Лазерные технологии и применение лазеров», Санкт-Петербург, 2018 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах общим объемом 1,5 п.л., из них 1 работа опубликована в журнале, индексируемом в базе данных SCOPUS, 7 работ опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе и списка литературы из 106 наименований. Диссертация изложена на 167 страницах машинописного текста, содержит 114 рисунков и 28 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, и практическая значимость работы.

В первой главе проведен литературный обзор, посвященный сведениям о методах и оборудовании, используемых для орбитальной сварки магистральных трубопроводов. Вопросами исследования сварки трубных

соединений занимались такие российские учёные как Патон Б.Е., Алёшин Н.П., Вешемирский Е.М., Григорьянц А.Г. и другие, а также зарубежные Karlsson A., Katayama Y. и другие.

На основе литературных источников рассмотрены технологии ручной дуговой сварки покрытыми электродами, механизированной и автоматической дуговой сварки, применяемые при строительстве магистральных трубопроводов. Анализ рассмотренных источников показал, что методы автоматизированной дуговой сварки орбитальных швов на толстостенных трубах большого диаметра являются достаточно отработанными, производительными и обеспечивают качество сварных швов. Однако, все эти технологии связаны с введением значительного количества тепла и высокой погонной энергией. Многопроходность заполнения разделки снижает производительность. Требуется удалять достаточно большой объём металла для разделки и использовать много проволоки для её заполнения, что увеличивает расходы на материалы. Помимо этого, высокие значения тепловложения и погонной энергии приводят к формированию микроструктур в шве и околошовной зоне, способствующих образованию горячих и холодных трещин, а также снижению ударной вязкости.

Для устранения и предупреждения указанных недостатков в настоящее время рассматриваются перспективные методы лазерной сварки. Применение лазерного излучения для орбитальной сварки магистральных трубопроводов позволяет увеличить производительность, получать более благоприятные структуры, как в шве, так и в переходной зоне, обеспечивать высокий уровень механических свойств и плотности швов. В отечественной и зарубежной литературе имеются сведения о нескольких технологиях лазерной сварки труб для газо- и нефтепроводов. В частности, такие технологии как сварка мощным лазерным излучением за один проход, многопроходная лазерно-дуговая сварка плавящимся электродом, сварка двумя лучами.

Однако, указанные методы лазерной сварки имеют целый ряд недостатков, также эти технологии не доведены до практического применения. В первую очередь необходимо снижение применяемой мощности лазерного излучения и соответственно стоимости лазерного оборудования. Во-вторых, более экономичным будет использование только одного лазерного источника, без дополнительного дугового. В связи с этим, в данной работе была поставлена актуальная задача создания новой лазерной технологии сварки магистральных трубопроводов, учитывающей существующие недостатки.

На основании проведённого литературного обзора были сформулированы задачи исследования.

Во второй главе приведено описание методик исследования, применяемого оборудования и материалов. В работе использовали материал трубы, изготовленной из стали 08ГФБАА класса прочности К60, соответствующей ISO 10893-9. Эта сталь относится к низколегированной, малоуглеродистой, микролегированной стойкими карбидообразующими элементами Nb, V, Ti. Присадочным материалом являлась проволока сплошного сечения ESAB Pipeweld SGC-ST 70S-6.

В качестве источника лазерного излучения использовали современный иттербиевый волоконный лазер серии ЛС, обеспечивающий КПД до 45% при мощности до 10 кВт. Фокусировку лазерного излучения осуществляли оптической головкой серии FLW D50 производства IPG Photonics, обеспечивающую не только фокусировку, но и колебания луча в двух направлениях, за счёт встроенного сканатора.

Для контроля внутренних дефектов в виде трещин и пор использовали ультразвуковые и рентгеновские методы контроля цифровой радиографии. Для контроля полного объёма сварного шва использовали компьютерную 3D томографию на рентгеновской установке X-Cube XL 225.

Испытания на растяжение сварного соединения выполняли по методике DNV-OS-F101 и ГОСТ 6996 на испытательных машинах ZDM-100 и INSTRON 8801. Испытания на ударный изгиб при температуре -40 °С проводили на маятниковом копре INSTRON 600MPX. Оценку трещиностойкости металла шва и зоны термического влияния проводили по методике DNV-OS-F101 на установке INSTRON 8802. Для металлографических исследований использовали оптический микроскоп марки «Meiji-Techno» и электронный микроскоп марки Phenom ProX. Измерения твердости проводили на автоматическом твердомере «DuraScan-50» и приборе измерения твердости по Виккерсу 430SVD по методике DNV-OS-F101 и ГОСТ 2999-75. Для математического моделирования и обработки экспериментов использовали стандартный программный продукт MATLAB 7.11, программу Microsoft Office Excel 2007, методы линейной и полиномической регрессии.

Третья глава посвящена исследованию особенностей формирования швов и оптимизации параметров режимов лазерной многослойной сварки с

присадкой в различных пространственных положениях. Учитывая недостатки, присущие существующим методам лазерной сварки труб большого диаметра, было предложено использовать метод многопроходной лазерной сварки с применением присадочной проволоки по схеме, показанной на Рисунке 1.

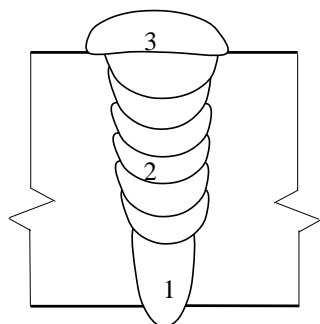


Рисунок 1. Схема комбинированного многопроходного шва, получаемого лазерной сваркой с присадочной проволокой: 1 - корневой проход; 2 - заполняющие проходы; 3 - облицовочный проход

Комбинированный шов состоит из трёх зон, указанных на Рисунке 1. Для создания подобного шва, также, как и при дуговой сварке, необходимо осуществлять разделку кромок, которая заполняется присадочной проволокой.

Однако, по предлагаемой лазерной технологии возможно получение значительно более узких швов. В связи с этим площадь разделки может быть в 6 раз меньше, чем при стандартной и в 3 раза меньше, чем при самой прогрессивной дуговой технологии. Кроме того, форма разделки будет проще для механической обработки, чем разделка под дуговую сварку.

Применение присадки даёт возможность снизить потери легирующих элементов за счёт испарения, регулировать химический состав шва и исключать такие характерные дефекты при сварке толстолистового материала, как неровность проплавления, поры и трещины. Для выбора оптимальных режимов сварки для каждого из проходов были проведены соответствующие исследования.

Наиболее сложным, с технологической точки зрения и ответственным является корневой проход. К нему предъявляются особые требования по превышению проплава над поверхностью и исключению непровара. Исходя из существующих физических представлений о формировании сварного соединения при лазерной сварке, был сформулирован механизм формирования корневого валика в потолочном положении при увеличенных зазорах, в случае применения присадочной проволоки. Направление действия сил, обеспечивающий удержание канала и, как следствие, глубокое проплавление, схематично показаны на Рисунке 2.

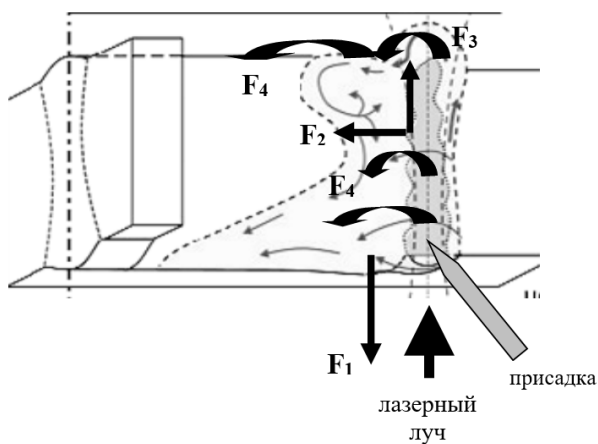


Рисунок 2. Схема сил, действующих на сварочную ванну в потолочном положении: F_1 - сила тяжести; F_2 - сила статического давления пара; F_3 - сила реакции паров; F_4 - сила поверхностного натяжения.

Баланс сил, обеспечивающих равновесие, представлен следующим равенством:

$$F_1 = F_2 + F_3 + F_4, \quad (1)$$

Так как металл корневой части шва выходит за пределы канала проплавления, в формировании коневой части шва участвуют только силы тяжести и силы поверхностного натяжения, поэтому можно рассматривать только баланс между этими силами:

$$F_1 = F_4, \quad (2)$$

Равновесие этих сил приводит к устранению корневых дефектов. В случае превышения силы тяжести над силами поверхностного натяжения может образоваться провисание металла в корне шва.

Введение дополнительного материала в виде присадки увеличивает объём расплавленного материала в сварочной ванне, что должно привести к заполнению зазора и устранению провисания в потолочном положении. Однако при этом увеличивается сила тяжести. Для уравнивания этой силы необходимо увеличить силу поверхностного натяжения. Этого можно добиться введением присадочного материала в хвостовую часть ванны. В этом случае температура расплава становится ниже, чем при введении присадки перед лучом, что было установлено экспериментально.

Коэффициент поверхностного натяжения для большинства жидкостей линейно зависит от температуры по формуле:

$$\sigma = \sigma_0 - \alpha (T - T_0), \quad (3)$$

где: σ и σ_0 - поверхностное натяжение при температурах T и T_0 ,

$\alpha \approx 0,1$ мН/(м·К) - температурный коэффициент поверхностного натяжения.

Из формулы (3) видно, что со снижением температуры увеличивается коэффициент поверхностного натяжения и соответственно, сила

поверхностного натяжения, определяемая по формуле:

$$F_4 = \pi d \sigma, \quad (4)$$

где: σ — коэффициент поверхностного натяжения;

d — диаметр канала или сварочной ванны.

Проведенные измерения температуры сварочной ванны при различных расположениях присадочной проволоки относительно лазерного луча показали, что при расположении проволоки сзади луча, температура сварочной ванны ниже, чем при расположении ее впереди лазерного луча. Замеры температуры поверхности сварочной ванны с помощью тепловизора показаны на Рисунке 3.

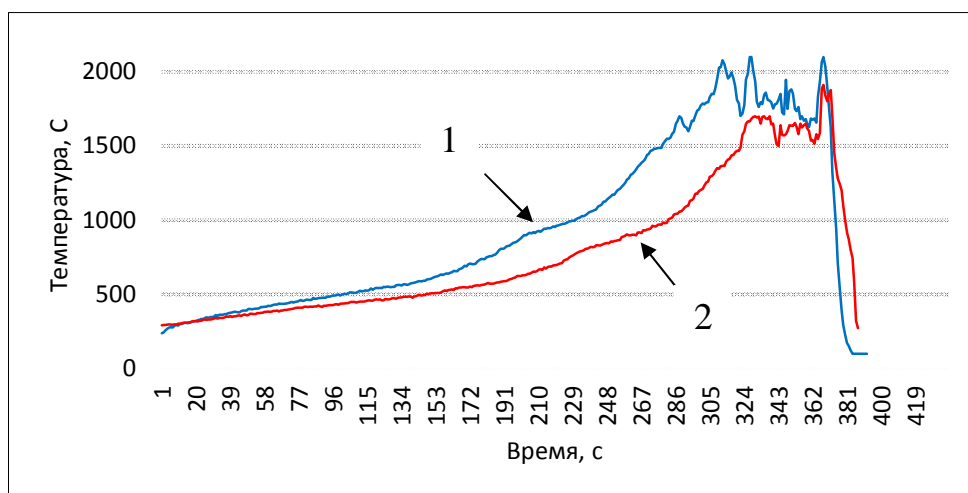


Рисунок 3. Термические циклы сварочной ванны при сварке в потолочном положении с присадочной проволокой: 1 - проволока впереди луча; 2 - проволока сзади луча

Таким образом понижение температуры в хвостовой части ванны увеличивает поверхностное натяжение в корне шва и не даёт силам тяжести опустить жидкий материал ниже поверхности проплавления. Экспериментально установлено, что угол подачи проволоки должен составлять от 30° до 45° относительно луча, при этом на оптимальных режимах сварки происходит полное расплавлению конца проволоки в ванне и формирование превышения корня шва над поверхностью. Дополнительный положительный эффект достигается при использовании сварки на подъём.

Оптимизацию режима сварки корневого шва в различных пространственных положениях проводили с помощью анализа статистической модели, разработанной по результатам полнофакторного эксперимента зависимости формирования превышения проплава и ширины проплава от параметров сварки. Полученные регрессионные модели зависимости высоты

(H) и ширины (L) валика в корне шва от мощности лазерного излучения (P), скорости подачи проволоки ($V_{пр}$), скорости перемещения (V) и фокусного расстояния (F) имеют следующий вид:

$$H = -5,666 + 0,388 \cdot P + 4,800 \cdot V + 2,260 \cdot V_{пр} + 0,193 \cdot F + 0,085 \cdot V \cdot V_{пр} - 0,043 \cdot P^2 - 4,285 \cdot V^2 - 0,327 \cdot V_{пр}^2 - 0,011 \cdot F^2 \quad (5)$$

$$L = 1,519 + 0,215 \cdot P - 3,333 \cdot V + 0,075 \cdot V_{пр} + 0,222 \cdot F \quad (6)$$

Анализ, полученных по этим формулам зависимостей позволил определить следующие параметры сварки: $P=4,5$ кВт, $V=0,6$ м/мин; $F=9$ мм; $V_{пр}=3,5$ м/мин. Эти параметры обеспечивают превышение проплава над поверхностью в диапазоне от 1,4 до 1,5 мм при ширине проплава от 2,6 до 2,75 мм. Проведённые эксперименты по сварке на выбранных режимах подтвердили расчётные значения.

Для сварки заполняющих проходов была применена схема расположения конца проволоки на расстоянии от 1 до 2 мм впереди точки сфокусированного луча под углом от 30^0 до 45^0 . В этом случае достигается полное расплавление проволоки и образуется наибольшая по объёму ванна расплава, что способствует быстрому заполнению разделки. Для обеспечения более равномерного заполнения разделки и сплавления присадки со сварочными кромками было предложено использовать колебания лазерного луча крестообразной формы с частотой 200 Гц и амплитудой 2,5 мм.

Основной целью, при оптимизации режимов сварки заполняющих проходов является создание как можно большего объёма сварочной ванны с тем, чтобы обеспечить минимальное количество проходов. Одним из параметров, определяющих геометрию проплавления, является фокусировка луча. Экспериментально определённые параметры расположения фокуса луча над поверхностью на расстоянии от 15 мм до 17 мм позволяют получить требуемую ширину шва 4,5 мм, достаточную его площадь и наименьшее проплавление предыдущего прохода.

Оптимизацию режима сварки заполняющего прохода в различных пространственных положениях так же проводили с помощью анализа статистической модели, созданной по результатам полнофакторного эксперимента зависимости глубины проплавления ($G_{3п}$) и высоты ($H_{3п}$) валика для заполняющего прохода от мощности лазерного излучения (P), скорости подачи проволоки ($V_{пр}$) и скорости перемещения (V). Фокусировка в модель не

вводилась, так как она была выбрана заранее. Полученные расчетные регрессионные модели имеют следующий вид:

$$G_{zn} = -7.282 + 1.878 \cdot P - 0.200 \cdot V_{np} \quad (7)$$

$$H_{zn} = -0.718 - 0.172 \cdot P + 0.975 \cdot V_{np} - 1.244 \cdot V \quad (8)$$

Анализ зависимостей, полученных по этим формулам, позволил определить следующие параметры сварки: $P=5,5$ кВт, $V=0,6$ м/мин и $V_{np}=5,0$ м/мин. Для увеличения объёма расплава сварку необходимо проводить на спуск. При изменении параметров режимов в заданном диапазоне достигается компромисс между стремлением максимально увеличить значение высоты формируемого валика и снижением глубины проплавления. Проведённые эксперименты по сварке на выбранных режимах позволили обеспечить заполнение разделки с минимальным количеством проходов.

Для создания поверхностного валика с плавным переходом к основному металлу, гарантированным переплавом разделки кромок и некоторым завышением шва было предложено проводить облицовочный проход. Режимы этого прохода: $P=8,0$ кВт; $V=0,6$ м/мин, $V_{np}=5,0$ м/мин. Сварка проводится с колебаниями луча с частотой 200 Гц и амплитудой 2,5 мм. Сварка осуществлялась на спуск. Макроструктура полученного сварного соединения толщиной 25,8 мм показана на Рисунке 4.

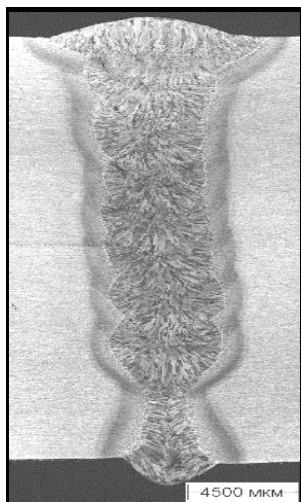


Рисунок 4. Макроструктура сварного соединения толщиной 25,8 мм из стали 08ГФБАА класса прочности К60

Четвёртая глава посвящена исследованию влияния термических циклов на структуру и твёрдость полученных соединений. Разработанные режимы сварки создают жёсткие термические циклы в шве и ЗТВ со скоростями охлаждения от 95 до 120 °С/с, что может приводить, согласно диаграммам распада аустенита, к формированию закалочных структур, в том числе, мартенситной фазы с повышенной твёрдостью. В качестве приёма,

снижающего жёсткость термических циклов, предложено применить предварительный подогрев до температуры 170-180 °С. В таком случае значения скоростей охлаждения в среднем на 20-25% выше, чем при дуговой сварке. Микроструктурные исследования показали, что в данных условиях в шве и околошовной зоне были получены бейнитные структуры с размером пакетов около 43,2 мкм и незначительным количеством феррита, в отличие от дуговой технологии, формирующей в структуре феррит и ферритно-карбидную смесь.

Установлено, что при наложении слоёв в процессе лазерной сварки во всех пространственных положениях, каждый последующий слой не приводит к существенному перегреву металла шва и зоны термического влияния предыдущего. В результате этого, в отличие от дуговой технологии, многослойность лазерной сварки оказывает несущественное влияния на структурные изменения в шве ЗТВ предыдущих слоёв.

Размеры участков перегрева, полной перекристаллизации (нормализации) и неполной перекристаллизации определяли теоретическим расчетом критических температур и экспериментальным замером максимальных температур в ЗТВ корневого и заполняющих швов на различных участках ЗТВ. Размеры этих зон при лазерной сварке были в 2-2,5 раза меньше, чем при дуговой сварке.

Измерения твёрдости в шве, выполненных лазерной сваркой в разных пространственных положениях с подогревом, показали, что она не превышает нормативных значений и составляет от 260 до 280 HV10. В среднем, твёрдость сварного соединения при лазерной сварке выше твёрдости получаемой при дуговой технологии на 12- 20% за счёт формирования бейнитной структуры в шве и ЗТВ.

Пятая глава посвящена разработке установки лазерной сварки неповоротных стыков труб, которая позволяет осуществлять многопроходную сварку труб диаметром от 720 до 1420 мм с толщиной стенки от 8 до 38 мм. Установка представляет собой направляющий пояс, который крепится на поверхности трубы и по которому перемещаются сварочные каретки с закреплёнными оптическими головками и механизмом подачи проволоки. В качестве лазерного источника излучения используется иттербиевый волоконный лазер серии ЛС производства ООО НТО «ИРЭ-Полус». Система

управления установкой построена на современной элементной базе микропроцессорной техники, и обеспечивает единый интерфейс для установки параметров сварочного режима, калибровки, диагностики и поиска неисправностей. Установка прошла испытания и была рекомендована ПАО «Газпром» для эксплуатации при сварке трубопроводов в полевых условиях. Для внедрения технологии на предприятиях ПАО «Газпром» была разработана технологическая инструкция с целью регламентации требований к применению сварочных материалов, лазерного оборудования, геометрических параметров разделки свариваемых кромок, параметров режима орбитальной сварки труб большого диаметра. Технологическая инструкция утверждена для применения ПАО «Газпром».

Проведённая расчетная оценка трещиностойкости показала, что химический состав металла сварного соединения не оказывает негативного влияния на склонность к образованию как горячих, так и холодных трещин. Испытания на трещиностойкость, проведённые по методике DNV-OS-F101, дали возможность установить, что критерий CTOD во всех случаях значительно выше нормативного значения. Анализ макро- и микроструктуры исследуемых сварных соединений, полученных на оптимальных режимах, показал отсутствие в них трещиноподобных дефектов.

Для контроля внутренних дефектов в виде трещин, пор, несплавлений использовали ультразвуковые и рентгеновские методы контроля, а также компьютерную 3D-томографию. Допустимая величина дефектов ограничивается утвержденной ПАО «Газпром» методикой выполнения контроля качества кольцевых сварных соединений и интерпретацией результатов контроля, разработанных с учетом геометрических параметров свариваемых кромок труб. При выполнении требований технологической инструкции дефектов в виде пористости, расслоений и несплавлений между слоями и со стенками разделки не наблюдалось.

Механические испытания сварных соединений проводили в соответствии с DNV-OS-F101, СТО Газпром 2-2.2-136-2007, ГОСТ 6996-66 и ГОСТ 1497-84. В соответствии с этими нормативными документами были выполнены испытания на статическое растяжение сварного соединения и металла шва, статический изгиб и ударную вязкость. Испытания на статическое растяжение, проведённые на полнотолщинных образцах, показали равнопрочность сварного соединения с

основным металлом трубы. Испытания на ударный изгиб проводили при температуре -40°C для металла шва и отдельно для металла корневого шва. По нормативным требованиям ударная вязкость металла шва и ЗТВ при испытаниях на ударный изгиб при температуре -40°C , должна быть не менее 50 Дж/см^2 (по Шарпи), при этом минимальное значение ударной вязкости для одного образца должно быть не менее $37,0 \text{ Дж/см}^2$. Результаты испытаний показали, что ударная вязкость металла шва и линии сплавления в 4-6 раз превышают требуемые величины. При испытаниях на статический изгиб все образцы при угле загиба до 120° не разрушались, трещин и расслоений не образовывалось.

Механические испытания проводили для соединений, сваренных с применением присадочной проволоки ESAB Pipeweld SGC-ST 70S-6. Для оценки возможности применения других марок были испытаны на растяжение и ударную вязкость сварные соединения, сваренные с тремя видами проволок. Как показали испытания, применение рассмотренных марок присадочных проволок не существенно влияет на свойства сварных соединений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании анализа существующих технологий предложен новый способ многопроходной сварки неповоротных стыков труб большого диаметра с толщиной стенки до 38 мм, отличающийся заполнением разделки шва присадочной проволокой, расплавляемой лазерным лучом с колебаниями.
2. Установлено, что соотношение между силами поверхностного натяжения и силой тяжести, при формировании корня шва, можно регулировать за счёт изменения температуры ванны при подаче в её хвостовую часть присадочной проволоки. Определено, что при сварке на подъем при скорости подачи проволоки 3,5 м/мин под углом от 30° до 45° к лазерному лучу и оптимальных режимах сварки происходит полное расплавление конца проволоки и формирование превышения корня шва над поверхностью.
3. Показано, что качественное заполнение разделки можно получить при расположении конца проволоки на расстоянии от 1 до 2 мм впереди точки фокусировки лазерного луча и применении его колебаний с частотой 200 Гц и амплитудой 2,5 мм. Сварку необходимо производить на спуск.
5. Расчётным путём, используя методы регрессионного анализа, определены

диапазоны режимов сварки с присадочной проволокой и колебаниями луча стали 08ГФБАА класса прочности К60 толщиной 25,8 мм. Экспериментальная оценка расчетов для корневого, заполняющего и облицовочного швов показала, что они обеспечивают требуемое качество формирования сварных соединений.

6. Установлено, что для снижения твёрдости металла шва, образующейся за счёт жёсткости термических циклов лазерной сварки с присадкой, необходимо применять подогрев до температуры 170-180 °С. Это позволяет получать бейнитную структуру металла шва с размером пакетов 40-50 мкм, что значительно повышает ударную вязкость и на 12-20% увеличивает значения твёрдости металла сварных соединений по сравнению с дуговой технологией.
7. Установлено, что при наложении слоёв в процессе лазерной сварки во всех пространственных положениях, каждый последующий слой не приводит к существенному перегреву металла шва и зоны термического влияния предыдущего. В результате этого, в отличие от дуговой технологии, многослойность лазерной сварки оказывает несущественное влияние на структурные изменения в шве ЗТВ предыдущих слоёв.
8. Расчетным и экспериментальным путём показано, что размеры участков перегрева, полной перекристаллизации и неполной перекристаллизации при лазерной сварке в 2-2,5 раза меньше, чем при дуговой сварке, что связано с более высокой скоростью охлаждения и меньшими размерами расплавленного металла сварочной ванны.
9. Измерения твёрдости в шве, выполненных лазерной сваркой в разных пространственных положениях с подогревом, показали, что она не превышает нормативных значений и составляет от 260 до 280 HV10. В среднем, твёрдость сварного соединения при лазерной сварке выше твёрдости получаемой при дуговой технологии на 12- 20% за счёт формирования бейнитной структуры в шве и ЗТВ.
10. Испытания механических свойств показали, что прочность сварных соединений находится на уровне прочности основного металла, ударная вязкость металла шва и линии сплавления в 4-6 раз превышает нормативные требования, а угол загиба без образования трещин и расслоений составляет 120°. Критерий трещиностойкости CTOD для сварных швов значительно

выше нормативного значения по методике DNV-OS-F101. Ультразвуковым и рентгеновским контролем недопустимых дефектов не обнаружено.

11. Разработана, изготовлена и испытана установка для сварки неповоротных труб большого диаметра лазерным излучением. Разработана технологическая инструкция, утверждённая ПАО «Газпром», для автоматической лазерной сварки неповоротных кольцевых стыковых соединений труб магистральных газопроводов.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Шамов Е.М., Курынцев С.В., Грезев Н.В. Сварка волокonnыми лазерами материалов больших толщин со сканированием луча и применением порошковой присадки на основе никеля // Сварочное производство. 2015. №12. С.22-25. (0,5/0,2)
2. Шамов Е.М., Шиганов И.Н., Грезев Н.В. Особенности сварки стали 10ХСНД лазерным лучом с колебаниями // Сварочное производство. 2016. №10. С.45-50. (0,6/ 0,2)
3. Лазерная сварка стали 09Г2С по слою флюса / Е.М. Шамов [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. №10. С.28-32. (0,5/0,2)
4. Технология лазерной сварки магистральных трубопроводов / Е.М. Шамов [и др.] // Газовая промышленность. 2017. Спец.№2. С.100-107. (0,6/0,15)
5. Влияние основных параметров лазерной сварки на формирование сварного шва в потолочном положении / Е.М. Шамов [и др.] // Сварочное производство. 2018. №1. С.14-20. (0,7 / 0,2)
6. Лазерная сварка толстостенных стальных труб в потолочном положении / Е.М. Шамов [и др.] // Сварочное производство. 2018. №8. С.16-22. (0,7 / 0,2)
7. Особенности формирования структуры и механических свойств при лазерной сварке неповоротных стыков труб / Е.М. Шамов [и др.] // Сварочное производство. 2018. №10. С.18-24. (0,7/0,2)
8. Technology and equipment for laser welding of annular pipes junction in fixed position of gas-main pipelines / E.M. Shamov [et al] // IOP Conf. Series: Journal of Physic: Conf. Series. 2018. v. 1109. 012025. (0,6/0,15)