

На правах рукописи

ЯКОВЛЕВ Дмитрий Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОРОШКОВЫХ
ПРОВОЛОК**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)

Научный руководитель: Заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор,
Шахматов Михаил Васильевич

Официальные оппоненты: **Крампит Андрей Гарольдович**,
доктор технических наук, доцент,
Юргинский технологический институт (филиал)
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
профессор кафедры «Сварочное производство»;

Шолохов Михаил Александрович,
кандидат технических наук,
ООО «Шторм» (г. Екатеринбург), директор

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»**

Защита диссертации состоится «24» мая 2016 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=255444>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,

Евгений Юрьевич Раскатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время в связи с необходимостью транспортировки углеводородов из удаленных регионов, а также с реализацией проектов строительства протяженных трубопроводных систем в глубоководных акваториях и сейсмоопасных районах возникает потребность в освоении производства электросварных высокопрочных труб большого диаметра (ТБД) с увеличенными толщинами стенок (более 25,0 мм). Это способствует увеличению рабочих давлений в трубопроводах и предъявления к таким трубам ряда повышенных требований к деформационной способности, ударной вязкости, стойкости к протяженным разрушениям и др.

Одной из наиболее сложных задач при изготовлении труб (в особенности толстостенных) из современных высокопрочных сталей, с точки зрения технологии сварки, является обеспечение высоких механических характеристик сварного соединения. Для выполнения сварного соединения обладающего требуемым сочетанием прочностных и пластических свойств необходимо комплексное рассмотрение процесса сварки и применение современных технологий и материалов.

В настоящее время наиболее прогрессивные технологии получения сварных соединений основываются на применении в качестве присадочного материала порошковых проволок, представляющих собой непрерывный электрод трубчатой или другой более сложной конструкции с порошкообразным наполнителем – сердечником. Применение порошковых проволок при сварке позволяет повысить производительность процесса, регулировать в широких пределах химический состав металла шва, повысить качественные характеристики сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Однако использование порошковых проволок требует корректировки режимов сварки, исследования скоростей охлаждения ЗТВ и кристаллизации сварного шва, а также определения остальных параметров сварки с целью повышения качества сварных соединений.

Степень разработанности темы исследования. Достаточно большое число исследовательских работ И.К. Походни, В.Н. Шлепакова и других ученых посвящено проблемам повышения механических характеристик металла шва, свойства которого во многом определяются его химическим составом и режимом сварки. При этом совершенствование листового проката применяемого при производстве труб и повышения его прочности и толщины требуют внесения изменений в режимы сварки и систему легирования металла шва.

Весьма сложной задачей при сварке толстостенных ТБД является обеспечение высоких пластических свойств ЗТВ, на структуру и свойства которой основное влияние оказывает химический состав листового проката и термический цикл сварки.

Теория процессов распространения тепла, основы, которой заложены советским ученым, академиком АН СССР Н.Н. Рыкалиным позволяет установить влияние режимов сварки, размеров и формы изделия, а также условий нагрева на термический цикл. Современный уровень разработанности методов анализа

теплопроводности при сварке и методик ее расчета достигнут благодаря работам В.И. Махненко, Н.Н. Прохорова, А.А. Углова, К.М. Гатовского, В.А. Кархина, В.И. Сидорова и других отечественных и иностранных ученых.

Существующие на сегодняшний день методики расчета тепловых процессов при сварке не адаптированы для решения задач многодуговой сварки. В исследованиях посвященных данному вопросу используют схему, согласно которой производится замена многодугового процесса на одnodуговой, мощность которого определяется как сумма мощностей всех входящих в многодуговую систему дуг. К недостаткам данного подхода нужно отнести отсутствие обратной связи между общей энергией многодугового процесса и отдельными дугами. Кроме того все дуги необходимо рассматривать отдельно, т.к. они могут отличаться между собой режимами сварки, родом тока, диаметрами проволок, и иметь различные установочные параметры, что оказывает влияние на форму и размеры сварного соединения.

Для оценки влияния термических циклов на структуру и свойства ЗТВ известен метод имитации термических циклов, описанный в работах О.Е. Капустина, Л.А. Ефименко и других ученых, который позволяет получить ряд важных результатов для корректировки химического состава стали.

Настоящая работа является актуальной, так как посвящена повышению механических свойств сварных соединений ТБД из высокопрочных сталей за счет рационального применения порошковых проволок в качестве присадочного материала при многодуговой сварке продольных швов и их ремонте.

Цель работы: повышение качества и механических характеристик сварных соединений электросварных ТБД из современных высокопрочных сталей за счет рационального и эффективного использования порошковых проволок при многодуговой сварке основных швов и их ремонте механизированной сваркой в среде защитных газов.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1) проведение математического моделирования нелинейных тепловых процессов при многодуговой сварке внутренних и наружных швов электросварных труб, с определением скоростей охлаждения различных зон сварного соединения и последующей оценке их влияния на структуру и свойства сварного соединения;

2) экспериментальное исследование рациональности и эффективности использования порошковых проволок при многодуговой сварке под слоем флюса продольных швов электросварных ТБД. Определение рационального месторасположения порошковой проволоки в многодуговом сварочном процессе;

3) экспериментальное исследование эффективности использования порошковой проволоки в качестве присадочного материала при ремонте сварных соединений электросварных ТБД из современных высокопрочных сталей;

4) разработка технологии многодуговой сварки под слоем флюса основных швов электросварных труб и их ремонта механизированной сваркой в среде защитных газов с использованием порошковой проволоки в качестве присадочного материала.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы: численный метод решения задачи теплопроводности с привлечением метода конечных элементов на базе программного комплекса ANSYS; методы исследования свойств и структуры материалов – методы определения механических свойств сварных соединений с использованием универсальной испытательной машины EU-20 и маятникового копра РКР-450; оптическая и электронная микроскопия, выполняемая на оптическом микроскопе Axiovert 40 MAT и растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490; методы анализа твердости с использованием твердомера LV-700; методы химического анализа с привлечением автоматического анализатора OBLF модель QSN 750; методы неразрушающего контроля сварных соединений. Экспериментальное исследование выполняли на лабораторном сварочном комплексе полностью имитирующем выполнение продольного сварного соединения трубы и оборудованном многодуговой сварочной головкой.

Научная новизна работы:

1) впервые сформулирована и решена краевая задача определения тепловых полей при многодуговой сварке. Разработанная математическая модель учитывает ввод тепловой энергии отдельно для каждой дуги, расстояние между смежными дугами, зависимость теплофизических свойств от температуры и теплопередачу с внешних поверхностей;

2) установлено, что для микролегирования металла шва при многодуговой сварке достаточно использования легированной порошковой проволоки на одной из дуг многодугового сварочного процесса;

3) установлено, что использование в многодуговом сварочном процессе металлпорошковой проволоки приводит к уменьшению протяженности участков перегрева и крупного зерна, сокращению времени пребывания металла при температурах более 1100 °С и как следствие уменьшению величины зерна на участке перегрева;

4) установлено, что для получения металла сварного шва из стали класса прочности К65 (Х80) обладающего высокими пластическими свойствами при отрицательных температурах наиболее эффективно многокомпонентное микролегирование Мо, Ti, В и Ni.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1) разработана методика расчета режимов многодуговой сварки под слоем флюса продольных швов электросварных ТБД и их ремонта механизированной сваркой плавящимся электродом в среде защитных газов при использовании в качестве присадочного материала порошковой проволоки, что существенно снижает затраты на пусконаладочные работы;

2) разработана математическая модель процесса многодуговой сварки, позволяющая оперативно решать инженерные задачи при разработке новых технологий сварки и оптимизации существующих режимов;

3) разработана технология многодуговой сварки под слоем флюса продольных швов труб с использованием на одной из сварочных дуг металлпорошковой сварочной проволоки и технология механизированной

сварки в среде защитных газов с применением порошковой проволоки для ремонта основных швов электросварных труб.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) результаты математического моделирования нелинейных тепловых процессов при многодуговой сварке с использованием различных типов присадочных материалов;

2) результаты экспериментального исследования по оценке эффективности применения металлопорошковых проволок при многодуговой сварке;

3) результаты экспериментального исследования по оценке эффективности применения порошковых проволок при ремонте механизированной сваркой сварных соединений электросварных труб;

4) особенности расчета параметров режима сварки при производстве ТБД с использованием различных типов присадочных материалов.

Степень достоверности результатов исследований. Проведенное теоретическое и экспериментальные исследования с достаточно хорошей сходимостью результатов, применение в работе современных методик, приборов и технических средств свидетельствуют о достоверности полученных в работе результатов.

Апробация работы. Основные положения работы представлены на IV, V, VI научно-технической конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ, г. Челябинск 2012 – 2014 гг., Международной научно-технической конференции «Перспективные вопросы мировой науки», г. София (Болгария) 2012 г., XV Международной научно-технической конференции «Сварка и родственные технологии», г. Екатеринбург 2015 г.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, из них 7 в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 128 наименований. Работа изложена на 186 страницах, содержит 56 рисунков и 45 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность тематики исследования, обоснован выбор направления исследования, отмечена научная новизна полученных результатов и практическая значимость работы, представлены основные положения работы, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен аналитический обзор действующих и перспективных нормативных требований предъявляемых к сварным соединениям электросварных труб. Показаны основные тенденции развития трубной отрасли, а именно повышение производительности и надежности трубопроводных систем за счет повышения прочности металла и увеличения толщины стенки и связанные с этим проблемы в части обеспечения требуемых механических характеристик сварных соединений. Проведена оценка влияния различных легирующих элементов на структуру и свойства основного металла, металла шва и ЗТВ.

Выполнен анализ рынка современных сварочных материалов. Установлено, что эффективным способом повышения комплекса механических свойств сварных соединений является применение в качестве присадочного материала порошковых проволок, а также, при сварке под слоем флюса, использование основных и высокоосновных керамических флюсов.

Показаны существующие методы моделирования тепловых процессов при сварке, приведены их основные достоинства и недостатки. Отмечено, что на сегодняшний день методики расчета тепловых процессов при сварке не адаптированы для решения задач многодуговой сварки.

На основе результатов аналитического обзора сформулирована цель и определены основные задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты математического моделирования нелинейных тепловых процессов при многодуговой сварке внутренних и наружных швов электросварных труб из стали класса прочности K65 (X80, L555) с толщиной стенки 27,7 мм, определены скорости охлаждения различных зон сварного соединения и проведена оценка их влияния на структуру и свойства сварного соединения.

Решение краевой тепловой задачи при многодуговой сварке выполняли методом конечных элементов на основе программного комплекса ANSYS. Предельное состояние процесса рассмотрено в двумерной системе.

Экспериментально установлено, что для микролегирования металла шва достаточно одной порошковой проволоки в многодуговой системе, при этом гомогенность наплавленного металла недостаточна при расположении ее на первой или последней дуге. При многодуговом процессе режимы сварки, обычно, устанавливаются по убыванию, начиная с первой дуги, поэтому для микролегирования металла шва эффективнее использовать порошковую проволоку на второй дуге, т.к. она вносит максимальный объем металла в сварочную ванну (не считая первой дуги).

Принимая во внимание особенности плавления порошковой проволоки и возможности легирования металла шва через порошковую проволоку, для решения краевой температурной задачи при многодуговой сварке были выбраны три варианта сочетания присадочных материалов, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Программа теоретического исследования

| Обозначение | Сочетание сварочных проволок |
|-------------|--|
| М-1 | Все дуги образованы проволоками сплошного сечения |
| М-2 | При сварке внутреннего и наружного шва вторая дуга образована порошковой проволокой, а остальные дуги проволоками сплошного сечения |
| М-3 | При сварке внутреннего и наружного шва первая дуга образована проволокой сплошного сечения, а остальные дуги порошковыми проволоками |

Сталь класса прочности K65 (X80, L555) относится к низколегированным малоуглеродистым сталям, при этом обладает достаточно низким содержанием легирующих элементов. Поэтому для учета зависимости теплофизических свойств от температуры при моделировании тепловых процессов сварки использовали известную для малоуглеродистых сталей графическую зависимость,

аппроксимированную в программном комплексе MATHCAD до температур близких к температуре плавления с коэффициентом корреляции 0,9996.

Процесс ввода в металл теплоты, выделяющейся при сварке, представляли в виде тепловых потоков от каждой дуги, распределенных по нормальному закону распределения с учетом объема наплавленного металла вносимого каждой дугой и температуры электродных капель. Нормально-круговой источник нагрева $q(r,t)$ рассчитывали для каждой дуги по формуле:

$$q(r,t) = \frac{k}{\pi} q_i \exp(-k r^2), \quad (1)$$

где k – коэффициент сосредоточенности теплового потока источника, см^{-2} ;

q_i – эффективная тепловая мощность i -ой сварочной дуги, Вт;

r – расстояние от источника тепла до точек тела, см.

Моделирование заполнения разделки сварного шва присадочным материалом выполняли по алгоритму появления и исчезновения элементов. Температуру для вновь активированных элементов T_K (температуру капель) определяли из выражения:

$$T_K = T_{КП} \left[1 - \frac{\rho_T j l}{U_э} \left(1 - \frac{T_{ПЛ}}{T_{КП}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $T_{КП}$, $T_{ПЛ}$ – температура кипения и плавления стали соответственно, $^{\circ}\text{C}$;

ρ_T – удельное сопротивление электродного металла, Ом м;

j – плотность сварочного тока, $\text{А}/\text{мм}^2$;

l – величина вылета электродной проволоки из токоподводящего мундштука, мм;

$U_э$ – эффективное падение напряжения в приэлектродной области, В.

Учитывая повышенный коэффициент расплавления порошковых проволок при моделировании многодуговой сварки принимали его величину на 40 % выше коэффициента расплавления проволок сплошного сечения, в результате чего погонная энергия сварки снизилась (относительно варианта М-1) на 10-14 % и на 20-25 % соответственно. При этом без потери производительности достаточно использовать три дуги при сварке внутреннего шва и четыре дуги при сварке наружного шва для варианта М-3.

Граничные условия теплопередачи с внешних поверхностей задавали удельным тепловым потоком при конвекции и излучении. Графическое изображение результатов моделирования сварного соединения М-1 (Таблица 1) представлено в виде поля максимальных температур на рисунке 1.

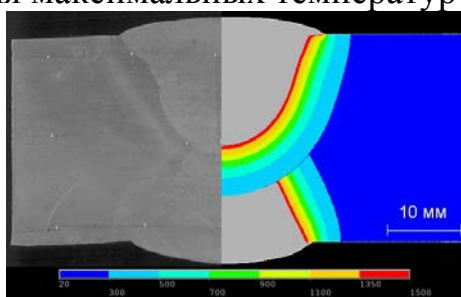


Рисунок 1 – Поле максимальных температур сварного соединения М-1

Установлено, что геометрия и протяженность различных участков ЗТВ смоделированного шва в пределах 10-12 % и 10-15 % соответственно совпадает с геометрией и протяженностью участков ЗТВ сварного соединения выполненного в производственных условиях (Рисунок 1). Таким образом, представленная модель с достаточной для практики точностью адекватно отражает многодуговой сварочный процесс.

Используя полученные модели сварных соединений М-1 – М-3 для точек расположенных на расстоянии 2 мм от поверхности внутренних и наружных швов были построены термические циклы по верхним границам отдельных участков ЗТВ. Термические циклы зоны крупного зерна наружных сварных соединений М-1 – М-3 представлены на рисунке 2, результаты анализа термических циклов сварных соединений наружных швов М-1 – М-3 приведены в таблице 2.

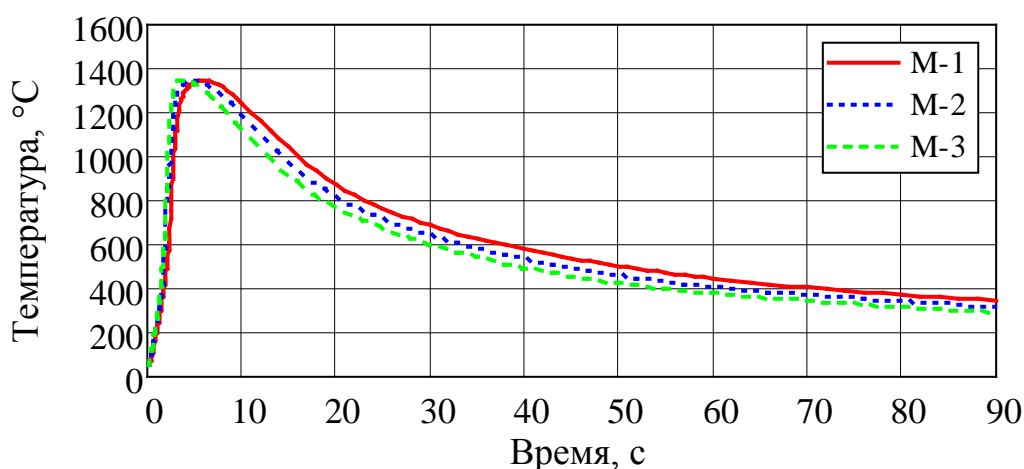


Рисунок 2 – Термические циклы зоны крупного зерна наружных сварных соединений М-1, М-2 и М-3

Таблица 2 – Параметры термических циклов зоны крупного зерна и участка перегрева сварных соединений наружных швов М-1 – М-3

| Параметр | Обозначение сварного шва | | |
|--|--------------------------|-------|-------|
| | М-1 | М-2 | М-3 |
| Время пребывания в интервале температур от 1350 до 1500 °С, с | 6,6 | 5,5 | 4,5 |
| Протяженность зоны крупного зерна, мм | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| Время пребывания в интервале температур от 1100 до 1500 °С, с | 12,3 | 10,8 | 9,5 |
| Протяженность участка перегрева, мм | 2,3 | 2,0 | 1,8 |
| Время пребывания $t_{8/5}$ в интервале температур от 500 до 800 °С (участок крупного зерна), с | 27,2 | 23,5 | 20,8 |
| Средняя скорость охлаждения $V_{8/5}$ в интервале температур от 500 до 800 °С (участок крупного зерна), °С/с | 8,74 | 10,52 | 12,15 |

Установлено, что введение в многодуговой сварочный процесс порошковой проволоки приводит к уменьшению протяженности участков перегрева и крупного зерна, снижению времени пребывания металла при температурах выше 1100 °С и, как следствие, уменьшению величины зерна на участке перегрева. Стоит отметить, что при моделировании пренебрегали замедленным охлаждением поверхности сварного шва и в действительности

скорость охлаждения, как сварного шва, так и ЗТВ будет несколько ниже скоростей охлаждения полученных при решении тепловой задачи.

Известно, что для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик сварных соединений из высокопрочной стали категории прочности K65 (X80) оптимальный диапазон скоростей охлаждения в интервале температур от 500 до 800 °С составляет от 10 до 50 °С/с. В ходе проведенного численного моделирования тепловых процессов установлено, что средняя скорость охлаждения участка крупного зерна сварных соединений М-2 и М-3 находится в оптимальном диапазоне, что способствует получению благоприятной структуры обладающей высоким уровнем пластических свойств. Снижение скорости охлаждения менее 10 °С/с (соединение М-1) приводит к выделению в структуре металла полигонального феррита и снижению ударной вязкости.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования эффективности применения порошковых проволок в качестве присадочного материала при многодуговой сварке под слоем флюса трубных сталей высокой прочности и ремонте сварных соединений электросварных ТБД.

Экспериментальное исследование эффективности применения порошковых проволок при многодуговой сварке под слоем флюса трубных сталей высокой прочности проводили на лабораторном сварочном комплексе, полностью имитирующем выполнение продольного сварного соединения трубы, получаемого комбинацией дуговой сварки в среде защитного газа и дуговой сварки под флюсом. Для сварки использовали пластины из стали класса прочности K65 с толщиной стенки 27,7 мм.

Микролегирование сварных швов для повышения пластических свойств металла шва при низких температурах выполняли такими элементами как Ni, Mo, Ti, B. На основе анализа влияния различных легирующих элементов на свойства металла шва для проведения эксперимента выбраны следующие марки порошковых проволок – Fluxocord 35 25 3D, Power Pipe 3D-Ni, Power Pipe 4D-Ni, и проволок сплошного сечения – S2Mo, S3TiB, Св-08Г2С (для технологического шва). Программа эксперимента для сварки внутренних и наружных швов под флюсом представлена в таблице 3. Во всех используемых вариантах вторая дуга образована порошковой проволокой, режимы сварки соединений С-3 – С-5 скорректированы с учетом повышенного коэффициента расплавления порошковых проволок, в результате чего погонная энергия сварки снижена на 8-12 %, относительно соединений С-1 – С-2.

Таблица 3 – Программа экспериментального исследования

| Номер соединения | Марка порошковой проволоки | Марка проволоки сплошного сечения | Легирующие элементы | Марка флюса |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| С-1 | – | S2Mo | Mo | ФСА ЧТ А 650-20/80 |
| С-2 | – | S2Mo+S3TiB | Mo, Ti, B | |
| С-3 | Fluxocord 35 25 3D | S2Mo+S3TiB | Mo, Ti, B | |
| С-4 | Power Pipe 3D-Ni ¹⁾ | S2Mo+S3TiB | Ti, B, Ni, Mo | |
| С-5 | Power Pipe 4D-Ni ¹⁾ | S2Mo+S3TiB | Ti, B, Ni, Mo | |

¹⁾ Проволока Power Pipe 4D-Ni имеет более высокое содержание Ni, по сравнению с проволокой Power Pipe 3D-Ni

От сварных соединений С-1 – С-5 были отобраны образцы для проведения механических испытаний на статическое растяжение (тип II по ГОСТ 6996), ударный изгиб (тип IX по ГОСТ 6996), определения химического состава сварных швов и металлографического исследования, результаты которых приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Результаты контроля химического состава сварных швов С-1 – С-5
В процентах

| Номер образца | Шов | Массовая доля элементов | | | | | | | | | | |
|---------------|--------|-------------------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|
| | | C | Mn | Si | P | S | Ni | V | Mo | Ti | Nb | B |
| С-1 | Наруж. | 0,075 | 1,54 | 0,10 | 0,013 | 0,003 | 0,14 | 0,010 | 0,27 | 0,009 | 0,03 | – |
| | Внутр. | 0,074 | 1,54 | 0,12 | 0,001 | 0,003 | 0,15 | 0,020 | 0,25 | 0,011 | 0,04 | – |
| С-2 | Наруж. | 0,070 | 1,58 | 0,28 | 0,015 | 0,004 | 0,13 | 0,020 | 0,19 | 0,025 | 0,04 | 0,0024 |
| | Внутр. | 0,070 | 1,58 | 0,23 | 0,014 | 0,005 | 0,15 | 0,020 | 0,22 | 0,023 | 0,04 | 0,0022 |
| С-3 | Наруж. | 0,060 | 1,69 | 0,31 | 0,010 | 0,003 | 0,12 | 0,020 | 0,22 | 0,030 | 0,03 | 0,0024 |
| | Внутр. | 0,060 | 1,76 | 0,28 | 0,010 | 0,003 | 0,14 | 0,020 | 0,23 | 0,031 | 0,03 | 0,0026 |
| С-4 | Наруж. | 0,070 | 1,56 | 0,27 | 0,011 | 0,003 | 0,59 | 0,020 | 0,25 | 0,025 | 0,03 | 0,0025 |
| | Внутр. | 0,070 | 1,63 | 0,29 | 0,011 | 0,003 | 0,61 | 0,020 | 0,21 | 0,034 | 0,04 | 0,0032 |
| С-5 | Наруж. | 0,070 | 1,72 | 0,39 | 0,011 | 0,004 | 0,82 | 0,018 | 0,25 | 0,018 | 0,03 | 0,0015 |
| | Внутр. | 0,070 | 1,82 | 0,44 | 0,012 | 0,004 | 0,80 | 0,016 | 0,20 | 0,019 | 0,04 | 0,0018 |

Таблица 5 – Результаты испытаний на ударный изгиб KCV соединений С-1 – С-5

| Номер образца | Средние значения ударной вязкости KCV, Дж/см ² , при температуре испытания | | | | | | | | | |
|---------------|---|-----|-------------|-----|------------|-----|------------|-----|-------------|-----|
| | Минус 20 °С | | Минус 40 °С | | | | | | Минус 60 °С | |
| | Наруж. шов | | Наруж. шов | | Корень шва | | Внутр. шов | | Наруж. шов | |
| | МШ | ЛС | МШ | ЛС | МШ | ЛС | МШ | ЛС | МШ | ЛС |
| С-1 | 141 | 254 | 63 | 129 | 91 | 70 | 148 | 64 | 33 | 47 |
| С-2 | 212 | 270 | 179 | 96 | 113 | 46 | 226 | 76 | 158 | 32 |
| С-3 | 187 | 261 | 165 | 226 | 95 | 184 | 125 | 181 | 137 | 78 |
| С-4 | 187 | 203 | 149 | 207 | 121 | 167 | 125 | 168 | 118 | 146 |
| С-5 | 244 | 236 | 212 | 238 | 178 | 177 | 206 | 206 | 184 | 128 |

Примечание: МШ – металл шва; ЛС – линия сплавления.

При проведении контроля химического состава по высоте сечения сварных швов С-3 – С-5, микролегированных через порошковую проволоку, установлено, что химический состав металла шва однородный по всему сечению.

По результатам испытания сварного соединения на статическое растяжение установлено, что комплексное микролегирование Mo, Ti, B и Ni сварных соединений из стали класса прочности К65 позволяет повысить прочностные свойства металла шва на 8-16 % и обеспечить определенный запас по прочности, что не достижимо при микролегировании только Mo.

В результате проведенных механических испытаний на ударный изгиб и анализа их результатов установлено, что сварные соединения С-3 – С-5 имеют более высокие показатели ударной вязкости при нанесении надреза по линии сплавления, что обусловлено понижением погонной энергии сварки, увеличения тем самым скорости охлаждения металла в ЗТВ и формирования более благоприятной структуры. При этом установлено, что для повышения

низкотемпературной вязкости металла сварного шва наиболее эффективно применять многокомпонентное микролегирование Mo, Ti, V и Ni.

Твердость сварных соединений С-1 – С-5 удовлетворяет требованиям нормативной документации для сталей класса прочности K65 – 280 HV10.

Проведение исследования микроструктуры сварных соединений выполнялось на образцах С-2 и С-5. Вне зависимости от места анализа (наружный шов, корень, внутренний шов), в микроструктуре наблюдались крупные аустенитные зерна, внутри которых формируется игольчатый бейнит (ИБ). Кристаллы бейнитной α -фазы имеют вид пластин линзовидной формы (Рисунок 3). По границам кристаллов бейнита присутствуют дисперсные участки мартенситно-аустенитной составляющей (МА) размером до 3 мкм. На образце С-2 по границам аустенитного зерна формируются вытянутые зерна аллотриоморфного феррита, что обусловлено незначительным снижением устойчивости переохлажденного аустенита за счет легирования уменьшения Mn и Ni по сравнению со сварным соединением С-5.

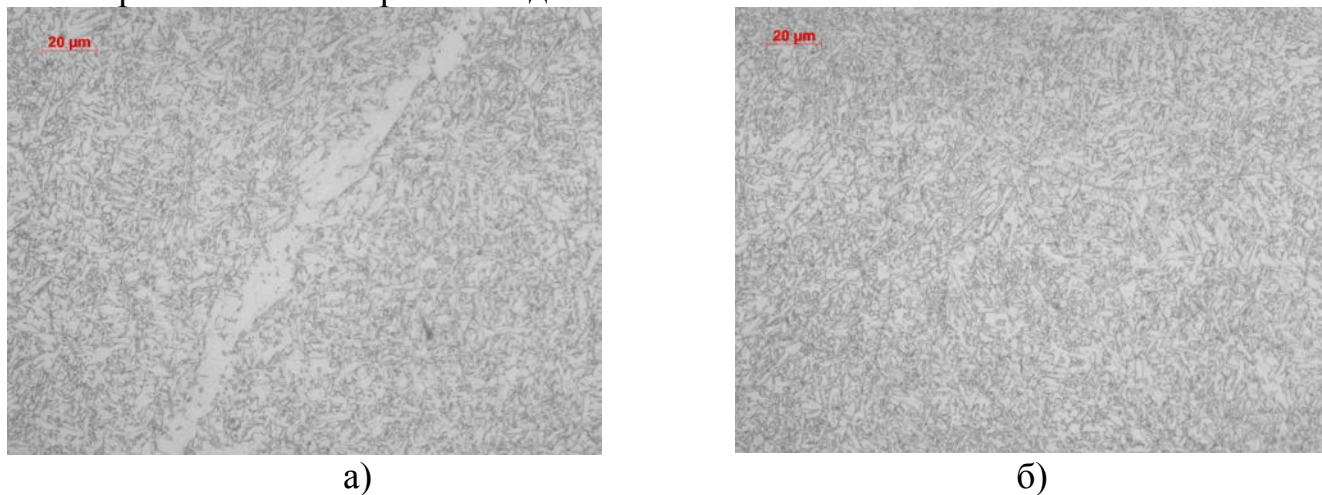


Рисунок 3 – Микроструктура наружного шва:
а – сварного соединения С-2; б – сварного соединения С-5

На участке перегрева всех исследованных образцов формируются крупные участки игольчатого и глобулярного (ГБ) бейнита. На участке нормализации аустенитное зерно постепенно измельчается и образуется также смешанная бейнитная структура (ИБ и ГБ) с выделением МА-составляющей и перлита. На участке неполной перекристаллизации наряду с формированием бейнитной составляющей наблюдается образование продуктов диффузионного превращения – полигонального феррита и вырожденного перлита. Но важно отметить, что во всех участках ЗТВ в образце С-5 формируется дисперсная мартенситно-аустенитная составляющая, которая, как известно, способствует повышению механических свойств при динамическом нагружении.

Микроструктура ЗТВ на участке наложения корневого шва преимущественно состоит из участков игольчатого бейнита. По удалению от линии сплавления объемная доля и размеры пакетов игольчатого бейнита уменьшаются, и в большей мере получает развитие диффузионное превращение и формируется полигональный феррит.

Результаты измерения ЗТВ на исследуемых образцах приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры ЗТВ соединений С-2 и С-5 при наложении наружного шва

| Номер образца | Общая ширина ЗТВ, мм | Ширина участков в ЗТВ, мм | | |
|---------------|----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| | | Участок перегрева | Участок полной и частичной перекристаллизации | Участок рекристаллизации |
| С-2 | 5,0 | 2,0 | 2,0 | 1,0 |
| С-5 | 4,0 | 1,5 | 1,5 | 1,0 |

Установлено, что на образце С-5 протяженность ЗТВ от сварки на 20 % меньше, чем на образце С-2. При нанесении надреза по линии сплавления образца с минимальной шириной ЗТВ, концентратор напряжений будет в большей степени приходиться на участок с перекристаллизованной структурой, либо на участок с мелким зерном, что положительно сказывается на ударной вязкости.

Фрактографическое исследование поверхностей изломов ударных образцов показало, что разрушение образцов наружного сварного шва С-5 идет по транскристаллитному механизму, образцов С-2 вязко-хрупко по границам аустенитных зерен. Понижение температуры испытания до минус 60 °С практически не изменяет механизм разрушения образцов С-5 в отличии от образцов соединения С-2, которые при снижении температуры испытания до минус 60 °С разрушаются хрупко (по механизму скола) по границам аустенитного зерна.

Ударная вязкость ЗТВ наружного шва сварного соединения С-5 имеет максимальные значения на всем исследованном температурном интервале, что, обусловлено наличием в микроструктуре ЗТВ дисперсной МА-составляющей, а также узкой зоны термического влияния.

Экспериментальное исследование эффективности применения порошковых проволок при ремонте сварных соединений электросварных труб проводили на пластинах из стали класса прочности К65 с толщиной стенки 27,7 мм и пластинах из стали марки SAWL 485 с толщиной стенки 37,4 мм. Предварительно на пластинах были выполнены U-образные выборки глубиной 70-75 % от номинальной толщины стенки.

Для проведения эксперимента были выбраны две марки сварочной проволоки:

- 1) проволока сплошного сечения марки Pipeliner 80Ni1 диаметром 1,2 мм;
- 2) основная порошковая проволока марки Pipeliner G80M-H диаметром 1,2 мм.

Механизированная сварка ремонтных участков-имитаторов производилась в цеховых условиях. Программа исследования приведена в таблице 7.

Таблица 7 – Программа экспериментального исследования

| Номер соединения | Основной металл | Сварочная проволока |
|------------------|--|---------------------|
| Ст-01 | Пластины из стали класса прочности К65 | Pipeliner 80Ni1 |
| Ст-02 | | Pipeliner G80M-H |
| Ст-03 | Пластины из стали марки SAWL 485 | Pipeliner 80Ni1 |
| Ст-04 | | Pipeliner G80M-H |

Радиографический контроль сварных швов Ст-02 и Ст-04 показал отсутствие дефектов. В сварных швах Ст-01 и Ст-03 выявлено несколько одиночных пор размером до 5 мм.

По результатам испытаний на статическое растяжение цилиндрических образцов (тип II по ГОСТ 6996) соединений Ст-01 – Ст-04 установлено, что механические характеристики соответствуют требованиям нормативных документов.

Результаты механических испытаний на ударный изгиб образцов сварных соединений Ст-01 – Ст-04, представлены в таблице 8, согласно которым установлено, что соединения, выполненные порошковыми проволоками, имеют более высокие значения ударной вязкости.

Таблица 8 – Результаты испытаний на ударный изгиб образцов (тип IX по ГОСТ 6996) сварных соединений Ст-01 – Ст-04

| Марка стали | Температура испытания, °С | Номер образца | Среднее значение ударной вязкости KCV, Дж/см ² | |
|-------------|---------------------------|---------------|---|--------|
| | | | МШ | ЛС |
| К65 | Минус 40 | Ст-1 | 92,42 | 119,37 |
| | | Ст-2 | 111,92 | 146,96 |
| SAWL 485 | Минус 30 | Ст-3 | 115,42 | 283,71 |
| | | Ст-4 | 124,50 | 311,13 |

Примечание: МШ – металл шва; ЛС – линия сплавления.

В результате анализа макроструктуры швов Ст-01 – Ст-04 установлено, что макроструктура швов Ст-02 и Ст-04 является более равновесной, что способствует получению более высоких значений ударной вязкости.

В **четвертой** главе разработана технология многодуговой сварки прямошовных электросварных ТБД из стали класса прочности К65 (Х80) с использованием на второй дуге микролегированной металлопорошковой проволоки, которая рекомендована к применению на ОАО «ЧТПЗ». При этом приведена методика расчета параметров режима сварки в зависимости от толщины стенки ТБД.

Рекомендуемые для многодуговой сварки под слоем флюса сочетания сварочных материалов и режимы сварки, обеспечивающие получение сварного соединения с толщиной стенки 27,7 мм из сталей класса прочности К65 (Х80) с высокими пластическими свойствами при отрицательных температурах, приведены в таблицах 9 и 10 соответственно.

Таблица 9 – Рекомендуемое сочетание сварочных материалов для сварки под слоем флюса труб из сталей класса прочности К65 (Х80) с толщиной стенки 27,7 мм

| Класс прочности | Толщина стенки, мм | Тип шва | Количество сварочных дуг | Сочетание сварочных проволок | Сварочный флюс |
|-----------------|--------------------|------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| К65 (Х80) | 27,7 | Внутренний | Четыре | S2Mo+S3TiB+ Power Pipe 4D-Ni | ФСА ЧТ А 650-20/80 |
| | | Наружный | Пять | | |

Таблица 10 – Рекомендуемые режимы многодуговой сварки под слоем флюса труб с толщиной стенки 27,7 мм

| Тип шва | Номер дуги | Тепловая мощность дуги ¹⁾ , кВт | Скорость сварки, м/ч | Площадь наплавленного металла каждой дугой, мм ² | Общая площадь наплавленного металла, мм ² |
|------------|------------------|--|----------------------|---|--|
| Внутренний | 1/ 2/ 3/ 4 | 34,6/ 30,6/ 22,7/ 20,5 | 90 | 32,0/ 40,0/ 15,0/ 11,0 | 98,0 |
| Наружный | 1/ 2/ 3/ 4/ 5 | 40,9/ 32,7/ 22,1/ 20,6/ 20,0 | 110 | 30,0/ 40,0/ 13,5/ 11,0/ 10,0 | 104,5 |

¹⁾ Определена с учетом принятого КПД процесса сварки $\eta = 0,9$.

Примечание: Вторая дуга при сварке внутреннего и наружного швов образована порошковой проволокой.

Также разработана технология ремонта механизированной сваркой в среде защитных газов сварных соединений электросварных труб с применением в качестве присадочного материала основной микролегированной порошковой проволоки. Рекомендуемые режимы сварки порошковой проволокой при ремонте продольного сварного соединения электросварных труб приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Рекомендуемые режимы механизированной сварки порошковой проволокой в смеси защитных газов

| Сварочный ток, А | Напряжение, В | Вылет электрода, мм | Расход газа, л/мин | Угол наклона горелки (угол вперед), град |
|------------------|---------------|---------------------|--------------------|--|
| 180 – 250 | 23 – 30 | 15 – 20 | 20 – 25 | 60 – 70 |

Приведены общие рекомендации по использованию порошковых проволок при многодуговой сварке под слоем флюса и механизированной сварке в среде защитных газов, позволяющие при разработке новых технологий сварки учесть особенности применения порошковых проволок.

Заключение

1. Разработанная математическая модель процесса многодуговой сварки, учитывающая ввод тепловой энергии отдельно для каждой дуги, расстояние между смежными дугами, зависимость теплофизических свойств от температуры и теплопередачу с внешних поверхностей, позволяет с достаточной для практики точностью описывать геометрию и температурные поля сварного соединения.

2. В результате выполненного на основе численного исследования математической модели анализа термических циклов в зоне крупного зерна и на участке перегрева сварного соединения установлено, что использование в многодуговом сварочном процессе порошковой проволоки приводит к уменьшению протяженности участков перегрева и крупного зерна, снижению времени пребывания металла при температурах выше 1100 °С и, как следствие, уменьшению величины зерна на участке перегрева. Средняя скорость охлаждения на участке крупного зерна смоделированных сварных соединений из стали класса прочности К65 (Х80), выполненных сочетанием проволок сплошного сечения и

порошковых проволок, составляет более $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, что способствует получению благоприятной структуры участка крупного зерна обладающей высоким уровнем ударной вязкости.

3. Экспериментально установлено, что применение порошковой проволоки в многодуговом сварочном процессе позволило снизить погонную энергию сварки внутренних и наружных швов на 8-12 %, что способствует повышению уровня механических свойств сварного соединения при испытаниях на ударный изгиб.

4. На основе результатов химического анализа выявлено, что при микролегировании через порошковую проволоку, расположенную на второй дуге, в многодуговом сварочном процессе в сочетании с проволоками сплошного сечения, получены однородные по химическому составу сварные соединения. Таким образом, в отличие от других позиций наиболее эффективно располагать порошковую проволоку в многодуговом процессе на второй дуге.

5. Для повышения низкотемпературной вязкости металла сварного шва наибольший эффект приносит многокомпонентное микролегирование Mo, Ti, В и Ni. При микролегировании только Mo не удастся обеспечить требуемый уровень пластических свойств сварного соединения, выполненного из стали класса прочности K65.

6. Сварные соединения, выполненные сочетанием порошковой проволоки и проволок сплошного сечения, имеют более высокие показатели ударной вязкости по линии сплавления на границе с ЗТВ по сравнению со сварными соединениями, выполненными проволоками сплошного сечения. Это связано с меньшей протяженностью ЗТВ (на 20 %) и формированием в данной зоне дисперсной мартенситно-аустенитной составляющей структуры.

7. Применение порошковой проволоки при ремонте сваркой основных швов электросварных ТБД из современных высокопрочных сталей позволяет повысить механические характеристики ремонтных сварных соединений, микролегировать ремонтный шов, обеспечить дополнительную защиту расплавленного металла и капель, снизить потери электродного металла на разбрызгивание за счет струйного переноса металла.

8. На основе проведенных исследований на ОАО «ЧТПЗ» разработана и внедрена технология, учитывающая рациональное и эффективное применение порошковых проволок в многодуговом сварочном процессе при производстве ТБД из сталей класса прочности K65 (X80), предложена методика расчета параметров режима многодуговой сварки, а также приведена технология ремонта механизированной сваркой в среде защитных газов сварных соединений электросварных труб с применением основной микролегированной порошковой проволоки. Данные технологии обеспечивают получение сварных соединений с высоким уровнем прочностных и пластических свойств.

9. Приведены общие рекомендации по использованию порошковых проволок при многодуговой сварке под слоем флюса и механизированной сварке в среде защитных газов, позволяющие при разработке новых технологий учесть особенности применения порошковых проволок.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- проведение трехмерного математического моделирования нелинейных тепловых процессов при многодуговой сварке под слоем флюса внутренних и наружных швов электросварных труб. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния трубы после сварки на основе результатов полученных при тепловом расчете;
- проведение экспериментально-теоретических исследований по обеспечению высоких механических характеристик сварных соединений высокопрочных ТБД из сталей класса прочности К70-К90.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Яковлев, Д.С. Анализ различных типов сварочных проволок для сварки трубных сталей при толщинах стенки труб более 25,0 мм / Д.С. Яковлев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – №39. – С. 157-159 (0,19 п.л.).

2. Яковлев, Д.С. Сварка трубных сталей высокой прочности с применением порошковых проволок / Д.С. Яковлев, М.В. Шахматов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2013. – №1. – С. 218-220 (0,19 п.л./0,1 п.л.).

3. Яковлев, Д.С. Анализ технологических особенностей сварки порошковой проволокой / Д.С. Яковлев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2014. – №2. – С. 92-95 (0,25 п.л.).

4. Шахматов, М.В. Моделирование тепловых процессов при многодуговой сварке / М.В. Шахматов, Д.С. Яковлев // Сварка и диагностика. – 2015. – №2. – С. 49-53 (0,31 п.л./0,2 п.л.).

5. Шахматов, М.В. Повышение механических характеристик сварных соединений из стали класса прочности К65 / М.В. Шахматов, Д.С. Яковлев, А.Н. Маковецкий, С.В. Шандер // Сварка и диагностика. – 2015. – №5. – С. 52-55 (0,25 п.л./0,1 п.л.).

6. Яковлев, Д.С. Применение порошковой проволоки при многодуговой сварке // Д.С. Яковлев, М.В. Шахматов // Сварочное производство. – 2015. – №11. – С. 3-9 (0,44 п.л./0,25 п.л.).

7. Шахматов, Д.М. Расчет параметров режима для многодуговой сварки труб под слоем флюса / Д.М. Шахматов, М.В. Шахматов, Д.С. Яковлев // Сварка и диагностика. – 2015. – №6. – С. 16-19 (0,25 п.л./0,1 п.л.).

Публикации в других изданиях:

1. Яковлев, Д.С. Применение современных сварочных материалов для сварки высокопрочных трубных сталей / Д.С. Яковлев, М.В. Шахматов // Перспективные вопросы мировой науки: материалы VIII международной научно-практической конференции. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012. – С. 48-54 (0,44 п.л./0,22 п.л.).

2. Яковлев, Д.С. Теоретическое исследование эффективности применения порошковой проволоки при многодуговой сварке / Д.С. Яковлев, М.В. Шахматов // Технологии и материалы. – 2015. – №2. – С. 9-16 (0,5 п.л./0,3 п.л.).

3. Яковлев, Д.С. Микролегирование сварных соединений порошковой проволокой / Д.С. Яковлев, М.В. Шахматов // Технологии и материалы. – 2015. – №2. – С. 23-28 (0,375 п.л./0,2 п.л.).

4. Яковлев, Д.С. Повышение качества сварных соединений труб при использовании порошковых проволок / Д.С. Яковлев // Сварка и родственные технологии: сборник докладов XV международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 53-61 (0,56 п.л.).