

Худяков Артем Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ
ПРЯМОШОВНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Екатеринбург – 2020 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»).

Научный руководитель: **Коробов Юрий Станиславович,**
Заслуженный изобретатель Российской Федерации,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
профессор кафедры «Технология сварочного производства».

Официальные оппоненты: **Паршин Сергей Георгиевич,**
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
профессор Высшей школы физики и технологий материалов.

Лаев Константин Анатольевич,
кандидат технических наук,
АО «Первоуральский новотрубный завод»,
главный специалист центра исследований и разработок №60.

Ведущая организация: **ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург**

Защита диссертации состоится «17» декабря 2020 г. в 10:00 ч на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.03 по адресу: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29., ауд.345

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», (<http://pstu.ru/>)

Автореферат разослан «10» ноября 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук,
доцент

Елена Михайловна Федосеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Разработка и освоение новых месторождений нефти и газа подразумевают строительство и эксплуатацию новых трубопроводов в осложненных климатических условиях. Эксплуатация трубопроводов существенно осложняется при транспортировке нефти и газа с высоким содержанием сероводорода (H_2S). Повышение пропускной способности трубопроводов требует увеличения толщины стенки труб. Это, закономерно, вызывает трудности в обеспечении требуемых свойств листового проката и, в особенности, сварного соединения труб большого диаметра (ТБД).

Опыт эксплуатации газо-нефтепроводов показывает, что разрушение прямошовных труб, главным образом, происходит на участке перегрева зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений. Доля аварий по причине коррозионного растрескивания достигает более 40%, при этом почти половина разрушений происходит в районе сварного соединения.

Механические и коррозионные свойства сварных соединений определяются типом и параметрами сформированной микроструктуры, которая, в свою очередь, зависит от термического цикла сварки, химического состава основного металла трубы и сварочных материалов. Большое тепловложение, необходимое для выполнения продольных сварных швов толстостенных труб, приводит огрублению микроструктуры и существенному снижению эксплуатационных и механических свойств сварных соединений на участке перегрева ЗТВ, а именно ударной вязкости, критического раскрытия в вершине трещины, а также стойкости к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН).

Проблеме снижения вязкопластических свойств сварных соединений высокопрочных труб большого диаметра (ТБД) посвящено большое количество исследований российских и зарубежных ученых, но усложнение условий эксплуатации трубопроводов закономерно приводит к постоянному росту требований к свойствам труб. Поэтому вопрос повышения ударной вязкости, критического раскрытия в вершине трещины сварных соединений высокопрочных ТБД остается актуальным и представляет большой научный и практический интерес. Вопросы влияния термических циклов сварки на стойкость сварных соединений труб к СКРН и обеспечение их стойкости к СКРН мало освещены в научно-технической литературе и поэтому также являются актуальными.

Настоящая диссертационная работа является актуальной, так как посвящена повышению эксплуатационных свойств сварных соединений высокопрочных ТБД за счет улучшения химического состава стали, рационального выбора сварочных материалов и разработки технологических мероприятий по снижению тепловложения многодуговой сварки.

Целью диссертационной работы является достижение нового уровня эксплуатационных свойств толстостенных прямошовных труб большого диаметра из

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н., Генеральному директору ОАО «РосНИТИ» И.Ю. Пышминцеву за участие в формировании направления диссертационного исследования, ценные замечания и предложения, а также за оказанную помощь при анализе результатов металлографических исследований.

современных сталей класса прочности К60 за счет улучшения микроструктуры и повышения вязкопластических и коррозионных свойств сварных соединений.

Для достижения поставленной цели был сформулирован ряд **задач**:

1. Установить рациональное содержание титана и бора в литом металле продольного сварного шва, обеспечивающее наивысший уровень вязкопластических свойств;

2. Исследовать влияние различных микролегирующих элементов основного металла на вязкопластические свойства участка перегрева ЗТВ сварных соединений высокопрочных ТБД и разработать рекомендации по улучшению химического состава стали с позиции повышения свариваемости;

3. Установить закономерности влияния термических циклов сварки и скоростей охлаждения на микроструктуру, вязкопластические свойства (критическое раскрытие в вершине трещины δ_c , ударная вязкость) и стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением участка перегрева ЗТВ сварных соединений ТБД. Уточнить целевой диапазон скоростей охлаждения, в котором обеспечивается заданный уровень требований к сварным соединениям ТБД, предназначенных для морских трубопроводов;

4. Выполнить анализ скоростей охлаждения на участке перегрева ЗТВ на основе численного моделирования тепловых полей посредством метода конечных элементов (МКЭ) при многодуговой сварке под флюсом. Определить необходимый уровень снижения погонной энергии сварки для обеспечения скорости охлаждения на участке перегрева ЗТВ в целевом диапазоне;

5. Разработать технологические рекомендации по режимам многодуговой сварки, обеспечивающие скорость охлаждения на участке перегрева ЗТВ в целевом диапазоне.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Установлен диапазон содержания микролегирующих элементов титана и бора, обеспечивающих максимальный уровень критического раскрытия в вершине трещины металла продольных сварных швов высокопрочных ТБД;

2. Установлено влияние микролегирующих элементов на вязкопластические свойства участка перегрева ЗТВ сварных соединений высокопрочных ТБД;

3. Определены целевые диапазоны скоростей охлаждения на участке перегрева ЗТВ, обеспечивающие высокие значения критического раскрытия в вершине трещины и стойкость к СКРН сварных соединений высокопрочных ТБД;

4. Разработана конечно-элементная модель распространения тепла при многодуговой сварке, позволяющая определять геометрические параметры сварного шва и скорости охлаждения в различных точках ЗТВ с высокой точностью;

5. Разработана методика расчета режимов многодуговой сварки, обеспечивающих качество и надежность сварных соединений высокопрочных ТБД на основе результатов выполненных экспериментальных и теоретических исследований.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны рекомендации по применению сочетаний марок сварочных проволок при автоматической многодуговой сварке под флюсом высокопроч-

ных ТБД, обеспечивающие высокие значения критического раскрытия в вершине трещины металла шва;

2. Разработаны рекомендации по улучшению химического состава стали класса прочности К60, обеспечивающего высокие значения ударной вязкости на участке перегрева ЗТВ сварных соединений высокопрочных ТБД;

3. Разработана математическая модель автоматической многодуговой сварки под флюсом с численным решением в программном продукте «SYSWELD», позволяющая аналитически оценивать геометрические параметры сварного шва, оценивать скорость охлаждения на участке перегрева ЗТВ по заданным параметрам режима сварки;

4. Разработана технология автоматической многодуговой сварки под флюсом сварных соединений высокопрочных ТБД с пониженным на 15-30% тепловложением. Разработанная технология обеспечивает высокий уровень ударной вязкости, критического раскрытия в вершине трещины и стойкости к СКРН сварных соединений высокопрочных ТБД;

5. Разработанные технические решения автора запатентованы и внедрены в нормативно-техническую документацию АО «Волжский трубный завод» (АО «ВТЗ»), регламентирующую требования к производству листового проката и ТБД;

6. Результаты работы внедрены в учебный процесс по профессиональной переподготовке специалистов трубоэлектросварочного цеха АО «ВТЗ» по специализации «трубное производство»

Методы исследований и достоверность полученных результатов.

Численный расчет тепловых полей при многодуговой сварке проведен с использованием разработанной автором модели, реализованной в лицензированном программном комплексе SYSWELD. Достоверность расчетов подтверждена экспериментально путем прямого определения температур в условиях промышленного производства ТБД.

Физическое моделирование формирования структуры и свойств металла в условиях сварочного нагрева и охлаждения выполнены по стандартизированной методике на сертифицированном и аттестованном комплексе Gleeble 3800.

Все виды механических, коррозионных испытаний и металлографических исследований выполнены в Испытательной лаборатории ОАО «РосНИТИ», аккредитованной Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии и имеющей признание Российского морского регистра судоходства.

Личный вклад автора состоит в комплексном решении проблемы повышения вязкопластических свойств и коррозионной стойкости сварных соединений труб большого диаметра, получении научных результатов, отраженных в опубликованных работах, разработке режимов сварки и их реализации на стадии опытно-промышленного производства труб.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований влияния микролегирующих элементов на вязкопластические свойства металла шва и участка перегрева ЗТВ сварных соединений высокопрочных ТБД;

2. Результаты имитации термических циклов сварки;

3. Результаты математического моделирования нелинейных процессов распространения тепла при автоматической многодуговой сварке;
4. Разработка режимов автоматической многодуговой сварки труб с пониженным тепловложением;
5. Результаты промышленного опробования разработанных технологических мероприятий по повышению свойств сварных соединений высокопрочных ТБД.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на российских и международных научно-технических конференциях и форумах: V, VI научно-технической конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ, г. Челябинск, 2013 – 2014 гг.; XXI, XXIII международной научно-технической конференции «Трубы», г. Челябинск, 2014, 2018 г.; Международной научно-практической конференции «Трубопроводы в России и за рубежом – настоящее и будущее», г. Псков, 2014 г.; XXV научно-технической конференции сварщиков Урала и Сибири «Современные проблемы сварочного производства», г. Челябинск, 2014 г.; X, XI, XIII Молодежной научно-практической конференции ТМК, г. Сочи 2014 - 2017 гг.; XV, XVI Международной научно-технической конференции «Сварка и родственные технологии», г. Екатеринбург, 2015-2016 гг.; I Международная конференция «Коррозия в нефтегазовой отрасли», г. Санкт-Петербург, 2019 г; 13th International Conference on the Mechanical Behaviour of Materials (ICM-13), Melbourne, Australia; 2019; Международная конференция «Сварка в России - 2019: современное состояние и перспективы», г. Томск, 2019.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах, из них 10 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

СОДЕРЖАНИЕ ДИSSERTАЦИИ

Во введении обоснована актуальность тематики исследования, сформулированы цель работы и задачи исследования, отмечены научная новизна полученных результатов и практическая значимость работы.

В первой главе на основе обзора научно-технической литературы показаны тенденции развития системы транспортировки газа в РФ и перспективы потребления ТБД. Выполнен обзор и анализ действующих и перспективных требований, предъявляемых к сварным соединениям ТБД. Представлен обзор технологии многодуговой сварки ТБД. Описаны особенности металлургических процессов, протекающих в стали при многодуговой сварке труб. Представлен обзор по существующим способам повышения вязко-пластических свойств сварных соединений ТБД.

Изучение и анализ научно-технической литературы позволяет сделать следующие выводы:

1. Ближайшее время имеющийся глобальный спрос обеспечит стабильно высокий уровень загрузки отечественных предприятий, специализирующихся на производстве ТБД;

2. Для реализации новых проектов магистральных газопроводов используют ТБД высоких классов прочности с толщиной стенки до 40 мм и более;

3. К сварным соединениям для подводных трубопроводов предъявляются высокие требования по параметру критическое раскрытие в вершине трещины δ_c – не менее 0,15 мм по линии сплавления и 0,20 мм по центру шва (проекта «Nord Stream 2»); по параметру ударная вязкость в различных зонах сварного соединения не менее 63 Дж/см² (проект «Nord Stream 2»). Также для проекта «Nord Stream 2» должна быть обеспечена стойкость сварных соединений к СКРН;

4. Производство толстостенных ТБД предполагает сварку продольных сварных швов с большим тепловложением, что приводит к замедленному охлаждению металла на участке перегрева ЗТВ и существенному снижению эксплуатационных свойств сварных соединений;

5. Проблема сильного снижения вязкопластических свойств сварных соединений высокопрочных ТБД изучена довольно глубоко, однако решения, представленные в настоящее время, труднореализуемы и потребуют больших капитальных вложений или не обеспечивают уровень свойств, требуемый для современных трубопроводов. Обеспечение высокого уровня вязкопластических свойств сварных соединений толстостенных высокопрочных ТБД, а также их стойкость к СКРН является актуальной задачей;

6. Задача обеспечения вязкопластических свойств и стойкость к СКРН сварных соединений толстостенных высокопрочных ТБД может быть решена за счет рационального выбора сварочных материалов, улучшения химического состава стали и снижения тепловложения при сварке.

Во **второй главе** описаны исследования влияния содержания микролегирующих элементов на вязкопластические свойства металла шва и участка перегрева ЗТВ сварных соединений ТБД. Представлены результаты экспериментальных и лабораторных исследований по изучению влияния термических циклов сварки на микроструктуру, вязкопластические свойства и стойкость к СКРН участка перегрева ЗТВ сварных соединений высокопрочных труб.

Для оценки влияния содержания титана и бора в металле шва выполняли сварку труб с помощью четырехдугового процесса с различным сочетанием сварочных проволок марок СВ-08ГНМ и S3MoTiB (OK Autrod 13.64). Вязкие свойства оценивали посредством определения параметра δ_c . Содержание титана и бора оценивали с помощью химического анализа атомно-эмиссионным спектральным методом. Результаты эксперимента показали, что вязкопластическими свойствами, удовлетворяющими требованиям к трубопроводам по критерию раскрытия вершины трещины, обладают сварные швы с содержанием титана 0,04-0,06% и содержанием бора 0,004-0,006%.

Для изучения влияния легирующих элементов основного металла на вязкопластические свойства участка перегрева ЗТВ сварных соединений ТБД было выплавлено четырнадцать сталей с различным химическим составом, у которых углеродный эквивалент ($C_{E(ПВ)}$) одного уровня. Из выплавленных сталей были прокатаны полосы толщиной 30 мм по режимам контролируемой прокатки. Затем была выполнена сварка этих пластин с тепловложением 6,5-7,0 кДж/мм. Далее была выполнена оценка механических свойств основного металла и сварных соединений.

Химический состав сталей выбирали таким образом, чтобы оценить влияние отдельных химических элементов. Содержание ниобия и титана во всех сталях было одинаковым (Ti-0,01%, Nb-0,04%).

В результате проведенных исследований установлено неблагоприятное влияние ванадия, кремния и молибдена на вязкопластические свойства продольных сварных соединений ТБД на участке перегрева ЗТВ. Для обеспечения вязкопластических свойств сварных соединений необходимо исключить ванадий из химического состава основного металла, ограничить содержание кремния (не более 0,2%) и молибдена (в диапазоне 0,1-0,2 %).

На основании полученных результатов разработаны и запатентованы требования к химическому составу основного металла труб класса прочности К60 и внедрены в нормативно-техническую документацию АО «Волжский трубный завод» (АО «ВТЗ»), регламентирующую требования к производству листового проката и ТБД. Исследования влияния термических циклов сварки на вязкопластические свойства участка перегрева ЗТВ выполняли на образцах трубной стали класса прочности К60, соответствующей по химическому составу разработанным рекомендациям с помощью имитации сварочного нагрева. Химический состав исследованной стали представлен в таблице 1

Таблица 1 – Химический состав основного металла исследованных труб.

Массовая доля элементов, %																Рсм	Сэкв.
C	Si	Mn	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Al	Ti	Ca	N	B	S	P		
0,060	0,14	1,67	0,180	0,030	0,180	0,190	0,000	0,020	0,029	0,012	0,002	0,004	0,0001	0,0010	0,0050	0,17	0,41

Исследования выполняли на комплексе моделирования технологических процессов Gleeble 3800. Нагрев до температуры 1350 °С осуществляли путем пропускания прямого тока через образец, а затем охлаждали с различными скоростями за счет теплоотвода через захваты и регулируемого понижения силы тока. Оценку влияния термических циклов сварки на вязкопластические свойства металла выполняли с помощью испытаний по оценке параметра δ_c и на ударный изгиб. Графические изображения результатов испытаний представлены на рисунке 1.

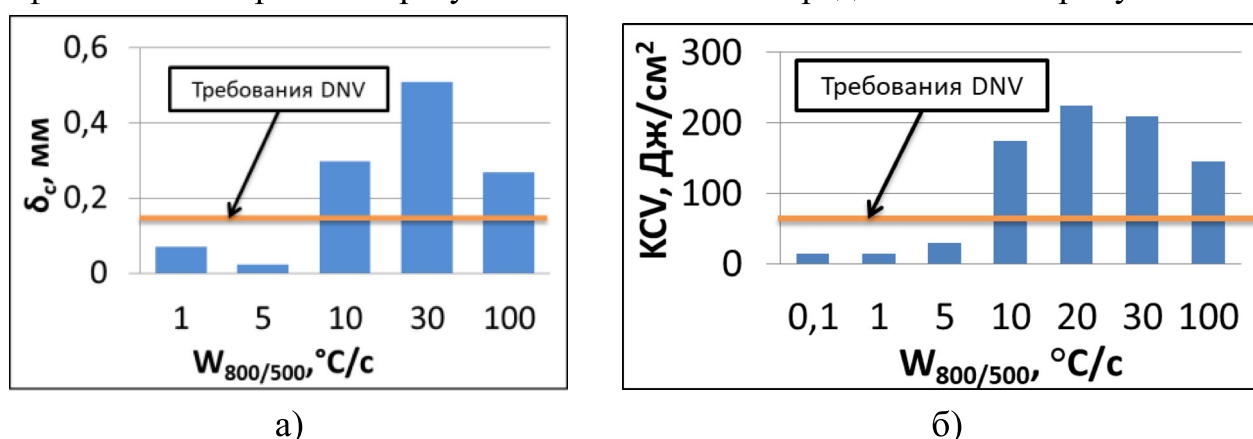


Рисунок 1 – Результаты испытаний образцов с имитированными циклами сварки: а) Критическое раскрытие в вершине трещины δ_c ; б) Ударная вязкость

Результаты испытаний образцов из металла с имитированной микроструктурой участка перегрева ЗТВ на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением представлены на рисунке 2. Видно, что лишь образцы с микроструктурой участка перегрева ЗТВ соответствующее скоростям

охлаждения 10 и 20 °С/с выдержали испытание на стойкость к СКРН. Остальные образцы разрушились, не выдержав базовое время испытаний в 720 ч.

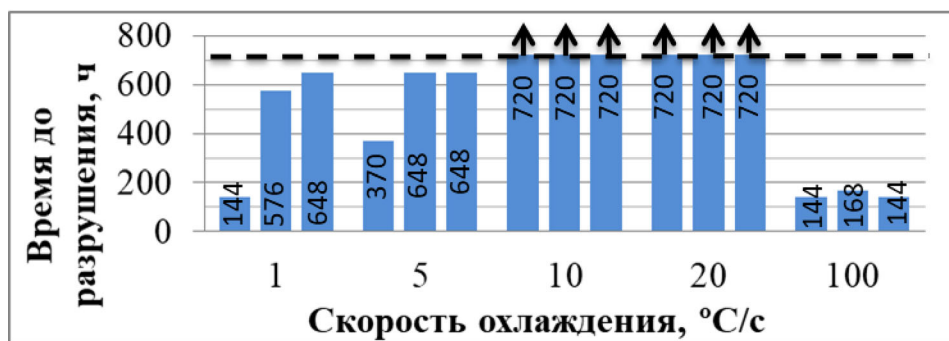


Рисунок 2 – Результаты испытаний на стойкость к СКРН ($\sigma=0,72\sigma_T$) образцов с имитированными циклами сварки

Таким образом, обеспечение предъявляемых требований к сварным соединениям ТБД по ударной вязкости, критическому раскрытию в вершине трещины и стойкости к СКРН могут быть обеспечены при реализации скоростей охлаждения в рекомендуемом диапазоне 10-20 °С/с. Это накладывает дополнительные ограничения на технологию многодуговой сварки продольных швов ТБД и требует повышения скорости охлаждения на участке перегрева ЗТВ, относительно существующих в настоящее время режимов. Для выбора и обоснования рационального уровня тепловложения (погонной энергии сварки) и его технологической реализации в диссертационной работе были выполнены дополнительные модельные и натурные эксперименты.

В третьей главе приведены результаты математического моделирования тепловых процессов при многодуговой сварке ТБД. Численное решение задачи теплопроводности выполнено с использованием программного продукта SYSWELD.

Расчет тепловых полей при сварке продольного сварного шва ТБД выполняли по схеме тонкостенной трубы, т.к. ее толщина намного меньше радиуса. При многодуговой сварке ввод тепла в изделие одновременно осуществляется несколькими объемными источниками, поэтому температурные поля в исследуемой плоскости определяются по принципу суперпозиции суммой температурных полей от каждого источника (рисунок 3):

$$T_a(q_\Sigma, r, t) = \sum_{n=1}^i T_i(q_i, r, t), \quad (1)$$

где T_a – поле температур в исследуемой плоскости; q_Σ – суммарная погонная энергия сварки; q_i – погонная энергия сварки i -го источника тепла; r – радиус вектор; t – время.

Для моделирования объемной плотности тепловыделения в окрестности каждой сварочной дуги была использована модель объемного тепловыделения, предложенная Дж. Голдаком. Модель источника тепла Дж. А. Голдака описывается нормальным распределением удельной тепловой мощности по всем координатным осям в объеме тела, имеющего форму двойного эллипсоида (рисунок 4).

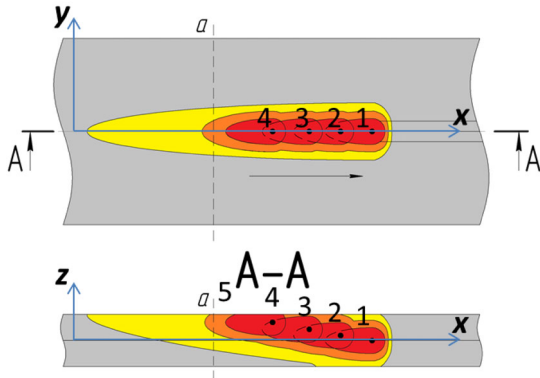


Рисунок 3 – Схема температурного поля при многодуговой сварке

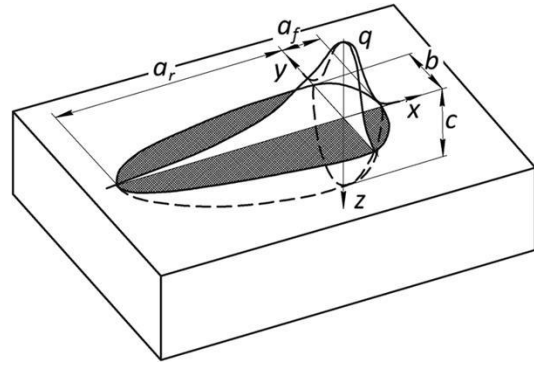


Рисунок 4 – Модель двойного эллипсоидного источника тепла по Голдаку

Независимое распределение удельной тепловой мощности q_v во фронтальной (индекс f) и хвостовой (индекс r) частях эллипсоида описывается уравнениями:

$$q_{v,f} = f_f \cdot \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot q}{a_f \cdot b \cdot c \cdot \pi^{3/2}} \cdot \exp \left(-3 \cdot \left(\left[\frac{x + v \cdot (t - \tau)}{a_f} \right]^2 + \left[\frac{y}{b} \right]^2 + \left[\frac{z}{c} \right]^2 \right) \right), \quad (2)$$

$$q_{v,r} = f_r \cdot \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot q}{a_r \cdot b \cdot c \cdot \pi^{3/2}} \cdot \exp \left(-3 \cdot \left(\left[\frac{x + v \cdot (t - \tau)}{a_r} \right]^2 + \left[\frac{y}{b} \right]^2 + \left[\frac{z}{c} \right]^2 \right) \right), \quad (3)$$

где q – эффективная тепловая мощность источника нагрева; τ – время запаздывания, отсчитываемое от начала действия источника; t – текущее время; v – скорость перемещения источника (скорость сварки); x, y, z – полуоси эллипсоида в направлении координатных осей Ox, Oy, Oz ; f_f и f_r – коэффициенты, определяющие соотношение тепла, вносимого во фронтальную и хвостовую части эллипсоида; a_f, a_r, b, c – соответствующие радиусы нормального распределения.

В разработанной математической модели многодуговой сварки труб были использованы известные зависимости теплофизических свойств и коэффициентов поверхностной теплоотдачи от температуры тела для малоуглеродистой стали. Схематическое изображение температурной краевой задачи при сварке продольного шва ТБД представлено на рисунке 5.

Сварку продольного шва ТБД выполняют в специальную разделку кромок. Так как каждая сварочная дуга вносит определенное количество наплавленного металла, каждый сварочный источник тепла действует на разной глубине. Первый источник тепла действует в корне разделки кромок, второй источник действует на поверхности наплавленного металла от первой дуги, третий – на поверхности наплавленного металла от второго источника и т.д. Принципиальная схема распределения источников тепла по глубине представлена на рисунке 6. Координата Z_i каждого последующего источника тепла будет определяться как высота треугольника площадью равной площади поперечного сечения наплавленного металла предыдущими сварочными дугами. Схема определения координаты Z источников тепла при многодуговой сварке представлена на рисунке 7.

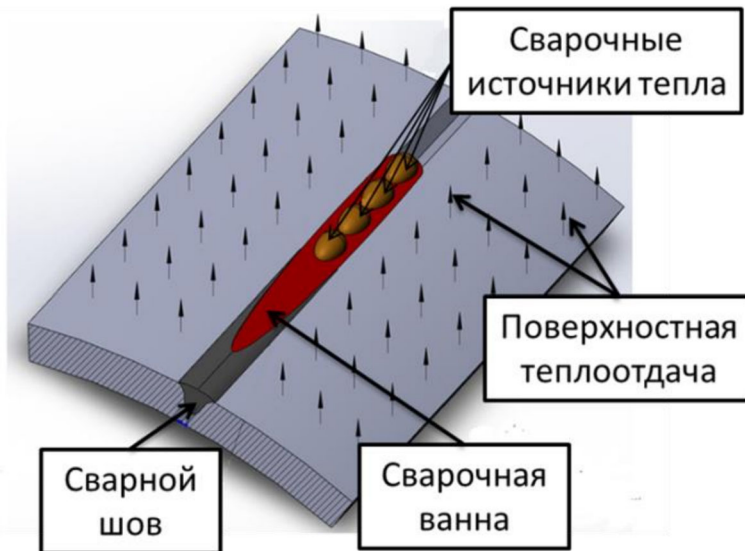


Рисунок 5 – Температурная краевая задача для многодуговой сварки ТБД

Координата Z_i действия каждого источника тепла определяли из выражения высоты треугольника по известной площади по формуле:

$$Z_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_{Hi-1})}{\tan(\beta/2)}} \quad (4); \quad F_H = \frac{\alpha_H \cdot I_{CB}}{\gamma \cdot V_{CB}}, \quad (5)$$

где F_H – площадь поперечного сечения наплавленного металла (m^2); α_H – коэффициент наплавки ($кг/А \cdot с$), при сварке под флюсом равен коэффициенту расплавления α_p ; I_{CB} – сила сварочного тока (A); γ – плотность наплавляемого металла ($кг/м^3$); V_{CB} – скорость сварки ($м/с$).

Для расчета площади поперечного сечения наплавленного металла методом регрессионного анализа экспериментальных данных получены эмпирические зависимости коэффициентов расплавления при сварке на постоянном токе обратной полярности ($\alpha_{p(DC+)}$) и на переменном токе ($\alpha_{p(AC)}$) для вылета электрода 40 мм:

$$\alpha_{p(DC+)} = 0,053 \cdot \frac{I_{CB}}{d_3^{0,88}} \quad (6); \quad \alpha_{p(AC)} = 1,257 \cdot \frac{I_{CB}^{0,539}}{d_3^{0,514}} \quad (7),$$

где I_{CB} – сила сварочного тока; d_3 – диаметр электрода.

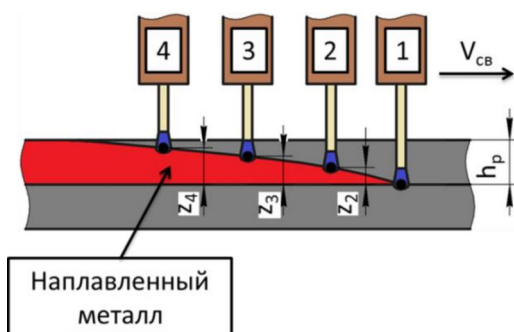


Рисунок 6 – Схема распределения источников тепла по высоте: h_p – глубина разделки кромок; Z_i – координат i -го источника тепла

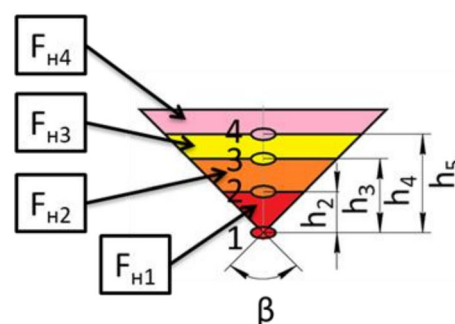


Рисунок 7 – Схема определения координаты Z источников тепла: F_{Hi} – площадь поперечного сечения наплавленного металла i -ой дугой; β – угол разделки кромок

В программном комплексе Sysweld распределение мощности объемных источников тепла осуществляется по алгоритму в соответствии с уравнениями (2, 3). Объемный источник тепла, задаваемый в программном продукте Sysweld, представлен на рисунке 8. Для моделирования объемного источника тепла необходимо задавать погонную энергию сварки, скорость движения источника, время начала действия источника, а также радиусы нормального распределения a_f , a_r , b и c (уравнения 2, 3).

Тепло электрической дуги поступает в изделие через поверхность образующегося кратера, то есть через объемный источник тепла. Таким образом, в диссертационной работе геометрические параметры источников тепла Голдака, т.е. радиусы нормального распределения, были приняты равными геометрическим параметрам кратера, образующегося под сварочной дугой. Для определения радиусов нормального распределения источника тепла Голдака были выполнены эксперименты по определению параметров кратера сварочной ванны. Для построения профиля кратера сварочной ванны была использована методика, основанная на применении вставок-индикаторов из тугоплавких металлов. В пластине, подвергаемой проплавлению, в плоскости перпендикулярной поверхности материала находились вставки из вольфрамовой проволоки диаметром 0,5 мм с шагом 1,5 – 2 мм (рисунок 9).

Результаты экспериментальных данных были обработаны с помощью регрессионного анализа, в результате которого получены эмпирические зависимости геометрических параметров кратера:

$$h_{кр}^{DC+} = 2,123 \cdot \frac{I_{св}^{1,516}}{V_{св}^{0,528} \cdot d_3^{0,488}} \quad (8);$$

$$b_{кр}^{DC+} = 54,205 \cdot \frac{U_d^{1,216} \cdot d_3^{0,904}}{I_{св}^{0,829} \cdot V_{св}^{0,571}} \quad (9);$$

$$h_{кр}^{AC} = 0,642 \cdot \frac{I_{св}^{1,168}}{U_d^{0,756} \cdot V_{св}^{0,756} \cdot d_3^{0,923}} \quad (10);$$

$$b_{кр}^{AC} = 6,865 \cdot \frac{U_d^{0,851} \cdot d_3^{0,6}}{I_{св}^{0,851} \cdot V_{св}^{0,32}} \quad (11),$$

где $h_{кр}^{DC+}$, $h_{кр}^{AC}$ – глубина кратера при сварке на постоянном токе обратной полярности и переменном токе соответственно [мм]; $b_{кр}^{DC+}$, $b_{кр}^{AC}$ – ширина кратера при сварке на постоянном токе обратной полярности и переменном токе соответственно [мм]; $I_{св}$ – сила сварочного тока [А]; U_d – напряжение на дуге, [В]; $V_{св}$ – скорость сварки, [мм/с]; d_3 – диаметр электродной проволоки [мм].

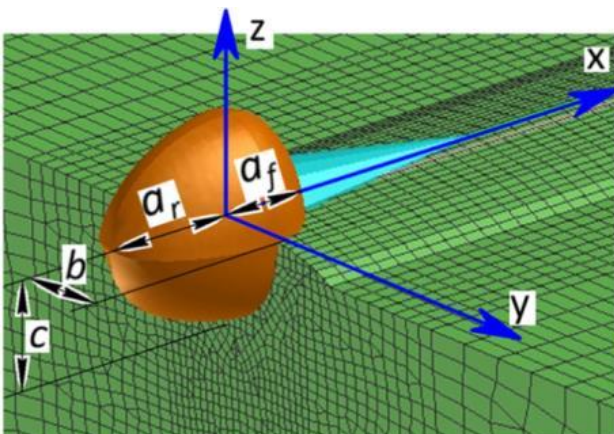


Рисунок 8 – Объемный источник тепла в программном продукте Sysweld

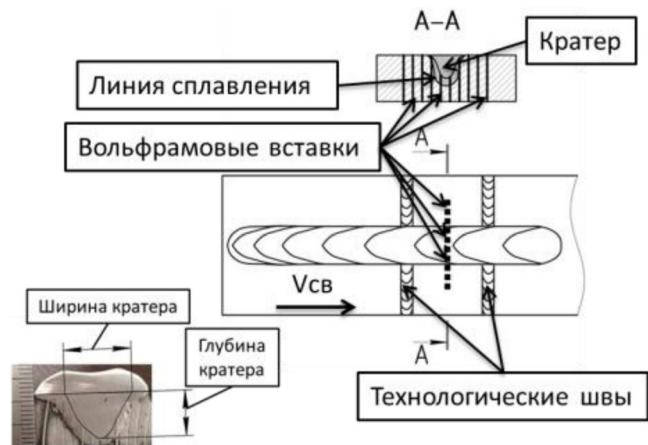


Рисунок 9 – Определение геометрических параметров кратера

Моделирование процесса сварки выполняли в соответствии с промышленными режимами сварки ТБД. Графические изображения результатов моделирования представлены на рисунке 10. Геометрические параметры сварного шва, длина сварочной ванны, протяженность различных участков ЗТВ сварного соединения, полученные в результате численного решения задачи теплопроводности, с достаточной для практических целей точностью совпадают с теми же параметрами сварных соединений, выполненных в производственных условиях, ошибка составляет не более 10%.

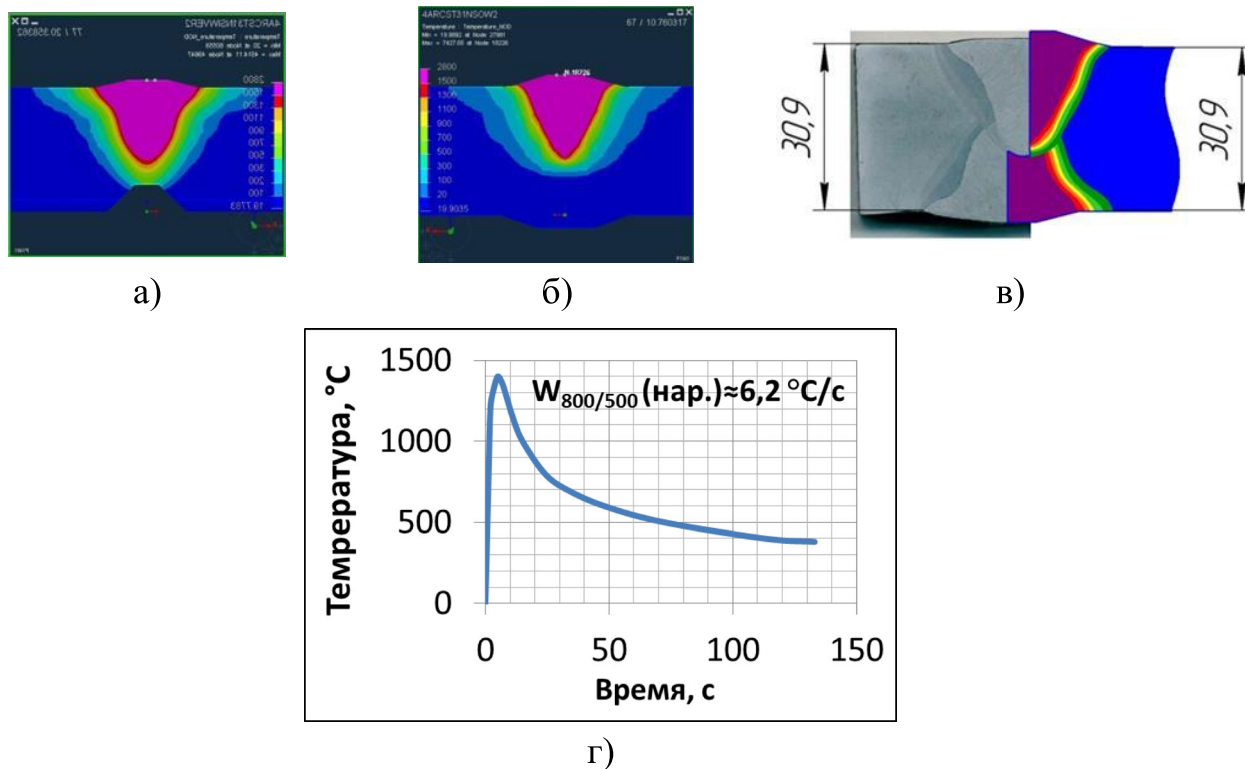


Рисунок 10 – Результаты численного моделирования процесса многодуговой сварки труб с толщиной стенки 30,9 мм: а) сварка внутреннего шва; б) сварка наружного шва; в) сопоставление смоделированного и реального швов; г) термический цикл участка перегрева ЗТВ при сварке наружного шва

Проведены эксперименты по записи термических циклов сварки труб с толщиной стенки 30,9 мм на трубоэлектросварочном стане АО «ВТЗ». Скорость охлаждения металла ОШЗ при сварке труб с толщиной стенки 30,9 мм на режимах внутреннего шва с тепловложением 6,45 кДж/мм составила 6,1 °C/с. Скорость охлаждения металла ОШЗ полученная расчетным способом составила 6,5-6,7 °C/с. Ошибка оценки скорости охлаждения не превышает 10%.

Таким образом, разработанная модель и ее численные решения с достаточной точностью для практических расчетов отражают процесс многодуговой сварки под флюсом ТБД. Также численные решения разработанной модели многодуговой сварки позволяют оценить геометрические характеристики сварного шва (глубину и форму проплавления, ширину шва) и скорость охлаждения в любой точке сварного соединения в зависимости от задаваемых параметров режима сварки. Модель позволяет оперативно производить изменения режимов сварки при необходимости корректировки геометрических размеров сварного шва и скорости охлаждения без существенных материальных затрат.

В результате численного решения задачи теплопроводности были определены скорости охлаждения на участке перегрева ЗТВ при сварке труб по стандартным режимам (рисунок 11). Скорость охлаждения на участке перегрева ЗТВ для труб с толщиной стенки от 23 до 40 мм не входит в рекомендуемый диапазон скоростей охлаждения и находится ниже минимальной рекомендуемой. Для реализации скорости охлаждения в рекомендуемом диапазоне необходимо снизить общую погонную энергию сварки при выполнении продольного сварного шва. С помощью разработанной конечно-элементной модели многодуговой сварки было рассчитано количество погонной энергии, на которое необходимо снизить погонную энергию сварки для обеспечения скорости охлаждения на участке перегрева ЗТВ в рекомендуемом диапазоне (рисунок 12). Для реализации скорости охлаждения в рекомендуемом диапазоне необходимо снизить общую погонную энергию сварки при выполнении продольного сварного шва на 15-30 %, в зависимости от толщины стенки свариваемых труб.

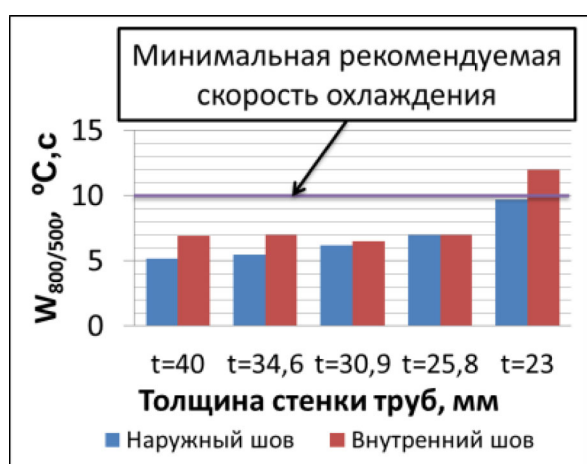


Рисунок 11 – Скорости охлаждения участка перегрева ЗТВ при сварке толстостенных ТБД по стандартным режимам

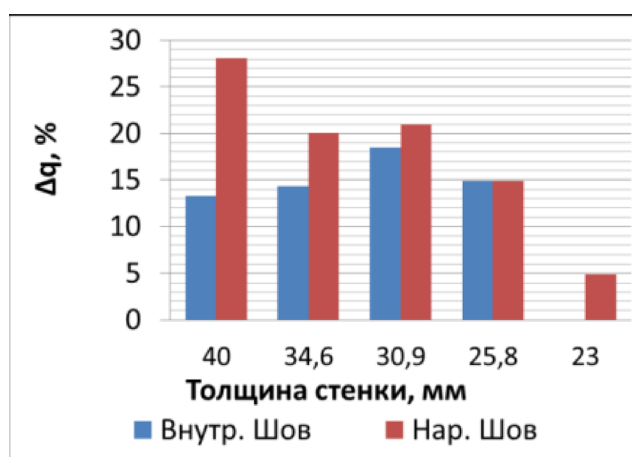


Рисунок 12 – Необходимый уровень снижения погонной энергии сварки

В четвертой главе на основании разработанной математической модели и ее численных решений предложена технология автоматической многодуговой сварки под слоем флюса ТБД с пониженным тепловложением. Представлены результаты опытно-промышленного опробования предложенных технических решений.

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что с уменьшением диаметра сварочной проволоки увеличивается проникающая способность дуги и, соответственно, увеличивается глубина проплавления. Применение сварочной проволоки на первой дуге меньшего диаметра позволяет уменьшить глубину разделки кромок и тем самым снизить необходимое количество наплавленного металла. Это позволило понизить суммарное тепловложение при многодуговой сварке продольных швов на ~30%, с 6,1 и 6,5 КДж/мм до 4,3 и 4,4 КДж/мм для внутреннего и наружного швов соответственно. Результаты численного решения задачи теплопроводности представлены на рисунке 13.

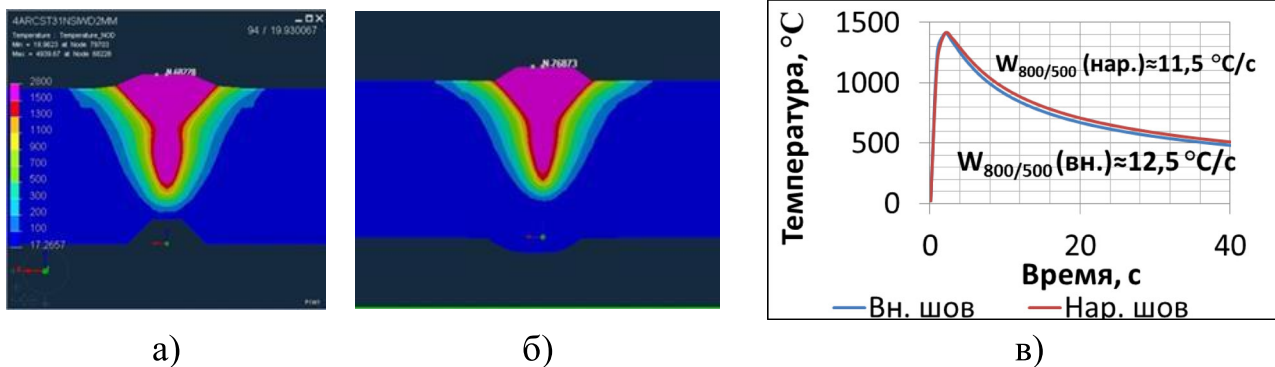


Рисунок 13 – Результаты численного моделирования процесса многодуговой сварки с пониженным тепловложением труб с толщиной стенки 30,9 мм:

а) сварка внутреннего шва; б) сварка наружного шва; в) термические циклы на участке перегрева ЗТВ

Результаты численного моделирования задачи теплопроводности показывают, что разработанный режим сварки обеспечивает требуемую глубину проплавления и перекрытие внутреннего и наружного сварных швов. Анализ полученных термических циклов сварки показал, что при сварке внутреннего шва на участке перегрева ЗТВ реализуется скорость охлаждения $\sim 12-12,5$ °C/c, а при сварке наружного шва- $11-11,5$ °C/c.

Промышленное опробование представленных решений было выполнено при производстве опытной партии труб типоразмером 1153x30,9 группы прочности X70 (K60), предназначенных для проекта «Nord Stream 2». Листовой прокат был изготовлен в условиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в соответствии с разработанными требованиями по химическому составу стали. Химический состав стали представлен в таблице 2. Сварку труб выполняли в условиях трубоэлектросварочного цеха АО «ВТЗ» по разработанным режимам со сниженным тепловложением для труб с толщиной стенки 30,9 мм. Сварка внутренних и наружных швов труб выполнялась с применением сочетаний двух сварочных проволок Св-08ГНМ и двух проволок S3MoTiV и сварочного флюса ОК 10.74. На первых дугах применяли сварочную проволоку диаметром 2,4 мм. Погонная энергия сварки составила 4,3 и 4,4 КДж/мм для внутреннего и наружного швов соответственно. Изменение технологии сварки привело к сужению сварных швов в корне. Сравнительная иллюстрация сварных швов, выполненных по стандартному и по новому режимам, представлена на рисунке 14.

Таблица 2 – Химический состав основного металла труб опытной партии для проекта «Nord Stream 2».

Массовая доля элементов, %													
C	Si	Mn	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Al	Ti	B	S	P
0,056	0,10	1,72	0,23	0,02	0,31	0,12	0,004	0,05	0,03	0,02	0,0038	0,0012	0,0069

Результаты механических испытаний показали, что сварные соединения обладают высокими вязкопластическими свойствами. Сравнительные результаты испытаний представлены на рисунке 15. Полученные сварные соединения выдержали испытания на стойкость к СКРН по NACE TM 0177 в растворе А.

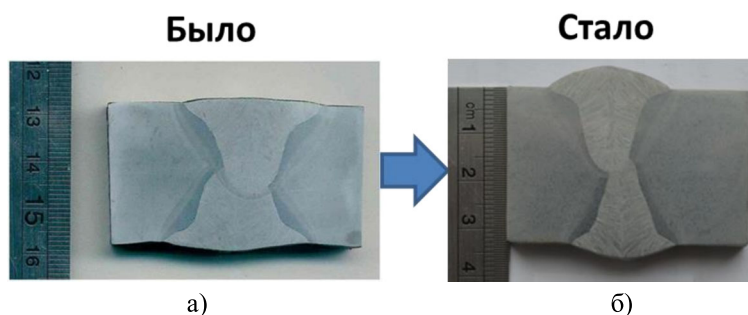


Рисунок 14 – Макрошлифы продольных сварных швов труб типоразмером 1153x30,9 мм: а) стандартный режим; б) новый режим

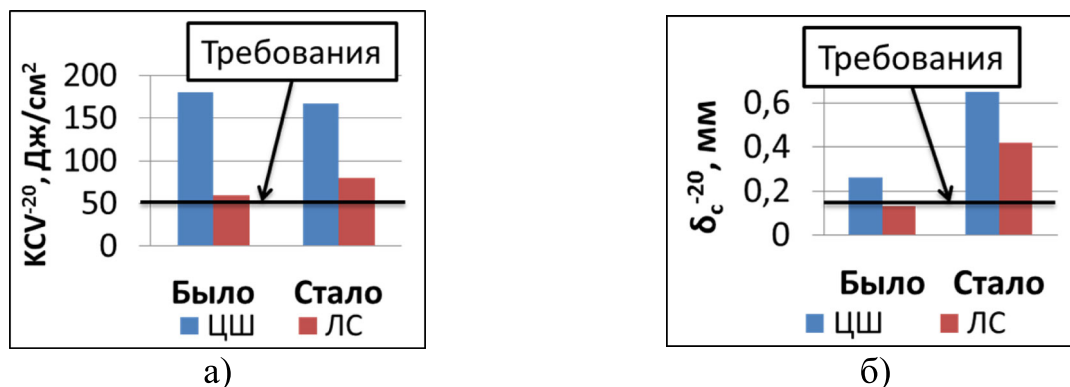


Рисунок 15 – Сравнительные результаты механических испытаний: а) испытания на ударный изгиб; б) испытания по определению δ_c

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что наибольшими вязкопластическими свойствами обладает металл сварных швов с содержанием титана 0,042-0,061% и бора 0,0037-0,0056%. Такое содержание титана и бора достигается при применении сварочных проволок S3MoTiB на 2-3 дугах;

2. Установлено негативное влияние ванадия, молибдена и кремния на вязкопластические свойства сварных соединений высокопрочных ТБД. Разработаны рекомендации к химическому составу основного металла для труб класса прочности K60 (X70).

3. Установлен целевой диапазон скоростей охлаждения участка перегрева ЗТВ сварных соединений ТБД 10-20 °C/с, в котором обеспечиваются требования по твердости, ударной вязкости, критическому раскрытию в вершине трещины и стойкости к СКРН. В данном диапазоне скоростей охлаждения формируется благоприятная микроструктура игольчатого и реечного бейнита.

4. Разработана конечно-элементная модель распространения тепла при многодуговой сварке ТБД. Установлено, что скорости охлаждения в целевом диапазоне необходимо снижать погонную энергию сварки на 15-30%

5. С помощью модели МКЭ были разработаны режимы многодуговой сварки со сниженным уровнем погонной энергии на ~30% для труб с толщиной стенки 30,9 мм.

6. Произведена опытная партия труб типоразмером 1153x30,9мм класса прочности K60 (X70) для проекта «Nord Stream 2» с применением разработанных режимов сварки и рекомендаций по химическому составу стали и применению сочетаний марок сварочных проволок. Результаты механических и коррозионных

испытаний показали полное соответствие основного металла и сварных соединений труб требованиям нормативной документации.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- оценка и прогнозирование остаточных сварочных напряжений и деформаций на основании решений задачи распространения тепла при выполнении продольного сварного шва ТБД;

- проведение экспериментальных и научных исследований по исследованию взаимного влияния легирующих элементов основного металла и термических циклов сварки на структуру и свойства трубных сталей классов прочности К70-К90.

Основные публикации, в которых отражены результаты диссертационной работы:

1. Худяков А.О. Влияние химического состава основного металла на вязкие свойства зоны термического влияния электросварных труб большого диаметра / А.О. Худяков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Металлургия. 2014. – Т.14. – №3. – С. 55-61. (ВАК)

2. Худяков А.О. Обеспечение трещиностойкости сварных соединений толстостенных труб большого диаметра класса прочности К60, К65 / А.О. Худяков, П.А. Данилкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Металлургия. 2015. – Т.15. – №1. – С. 96-102. (ВАК)

3. Пышминцев И.Ю. Освоение производства труб большого диаметра с повышенной деформационной способностью / И.Ю. Пышминцев, А.О. Струин, А.М. Гервасьев, Е.Р. Струина, А.О. Худяков, В.В. Микуров, П.А. Стеканов, А.В. Мозговой // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Металлургия. 2016. – Т.16. – №1. – С. 82-90. (ВАК)

4. Худяков А.О. Легирование металла продольного сварного шва при производстве высокопрочных труб большого диаметра / А.О. Худяков, П.А. Данилкин, С.И. Ярославцев, М.А. Иванов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2016. – №1. – С. 43-47. (ВАК)

5. Худяков А.О. Изучение свариваемости трубной стали группы прочности Х65QS в сероводородостойком исполнении / А.О. Худяков, Ю.С. Коробов, П.А. Данилкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета "Машиностроение, материаловедение". 2019. – Т. 21. – № 2. – С. 5-14. (ВАК)

6. Khudyakov A.O. Providing resistance to sulfide stress corrosion cracking of pipelines welded joints by selection of welding parameters / A.O. Khudyakov, P.A. Danilkin // E3S Web of Conferences – corrosion in oil & gas industry 2019, Vol. 121: 04005 – Saint Petersburg, Russia, 2019. (Scopus)

7. Khudyakov A.O. Finite element modeling of multiple electrode submerged arc welding of large diameter pipes / A.O. Khudyakov, Yu. Korobov, P.A. Danilkin, V. Kvashnin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 681: 012025, – Tomsk, Russia, 2019. (Scopus)

Патенты:

8. Пат. RU 2612109 С2 Российская Федерация, МПК. Стальной лист и его применение для трубы магистрального трубопровода / Пумпянский Д.А., Рашников В.Ф., Пышминцев И.Ю., Трутнев Н.В., Щуров Г.В., Струин А.О., Гервасьев А.М., Худяков А.О. - опубл. 02.03.2017 Бюл. № 7.

9. Пат. RU 2640685 С1 Российская Федерация, МПК. Способ изготовления стального листа для труб с повышенной деформационной способностью / Пумпянский Д.А., Рашников В.Ф., Пышминцев И.Ю., Трутнев Н.В., Щуров Г.В., Струин А.О., Гервасьев А.М., Худяков А.О. - опубл. 11.01.2018 Бюл. № 2.

10. Пат. RU 2656189 С1 Российская Федерация, МПК. Труба с повышенной деформационной способностью и высокой вязкостью сварного соединения и способ ее изготовления способностью / Пумпянский Д.А., Рашников В.Ф., Пышминцев И.Ю., Трутнев Н.В., Щуров Г.В., Струин А.О., Гервасьев А.М., Худяков А.О. - опубл. 31.05.2018 Бюл. № 16.

Прочие научные публикации по теме диссертации:

11. Пышминцев И.Ю. Изучение влияния термического цикла сварки на свойства основного металла труб К65 на комплексе Gleeble 3800 / И.Ю. Пышминцев, В.В. Вятчинников, А.В. Мозговой. А.О. Худяков, П.А. Данилкин, С.В. Рушиц, А.М. Ахмедьянов // Трубы-2014. Труды международной научно-практической конференции. ОАО "РосНИТИ". Ч. 2. – Челябинск, 2014. – С. 235-241.

12. Худяков А.О. Обеспечение высокой трещиностойкости сварных соединений толстостенных труб большого диаметра класса прочности К60, К65 / А.О. Худяков, П.А. Данилкин, В.В. Вятчинников, А.В. Мозговой // Трубы-2014. Труды международной научно-практической конференции. ОАО "РосНИТИ". Ч. 2. – Челябинск, 2014. – С. 105-113.

13. Худяков А.О. Влияние параметров режима автоматической многодуговой сварки под слоем флюса на глубину проплавления / А.О. Худяков, П.А. Данилкин, С.И. Ярославцев, М.А. Иванов // Сборник докладов Международного форума «Сварка и диагностика». – Екатеринбург, 2016. – С. 40 -45.

14. Худяков А.О. Определение коэффициентов расплавления при автоматической сварке под слоем флюса на постоянном токе обратной полярности (DC+) и на переменном токе (AC) / А.О. Худяков, П.А. Данилкин, С.И. Ярославцев, М.А. Иванов // Сборник докладов Международного форума «Сварка и диагностика». – Екатеринбург, 2016. – С. 46 -51.

15. Худяков А.О. Анализ причин и характера разрушения трубопровода транспортирующего попутный нефтяной газ в начальный период эксплуатации / А.О. Худяков, И.В. Костицына, И.М. Хуснуллин // Трубы-2018. Труды международной научно-практической конференции. ОАО "РосНИТИ". – Челябинск, 2018. – С. 121-127.

16. Khudyakov A.O. Finite element analysis of heat distribution for multiple-electrode submerged arc welding of high-strength pipe steels / A.O. Khudyakov, Yu.S. Korobov, P.A. Danilkin, V.D. Kvashnin // 13th Int. Conf. on the Mechanical Behaviour of Materials (ICM-13). – Melbourne, Australia, 2019. – P.190 – 197.