



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**



«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов



«ПРОМЕТЕЙ»

имени И. В. Горынина
Государственный научный центр

№ _____

На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

**Заместитель генерального директора
института**

Ильин А.В.

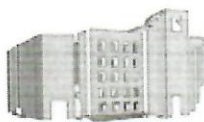
2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» – Федеральное государственное унитарное предприятие ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей», г. Санкт-Петербург, на диссертационную работу «Повышение эксплуатационных свойств сварных соединений высокопрочных толстостенных прямошовных труб большого диаметра» соискателя ученой степени кандидата технических наук Худякова Артема Олеговича по специальности 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии.

Актуальность работы

В настоящее время в мире наблюдается устойчивая тенденция к увеличению объема потребления углеводородов, добываемых с месторождений, расположенных в северных широтах. 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. Одним из факторов, влияющих на пропускную способность трубопроводов является увеличение



НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
191015, Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49
Телефон (812) 274-37-96, Факс (812) 274-15-33, npk3@crism.ru, www.crism-prometey.ru
ОКПО 07516250, ОГРН 1037843061376, ИНН 7815021340/ КПП 784201001

толщины стенки трубы, что вызывает проблемы с обеспечением требуемых характеристик металла шва и ЗТВ сварных соединений при сварке труб большого диаметра.

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 к существенному снижению эксплуатационных и механических свойств сварных соединений на участке перегрева ЗТВ, а именно ударной вязкости, значений критического раскрытия в вершине трещины, а также стойкости к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН).

Условия эксплуатации действующих и строительство новых трубопроводов в суровых климатических условиях, способствуют пересмотру в сторону ужесточения действующих в настоящий момент норм и требований, предъявляемых к служебным свойствам сварных соединений. 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 недостаточно освещены в научно-технической литературе и также являются актуальными.

Важность и актуальность диссертационной работы Худякова А.О. обусловлена тем, что соискателем предлагается комплексное решение проблемы повышения эксплуатационных свойств сварных соединений высокопрочных ТБД как за счет улучшения химического состава стали, так и рационального выбора сварочных материалов и разработки технологических мероприятий по снижению тепловложения при выполнении многодуговой автоматической сварки.

Сформулированная соискателем цель работы – достижение нового уровня эксплуатационных свойств толстостенных прямошовных труб большого диаметра из современных сталей класса прочности К60 за счет улучшения микроструктуры и повышения вязкопластических и коррозионных свойств сварных соединений, определила перечень решаемых задач:

1. Установление оптимального содержания титана и бора для получения высоких вязкопластических характеристик металл сварного шва.

2. Оценка влияния микролегирующих элементов основного металла на вязкопластические свойства участка перегрева ЗТВ сварных соединений высокопрочных труб большого диаметра. Разработка рекомендаций по улучшению химического состава стали с позиции улучшения свариваемости.

3. Установление закономерности влияния термических циклов сварки и скоростей охлаждения на микроструктуру, вязкопластические свойства и стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением участка перегрева ЗТВ сварных соединений. Определение целевого диапазона скоростей охлаждения, в котором обеспечивается заданный уровень требований к сварным соединениям для морских трубопроводов.

4. Анализ скоростей охлаждения на участке перегрева ЗТВ на основе численного моделирования тепловых полей посредством метода конечных элементов при многодуговой сварке под флюсом. Определение степени снижения погонной энергии для обеспечения оптимальных скоростей охлаждения на участке перегрева ЗТВ. Разработка рекомендаций по режимам многодуговой сварки.

Формулировка задач работы выполнена автором на основе достаточно полного анализа современного состояния проблемы. В результате выполненных исследований получены следующие результаты, обладающие **научной новизной**:

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

2. Произведена оценка влияния микролегирующих элементов на вязкопластические свойства участка перегрева ЗТВ сварных соединений.

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.

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

Несомненная *практическая значимость* выполненной работы заключается в разработке рекомендаций по химическому составу трубной стали, обеспечивающему повышение её свариваемости, а также разработке математической модели автоматической многодуговой сварки под флюсом, позволяющей оценивать геометрические параметры сварного шва и скорость охлаждения на участке перегрева ЗТВ по заданным параметрам режима сварки, создании технологии автоматической многодуговой сварки под флюсом сварных соединений высокопрочных ТБД. Технология обеспечивает высокий уровень ударной вязкости, критического раскрытия в вершине трещины и стойкости к СКРН сварных соединений высокопрочных ТБД.

Общая характеристика работы.

Диссертационная работа изложена на 152 стр. машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, выводов и приложений.

В первой главе соискатель рассматривает тенденции развития системы транспортировки газа и перспективы увеличения потребления труб большого диаметра. Выполнен обзор и анализ требований, предъявляемых к сварным соединениям ТБД. Описана технология многодуговой сварки и особенности процессов, протекающих при выполнении сварки. Рассмотрены проблемы обеспечения эксплуатационной надежности продольных сварных соединений высокопрочных труб большого диаметра. Определены пути повышения вязкопластических свойств сварных соединений ТБД. Показано, что обеспечение высоких вязкопластических свойств сварных соединений ТБД может быть решена за счет рационального выбора сварочных материалов, технологии сварки, корректировки химического состава стали, а также благодаря снижению тепловложения при сварке изделий.

Во второй главе описаны исследования влияния содержания микролегирующих элементов на вязкопластические свойства металла шва и участка перегрева ЗТВ сварных соединений ТБД. Приведены результаты исследований влияния скорости охлаждения

после сварки на эксплуатационные характеристики сварных соединений прямошовных труб большого диаметра класса прочности К60. Представлены результаты экспериментальных и лабораторных исследований по изучению влияния термических циклов сварки на микроструктуру, вязкопластические свойства и стойкость к СКРН участков ЗТВ сварных соединений высокопрочных труб. По результатам проведенных испытаний показано, что наилучшими показателями ударной вязкости обладает металл шва с содержанием титана 0,04-0,06% и бора 0,004-0,006%, при содержании кремния и молибдена не более 0,2% в основном металле. Установлено, что наиболее благоприятной структурой участка перегрева ЗТВ является нижний бейнит игольчатой и речной морфологии при этом обеспечиваются требования к сварным швам ТБД по твердости, ударной вязкости, показателям критического раскрытия в вершине трещины, требованиям по стойкости к СКРН отвечает ЗТВ сварных соединений со структурой игольчатого бейнита. Обеспечение предъявляемых требований к сварным соединениям ТБД, реализуется при скоростях охлаждения в интервале 10-20°С/с, что создает дополнительные трудности при выполнении многодуговой сварки продольных швов ТБД. Для выбора и обоснования рационального уровня тепловложения при сварке в диссертации были проведены дополнительные модельные и натурные эксперименты, полученные результаты приведены в 3 главе.

В третьей главе подробно описаны результаты математического моделирования тепловых процессов при многодуговой сварке ТБД включающие: постановку задачи, выбор модели источника тепла, граничных условий, методы решения, определение неизвестных параметров модели, создание конечно-элементной модели, результаты численного решения задачи теплопроводности. С помощью регрессионного анализа экспериментальных данных разработаны эмпирические формулы для определения параметров объемных источников тепла для численного моделирования процесса распространения тепла при многодуговой сварке под флюсом и расчета среднего значения коэффициентов расплавления при сварке под флюсом на постоянном и переменном токе. С помощью разработанной конечно-элементной модели многодуговой сварки под флюсом рассчитаны скорости охлаждения на участке ЗТВ при сварке на стандартных заводских режимах, установлены максимально допустимые уровни погонной энергии при сварке продольных сварных швов ТБД и показатели величины снижения погонной энергии для достижения требуемых скоростей охлаждения.

В четвертой главе на основании разработанной математической модели и полученных численных решений, представлена технология автоматической сварки многодуговой сварки под флюсом изделий ТБД. Приведены результаты опытно-промышленного опробования предложенных технических решений.

В целом постановка диссертационной работы и ее основные этапы, описываемые в главах диссертации, объединены общей логикой, вытекающей из необходимости последовательного решения поставленных задач. Не вызывает сомнений соответствие используемых методик численных исследований и математического моделирования современным требованиям к уровню подобных работ.

Диссертационная работа практически не содержит ошибок и опечаток, выводы по каждой главе и по работе в целом логичны и обоснованы. Содержание диссертации полностью соответствует заявленной специальности. Работа имеет достаточно полную библиографию, включающую большое количество ссылок на современные зарубежные и отечественные публикации.

Работа прошла апробацию на российских, международных конференциях и форумах. Основное содержание работы опубликовано в 16-ти статьях, в том числе в 8-ми изданиях из перечня ВАК. Автореферат полностью и корректно отражает основное содержание диссертации в кратком изложении.

Личный вклад автора выделен в диссертации и автореферате и заключается в комплексном решении проблемы повышения вязкопластических свойств и коррозионной стойкости сварных соединений труб большого диаметра, полученных научных и практических результатов, отраженных в опубликованных работах, разработке режимов сварки и их реализации на стадии опытно-промышленного производства труб большого диаметра, внедрении результатов представленной диссертационной работы на АО «ВТЗ» и в учебный процесс при профессиональной подготовке специалистов АО «ВТЗ».

Замечания по диссертационной работе.

1. Исследования металла шва, приведенные в диссертации, проведены с применением 4-х дугового автомата (марка автомата не приведена), а ЗТВ - на 2-х дуговом автомате. Целесообразно пояснить, чем вызвано столь сильное различие применяемого оборудования.

2. В разделе 2.1 диссертации отсутствуют данные по химическому составу основного металла, режимам сварки и величине погонной энергии при сварке.

3. На стр. 78 приведено прямое сравнение значений CTOD на образцах 10×10 мм с требованиями, применимыми для образцов в полной толщине стенки трубы, без учета масштабного фактора. Комментарии по приведенному сравнению в работе отсутствуют.

4. Стр. 79. Каким образом вытянутость островков МА фазы вдоль границ рек и игл бейнита препятствует распространению трещины? В диссертации приведена только одна фотография с МА фазой в ЗТВ (рис. 1.7, стр. 29) что в принципе, не позволяет судить о её морфологии и распределении в структуре в различных экспериментах. Подрисуночная надпись к рис. 1.7 не позволяет точно приписать данное изображение к конкретному эксперименту, а сам рисунок, хотя и относится к выполненным автором исследованиям, помещён в обзорную часть работы.

Отмечаем ряд замечаний к оформлению материала и рекомендаций:

а) На стр. 28 Дана ссылка на показатель «тепловложения» при сварке, имеющего размерность «кДж». Далее в работе данный показатель не встречается, но используется понятие «погонной энергии с размерностью «кДж/мм». Целесообразно уточнить данный момент.

б) Оборот «различная концентрация электродного металла», приведенный на стр. 46, не имеет очевидного смысла и не раскрыт.

в) На стр. 54, рис 2.8. показано, что содержание молибдена не влияет на значения KV при -20°C, но снижает ее при положительной температуре. Желательно, чтобы автор прокомментировал полученные результаты. На рис. 2.8 по оси ординат вместо KV⁻³⁰ должно быть KV.

г) На стр.59, п.2.2.3 отсутствует ссылка на источник при описании влияния кремния и мартенсит-аустенитной составляющей (МА).

д) На стр. 67, видимо ошибочно при испытании на ударный изгиб вместо образцов тип IX приведен тип X по ГОСТ 6996.

е) Стр. 95. В разделе 3.5.1 описана схема определения вертикальной координаты источников тепла. Следует помнить, что допущение, заключающееся в том, что при многодуговой сварке последующая дуга горит на слое металла, затвердевшем после воздействия предыдущей дуги, является именно допущением.

ж) На стр. 120, в подрисуночной надписи рис. 4.3 указана толщина трубы 30,9 мм, а

судя по данным на рис. 4.3а толщина трубы около 33 мм, 4.3.б около 27 мм.

з) Стр. 122, в подрисуночной надписи рис.4.4 указано увеличение $\times 200$. При этом метки, приведенные на рисунках «а» и «б» разные.

и) В формуле (3.13, стр.102) диссертации и (8, стр. 12) автореферата отсутствует показатель напряжение на дуге U_d . Это опечатка или особенность формулы?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Худякова Артема Олеговича «Повышение эксплуатационных свойств сварных соединений высокопрочных толстостенных прямошовных труб большого диаметра» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Она содержит научно обоснованные рекомендации по выбору основного металла, применению сварочных материалов и технологии выполнения автоматической сварки под флюсом сварных соединений труб большого диаметра, является актуальной и значимой при строительстве трубопроводов для эксплуатации в суровых климатических условиях.

По актуальности, научной новизне и практической значимости полученных результатов диссертационная работа полностью соответствует п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции от 01.10.2018г. Постановление Правительства РФ № 1168)), а ее автор – Худяков А.О. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии.

Работа заслушана, рассмотрена и одобрена на заседании Научно-технического совета Научно-производственного комплекса 3 «Корпусные стали и наноматериалы» (НТС-3) НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» 24.11. 2020г., протокол № 6.

Отзыв составили:

Начальник лаборатории сварки
конструкционных материалов, ктн.

Мельников Петр Васильевич

Ученый секретарь секции, начальник
лаборатории металловедения корпусных
сталей, дтн., профессор

Хлусова Елена Игоревна

Начальник сектора аттестации материалов и
обеспечения прочности конструкций, дтн.

Филин Владимир Юрьевич