

На правах рукописи



**Федотова Анна Владимировна**

**КОРРОЗИОННО – МЕХАНИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ  
СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Выбойщик Михаил Александрович**

Официальные оппоненты:

**Кудря Александр Викторович** доктор технических наук, профессор кафедры металловедения и физики прочности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва

**Гладковский Сергей Викторович** доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, заведующий Лабораторией деформирования и разрушения ФГБУН Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза

Защита состоится «3» ноября 2023 г., в 16 час. 00 мин. на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»: <http://d99912202.samgtu.ru>

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, г. Самара ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета,  
к.т.н., доцент



А.Р. Луц

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Мировое техническое развитие характеризуется устойчивой тенденцией увеличения трубопроводного транспорта. Доминируют нефте- и газодобывающие отрасли с развитыми системами добычи, сбора, переработки и доставки потребителям своей продукции. Вопрос обеспечения необходимого уровня требований по эксплуатационной надёжности наиболее остро стоит для нефтепромысловых трубопроводов, что вызвано постоянным увеличением интенсивности добычи и агрессивности добываемых сред. В большинстве месторождений присутствуют в значительных количествах такие агрессивные составляющие, как сероводород, углекислый газ, хлориды, вода, бактериальная заражённость и др., что вызывает сульфидное и водородное растрескивание, углекислотную и бактериальную коррозии нефтепромыслового и нефтегазо транспортирующего оборудования. Всего на территории Российской Федерации находится в эксплуатации более 200 тыс. км внутрипромысловых трубопроводов, на которых ежегодно происходят свыше 25 тысяч инцидентов, часто сопровождающихся разливом транспортируемых сред.

Трубопроводные системы состоят из прямолинейных участков, выполненных из труб и соединительных деталей (отводы, переходы, тройники и др.). Соединительные (фасонные) детали трубопроводов, как правило, подвержены более интенсивному коррозионно-механическому разрушению по сравнению с линейными участками, что связано с более высокими гидравлическими нагрузками. В соединительных деталях трубопровода (СДТ) меняется направление потока транспортируемой среды и образуются зоны турбулентности и застоя, что приводит к более интенсивному коррозионно-механическому разрушению. Несмотря на более жёсткие условия эксплуатации, СДТ продолжают изготавливать из традиционных сталей: сталь 20, 20Ф, 20пс, 17Г2, 09Г2С с низким уровнем механических и коррозионных свойств.

Очевидно, что эксплуатационные свойства СДТ должны быть на уровне или выше, чем свойства линейных участков трубопроводов. Решение этого вопроса возможно на основе создания специализированного производства СДТ из сталей повышенной коррозионной стойкости в нефтепромысловых средах. Соответственно необходимы надёжные представления об особенностях коррозионно-механического разрушения соединительных деталей в составе действующих трубопроводов, что требует проведения ряда лабораторных и промышленных испытаний.

**Объект исследования:** стали 05ХГБ, 08ХМФЧА, 13ХФА, 09ГСФ, 20-кcx, электросварные и бесшовные трубы, а также СДТ, изготовленные из этих сталей.

**Предмет исследования:** связь структурного состояния СДТ с коррозионными и механическими свойствами.

**Цель работы:** повышение механических свойств и коррозионной стойкости соединительных деталей нефтепромысловых трубопроводов на основе выбора их химического состава и структурного состояния.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены **следующие задачи:**

1. Провести промышленные испытания нефтегазопроводных труб, изготовленных из наиболее перспективных низкоуглеродистых низколегированных сталей. Выбрать сталь, с сочетанием наиболее высоких характеристик коррозионной стойкости и механической прочности в агрессивных нефтепромысловых средах, в качестве базовой для изготовления СДТ.
2. Собрать из труб и опытных образцов СДТ трубопроводную систему и провести её длительное промышленное испытание. Изучить закономерности и особенности зарождения и развития коррозионно-механического разрушения каждого вида СДТ. Выяснить различие механизмов и кинетик разрушения линейных участков трубопроводов и соединительных деталей.
3. Оценить возможность использования для изготовления СДТ сварных труб вместо бесшовных. Уточнить состав базовой стали и требования по структуре и свойствам к трубной заготовке для изготовления СДТ.
4. Отработать технологии формообразования и термической обработки производства СДТ из выбранной стали и получить опытную партию отводов. Провести их лабораторные испытания и передать отводы для промышленной эксплуатации.

**Методы исследования.** Использовалась методология научных исследований, применяемых в материаловедении, в частности, комплекс современных методов исследований микроструктуры, фазового рентгеноструктурного анализа, локального анализа химического состава, механических и коррозионных свойств металла и продуктов коррозии, что позволило получить представление о влиянии состава и структурного состояния стали на развитие коррозионно-механического

разрушения стальных труб и СДТ. Экспериментальные исследования выполнены аттестованными лабораториями по стандартным и международным методикам с компьютерной обработкой полученных результатов.

**Достоверность и обоснованность** научных результатов обеспечивается: применением различных методов и достаточным объёмом исследований свойств и структурного состояния металла; сходимостью результатов, полученных при лабораторных и промышленных испытаниях; соответствием результатов и выводов основным положениям современных представлений материаловедения, теорий прочности и коррозионного разрушения материалов; положительными результатами внедрения в производство. Диссертационное исследование соответствует пунктам 1,3,5,6,9 паспорта специальности 2.6.17. Материаловедение.

**Научная новизна:**

1. Установлены особенности и последовательность формирования продуктов углекислотной коррозии на поверхности сталей, покрытой плотным слоем высокотемпературной окалины.
2. Показано сходство и отличия коррозионно-механического разрушения соединительных деталей и линейных участков нефтепромысловых трубопроводов.
3. Для каждого из видов СДТ установлены места наиболее интенсивного коррозионного разрушения.
4. Показано, что в СДТ осаждающие карбонаты в продуктах коррозии имеют слоистое строение и резко отличаются от карбонатов на линейных участках трубопроводов.
5. Отмечено, что в застойных зонах СДТ, биологическая коррозия является преобладающим видом разрушения.
6. Впервые для каждого вида СДТ получены результаты изменения скорости коррозии со временем эксплуатации.
7. Представлена последовательность трансформации структуры и изменение механических и коррозионных свойств низкоуглеродистого речного бескарбидного бейнита в стали 05ХГБ с ростом температуры отпуска.
8. Показано, что для стали 05ХГБ со структурой речного, бескарбидного бейнита отпуск до 600<sup>0</sup>С мало влияет на коррозионную стойкость в агрессивных нефтепромысловых средах.

**Практическая значимость:**

1. Разработана методика исследования состава и структуры продуктов коррозии, позволяющая установить связь морфологии продуктов коррозии с составами транспортируемой среды и корродирующего металла.
2. Из цельнотянутой трубы стали 13ХФА и предложенной термической обработкой (двухкратная закалка + высокий отпуск) получена опытная партия СДТ (отводы, переходы, тройники) повышенной коррозионной стойкости. Их эксплуатация 3,5 года не вызвала значительных коррозионных повреждений.
3. Результаты сравнительного анализа скорости коррозионно-механического разрушения линейных участков и СДТ позволяют делать оценки надёжности и работоспособности нефтепромысловых трубопроводных систем.
4. Разработана новая упрощенная технология производства СДТ повышенной прочности и коррозионной стойкости из сварной трубы-заготовки стали 05ХГБ, и изготовлена промышленная партия отводов. Сокращение цикла термообработки (закалка + средний отпуск) и переход от цельнотянутой на сварную трубу-заготовку позволили на четверть уменьшить стоимость производства отводов.
5. Промышленная партия отводов, выполненная по разработанной технологии из сварной трубы, безаварийно эксплуатируется на месторождении ООО «ГазпромНефть» в Западной Сибири более 3х лет.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика исследования строения, состава и структуры продуктов коррозии на внутренней поверхности труб и СДТ после длительных промышленных испытаний или эксплуатации.
2. Технология производства СДТ из низкоуглеродистой низколегированной стали 13ХФА повышенной коррозионной стойкости в нефтепромысловых средах.
3. Результаты исследования изменений свойств и коррозионного разрушения СДТ в процессе эксплуатации в углекислотных средах с бактериальной зараженностью.
4. Результаты сравнительного анализа скорости коррозии и бактериальной зараженности соединительных деталей и линейных участков нефтепромысловых трубопроводов.

5. Последовательность эволюции структуры и изменение механических свойств и коррозионной стойкости низкоуглеродистого реечного бескарбидного бейнита в стали 05ХГБ.
6. Структурное состояние стали 05ХГБ, обеспечивающее рациональное сочетание высоких прочностных свойств и коррозионной стойкости в нефтепромысловых средах, и режимы его образования.
7. Технология массового производства СДТ повышенной прочности и коррозионной стойкости из сварной трубы заготовки стали 05ХГБ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и списка источников из 154 наименований. Работа содержит 153 страницы основного текста, 52 рисунка, 17 таблиц и 1 приложение.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на Международных конференциях «Коррозия в нефтяной и газовой промышленности» (Самара 2019, 2020, 2021, 2022 гг.) и на Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (АПП-2019, 2021) на Научно-техническом семинаре «Добыча и транспорт нефти и газа Новые технологии и решения» (Уфа, 2022), на XII Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (Черноголовка, 2022г.), на Научно-технической конференции «Трубопроводы» (Волгоград, 2022)), на XI Научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2023 (Москва, 2023 г.).

**Публикации:** По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в т.ч. 6 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ и 3 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS.

**Личный вклад автора:** Все эксперименты в диссертации по подбору стали, режимов термической обработки СДТ и оценке влияния микроструктуры сталей на механические и коррозионные свойства выполнены при участии автора. Автором поставлены цели и задачи, выполнена разработка методологии исследований, проведена обработка результатов и сформулированы все основные положения, определяющие научную новизну и практическую значимость работы. Автор принял участие в разработке нормативно-технической документация (ТУ) и организации промышленного производства СДТ.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, отмечено научное и прикладное значение работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приводится структура диссертационной работы, а также сведения об апробации работы и публикациях автора.

### **Глава 1. Аналитический обзор и постановка задачи исследования.**

Приведены представления о механизмах и кинетике коррозионного разрушения линейных участков и соединительных деталей трубопроводов в агрессивных нефтепромысловых средах. Показано, что в трубопроводных системах СДТ испытывают более жесткие гидродинамические нагрузки по сравнению с линейной частью, что обусловлено изменением в них характера, а часто и направления течения транспортируемой среды. Проведенный анализ возможных способов повышения эксплуатационной надежности СДТ. Показал отсутствие информации о закономерности и особенностях коррозионно-механического разрушения каждого вида СДТ нефтепромысловых трубопроводов, а также необходимость решить прикладные вопросы по выбору состава, разработки и освоению технологии производства СДТ.

Сформулирована цель работы и основные задачи исследований, необходимые для решения поставленной цели.

### **Глава 2. Объекты и методы исследований.**

Объектами исследований являются стали 05ХГБ, 08ХМФЧА, 13ХФА, 09ГСФ, 20-кcx, электросварные и бесшовные трубы, а также СДТ, изготовленные из этих сталей. Химический состав исследуемых сталей представлен в таблице 1.

Стали 05ХГБ, 08ХМФЧА и 13ХФА, наиболее перспективные из нового поколения низкоуглеродистых низколегированных трубных сталей с бейнитной закаливаемостью, рассматриваются как базовые для производства СДТ. Стали 09ГСФ и 20-кcx, традиционно применяемые для производства СДТ, используются для сравнительных испытаний.

Таблица 1 Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %														
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N	Nb	Ti	V	Ca
08ХМФА	0,07	0,34	0,53	0,005	0,001	0,66	0,131	0,16	0,38	0,14	0,03	0,029	0,003	0,063	0,002
13ХФА	0,09	0,35	0,54	0,010	0,002	0,58	0,002	0,02	0,34	0,03	0,04	0,018	0,004	0,046	0,001
09ГСФ	0,10	0,57	0,56	0,015	0,003	0,05	0,002	0,01	0,38	0,02	0,05	0,033	0,004	0,053	0,002
20-кcx	0,21	0,26	0,55	0,010	0,006	0,02	0,003	0,03	0,25	0,05	0,07	0,040	0,002	0,001	<0,0005
05ХГБ	0,05	0,22	0,71	0,006	0,001	0,62	0,01	0,08	0,013	0,18	0,006	0,029	0,001	0,003	-

Выбор методов исследований основан на необходимости получения информации о связи состава и структурного состояния сталей с механическими свойствами и коррозионной стойкостью в нефтепромысловых средах. Исследовали строение, состав и структуру образующегося слоя продуктов коррозии, который во многом определяет кинетику развития коррозионно-механического разрушения стали.

В работе были использованы следующие методы исследований, представленные в виде отдельных групп по назначению:

- металлографический анализ, включающий световую микроскопию (микроскоп фирмы GX51 фирмы "Olympus"); электронную сканирующую микроскопию (ЭСМ) на микроскопе XL-30 фирмы "Philips"; электронную просвечивающую микроскопию (ЭПМ);
- рентгеноструктурный анализ для объёмного определения фазового состава и напряжённого состояния (остаточные напряжения 2<sup>го</sup> и 3<sup>го</sup> рода и плотность дислокаций), выполняли на дифрактометре Shimadzu Maxima XRD-7000S.
- механические свойства: испытания на твёрдость (ГОСТ 9013), испытания на одноосное растяжение (ГОСТ 1497), испытания на ударную вязкость (ГОСТ 9454);
- сопротивление коррозионному разрушению: испытания на водородное растрескивание (стандарт NACE TM 0284), испытания на сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением (стандарт NACE TM 0177); на стойкость к углекислотной коррозии проводили по методике ООО «ИТ-Сервис» (выдержка 400 часов в агрессивной среде 3,5 % хлоридов при 65 °С и 0,1 МПа CO<sub>2</sub>), на стойкость к биологической коррозии сталей проводили по методике №003-10 ООО «ИТ-Сервис», применяемой в нефтегазодобывающей промышленности.

Проведены длительные промышленные испытания СДТ (19, 23 и 42 месяца) и сварных труб (8 и 14 месяцев). Разработана методика исследования продуктов коррозии.

Экспериментальные исследования выполнены аттестованными лабораториями по российским и международным стандартам с компьютерной обработкой полученных результатов.

### **Глава 3. Изготовление и промышленные испытания СДТ повышенной прочности и коррозионной стойкости из стали 13ХФА.**

Промышленную партию СДТ изготавливали из трубы стали 13ХФА производства ОАО «ПНТЗ» и ОАО «Интерпайп НТЗ». Структура феррито-перлитная, размер зерна соответствует 9 баллу, полосчатость отсутствует, цементит пластинчатой формы. Значительных отличий структуры по толщине стенки не наблюдали. Полученные изделия после формообразования подвергались специальной термической обработке по следующим режимам: тройники и отводы – двойной закалке и отпуску (закалка с аустенитной области -930<sup>0</sup>С + закалка с МКИ - 870<sup>0</sup>С + высокий отпуск - 580<sup>0</sup>С); переходы - закалке из аустенитной области и последующему отпуску (940<sup>0</sup>С+580<sup>0</sup>С). Термическая обработка деталей вызвала измельчение зерна металла 9-10 баллов, однако одновременно произошло образование окалины и поверхностного обезуглероженного слоя с более крупным зерном (7-9 баллов). Средняя глубина обезуглероженного слоя и толщина слоя окалины приблизительно одинаковы и составляют 200 мкм. Микроструктура металла всех соединительных деталей из стали 13ХФА идентична и представлена зёрнами феррита и ферритно-карбидной смесью с округлой формой карбидных частиц. По толщине стенки СДТ структура металла однородная. Таким образом, предложенные режимы термической обработки обеспечили гомогенность структуры и высокие механические свойства СДТ.

Проведены длительные опытно-промышленные испытания (ОПИ). Для проведения ОПИ на участке нефтесборочного коллектора Мамонтовского месторождения Западной Сибири был создан

опытный стенд. В одну байпасную линию включены линейные участки (трубы) и основные виды СДТ (отводы, переходы, тройники одного и разных диаметров), что позволило в идентичных условиях эксплуатации оценить интенсивность коррозионно-механического разрушения всех составляющих трубопроводных систем. Общий вид, схема соединения и характер потока в каждой СДТ байпасной линии показаны на рис.1, что даёт представления о реальных условиях эксплуатации каждого из СДТ. Технологические параметры работы нефтесборного коллектора и состав транспортируемой среды (табл.2) свидетельствуют о крайне жёстких условиях испытаний. Механические свойства и коррозионная стойкость СДТ до и после 19, 23 и 42 месяцев эксплуатации представлены в таблице 3.

Прочностные, вязкопластические свойства и коррозионная стойкость СДТ (табл.3), практически не изменились в процессе промышленных испытаний и все детали соответствуют требованиям ТУ 1469-032-04834179-2012 и группе прочности К52. Стабильность свойств при длительной эксплуатации позволяют рекомендовать сталь 13ХФА и предложенные режимы термообработки для производства соединительных деталей трубопроводов.

Для СДТ из стали 13ХФА характерна высокая стойкость к общей коррозии. Средняя скорость общей коррозии составляет 0,08-0,13 мм/год, максимальная 0,12-0,23 мм/год. Интенсивность локальной (язвенной) коррозии значительно более высокая и достигает 1 мм/год. Участки интенсивного разрушения представляют собой более плотное сосредоточение язвенной коррозии и соответствует местам изменения направления или образования застойных зон. Изменение скорости локальной коррозии со временем эксплуатации для каждого вида СДТ индивидуально (рис.2).

Таблица 2. Параметры работы и содержание коррозионно-агрессивных компонентов.

Время измерений	Параметры работы				Состав среды, мг/дм <sup>3</sup>			
	Обводненность, %	Температура, °С	Давление, МПа	Скорость, м/с	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Начальное	93	60	1,8	0,4	6035	512	69	28
Через 21 месяц	94	76	1,6	0,4	10383	658	73	49

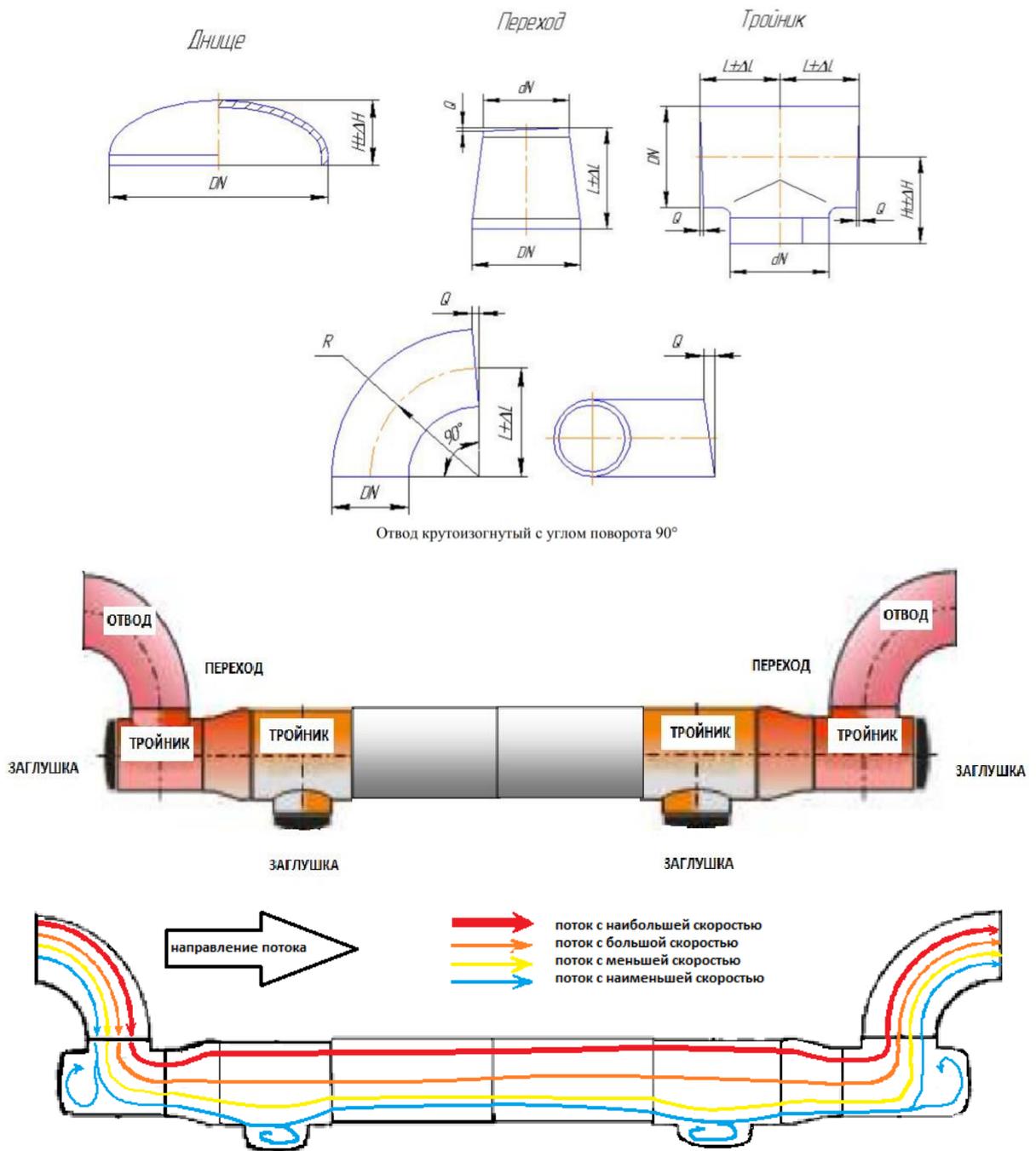


Рис.1 Эскизы СДТ, общий вид, схема соединения и характер потока в каждой СДТ байпасной линии.

Таблица 3. Изменение механических свойств и коррозионной стойкости СДТ из стали 13ХФА при эксплуатации.

Отбор образцов	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b / \sigma_{0,2}$	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	ДВС, %	K <sub>ISSC</sub> , МПа*м <sup>1/2</sup>	CLR (CTR), %
<b>Отвод</b>								
До испытаний	520	393	32,5	0,75	255	100	43,0	0(0)
После 19 мес.	515	400	32,5	0,77	270	100	42,5	0(0)
После 23 мес.	515	360	31,5	0,70	-	-	40,0	0(0)
После 42 мес.	520	385	33,0	0,75	-	-	42,0	0(0)
<b>Тройник диаметром 219мм</b>								
До испытаний	525	395	34,0	0,75	300	100	50,0	0(0)
После 19 мес.	526	400	33,5	0,76	310	100	49,0	0(0)
После 23 мес.	555	420	30,5	0,75	-	-	46,0	0(0)
После 42 мес.	540	410	30,5	0,76	-	-	47,5	0(0)
<b>Тройник диаметром 273-219мм</b>								
До испытаний	510	395	35,0	0,77	310	100	46,0	0(0)
После 19 мес.	520	395	35,0	0,76	310	100	46,0	0(0)
После 23 мес.	520	365	31,5	0,70	-	-	43,5	0(0)
После 42 мес.	520	370	34,5	0,71	-	-	42,5	0(0)
<b>Переход</b>								
До испытаний	530	390	35,0	0,74	320	100	47,0	0,22 (1,47)
После 19 мес.	530	395	34,5	0,74	320	100	45,5	0(0)
После 23 мес.	540	395	31,5	0,73	-	-	45,5	0(0)
После 42 мес.	540	385	36,0	0,72	-	-	46,5	0(0)
<b>ТУ 1469-032-04834179-2012, требования для группы прочности K52</b>								
	510-630	не менее 353		не более 0,9	не менее 98			

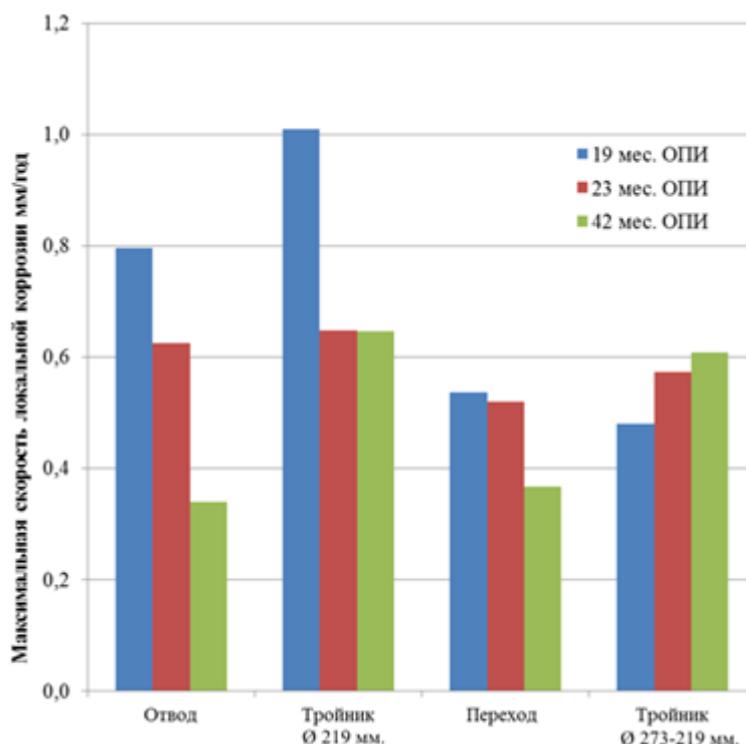


Рис.2 Изменение скорости локальной коррозии СДТ в процессе эксплуатации: 19, 23 и 42 месяца.

Для всех видов соединительных деталей процесс разрушения идентичен и при эксплуатации развивается в следующей последовательности:

- на внутренней поверхности детали, покрытой окалиной, происходит выпадение осадков (I-ый тип – осадочные продукты коррозии), представленных сульфидами, карбонатами и оксидами железа. Под осадками развиваются коррозионно-опасные микроорганизмы;
- через дефекты окалины среда, содержащая  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и бактерии, проникает к поверхности металла. Под окалиной происходят процессы коррозионного разрушения, обусловленные составом транспортируемой среды, т.е. углекислотной, сульфидной и бактериальной коррозиями;
- образуются сплошные слои карбонатов железа (II-ой тип – продукты взаимодействия металла с коррозионной средой) и другие фазовые составляющие продуктов коррозии (За, б), на границе раздела металл-окалина находится область повышенного содержания хрома и наиболее высокой концентрации микроорганизмов;
- под действием среды, роста продуктов коррозии и микроорганизмов происходит отслоение и разрушение слоя окалины, что увеличивает контакт металла со средой;
- в местах дефектов поверхности металла происходит зарождение язвенных повреждений, развитию которых способствует образование гальванических пар (катод-окалина и анод-поверхность металла без окалины);
- устанавливается термодинамическое равновесие между ростом защитных свойств продуктов коррозии и скоростью коррозионного растворения.

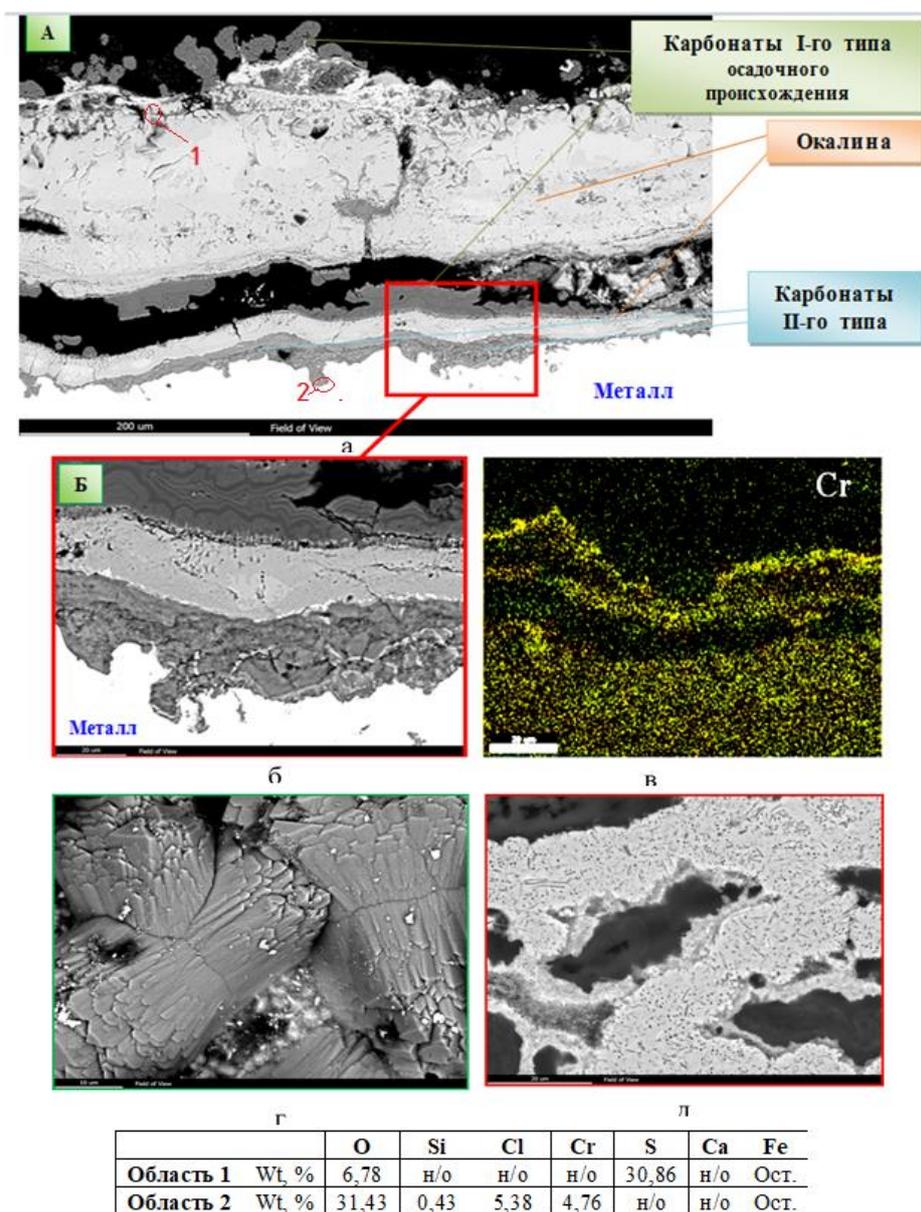


Рис. 3 Сечение внутренней поверхности отвода с углом поворота 90° Ø219×6мм после 19 месяцев эксплуатации:

*а-общий вид; б-слой карбонатов железа II типа и язвенные повреждения; в-распределение Cr в продуктах коррозии; г-карбонаты железа I-го типа; д-отпечатки клеток коррозионно-опасных микроорганизмов; таблица-состав продуктов коррозии в областях 1 и 2.*

Микробиологические исследования прикрепленных форм бактерий нефтяного биоценоза показали, что во всех СДТ число и индекс активности четырёх групп нефтяного коррозионно-опасного биоценоза (сульфитвосстанавливающие, сероокисляющие, углеводородокисляющие и железоокисляющие) значительно увеличивается со временем эксплуатации. Сравнение результатов испытаний СДТ и труб из 13ХФА, проведенных на этом же нефтесборном коллекторе (глава 4) показали, что в СДТ интенсивность биологической коррозии выше (по числу клеток на порядок и по биологической активности – в 5 раз) чем на линейных участках трубопроводов.

Скорость коррозионного разрушения СДТ и её изменение со временем эксплуатации определяется суперпозицией двух разрушающих процессов переменных во времени: углекислотная и бактериальная коррозии. В СДТ коррозионно-механическое разрушение зарождается и развивается более интенсивно, чем в прямолинейных участках трубопровода.

#### Глава 4. Производство СДТ повышенной прочности и коррозионной стойкости из сварной трубы.

Посвящена вопросу отработки процесса производства СДТ для производства отводов с высокими механическими и коррозионными свойствами из сварной трубы–заготовки.

Сварные нефтегазопроводные трубы, изготовленные из листовой стали, по сравнению с цельнотянутыми имеют следующие преимущества: низкая себестоимость, размерная стабильность и более высокая коррозионная стойкость внутренней поверхности трубы (зона ликвации расположена в средней части листа) Однако возможные более низкие механические и коррозионные свойства и дефекты сварных соединений часто ограничивают применение сварных труб. Контроль механических свойств основного металла и сварных соединений обычно заложен в ТУ на производство сварных труб, в то же время сравнительная оценка коррозионной стойкости этих областей не проводится. Кроме того, обычные лабораторные испытания не дают информации о локальных коррозионных разрушениях, поэтому требуются длительные промышленные испытания.

Для исследований использовали сварные трубы Ø219x8 мм из сталей 08ХМФЧА, 13ХФА, 09ГСФ и 20-кcx. Трубы изготовлены на Выксунском металлургическом заводе по обычной технологии с локальной термической обработкой сварного шва и последующей объёмной термической обработкой. Металл исследуемых труб представлен однородной по толщине стенки ферритно-перлитной структурой. Цементит в перлите имеет тонкопластинчатую форму. По результатам заводских испытаний, входного контроля и дополнительным исследованиям структурное состояние и механических свойств (одноосное растяжение, твёрдость и ударная вязкость) основной металл и область сварного соединения труб практически идентичны.

Промысловые испытания исследуемых труб проводили в составе байпасной линии, созданной параллельно нефтесборному коллектору Мамонтовского месторождения Западной Сибири. О жёстких условиях эксплуатации и коррозионной агрессивности трансформируемой среды свидетельствуют данные в таблице 2. Время двух испытаний (8 и 14 месяцев) позволяет оценить характер коррозионного разрушения основного металла и сварных соединений труб и изменение его интенсивности от времени испытаний (табл. 4).

Таблица 4. Скорость общей и локальной коррозий исследуемых сталей за 8 и 14 месяцев испытаний.

Марка Стали	Скорость общей коррозии, мм/год									Скорость язвенной коррозии, мм/год			
	Стенка трубы			Сварной шов			Нижняя образующая трубы			По толщине стенки			
	За 8 мес	За 14 мес	$K_L$	За 8 мес	За 14 мес	$K_L$	За 8 мес	За 14 мес	$K_L$	Глубина язв, мм	За 8 мес	За 14 мес	$K_L$
08ХМФЧА	0,2	0,09	-0,7	0,2	0,08	-0,8	0,4	0,24	-0,5	0,41	0,62	0,35	-0,5
13ХФА	0,25	0,15	-0,5	0,26	0,13	-0,7	0,5	0,44	-0,1	0,5	0,76	0,43	-0,5
09ГСФ	0,33	0,13	-0,8	0,47	0,24	-0,6	0,5	0,5	0,0	1,0	1,5	0,86	-0,5
Сталь 20-кcx	-	0,16	-	-	0,32	-	-	0,91	-	1,2	-	1,04	-

По мере снижения коррозионной стойкости, исследуемые стали располагаются в следующей последовательности: 08ХМФЧА - 13ХФА - 09ГСФ – сталь 20-кcx. Для условной оценки изменения интенсивности коррозионного разрушения по времени эксплуатации нами предлагается использовать коэффициент  $K_L$ , представляющий относительное изменение скорости коррозии за относительное изменение времени эксплуатации.

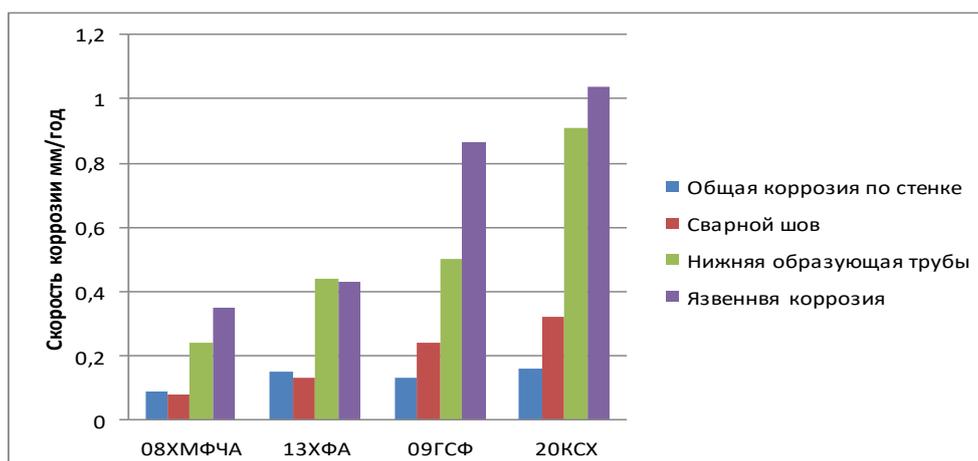


Рис. 4 Скорости коррозии труб из сталей 08ХМФЧА, 13ХФА, 09ГСФ и стали 20-кcx за 14 месяцев эксплуатации.

За время эксплуатации (14 месяцев) на внутренней поверхности труб сформировался биоценоз коррозионно-опасных бактерий (табл. 5). Углеводородоокисляющие бактерии не обнаружены. Бактериальная заражённость не превышает среднего уровня.

Основным выводом проведенных исследований является то, что сварные соединения труб из хромосодержащих сталей 08ХМФЧА и 13ХФА по коррозионной стойкости при длительной эксплуатации не уступают основному металлу.

Таблица 5 Биокоррозия на внутренней поверхности труб после 14 месяцев эксплуатации.

№ п/п	Марка стали	Сульфидовостанавливающие бактерии		Сероокисляющиеся (тионовые) бактерии		Железоокисляющиеся бактерии	
		Кол-во клеток, кл/г	Индекс активности, %	Кол-во клеток, кл/г	Индекс активности, %	Кол-во, кл/г	Индекс активности, %
1	08ХМФЧА	10 <sup>2</sup>	17	10 <sup>1</sup>	17	10 <sup>2</sup>	17
2	13ХФА	10 <sup>2</sup>	20	10 <sup>2</sup>	17	10 <sup>2</sup>	17
3	09ГСФ	10 <sup>4</sup>	100	10 <sup>2</sup>	17	10 <sup>2</sup>	17
4	Сталь 20-кcx	10 <sup>4</sup>	100	10 <sup>2</sup>	17	10 <sup>2</sup>	17

В последнее время для производства нефтегазопроводных труб широко используется сталь 05ХГБ. По коррозионной стойкости в углекислотных нефтепромысловых средах она близка к стали 08ХМФЧА и превосходит сталь 13ХФА, однако, по сравнению с этими, сталями имеет более высокую свариваемость ТВЧ. Последнее обусловлено низким содержанием углерода и благоприятным соотношением Mn/Si, что снижает температуру плавления окислов и способствует более полному их удалению в грат. Дополнительное легирование ниобием обеспечивает высокие механические свойства. Приведенные факторы определили использование сварной трубы из стали 05ХГБ в качестве заготовки для производства СДТ.

Для изготовления опытной партии отводов использовали трубу Ø168x8 мм, сваренную ТВЧ, с локальной термической обработкой сварного соединения. Лист под сварку получен контролируемой прокаткой. Микроструктура трубы из стали 05ХГБ представлена зёрнами пластинчатого перлита и полигонального феррита. Структура и свойства сварного соединения соответствует основному металлу. Механические свойства трубы-заготовки и полученных отводов приведены в таблице 6.

Формовку отводов проводили методом протяжки по рогообразному сердечнику при температуре 960-860 °С с последующим охлаждением на воздухе. Структура отводов ферритно-перлитная с зёрнами 9-10 баллов.

Таблица 6. Механические свойства трубы-заготовки и полученных отводов из стали 05ХГБ.

Деталь	Основной металл					Сварное соединение	
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_T / \sigma_B$	$\delta$ , %	KCV <sup>-60</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , МПа	KCV <sup>-60</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
труба-заготовка	570	565	0,99	24,0	285	570	280
отвод	450	355	0,78	42,0	335	-	345
<b>ТУ 1469-032-04834179-2012, требования для группы прочности K52</b>							
	$\geq 510$	353-510	$\leq 0,87$	$\geq 23$			

В области сварного шва структура соответствует основному металлу и характерна для металла, подвергнутого нормализации. Твердость металла отводов в растянутой и сжатой областях практически одинаковая и составляет 66,5-71 HRB и 67,5-72 HRB соответственно. Такие же значения твердости сварного соединения. Структура металла и твердость по толщине стенки также не отличаются.

Технология формообразования отводов из сварной трубы - заготовки 05ХГБ обеспечивает однородность структуры и свойств отводов. Получение СДТ с более высокими эксплуатационными свойствами рассматривается в следующей главе.

### **Глава 5 Структурное состояние стали 05ХГБ, обеспечивающее сочетание высоких механических свойств и стойкости СДТ в углекислых нефтепромысловых средах.**

Сталь 05ХГБ относится к низкоуглеродистым низколегированным сталям с бейнитной закаливается. Для получения представлений о связи морфологии низкоуглеродистого бейнита с его прочностью и коррозионной стойкостью исследовали несколько разновидностей бейнитных структур, полученных при закалке, стали 05ХГБ с разных температур, и последующем отпуске. Были выбраны четыре температуры закалки: 960, 920, 880 и 840<sup>0</sup>С. Критические точки стали 05ХГБ:  $A_{c1}=751^{\circ}\text{C}$  и  $A_{c3} =892^{\circ}\text{C}$ , соответственно при 960 и 920<sup>0</sup>С закалка происходит из аустенитной области, при 880 и 840<sup>0</sup>С из верхнего и среднего интервала межкритических температур. Более высокие механические свойства (выше группы прочности K52) обеспечивают только два режима закалки: 920 и 880<sup>0</sup>С, на которых проводили дальнейшие исследования. Структурное состояние металла отводов из стали 05ХГБ после закалки от температур 920<sup>0</sup>С и 880<sup>0</sup>С показано на рис. 5, а механические и коррозионные свойства в таблице 7.

После закалки от 920<sup>0</sup>С структура стали 05ХГБ состоит из бейнитных зёрен и избыточного феррита до 10% (рис.5). Бейнитные зёрна представлены колониями разнонаправленных реек бейнитного феррита, по границам реек располагаются тонкие прослойки остаточного аустенита. При закалке от 880<sup>0</sup>С (рис.5) количество избыточного феррита увеличивается до 20%. Бейнитные зёрна разнонаправлены и более мелкие. Остаточный аустенит встречается в виде тонких прослоек или микрообъёмов неправильной угловой формы.

Образцы, закаленные от температур 920<sup>0</sup>С и 880<sup>0</sup>С, подвергали отпуску при температурах 300, 400, 500 и 600<sup>0</sup>С. Механические и коррозионные свойства, соответствующие каждому структурному состоянию, стали 05ХГБ и температуре отпуска представлено в табл. 7.

Высокие прочностные свойства ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ), сохраняются до температуры отпуска 400<sup>0</sup>С. Пластичность ( $\delta$ , KCV-50) с ростом температуры отпуска только повышается. Интенсивность коррозионного разрушения (ВР, СКРН,  $V_{CO_2}$ ) мало изменяются с ростом температуры отпуска до 600<sup>0</sup>С. Таким образом, сочетание высоких значений прочностных, пластических свойств и сопротивления коррозионному разрушению в нефтепромысловых средах обеспечивают структуры реечного, бескарбидного, низкоуглеродистого бейнита после среднего отпуска. Для деталей, работающих в менее агрессивных нефтепромысловых средах (низкие содержания CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S и ионов Cl), отпуск бейнитных структур можно не проводить.

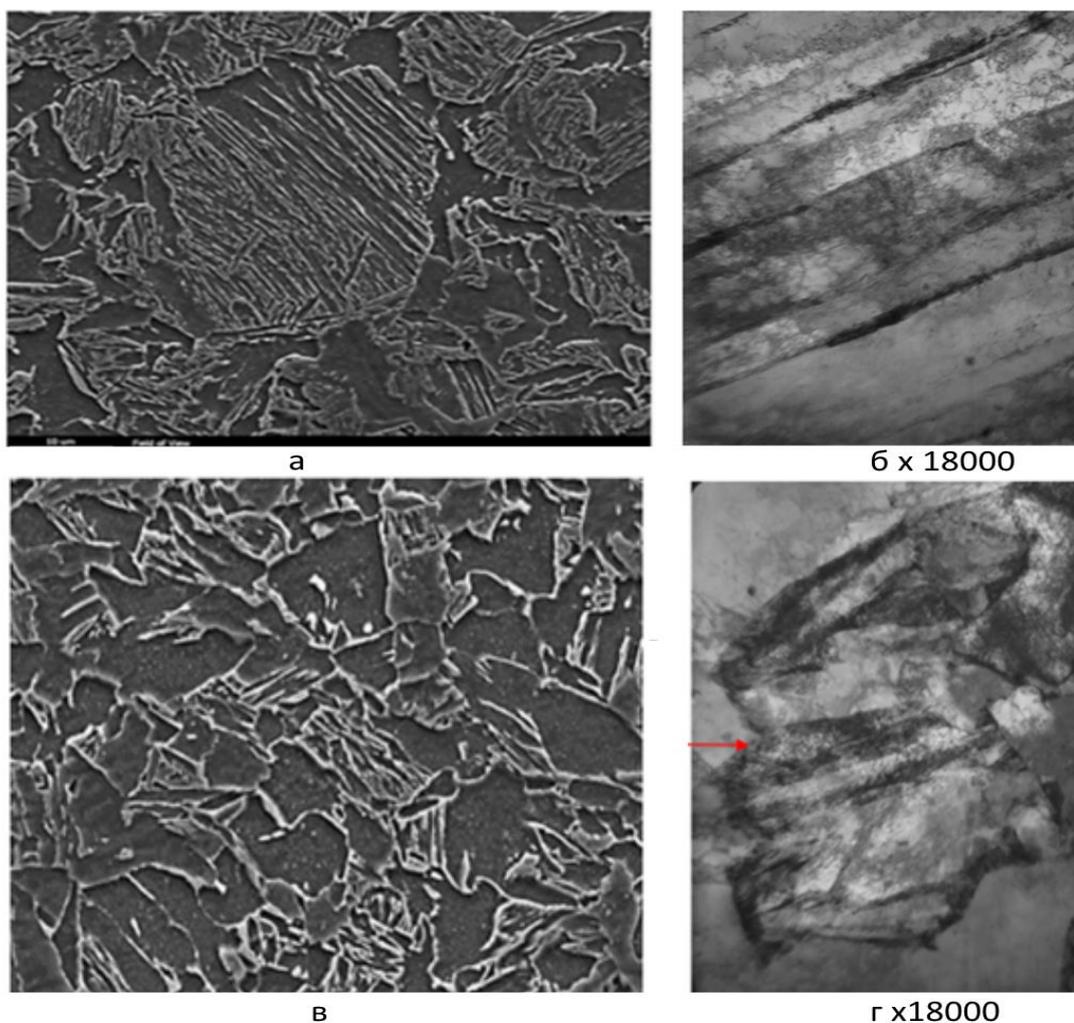


Рис.5 Микроструктура отводов из стали после закалки в воду:

*а и б – с температуры 920 °С; в и г – с температуры 880 °С; а и в – сканирующая электронная микроскопия; б и г – электронная микроскопия на просвет.*

Бескарбидный реечный бейнит с ростом температуры отпуска претерпевает ряд последовательных изменений и превращается в смесь феррита со сферическими карбидными частицами.

Сочетание механических свойств (выше группы прочности K52) и высокой коррозионной стойкости обеспечивают два режима термической обработки: закалка 920 °С с отпуском 400 °С и закалка 880 °С с отпуском 400 °С (табл.7). Характерно, что у обоих рекомендованных режимов термообработки структурное состояние бейнитов идентичное и соответствует стадии начала рекристаллизации при отпуске и резкому снижению остаточных напряжений 3<sup>го</sup> рода. Коррозионная стойкость отводов, из традиционных сталей (сталь 20 – 3,5 мм/год, сталь 09Г2С – 2,9 мм/год) в 2,5-3 раза выше чем отводов из стали 05ХГБ.

По отработанной технологии формообразования из сварной трубы- заготовки по предложенным режимам термообработки для стали 05ХГБ (закалка с 920<sup>0</sup>С в воду и отпуск при 400<sup>0</sup>С) была изготовлена промышленная партия отводов. С середины 2020 года она эксплуатируется в условиях месторождений Западной Сибири (ООО «Газпром Нефть», за прошедшее время случаев коррозионного разрушения (отказов) отводов не отмечено.

Таблица 7. Механические свойства и коррозионная стойкость стали 05ХГБ после разных режимов термообработки.

Режим ТО	Механические свойства					Коррозионные свойства			
	Твердость, HRB	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Ударная вязкость, KCV <sup>-50</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	Скорость коррозии V <sub>со2</sub> , мм/Г	Водородное растрескивание		СКР Н $\sigma_{th} = \% \sigma_t$
							CLR, %	CTR, %	
Закалка 920	98	605	490	29	290	2,07	0	0	70
Закалка 920+ отпуск 300	97	590	500	29	315	2,07	0	0	70
Закалка 920+ отпуск 400	94	560	470	27	330	1,93	0	0	70
Закалка 920+ отпуск 500	91	530	430	28	315	1,93	0	0	70
Закалка 920+ отпуск 600	90	510	420	27	325	1,40	0	0	70
Закалка 880	96	595	475	27	290	2,09	0	0	70
Закалка 880+ отпуск 300	96	545	425	31	300	1,62	0	0	70
Закалка 880+ отпуск 400	92	540	420	30	320	1,21	0	0	70
Закалка 880+ отпуск 500	90	505	385	30	330	1,75	0	0	70
Закалка 880+ отпуск 600	85	485	385	29	320	1,65	0	0	70
Группа прочности К52	≥92	510-630	≥353	≥20	≥58,8	-	≤6	≤3	-

Таблица 8. Изменение остаточных напряжений 2го рода, 3го рода и плотности дислокаций с ростом температуры отпуска.

№	Термообработка	Остаточные напряжения 2 <sup>го</sup> рода, МПа	Остаточные напряжения 3 <sup>го</sup> рода, МПа	Плотность дислокаций $\rho \cdot 10^{14}, \text{м}^{-2}$
1	Закалка 920	740	570	5,4
2	Закалка 920+ отпуск 300	690	460	4,88
3	Закалка 920+ отпуск 400	700	215	4,7
4	Закалка 920+ отпуск 500	705	90	4,5
5	Закалка 920+ отпуск 600	690	45	4,0
1	Закалка 880	740	170	5,6
2	Закалка 880+ отпуск 300	760	145	4,9
3	Закалка 880+ отпуск 400	690	110	5,8
4	Закалка 880+ отпуск 500	670	105	5,0
5	Закалка 880+ отпуск 600	650	95	4,6



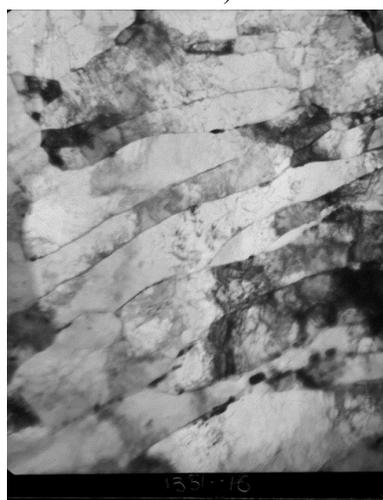
а) x22000



б) x18000



в) x18000



г) x18000

Рис.6 Микроструктура стали 05XГБ (электронная просвечивающая микроскопия) после закалки от 920 °С и отпуска при температурах:  
а - 200 °С, б - 400 °С, в - 500 °С, г - 600 °С

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложенная методика исследования состава и структуры продуктов коррозии позволила систематизировать информацию по их строению и развитию коррозионного разрушения сталей в нефтепромысловых средах.

2. Разработана технология и изготовлена опытная партия СДТ, повышенной прочности и коррозионной стойкости, из стали 13ХФА. Длительные промысловые испытания (3,5 года) показали её высокую коррозионную стойкость и стабильность механических свойств в нефтепромысловых агрессивных средах.

3. Геометрия, кинетика и интенсивность развития коррозионного разрушения индивидуальны для каждого вида СДТ и зависят от происходящих в нём изменений параметров потока.

4. В СДТ общая и локальная (язвенная) формы углекислотной коррозии и бактериальная коррозия зарождается и развивается более интенсивно, чем в прямолинейных участках трубопровода.

5. Скорость коррозионного разрушения соединительных деталей трубопроводов и её изменение со временем эксплуатации определяется суперпозицией двух переменных во времени процессов: углекислотной и бактериальной коррозий.

6. Структура речного бескарбидного бейнита обеспечивает сочетание высоких значений прочностных, пластических свойств и сопротивления коррозионному разрушению в нефтепромысловых средах.

7. Для речного бескарбидного низкоуглеродистого бейнита стали 05ХГБ во всем интервале температур отпуска стойкость к углекислотной коррозии практически не меняется, а прочность до 400 °С снижается незначительно.

8. Высокую работоспособность СДТ из стали 05ХГБ в нефтепромысловых средах обеспечивает закалка на речный бейнит и средний отпуск.

9. Отводы из стали 05ХГБ, полученные из электросварной трубы-заготовки (закалка + средний отпуск) по эксплуатационным свойствам, не уступают отводам из стали 13ХФА, изготовленным из цельнотянутых труб (двухкратная закалка + высокий отпуск).

10. Сталь 05ХГБ и предложенная технология термической обработки обеспечивают в условиях массового производства получение отводов повышенной прочности и коррозионной стойкости. Скорость коррозии в 2,5-3 раза ниже чем отводов из сталей 20 и 09Г2С.

11. Промышленная партия отводов, выполненная по разработанной технологии из сварной трубы, стали 05ХГБ безаварийно эксплуатируется на месторождениях ООО «Газпром Нефть» в Западной Сибири с середины 2020 года (Приложение 1 – Письмо от АО «Трубодеталь»).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

### В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. А.В. Федотова., П.Е. Юдин., С.С. Петров., Н.В. Елистратова, Ю.М. Марков Исследование возможности применения биметаллического листового проката Х70+316L для изготовления коррозионно - стойких фасонных изделий ТЭК. // ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ [теория и практика] • № 3-4 (43-44) 2014.

2. А.В. Федотова., П.Е. Юдин., С.С. Петров., Н.В. Елистратова Структурные превращения в биметалле Х70+316L при изготовлении фасонных изделий штампованным методом. // ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ [теория и практика] • № 5-6 (45-46) 2014.

3. Федотова А. В., Выбойщик М. А., Зырянов А. О., Грузков И. В. Углекислотная коррозия нефтепромысловых труб в средах, насыщенных H<sub>2</sub>S и Cl // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2019. № 2 (48). С. 6-17.

4. Федотова А. В., Выбойщик М.А., Кудашов Д.В. и др. Коррозионно-механическое разрушение электросварных труб в нефтепромысловых средах высокой агрессивности. // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 3 (45). С. 7-18.

5. Федотова А.В., М.А. Выбойщик, Чистопольцева Е.А., Кудашов Д.В., Грузков И.В. Изменение структуры и свойств речного бескарбидного бейнита стали 05ХГБ в процессе отпуска. //Деформация и разрушение материалов. 2023. № 8. С. 31-39.

6. Федотова А.В., Выбойщик М.А., А. В. Иоффе., Кудашов Д.В. производство соединительных деталей нефтегазопроводных систем, повышенной прочности и коррозионной стойкости из сварной заготовки. //Технология металлов. 2023. № 8. С. 7-18.

**В изданиях, входящих в базу SCOPUS**

1. Anna Fedotova, Mikhail Vyboischik, Dmitry Kazdayev. Corrosionfracture kinetics in welded pipes in chlorine-saturated carbon dioxide oilfield media.// E3S Web of Conferences. 225. 01007. 2021. P.1-6.

2. Anna Fedotova, Mikhail Vyboischik, Dmitry Kazdayev. Corrosion-mechanical failure of the fittings of pipeline systems In deposits with a high CO2 content. Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2020, No. 10.

3. Федотова А. В., Выбойщик М.А., Иоффе А.В., Князькин С.А., Тетюева Т.А. Разрушение соединительных деталей нефтепромысловых трубопроводов в процессе эксплуатации. // Нефтяное хозяйство. 2022. №04. С. 90-96.

Научное издание

Федотова Анна Владимировна

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук на тему:

Коррозионно – механическое разрушение  
соединительных деталей нефтепромысловых трубопроводов

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева»

(протокол № 12 от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.)

Формат 60×84 1/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Отдел типографии и оперативной печати

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.