

На правах рукописи

Шапошников Никита Олегович



**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СТРУКТУРНЫХ
ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ТРУБ
ИЗ СТАЛИ 10Г2ФБ, В УСЛОВИЯХ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
НЕФТЕГАЗОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

*Специальность 05.16.09 – Материаловедение
(машиностроение)*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Ермаков Борис Сергеевич

Официальные оппоненты:

Голиков Николай Иннокентьевич

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», заместитель генерального директора по науке и техническим проектам;

Дорогов Максим Владимирович

кандидат физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», институт перспективных систем передачи данных, доцент.

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ», Московская обл., г.о. Ленинский, п. Развилка.

Защита состоится 29 сентября 2022 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные тенденции нефтегазового комплекса РФ ориентированы на разработку инновационных решений, позволяющих обеспечить эффективную добычу трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) и обустройство нефтегазовой инфраструктуры в труднодоступных северных регионах. Основным типом нефтегазового оборудования являются трубы из низколегированных сталей различного класса прочности для трубопроводных систем, работоспособность которых определяется эксплуатационной надежностью металла и составом транспортируемых продуктов. Осложняющей особенностью для металлургических компаний становятся отсутствие единых условий эксплуатации нефтегазовых месторождений, а соответственно, отсутствие универсальных требований к металлопродукции со стороны потребителей, что требует проработки мер по повышению качества трубной продукции, анализа причин разрушения трубопроводов и входящего в их систему оборудования, разработки требований к виду и объему испытаний стали, проката и трубной продукции, предназначенной для трубопроводов, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур. Таким образом, оценка влияния структурных параметров металла, характерных для трубной продукции различных изготовителей на низкотемпературные механические свойства, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени разработано большое количество сталей для труб, а также определены критерии и методы испытаний металла для оценки их работоспособности. Однако высокий уровень аварийности в условиях пониженных климатических температур показывает, что требуется создание дополнительных методик контроля и унификация нормативной базы испытаний.

Цель работы состоит в обеспечении надежности, работоспособности и качества трубной продукции, изготовленной из низколегированных трубных сталей, для низкотемпературных условий эксплуатации, за счет установления закономерностей влияния различных структурных факторов.

Для достижения общей цели в работе были сформулированы следующие основные **задачи**:

1. Провести анализ аварийности трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях Северных регионов России, и изучить причины

разрушения труб в сложных природных условиях пониженных климатических температур.

2. Определить взаимосвязь структурных факторов (полосчатость, разнотекстность, неметаллические включения, остаточная текстура) и трещиностойкости, механических и коррозионных свойств, а также степень их влияния на надежность труб.

3. Провести сравнительные испытания металла труб различного качества (в диапазоне возможных структурных состояний), а также определить взаимосвязь особенностей структурного состояния и свойств металла труб при нормальной и пониженной температурах.

4. На основе полученных экспериментальных данных проанализировать необходимость внедрения новых критериев оценки качества металла труб для повышения работоспособности и обеспечения целостности трубопроводов Северного исполнения.

5. Выполнить проверку предлагаемых критериев качества на ряде сталей трубного сортамента – 10Г2ФБ, 09Г2С, 13ХФА, Х56.

Идея работы заключается в определении видов структурных несовершенств трубных сталей, приводящих к повышенной аварийности трубопроводов северного исполнения и определении допустимых уровней полосчатости и разнотекстности микроструктуры, наличия и размеров неметаллических включений, текстурной неоднородности и разработке рекомендаций для включения этих требований в нормативную и контрактную документацию на поставку труб для строящихся трубопроводов северного исполнения.

Научная новизна работы определяется следующими результатами проведенных исследований:

1. Определены механизмы повышения аварийности трубопроводов, расположенных в Арктике, Северных и Северо-Восточных регионах страны, по результатам проведенных исследований при установлении причин ускоренного выхода из строя трубопроводов различного назначения.

2. Впервые произведен комплексный анализ влияния металлургического качества трубной стали, проката и трубной продукции для трубопроводов и установлены закономерности влияния металлургического качества металла труб на трещиностойкость, механические и коррозионные свойства при пониженных температурах.

3. Показана взаимосвязь остаточной текстуры материала труб с ее низкотемпературными коррозионными, механическими свойствами и трещиностойкостью.

Практическая и теоретическая значимость работы:

1. Выполнена экспертная оценка металла поврежденных трубопроводов Арктики, Северных и Северо-Восточных регионов страны. Определено, что основными причинами ускоренного выхода из строя являются коррозионные повреждения и недостаточная хладостойкость и трещиностойкость металла труб.

2. Выполнены комплексные исследования металла труб из стали 10Г2ФБ после эксплуатации 25-40 тыс. час. в диапазоне от 20 до минус 60 °С; определены коррозионные, механические свойства и трещиностойкость, установлена взаимосвязь между этими свойствами и особенностями структурного состояния стали, размерами неметаллических включений, распределением ниобия между твердым раствором и включениями.

3. Проведены исследования остаточной текстуры металла труб, показана взаимосвязь текстурного состояния стали с ее коррозионной стойкостью в агрессивных средах, трещиностойкостью и работоспособностью в условиях низких климатических температур.

4. Экспериментально доказана необходимость введения дополнительного контроля структурного и текстурного состояния металла труб из стали 10Г2ФБ, предназначенных для строительства нефтепроводов, расположенных в северных регионах страны.

5. Разработаны рекомендации по дополнительному объему контроля металла труб, предназначенных для строительства трубопроводов Северного исполнения. Предложенные рекомендации используются в новых нормативно-технических документах ПАО «ГАЗПРОМНЕФТЬ».

Методология и методы исследования:

Проведены исследования металла труб трубопроводов северного исполнения до и после эксплуатации, определены и сформулированы основные факторы, приводящие к снижению надежности трубопроводов. Выполнены исследования свойств и микроструктуры металла труб. Механические свойства и трещиностойкость сталей испытаны на разрывных машинах INSTRON 8801; маятниковом копре INSTRON 600MPX. Анализ микроструктуры металла выполнен на оптическом микроскопе Reichert-Jung MeAF-3A с программным обеспечением ThixometPro, растровом электронном микроскопе Zeiss Supra 55VP. Текстуры сталей изучены на многофункциональном рентгеновском дифрактометрах Rigaku Ultima IV и ДРОН-2. Элек-

трохимические исследования коррозионных свойств проведены на потенциостате VersaSTAT 4.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Определены причины ускоренного выхода из строя трубопроводов различного назначения, изготовленных из стали 10Г2ФБ и эксплуатирующихся в условиях Арктики, Северных и Северо-Восточных регионов страны.

2. По результатам исследования металла труб из стали 10Г2ФБ после эксплуатации в течение 25-40 тыс. час, доказана взаимосвязь коррозионной стойкости, низкотемпературных механических свойств и трещиностойкости с особенностями формирования микроструктуры стали, неметаллическими включениями, распределением ниобия в твердом растворе стали.

3. Установлено, что в металле труб может сохраняться остаточная текстура, причем усиление текстурных ориентировок (110) от 1-3 до 12-15%, повышает работоспособность труб в условиях Арктики, Северных и Северо-Восточных регионов страны.

4. Теоретически и экспериментально доказана необходимость введения дополнительного объема контроля металла труб, предназначенных для строительства трубопроводов в условиях Арктики, Северных и Северо-Восточных регионов страны. Разработаны рекомендации по дополнительному объему контроля металла труб для трубопроводов Северного исполнения.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена воспроизводимостью и согласованностью полученных данных, доказана значительным объемом разнообразных экспериментальных исследований, выполненных в обоснование основных теоретических положений, применением современного сертифицированного исследовательского оборудования и лицензионных программных средств для обработки информации. Теория построена на известных, проверяемых данных, взятых из открытых источников, согласуется с экспериментальными данными, полученными в диссертационной работе.

Апробация результатов. Материалы диссертации доложены и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: конференция: Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019), Низкотемпературные и пищевые технологии в 21 веке. IX Международная научно-техническая конференция, 2019. «Коррозия в нефтегазовой отрасли», 2021, XIV Всероссийская кон-

ференция «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых», г. Пермь, 2021 г.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач, подготовке объектов исследования, проведении экспериментов, в обсуждении и анализе полученных результатов. Все экспериментальные результаты, включенные в диссертацию, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии. Анализ полученных результатов и подготовка публикаций выполнена диссертантом как лично, так и в составе коллектива авторов.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 18 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 10 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов по работе и списка литературы из 169 наименований. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и 28 таблиц, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертации. Приведены основные положения, выносимые на защиту, и указан личный вклад автора в исследования, проведенные по теме диссертации.

В первой главе рассмотрены разные поколения трубных сталей и система формирования требований к ним, в зависимости от меняющихся условий эксплуатации нефтегазовых месторождений, этапов разработки и региональных особенностей с учетом пониженных климатических температур эксплуатации до минус 60°C. Проанализированы аварии трубопроводов, расположенных в северных регионах страны. Показано, что при формальном соответствии требованиям действующих нормативных документов металл труб не обладает требуемой надежностью – в условиях северных широт в несколько раз повышается аварийность нефтепроводов, происходит

разрушение труб, обусловленное их металлургическим качеством. Выполнен анализ российских и международных нормативно-технических документов, регламентирующих изготовление и испытания труб. Показано, что требования к механическим свойствам и трещиностойкости при пониженных климатических температурах недостаточны, а требования к структурным факторам – отсутствуют. Исходя из результатов проведенного исследования в конце первой главы были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены материалы и методы исследования металла труб. Были исследованы вырезки из поврежденных труб стали 10Г2ФБ, темплеты, вырезанные из восьми труб большого диаметра из стали 10Г2ФБ пяти заводов изготовителей с толщиной стенки 22 мм после их эксплуатации в течение 25-40 тыс. час без видимых повреждений и металл трубных заготовок в исходном состоянии из сталей 10Г2ФБ, 09Г2С, 13ХФА, X56 API 5L.

Проведены исследования механических свойств в диапазоне температур от 20 до минус 60 °С, анализ микроструктуры металла труб, проведены фрактографические исследования изломов, исследованы текстуры сталей. Проведены электрохимические исследования коррозионных свойств в соответствии со стандартами ASTM G3, G5, G59, G102 при комнатной температуре в деаэрированном растворе 5 % NaCl без и с насыщением CO₂.

В третьей главе проведен анализ причин ускоренного выхода из строя труб нефтепроводов различного назначения из стали 10Г2ФБ и исследованию взаимосвязи между структурными особенностями металла труб и ее низкотемпературными механическими свойствами. Было установлено, что основными причинами ускоренного повреждения и последующего разрушения нефтепроводов являются неметаллические включения и неравномерность структуры металла, которые приводят к возникновению сложноподвижных состояний в структуре металла, снижают коррозионную стойкость и хладостойкость стали.

В четвертой главе приводятся результаты исследований текстуры металла труб и ее влияния на комплекс низкотемпературных механических свойств, трещиностойкость и коррозионную стойкость стали 10Г2ФБ.

В пятой главе сформулированы основные требования к металлургическому качеству металла труб, поставляемых в северные регионы страны.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Определены причины ускоренного выхода из строя трубопроводов различного назначения, изготовленных из стали 10Г2ФБ и эксплуатирующихся в условиях Арктики, Северных и Северо-Восточных регионов страны.

На основании проведенного анализа причин разрушения трубопроводов Северного исполнения установлено, что основными причинами выхода из строя являются развитие коррозионных дефектов и хрупких трещин в металле труб, что хорошо согласуется с данными отечественных и зарубежных исследователей. Исследование взаимосвязи микроструктуры металла труб с их хладостойкостью, коррозионной стойкостью и трещиностойкостью было изучено на металле восьми вырезок из труб большого диаметра из стали 10Г2ФБ после их эксплуатации в течение 25-40 тыс. час (рисунок 1).

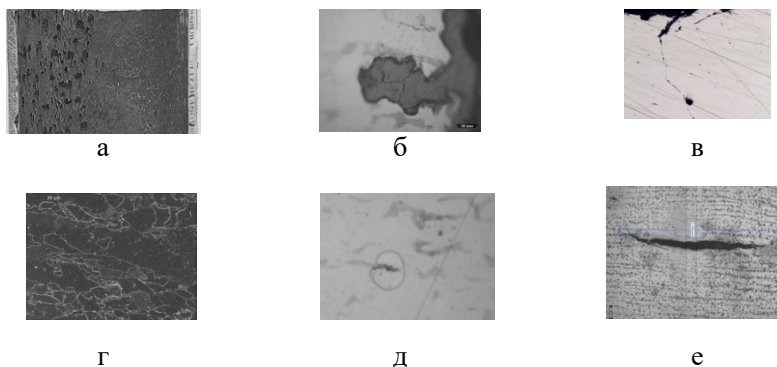


Рисунок 1 – Коррозионные язвы на нижней образующей трубы (а,б), хрупкая трещина от коррозионного дефекта на внутренней поверхности трубы (в), разнотекстурность (г), растравы в области неметаллических включений (д) развитие трещины вдоль линии полосчатости (е)

Химический состав металла труб и их механические свойства полностью соответствовали требованиям ГОСТ Р ИСО 3183–2009, ни на одной из вырезок не были обнаружены препятствующие эксплуатации дефекты. Разброс значений механических свойств исследованных труб при 20 °С укладывался в 15 % и соответствовал требованиям ГОСТа – предел текучести - 450-600 МПа, временное сопротивление – 535-760 МПа, ударная вязкость 375-200 Дж/см² в

диапазоне температур от +20 до минус 20 °С. Результаты испытаний ударной вязкости при минус 60 °С показали разброс от 98 до 316 Дж/см², трещиностойкость металла труб (CTOD_{min}) уже при минус 20 °С изменялась более чем в 8 раз – от 0,09 до 0,78 мм (таблица 1).

На рисунке 2 приведены фотографии изломов металла труб после испытаний при минус 60 °С.

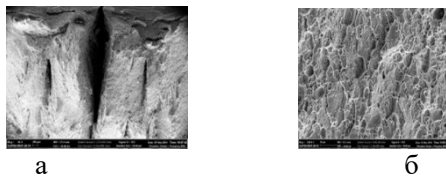


Рисунок 2 – Изломы образцов после испытаний на ударную вязкость при минус 60 °С. Слева труба № 8 – KCV = 98 Дж/см², справа труба № 5 – KCV = 316 Дж/см²

Анализ результатов показал значительный разброс трещиностойкости и механических свойств у металла всех исследуемых труб при понижении температуры – то есть пониженные температуры оказывают совершенно разное влияние на свойства одной и той же марки стали, произведенной по одному и тому же стандарту. Это проявляется в резком снижении механических свойств стальных одних труб, и практически сохранением свойств других – внутри одной произвольно выбранной партии. Такой разброс значений, характеризующих сопротивляемость низким температурам, предопределяет появление в действующем трубопроводе зон, склонных к хрупкому низкотемпературному разрушению, снижению надежности и долговечности и связан с особенностями структурного состояния металла труб.

2. По результатам исследования металла труб из стали 10Г2ФБ после эксплуатации в течение 25-40 тыс. час, доказана взаимосвязь коррозионной стойкости, низкотемпературных механических свойств и трещиностойкости с особенностями формирования микроструктуры стали, неметаллическими включениями, распределением ниобия в твердом растворе стали.

По результатам исследования микроструктуры стали в ¼ и ½ толщины стенки трубы показано, что для микроструктуры металла исследованных труб характерна разнотекстурность – результаты

анализа структурного состояния, в соответствии с ГОСТ Р 54570–2011, приведены в таблице 1.

Установлено, что в трубах с высоким уровнем ударной вязкости – форма ферритных зерен, в основном, гранулярная, разнотернистость минимальная. Ранжирование труб по полосчатости показало, что максимальный уровень полосчатости структуры 5-6 балл (ГОСТ 5640), был обнаружен в $\frac{1}{2}$ толщины трубы №8 – трубы с минимальной ударной вязкостью и трещиностойкостью; минимальный – у труб №5 и 6 – 1-2 балл ГОСТ 5640. Таким образом, была выявлена однозначная зависимость низкотемпературных вязкости и трещиностойкости металла труб стали 10Г2ФБ от неравномерности ее структуры. Еще одним фактором, охрупчивающим металл труб являются неметаллические включения, которые являются концентраторами напряжений и электродами, вокруг которых возникают электрохимические взаимодействия металла и агрессивных флюидов перекачиваемой среды, приводящие к возникновению коррозионных и коррозионно-механических дефектов. Было показано, что металл труб загрязнен неметаллическими включениями (рисунок 3), максимальное количество зафиксировано в металле труб № 8 и 1, а минимальное – в трубах № 6 и 5.

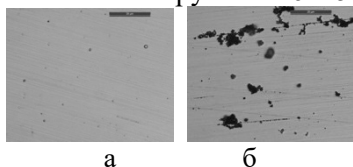


Рисунок 3 – Неметаллические включения в трубе №5 (а) и трубе №8 (б)

Средний размер включений находится в пределах от 1,5-2 до 5-15 мкм, однако в материалах труб № 8, 1, 2 и 3 были обнаружены включения со средними размерами до 30 и 40 мкм (труба № 8). Состав включений был определен микрорентгеноспектральным анализом, установлено, что обнаруженные включения являются комплексными соединениями на основе системы Al-Ca-Mg-O и Ca-Al-S-O.

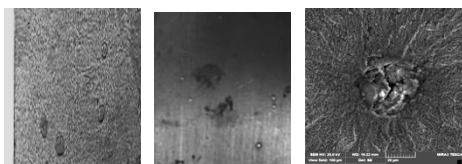
При анализе состава неметаллических включений было обнаружено, что от 60 до 100% вводимого в сталь ниобия находится в комплексных неметаллических включениях, причем, чем выше в

них доля ниобия, тем выше разнотернистость стали, ниже ее низкотемпературные ударная вязкость и трещиностойкость.

Исследования взаимосвязи структурного состояния стали и ее коррозионной стойкости были выполнены в соответствии со стандартами ASTM G3, G5, G59, G102 – определение скорости коррозии и NACE TM-0177 – стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением. При измерении поляризационных сопротивлений и дальнейших расчетах скоростей коррозии получены результаты, подтверждающие ранее сделанные выводы – максимальная скорость коррозии была отмечена у сталей с высокой структурной неоднородностью (№8 и №2) – минимальные у стали №5. Сера один из наиболее часто присутствующих в нефтяном флюиде элементов, поэтому оценка работоспособности материалов труб без анализа их сопротивляемости сульфидному растрескиванию была бы некорректной. Испытания показали, что металл всех труб не склонен к сульфидному растрескиванию, однако, у сталей с высоким содержанием крупных (более 20 мкм) неметаллических включений имеются множественные блистеры, в трубах, где такие включения в металле отсутствуют – блистеры не обнаружены. Развитие блистеров происходит в местах расположения крупных неметаллических включений. На рисунке 4 видно, что межфазная граница между включением и матрицей растравлена, а в теле самого включения – микротрещины. Совокупность растравленных границ и микротрещин служит инициатором развития хрупкого трещинообразного дефекта и приводит к ускоренному разрушению трубы.

Результаты исследований позволяют утверждать о ведущей роли структурных (металлургических) факторов в формировании комплекса низкотемпературных свойств стали 10Г2ФБ, которые обязательно должны контролироваться при поставке труб в регионы Арктики, Крайнего Севера и Сибири.

Зафиксированный разброс значений низкотемпературных механических свойств и трещиностойкости приводит к снижению надежности трубопроводов при эксплуатации в условиях низкотемпературной эксплуатации и требует разработки дополнительных методов и объемов контроля металла труб, поставляемых для строительства нефтепроводов в северных регионах страны.



а б в

Рисунок 4 – Блистеры на поверхности образца: слой отложений и вспучивания (а), расположение блистеров – после снятия отложений (б), неметаллическое включение Ca-Al-S-O под слоем отложений

3. Установлено, что в металле труб может сохраняться остаточная текстура, причем усиление текстурных ориентировок (110) от 1-3 до 12-15%, повышает работоспособность труб в условиях Арктики, Северных и Северо-Восточных регионов страны.

Известно, что кристаллографическая текстура оказывает влияние на все свойства материалов. Основными ориентировками текстуры, характерной для плоской деформации α -фазы при прокатке, являются: $\{001\} \langle 110 \rangle$, $\{112\} \langle 110 \rangle$ – основные ориентировки и $\{111\} \langle 110 \rangle$, $\{111\} \langle 112 \rangle$ – дополнительные. Текстурный анализ металла труб проводился с помощью программы исследования текстур методом Шульца для отражений от серий плоскостей (110), (200) и (211). Для получения нормированных полюсных фигур был снят эталонный бестекстурный (порошкообразный) образец α – Fe. Исследования были проведены в двух сечениях по толщине трубы – в $\frac{1}{4}$ и $\frac{1}{2}$ от наружной поверхности трубы. При обработке результатов текстурogramм установлено, что для отражений от серии плоскостей (110) в основном металле труб №5 и №6 наблюдается некоторое усиление остаточной текстуры прокатки, у образцов №3, 4, 7 отмечен незначительный уровень текстурной ориентировки, у образцов №8, 1, 2, – состояние, близкое к бестекстурному. Полуколичественный анализ ППФ от линий (110) (200) и (211) образцов от двух сталей №5 и №8 дал следующее распределение процентного содержания этих ориентировок: сталь трубы №5 ориентировка $\{110\} \langle 001 \rangle$ в $\frac{1}{2}$ – 14,9% в $\frac{1}{4}$ – 11,8%; в стали трубы №8 – доля текстурных ориентировок не превысила 0,5%. Это позволило разделить все стали труб на несколько групп, определяемых по интенсивности отражений от серии плоскостей (110). Первая с явно выраженной текстурной ориентацией – трубы №5 и №6; вторая – со

слабо выраженной ориентацией (5-8%) – трубы №3,4,7; третья – бестекстурное состояние (не более 3%) – трубы №2, 1, 8. Сравнение полученных данных о текстурном состоянии металла труб таблицы 1 показало, что остаточная текстурованность материала является значимым фактором с точки зрения обеспечения работоспособности труб северного исполнения и должна контролироваться наряду со структурным состоянием стали.

4. Теоретически и экспериментально доказана необходимость введения дополнительного объема контроля металла труб, предназначенных для строительства трубопроводов в условиях Арктики, Северных и Северо-Восточных регионов страны. Разработаны рекомендации по дополнительному объему контроля металла труб для трубопроводов Северного исполнения.

Определены граничные условия, позволяющие обеспечить необходимый уровень свойств металла труб – разнотекстурность (фактор разнотекстурности – не менее 0,45), полосчатость – не выше 3 балла, максимальный размер неметаллических включений – до 10 мкм, наличие текстурной ориентации металла $\{110\} \langle 001 \rangle$ – не менее 10 %. Для подтверждения адекватности предложенных граничных условий были проведены сравнительные исследования металла трубных заготовок из сталей 10Г2ФБ, 09Г2С, 13ХФА и X56 API 5L. В таблице 2 символом «+» отмечены стали, соответствующие предлагаемым требованиям, «-» – не соответствующие, а также результаты анализа металла вырезов поврежденных труб (в таблице 4 обозначены «Р»).

Анализ результатов исследований механических свойств, коррозионной стойкости и трещиностойкости сталей подтверждает правомерность предложенных требований и позволяет распространить разработанные требования на всю группу труб нефтяного сортамента, изготовленных из феррито-перлитных сталей и поставляемых на особо ответственные участки нефтепроводов, строящихся в условиях Арктики, Крайнего Севера и Сибири. Предложенные рекомендации используются в новых нормативно-технических документах ПАО «ГАЗПРОМНЕФТЬ» (акт внедрения ООО «Газпром-нефть НТЦ» от 15.05.2022 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании проведения экспертиз разрушения выявлено системное падение трещиностойкости, хладостойкости, коррозионной стойкости материалов труб из низкоуглеродистых легированных сталей сформулированы научно-обоснованные основные требования к материалам труб из низколегированных углеродистых сталей нефтегазовой инфраструктуры для эксплуатации в Северных, Северо-Восточных регионах страны и Арктике.

На основании проведенных исследований было установлено:

1. Анализом поврежденных трубопроводов показал, что причинами ускоренного выхода из строя труб в северных регионах РФ являются недостаточная трещиностойкость, хладостойкость и коррозионная стойкость металла труб, связанные с несколькими совместно действующими факторами риска. К ним относятся неравновесность структуры (разнозернистость, полосчатость и неметаллические включения). Разнозернистость и полосчатость приводят к возникновению сложнапряженных состояний в структуре металла и сложным зернограницным состояниям; неметаллические включения действуют как концентраторы напряжений, препятствующие движению дислокаций, оказывают влияние на прочность и характер разрушения материала. Также крупные неметаллические включения и возникающие вокруг них зоны коррозионных повреждений провоцируют образование и развитие хрупких трещин.

2. Результатами испытаний вырезов из труб нефтепроводов, изготовленных из стали 10Г2ФБ после наработки 25-40 тыс. часов на ударную вязкость было определено, что низкотемпературная вязкость основного металла различных труб одной марки стали отличается более чем в три раза от 98 Дж/см² до 316 Дж/см², а трещиностойкость уже при минус 20 °С более чем в девять раз – от $\delta_c = 0,09$ мм до 0,73-0,78 мм. Анализом металла труб было установлено, что такие изменения свойств связаны с особенностями структурного состояния металла труб. Средний размер зерен снижается от 15,3 до 6,5 мкм; фактор разнозернистости возрастает более чем два раза с 0,26 до 0,51; полосчатость феррито-перлитной структуры снижается с 4-5 до – 1-2 балла. В металле труб с пониженным уровнем ударной вязкости и трещиностойко-

сти обнаружены крупные неметаллические включения типа Al-Sa-Mg-O и Са-Al-S-O, размер которых в металле трубы № 8 (трубы с минимальными характеристиками вязкости и трещиностойкости) достигает 40 мкм, а количество таких включений не менее 6 шт/мм². Такие неметаллические включения также оказывают влияние на сопротивляемость сульфидному растрескиванию под напряжением – в местах расположения крупных неметаллических включений были обнаружены вспучивания – блистеры, границы вокруг включения растравлены.

3. Анализ текстурных ориентировок показал, что в металле ряда труб отмечается усиление ориентировок текстуры сдвига (110). Наибольшие доли содержания текстурных ориентировок для отражений от серии плоскостей (110) обнаружены в металле труб №№5, 6. В металле труб №№8, 1, 2 доля текстурных ориентировок для отражений от серии плоскостей (110) минимальна.

4. Доказано, что учет структурного и текстурного факторов металла труб при определении их работоспособности в условиях холодных климатических температур и агрессивного воздействия перекачиваемой среды – необходим. Трубы, полностью удовлетворяющие требованиям отечественной и зарубежной нормативно-технической документации и сертифицированные как годные к эксплуатации, в зависимости от состояния структуры и остаточной текстуры прокатки при пониженных температурах могут иметь динамические механические свойства и трещиностойкость, различающиеся в несколько раз.

5. На основании проведенных исследований подтверждена возможность повышения свойств материалов труб путем оптимизации структурного и текстурного состояния. С этой целью рекомендуется ввести в нормативно-техническую и контрактную документацию на поставку труб ответственного назначения для нефтепроводов Арктического и Северного регионов следующие дополнительные требования:

5.1. Включить в объем обязательных сдаточно-приемных испытаний определение полосчатости, фактора разнотекстурности, размеров неметаллических включений и остаточной текстуры прокатки металла труб.

5.2. Установить:

- допустимый (рекомендуемый) уровень разнотекстурности ограниченный фактором разнотекстурности – не менее 0,45:

- допустимый (рекомендуемый) уровень полосчатости балл 2 (ряд А, шкала 3, ГОСТ 5640)

- рекомендуемый уровень доли содержания текстурной ориентировки для отражений от серии плоскостей (110) не менее 6-8 %.

6. Действенность разработанных рекомендаций и сделанные в работе выводы о взаимосвязи металлургического качества труб и их работоспособностью в условиях Арктики, Крайнего Севера и Сибири была проверена на вырезках из повреждённых труб, изготовленных из труб других марок феррито-перлитных сталей – 09Г2С, 13ХФА, Х56, а также на трубных заготовках этих сталей и стали 10Г2ФБ.

7. Разработанные рекомендации были использованы при формировании требований к трубной продукции, предназначенной для эксплуатации в Арктическом регионе ПАО «Газпром нефть».

8. Перспективы разработки данной тематики включают исследования, с целью определения критериев надежности для объектов нефтегазовой инфраструктуры в новых регионах, основанных на установлении взаимосвязи между структурной неоднородностью и широким перечнем параметров эксплуатации, таких как характер течения транспортируемой продукции с учетом распределения фазового состава, напряженно-деформированное состояние трубопровода, циклические механические нагрузки. Сформированные по результатам диссертационного исследования зависимости влияния структурной неоднородности на низкотемпературные механические свойства и трещиностойкость металла трубопроводов, эксплуатируемых в Арктическом регионе, будут востребованы при проектировании и выборе материалов трубопроводных транспортных систем. Установленные закономерности взаимосвязи структурной неоднородности и работоспособности сталей, эксплуатирующийся при пониженных климатических температурах, будут рекомендованы в качестве учебных пособий студентам бакалавриата и магистратуры направления «проектирование и эксплуатация газонефтепроводов, газонефтехранилищ».

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Shaposhnikov, N.O. Study of the crystallographic texture of pipe steel / N.O. Shaposhnikov, B.S. Ermakov, A.A. Alhimenko,

A.S. Tsvetkov, A.V. Shirokov // Letters on Materials 2020. - №10 (1). – с. 48-53.

2. Shaposhnikov, N.O. Effect of Production Factors on Main Oil Pipeline Pipe Metal Property / Ermakov, B.S. // November 2018 Metallurgist. – № 62 (7-8). – с. 143-147. DOI: 10.1007/s11015-018-0718-7.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Shaposhnikov, N.O. The use of sprayed powders to create coatings in the welds of oilfield pipelines / N.O. Shaposhnikov, B.S. Ermakov, A.A. Alhimenko, T.E. Shatsky, A.F. Igolkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 826 012008, 2020

4. Golubev, I.A. The effect of magnetic treatment on the effectiveness of inhibition in oilfields / Laptev A.B., Alekseeva E.L. **Shaposhnikov N.O.**, Povyshev A.M., Kurakin M.K // E3S Web of Conferences 121 02006, 2019

5. Kovalev, M. Predicting the durability of zinc coatings based on laboratory and field tests / Alekseeva E., **Shaposhnikov N.** // Metals 2021, 11, 1713.

6. Alkhimenko, A. Several erosion test results of means of sand control / **Shaposhnikov N.**, Shemyakinsky B., Tsvetkov A. // E3S Web of Conferences 121, 03005, 2019

7. Sleptsov, O.I. The analysis of the causes of efficiency decrease in the metal of liquefied gas pipeline under the conditions of corrosive environmental exposure / Ermakov B.S., Ermakov S.B., **Shaposhnikov N.O.** // Procedia Structural Integrity 20 (2019). – с.143–147.

8. Shaposhnikov, N.O. Structural heterogeneities of tube steels taken into account in the development of contactless magnetometry of pipeline systems / N.O. Shaposhnikov, B.S. Ermakov, S.B. Ermakov, O. Nikiforova // MATEC Web of Conferences 245(115):11007, 2018

9. Shaposhnikov, N.O. Influences of the banding level on the viscosity of tube steel 10G2FB, / Materials today: proceedings. - № 30(7–8) DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.445

10. Shaposhnikov, N.O. Acoustic anisotropy and localization of plastic deformation in aluminum alloys / N.O. Shaposhnikov,

Tretyakov D., A. Belyaev // Materials today: proceedings, DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.387

11. Shaposhnikov, N.O. Investigation of hydroabrasive resistance of internal anti-corrosion coatings used in the oil and gas industry / N.O. Shaposhnikov, M.A. Kovalev, E.L. Alekseeva // IOP Conference Series Materials Science and Engineering 889(1):012020, 2020

12. Shaposhnikov, N.O. Corrosion resistance of steel piling supports in sea water / N.O. Shaposhnikov, A.A. Alkhimenko, A.A. Kharkov, A. Tstvetkov, I. Kolyushev // journal Corrosion resistance, January 2020. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-2-16-20

Публикации в прочих изданиях:

13. Шапошников, Н.О. Исследование влияния прокатки на работоспособность металла трубных сталей в условиях низких температур / Шапошников Н.О., Гарбузова Ю.С., Мухаметшина А.Р., Жужгина Т.А. // Материалы XIV Всероссийская научно-техническая конференция. Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: (г. Пермь, 9–12 ноября 2021 г.) : в 2 т. – Пермь – Екатеринбург, 2021, С. 454-458.

14. Шапошников, Н.О. Оценка качества бурильных труб с использованием комплексной методики материаловедческих, механических, коррозионных и триботехнических исследований / Н.О. Шапошников, А.А. Альхименко, В.А. Яхимович, М.К. Куракин, О.В. Швецов, М.А. Ковалев, Е.Л. Алексеева, Б.А. Шемякинский, А.Д. Бреки, О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, С.Г. Чулкин, Ю.А. Фадин, О.В. Толочко // Тула: Изд-во ТулГУ. - 2019. - 134 с.

15. Шапошников, Н.О. Комплексная оценка качества стальных бурильных труб / Н.О. Шапошников, А.А. Альхименко, В.А. Яхимович, М.К. Куракин, О.В. Швецов, М.А. Ковалев, Е.Л. Алексеева, Б.А. Шемякинский, А.Д. Бреки, О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, С.Г. Чулкин, Ю.А. Фадин, О.В. Толочко, А.Е. Гвоздев // Тула: Изд-во ТулГУ. - 2019. – 138 с.

16. Шапошников, Н.О. Особенности разрушения сталей, эксплуатируемых в сероводородсодержащих средах / Шапошников, Н.О., Алексеева, Е.Л. // Инженерная практика № 12. с. 56-60. - 2017.

17. Шапошников, Н.О. Влияние технологических факторов на формирование свойств металла труб магистральных нефтепро-

водов / Ермаков, Б.С., Шапошников, Н.О. // *Металлург*, 8(62). - с. 39–43. - 2018.

18. Альхименко, А.А. Коррозионная стойкость стальных свайных опор в морской воде / Альхименко, А.А., Колушев, И.Е., Харьков, А.А., Шапошников, Н.О., Цветков А.С. // ISSN:1813-7016. *Коррозия: материалы, защита*, №2. – с. 16-20, 2020

Свидетельство:

19. Свидетельство № 2019663575. «Программа для выбора марки стали или сплава по заданным параметрам»: программа для ЭВМ / Давыдов, А.Д., Альхименко, А.А., Шапошников, Н.О., Харьков А.А. (RU) - Правообладатель: «ФГАОУ ВО СПбПУ» (RU). № 2019662339; заявл. 08.10.2019; опубл. 18.10.2019, Бюл. № 10.

Таблица 1 – Взаимосвязь микроструктуры и свойств металла труб из стали 10Г2ФБ

№ трубы	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ_5	KCV при T _{исп} , °C		CTOD _{min} -20 °C	Средний размер зерен в ½ листа	Фактор разно- зерни- стости	Доля Nb	Полос- чатость /балл	Кол-во НВ*	V** корр.	Кол-во блис- теров
	при 20 °C			20	-60								
	МПа		%	Дж/см ²		мм	мкм		%		шт/мм ²	мм/год	шт/см ²
8	623	531	28	242	98	0,09	15,3	0.21	-	A.1.9/5	6	0,78	10-12
1	603	483	25	230	102	0,19	12,4	0.24	следы	A.1.9/5	4	0,77	9
2	599	497	26	231	141	0,33	11,9	0.28	следы	A.1.9/5	4	0,67	3-5
4	632	533	27	258	159	0,39	11,7	0.29	5-10	A.1.8/4-5	2	0,66	3
3	617	497	27	292	191	0,50	10,9	0.35	35	A.1.7/3-4	2	0,59	2
7	587	511	27	287	242	0,48	10,4	0.43	40	A.1.7/3	1	0,61	-
6	644	532	26	326	295	0,73	6,5	0.46	40-45	A.1.7/2-3	-	0,60	-
5	618	485	28	375	316	0,78	6,5	0.51	40-50	A.1.7/2	-	0,58	-

Примечание: *включения диаметром более 10 мкм; **в среде 5 % NaCl+CO₂

Таблица 2 – Результаты исследований

Сталь	Состояние	D _{сред} , мкм	F _Z , %	Полос- чатость, балл	T(110), %	НВ > 10 мкм, шт/м ²	KCV ⁻⁶⁰ , Дж/см ²	CTOD _{inm} при -20 °C	V*корр. мм 10 ²
10Г2ФБ	+	7	47	1	10,5	-	278	0.71	14/63
	-	12	26	3	3.7	3	103	0.12	18/75
09Г2С	P	15	31	3	5.1	2	51	0.18	15/61
	+	7	45	2	11.0	-	118	0.58	10/53
	-	11	29	4	4.2	1	47	0.14	14/58
13ХФА	P	14	27	3	3.2	2	72	0.20	11/46
	+	7	48	1	9.8	-	134	0.64	8/37
	-	12	36	3	5.4	-	101	0.12	9/42
Х56	P	14	29	2	0.9	-	69	0.19	25/88
	+	9	48	1	11.3	-	129	0.53	16/62
	-	13	35	3	4.2	1	72	0.22	21/73

Примечание: в числителе – скорость коррозии в 5 % NaCl в знаменателе – 5 % NaCl+CO₂.