

На правах рукописи



ТОЛСТОВ АНАТОЛИЙ ЭДУАРДОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ УЧАСТКОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ,
СОДЕРЖАЩИХ РАССЛОЕНИЯ МЕТАЛЛА**

25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и
хранилищ»

АВТОРЕФЕРАТ

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

Москва – 2019

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Научный руководитель: доктор технических наук
Зорин Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Великоднев Валерий Яковлевич**, доктор технических наук, технический директор ООО «Центр ЭТСИ»

Шкатов Петр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры физики и химии материалов им. Б.А. Догадкина ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»

Ведущее предприятие: ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина»

Защита диссертации состоится 30 октября 2019 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 511.001.03 в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», по адресу: 142717, Московская область, Ленинский район, сельское поселение Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и на официальном сайте: [http:// www.vniigaz.gazprom.ru](http://www.vniigaz.gazprom.ru).

Автореферат разослан «20» сентября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

И.Н. Курганова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для рационального планирования и выполнения ремонтных работ на трубопроводах в настоящее время принято руководствоваться принципом обслуживания по техническому состоянию. Однако реализуется он не в полной мере, что можно проследить на примере расслоений металла труб.

Анализ действующих на нефте- и газопроводах норм оценки качества труб с расслоениями показывает, что данные дефекты рассматриваются как технологические дефекты производства, сами по себе не представляющие опасности в случае, если они не имеют выхода на поверхность и не находятся в зоне сварных швов или других дефектов геометрии.

Такой подход не может считаться оптимальным. Реальные условия эксплуатации характеризуются воздействием на трубопровод дополнительных нагрузок, таких как изгибы и кручения. Кроме того, расслоения имеют различную конфигурацию и природу. Очевидно, что применительно к рассматриваемым дефектам указанные факторы преимущественно определяют степень их опасности. Как следствие, регулярное обнаружение расслоений в очагах разрушения трубопроводов свидетельствует о том, что данные дефекты могут являться причиной многих аварий, и в существующей методологии обслуживания нефте- и газопроводов их влияние недооценено.

Учитывая изложенное, исследование опасности расслоений в трубах, выполненное в рамках научно обоснованного подхода, отражающего совокупность реальных условий эксплуатации трубопроводов и особенностей данных дефектов, разработка на базе полученных результатов усовершенствованных норм оценки качества труб с расслоениями, и своевременное их выявление являются актуальными задачами.

Степень разработанности темы исследования

В последнее время вопрос влияния расслоений на несущую способность трубопровода стал привлекать больше внимания, но практическая ценность проводимых исследований снижается по причине рассмотрения преимущественно базовых задач нагружения трубопроводов внутренним давлением, без учета конфигурации и причин образования расслоений. В результате такой подход не позволяет сформировать эффективных критериев оценки качества труб с данными дефектами.

Цель работы – совершенствование методов и технологий оценки технического состояния участков магистральных трубопроводов с расслоениями металла с учетом фактических условий эксплуатации и природы возникновения данных дефектов.

Основные задачи исследования:

- оценить масштаб распространения расслоений металла труб на магистральных трубопроводах, а также эффективность действующих подходов к оценке опасности данных дефектов;

- изучить влияние фактических условий эксплуатации на работоспособность трубопроводов, содержащих расслоения металла;
- исследовать причины возникновения расслоений и их влияние на опасность данных дефектов;
- разработать технологию, способствующую повышению выявляемости расслоений на газопроводах;
- разработать уточненные нормы оценки качества труб с расслоениями, учитывающие сведения о текущем состоянии и фактических параметрах нагружения дефектной зоны, и предложить методические подходы, позволяющие получать указанные сведения.

Научная новизна

Установлено, что изгибные нагрузки, даже не превышающие допустимые нормативные значения, а также нагрузки кручения негативно влияют на несущую способность трубопровода в зоне расслоения. Определен пороговый уровень сложного напряженно-деформированного состояния (НДС), при превышении которого трубопровод с расслоением не соответствует принятому критерию работоспособности.

Экспериментальные исследования показали, что одной из фундаментальных причин образования расслоений в трубах являются структурные изменения в металле, а именно сегрегация карбидов по границам зерен феррито-перлитной матрицы. Также установлено, что природа расслоений определяет степень их влияния на работоспособность конструкции: расслоения, вызванные металлургической ликвацией, являются только концентраторами напряжения, а зоны расслоений, вызванных водородным охрупчиванием или структурными изменениями металла, имеют еще и комплекс пониженных эксплуатационных свойств.

Предложена и подтверждена возможность эффективного использования технологии неразрушающей экспресс-диагностики металла, основанной на получении массива значений поверхностной микротвердости, для идентификации типа расслоения, вызванного металлургической ликвацией, водородным охрупчиванием или структурными изменениями в металле.

Разработана усовершенствованная методика технического диагностирования участков трубопроводов, содержащих расслоения, основанная на использовании: созданного диагностического комплекса для выявления расслоений в трубах, в том числе без снятия изоляционного покрытия; технологии неразрушающей экспресс-диагностики состояния металла в зоне дефекта; экспериментально-аналитического подхода к оценке уровня изгибных напряжений в трубопроводе; разработанных норм оценки качества труб с расслоениями, учитывающих параметры расслоения, его тип, а также фактическое НДС трубопровода в зоне дефекта.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты работы позволяют использовать обоснованные критерии, методы и технические средства для учета воздействия факторов, снижающих

работоспособность участков магистральных трубопроводов с расслоениями, с целью повышения эффективности их обслуживания.

Разработанный сканер-дефектоскоп NDM18 «TESTMASTER» по результатам проведенных тестовых и полевых испытаний рекомендован к использованию в ПАО «Газпром» и прошел опытную эксплуатацию на объектах ООО «Газпром трансгаз Волгоград» и АО «Чеченгазпром».

Методика технического диагностирования участков трубопроводов, содержащих расслоения принята к внедрению на объектах ООО «Газпром трансгаз Волгоград», для чего был разработан соответствующий нормативный документ.

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается актами внедрения и опытно-экспериментального использования.

Методология и методы исследования

При проведении исследований применялись механические испытания образцов металла труб, натурные полигонные испытания трубной плети и испытания на специально разработанном стенде, оптическая и трансмиссионная электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ металла, измерения твердости и микротвердости, программное моделирование методом конечных элементов, статистические методы обработки данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика исследования влияния расслоений металла на сопротивляемость разрушению участков трубопроводов под действием фактических условий эксплуатации и полученные с ее помощью количественные критерии работоспособности труб с данными дефектами.

2. Установленное влияние природы возникновения расслоений на степень их опасности.

3. Экспериментальное подтверждение возможности использования технологии неразрушающей экспресс-диагностики состояния металла, основанной на измерении значений поверхностной микротвердости, для идентификации различных типов расслоений.

4. Методика технического диагностирования участков магистральных трубопроводов, включающая использование современных технологий диагностики, определения состояния металла и НДС в зоне дефекта, а также актуализированные нормы оценки качества труб с расслоениями.

Личный вклад автора заключается в формулировании цели и задач работы, изучении накопленного опыта и достижений в соответствующих областях науки, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных результатов, их апробации, подготовке публикаций по выполненной работе.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов диссертационной работы определяется их сопоставлением с общепризнанными отраслевыми знаниями, с данными, полученными другими авторами при рассмотрении схожих вопросов, использо-

ванием современного поверенного оборудования и лицензионных программных продуктов.

Основные результаты, полученные в работе, докладывались и обсуждались на: 3-ей международной научно-технической конференции «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла» (Москва, 2003 г.), 19-й Международной деловой встрече «Диагностика – 2011» (г. Геленджик, 2011 г.), 7-й международной конференции «Обслуживание и ремонт газонефтепроводов – 2014» (г. Сочи, 2014 г.), совещании «Итоги работы газотранспортных обществ по эксплуатации линейной части магистральных газопроводов и газоконденсатопроводов ОАО «Газпром» за 2014 год и задачи на 2015 год» (г. Минск, 2015 г.), IX Международной конференции «Обслуживание и ремонт основных фондов ПАО «Газпром» (г. Алушта, 2018 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 111 наименований и 3 приложений. Содержит 173 страницы текста, включая 92 рисунка и 27 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена актуальность темы диссертации, обозначены цель и задачи исследования, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость результатов работы.

В первой главе представлены данные, отражающие распространенность дефектов расслоений металла нефте- и газопроводов и существующие представления об их опасности.

Статистические сведения о дефектах расслоения в трубах были классифицированы по диаметру труб, категории трубопровода, марки трубной стали. В силу низкой выявляемости расслоений при внутритрубной дефектоскопии (ВТД) газопроводов, использовались только сведения, полученные на нефтепроводах.

Анализ данных показал, что подобные дефекты распространены: на 01.06.2018г. их насчитывалось более 2 000 000 шт. При этом диаметр труб не оказывает существенного влияния на образование дефектов расслоения. Повышение категоричности участка приводит к некоторому увеличению плотности дефектов расслоения. Наибольшее же влияние оказывает марка стали. Несмотря на то, что дефекты расслоения обнаруживаются на трубах любых марок, их плотность может существенно отличаться. Так, для сталей 17Г1С, 17Г1С-У и 17ГС она составляет 40 ÷ 55 дефектов на 1 км трубопровода. Для стали 20 – более 153 дефектов на 1 км, а для сталей 10Г2СД и 10Г2ФБЮ в диапазоне 0,4 ÷ 4,9 на 1 км.

Таким образом, трубы из наиболее простых, низколегированных сталей имеют значительно большую склонность к образованию расслоений, чем трубы из легированных сталей контролируемой прокатки.

Динамика обнаружения дефектов расслоения (рисунок 1) показывает, что их количество неуклонно растет, хотя многие из данных дефектов вырезаются в рамках ежегодно выполняемых ремонтно-восстановительных работ. Из этого следует, что расслоения в трубах не являются только технологическими дефектами производства, условия эксплуатации также оказывают существенное влияние на их образование и развитие. Причем наметившаяся тенденция свидетельствует о прогрессии этого процесса по мере увеличения срока службы нефтепроводов.

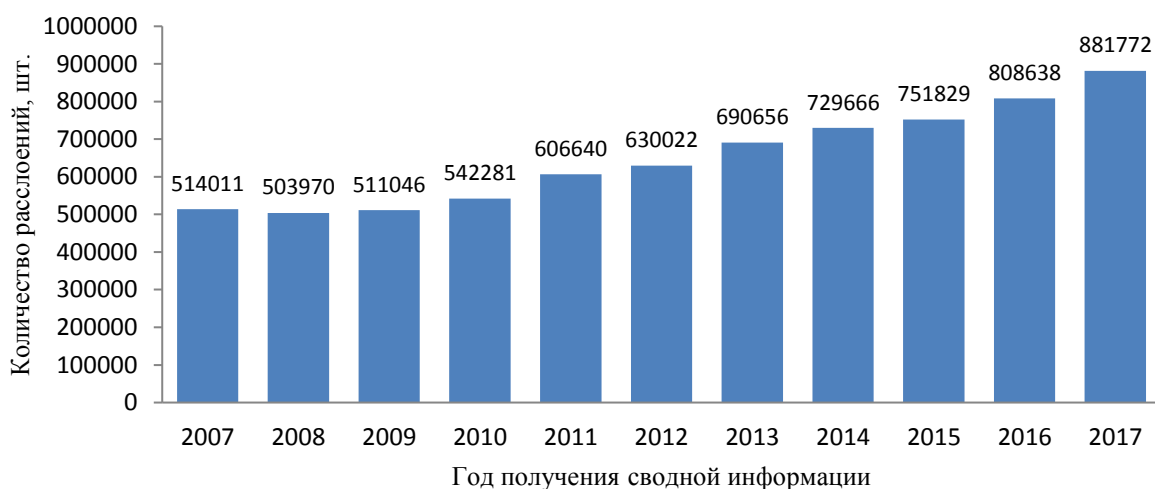


Рисунок 1 – Количество обнаруженных при ВТД дефектов расслоения на магистральных нефтепроводах

Несмотря на отсутствие представительной статистики по дефектам расслоения на газопроводах, следует ожидать там аналогичной картины, поскольку и трубная продукция, используемая для их сооружения, и условия эксплуатации очень схожи с нефтепроводами. Подтверждением этому служат результаты отбраковки труб на газопроводах, в рамках которых обнаруживается большое количество дефектов расслоения (рисунок 2, таблица 1).

Распространенность расслоений ставит вопрос об их влиянии на несущую способность эксплуатируемых трубопроводов, особенно учитывая, что подобные дефекты регулярно обнаруживаются в очагах аварийных разрушений.

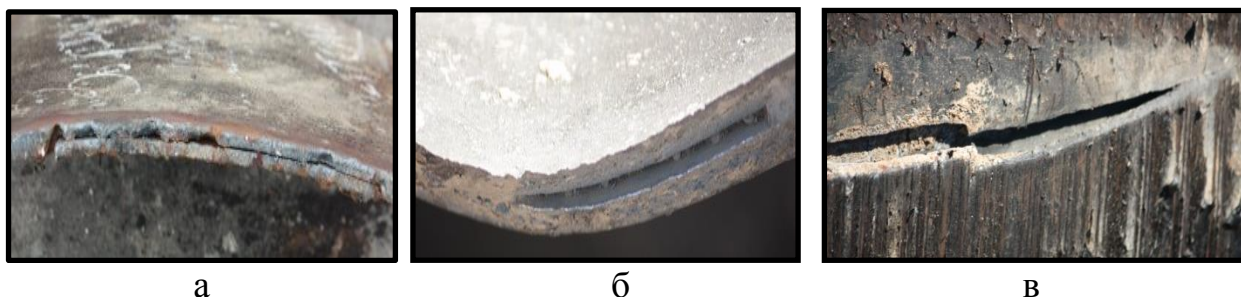


Рисунок 2 – Дефекты расслоения на магистральных газопроводах

Таблица 1 - Брак по дефектам типа расслоения при отбраковке труб

№ п/п	Наименование объекта	Диаметр, мм	Толщина, мм	Брак по рассл., м	Брак по рассл., шт.
2006-2016 гг.					
1	Оренбург-Новопсков 634-661 км	1220	14,0-14,9	110,3	11
2	Петровск-Новопсков 337-349 км	1220	12,0-12,8	68,44	8
3	Союз 753-799 км	1420	15,7-17,6	1049,9	95
4	Уренгой-Новопсков 3066-3077 км	1420	15,7-18,5	2737	236
5	Союз 948-970 км	1420	15,7-18,7	1847,58	163
6	Коробки-Лог 0-23 км	530	7,5-8,7	125	12
7	Союз 998-1012 км	1420	15,7-18,7	537,37	46
8	Уренгой-Новопсков 3215-3247 км	1420	15,7-18,5	2701,55	235
9	Уренгой-Новопсков 3007-3052 км	1420	15,7-18,5	5544,38	481
10	Уренгой-Новопсков 3186-3213 км	1420	15,7-18,5	2971,91	263

Анализ исследований, посвященных данному вопросу, проведенных И.Н. Бирилло, К.М. Гумеровым, Г.Е. Закиричным, В.Я. Кершенбаумом, А.Н. Колотовским, А.В. Комаровым, В.М. Кушнареном, Н.А. Махутовым, В.Д. Олешко, Ф.И. Пантелеенко, М.Ф. Фокиным и другими, позволяет выделить два ключевых момента. Во-первых, в большинстве случаев использовалась упрощенная постановка задачи: установление механических характеристик металла в зоне расслоения от действия внутреннего давления в трубопроводе или одноосного растяжения. Во-вторых, несмотря на схожесть экспериментов, полученные результаты демонстрировали неопределенность во влиянии расслоений на работоспособность труб.

По-видимому, вследствие этого разнятся и подходы эксплуатирующих организаций к оценке качества труб с подобными дефектами. В ПАО «Газпром» опасность расслоений признается только в случае их нахождения в области дефектов геометрии и торцевых зонах труб. В ПАО «Транснефть» применяется подход, основанный на приведении фактических параметров дефекта расслоения к эквивалентной классической трещине, которая оценивается по критериям прочности и долговечности. В таком случае опасность представляют только расслоения, расположенные под углом к оси трубы.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод об отсутствии к настоящему времени обоснованных критериев оценки соответствия качества труб с дефектами расслоения.

Во второй главе приведены результаты исследований поведения дефектов труб типа расслоения под действием различных эксплуатационных нагрузок.

Экспериментальное изучение поведения дефектов расслоения под действием сложного НДС методически является практически невыполнимой задачей. Для этой цели использовалось конечно-элементное моделирование в программном комплексе ANSYS, являющееся численным методом решения

задач механики деформированного твердого тела в трехмерной постановке с реальными моделями поведения материала. Это дает возможность вариативно подойти к программе исследования и более достоверно установить причинно-следственные связи в изучаемых процессах, которые потом могут быть подтверждены экспериментально.

В частности, планировалось оценить влияние на опасность дефектов расслоения таких параметров, как: диаметр трубы, размер и конфигурация расслоения, а также действие всех типов нагрузок, наблюдаемых на эксплуатируемых трубопроводах, и их сочетания.

В качестве объектов исследования выбраны трубные секции длиной 5 м: Ду 1400 мм, $\delta = 15,7$ мм и Ду 1200 мм, $\delta = 12,5$ мм. В центральной по толщине части труб моделировались расслоения различного размера и конфигурации: квадратные, круглые, плоские (повторяющие в сечении контур трубы) и зубчатые (с высотой зубьев в 1 мм и шагом зубьев в 5 мм).

Для конечно-элементного анализа использовался 20-узловой объемный элемент SOLID95, имеющий три степени свободы в каждом из узлов. С целью повышения точности расчетов разбиение моделей на сетку конечных элементов производилось так, чтобы в зоне расслоения она была значительно мельче, чем в окрестных участках. Между смежными поверхностями расслоения задавалось условие контакта без трения.

Нагрузки прикладывались как по отдельности, так и в сочетании: внутреннее давление $P = 7,4$ МПа (для секции Ду 1400 мм) и 5,4 МПа (для секции Ду 1200 мм); изгиб в 500D, 1000D и 2000D, направленный под углом 0, 90 и 180° к зоне дефекта; кручение, вызывающее в бездефектной зоне трубы касательные напряжения в 100 и 250 МПа.

После моделирования в информативных точках по контуру и в центре расслоения для каждого сочетания внешних нагрузок определялись компоненты осевых напряжений σ_x , σ_y , σ_z и интенсивность напряжений σ_i , используя классическое выражение (рисунки 3 и 4):

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1)$$

Из полученных данных были сделаны следующие выводы:

- при приложении любых нагрузок максимальные напряжения возникают на краях расслоения;
- конфигурация расслоения оказывает определяющее влияние на формирование НДС в зоне дефекта. В частности, расслоения зубчатой формы вызывают высокую концентрацию напряжений уже от действия внутреннего давления;
- изгиб приводит к возникновению повышенных напряжений в зоне дефекта в случае, если зубья расслоения ориентированы под углом к оси трубы, причем напряжения и величина изгиба имеют степенную зависимость (см. графики 1.1, 1.3 и 1.5 на рисунке 3);

- кручение также приводит к концентрации напряжений в зоне расслоения (интенсивность напряжений возрастает приблизительно вдвое, в сравнении с бездефектной зоной (см. графики 1.1 и 1.7 на рисунке 3)), однако влияние кручения стабильно и в целом не зависит от конфигурации дефекта;
- размер расслоения не оказывает принципиального влияния на его опасность.

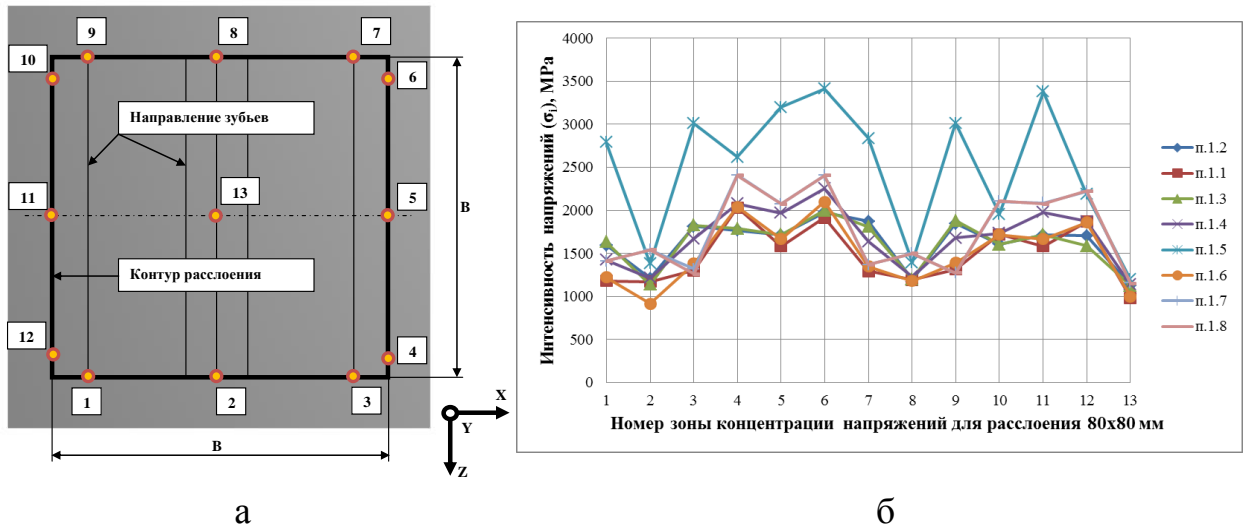


Рисунок 3 – Расчет интенсивности напряжений в зубчатом квадратном расслоении 80x80 мм в трубе Ду 1400 мм

а – точки измерения напряжений; б – значения интенсивности напряжений в точках 1 – 13 от действия следующих нагрузок: п.1.1 – $P=7,4$ МПа; п.1.2 - $P=7,4$ МПа + изгиб $1000D$ (0°); п.1.3 - $P=7,4$ МПа + изгиб $1000D$ (90°); п.1.4 - $P=7,4$ МПа + изгиб $1000D$ (180°); п.1.5 - $P=7,4$ МПа + изгиб $500D$ (90°); п.1.6 - $P=7,4$ МПа + изгиб $2000D$ (90°); п.1.7 - $P=7,4$ МПа + кручение 250 МПа; п.1.8 - $P=7,4$ МПа + кручение 250 МПа + изгиб $1000D$ (90°)

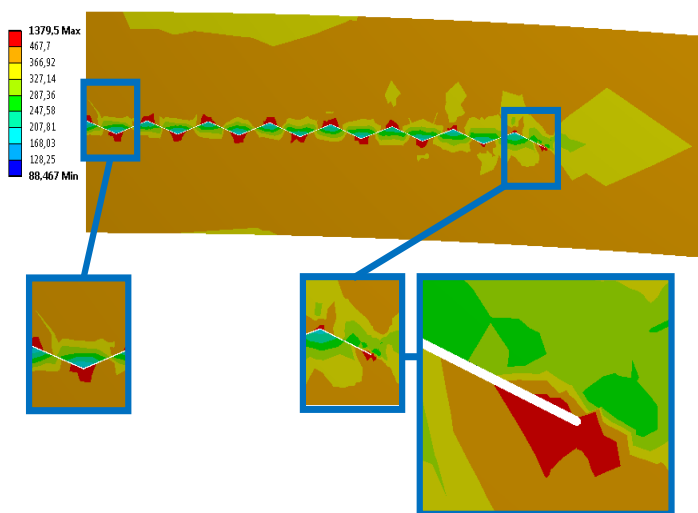


Рисунок 4 – Визуализация интенсивности напряжений в зоне расслоения от действия внутреннего давления и изгиба

Обработка представленных результатов позволяет установить количественную взаимосвязь между действующими на трубопровод нагрузками и напряжениями, вызываемыми ими в зоне трубы с расслоением, что было использовано при формировании обоснованных норм оценки качества труб с данными дефектами.

Экспериментальные исследования выполнялись для подтверждения результатов, полученных аналитическим путем.

На первом этапе объектом исследования служила трубная секция Ду 325 мм, $\delta = 12$ мм, $l = 2$ м, содержащая расслоение на глубине 5,5 мм оценочным размером 180 x 110 мм.

Методика проведения испытаний заключалась в нагружении дефектной зоны трубы внутренним давлением и кручением, для чего был сооружен стенд (рисунок 5), представлявший собой трубную плетку (1), сваренную с использованием отводов (2), закрепленную системой опор (3), фиксирующую горизонтальную часть плетки, в которой располагалась исследуемая труба (5).

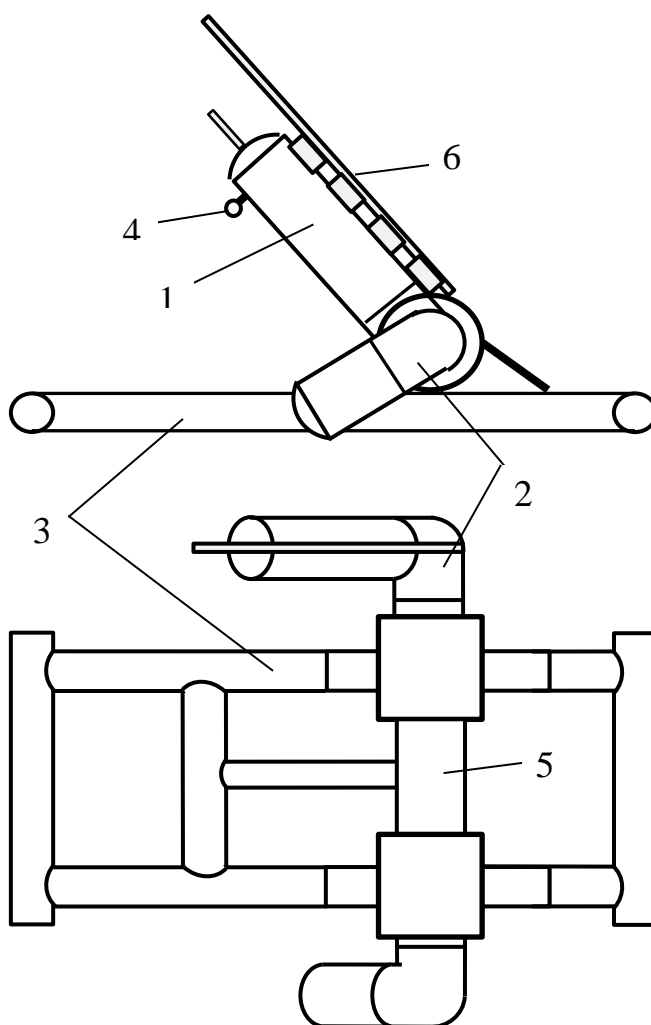


Рисунок 5 – Схематичное изображение испытательного стенда

Внутреннее давление в плетке задавалось посредством гидравлического насоса, подсоединенного к ней через патрубок на торцевой заглушке, а кручение – путем приложения усилия через рычаг (6).

Программа испытаний заключалась в создании внутреннего давления воды в плетке на уровне 35 атм., при котором трубоукладчиком выполнялась тяга рычага в направлении, обратном его исходному наклону. Поскольку нагрузки кручения не регламентируются нормативной документацией, степень кручения определялась технической возможностью трубоукладчика, а также устойчивостью стенда в процессе приложения нагрузки. В результате рычаг был повернут на угол $\varphi \approx 40^\circ$ (рисунок 6).



а



б

Рисунок 6 – Проведение испытаний

а - положение стенда до нагружения; б - положение стенда после нагружения

Затем выполнялся ультразвуковой контроль, показавший изменение размеров расслоения в продольном направлении до 192 мм, а в кольцевом до 176 мм.

Полученные результаты показали, что кручение способствует развитию расслоений в трубах, причем оно может происходить в направлении выхода дефекта на поверхность, делая его более опасным с точки зрения влияния на несущую способность трубопровода. И несмотря на то, что кручение не является типовой эксплуатационной нагрузкой нефте- и газопроводов, для участков, проложенных в зонах морозного пучения, карстов, оползней, а также для трубопроводных обвязок насосных и компрессорных станций, данный вид нагрузок достаточно распространен и требует учета.

На следующем этапе была подготовлена плеть из трубы класса прочности К60 (Италия), Ду 1200 мм, $\delta = 14,1$ мм, $l = 11,2$ м, вырезанной после 32 лет эксплуатации по причине коррозионных дефектов (таблица 2). Проведенный ультразвуковой контроль показал наличие в трубе еще и множественных дефектов расслоения, расположенных, в том числе, в зоне коррозии. Общий вид плети приведен на рисунке 7.

Программа испытаний заключалась в статическом нагружении плети до разрушения, которое произошло при давлении 139 атм. в дефектной зоне №3 (рисунок 8). Осмотр излома после проведения испытаний показал, что очаг разрушения находился не в месте наиболее глубокого дефекта, а в зоне общей коррозии, по глубине не превышающей $1,0 \div 1,3$ мм.

Таблица 2 – Размеры коррозионных зон, содержащихся в плети

Коррозионная зона	Длина l , мм	Ширина b , мм	Максимальная глубина d , мм
№1	430	270	2,6
№2	670	220	3,1
№3	420	310	3,0
№4	520	370	2,5
№5	620	480	2,2
№6	310	150	2,9



Рисунок 7 – Общий вид плети и содержащихся на ней дефектов



Рисунок 8 – Зона разрушения трубной плети

В целом квазихрупкий излом разрушения характеризовался крайней неоднородностью. По всей длине наблюдались участки хрупких сколов, отрыва слоев металла и расслоений.

Одной из основных целей проведенных испытаний было сопоставление фактического разрушающего давления с расчетным, определенным по методике из СТО Газпром 2-2.3-112-2007. Дефектная зона №3, явля-

вшаяся очагом разрушения, представляла собой питинговое коррозионное поражение сложной конфигурации глубиной от 0,5 до 3,0 мм. Поскольку в очаге, а также по линии распространения разрушения глубина коррозии не превышала 1,3 мм, для проведения расчетов были приняты следующие параметры одиночного дефекта: длина - 420 мм; глубина – 1,3 мм. В результате расчетное давление разрушения плети составило 144 атм.

Теоретическое и реальное значение разрушающего давления оказались близки. Однако, полученный результат являлся неожиданным. Во-первых, фактическое давление разрушения оказалось ниже расчетного, хотя методика из СТО Газпром 2-2.3-112-2007 является консервативной, а параметры де-

фекта округлялись в большую сторону. Во-вторых, разрушение произошло не по коррозионным кавернам глубиной до 3,1 мм, а в зоне общей коррозии.

Обозначенные обстоятельства свидетельствовали о наличии дополнительных факторов, приведших к снижению несущей способности трубы в очаге разрушения.

Третья глава посвящена изучению природы расслоений.

Анализ существующих исследований показывает, что в настоящее время принято выделять два типа расслоений: металлургические и водородные.

Для расширения указанных представлений было выдвинуто предположение о влиянии на образование дефектов расслоения структурных изменений в металле, в частности сегрегации карбидов по границам зерен, наблюдаемых у феррито-перлитных сталей, и называемых старением. Такие изменения приводят к охрупчиванию металла, что увеличивает вероятность возникновения расслоений в зонах, содержащих металлургическую ликвацию.

С целью подтверждения данного предположения из шести участков газопроводов были вырезаны темплеты, содержащие дефекты расслоения. Также, подбирались темплеты из тех же участков, не содержащие подобных дефектов, либо из аналогичных труб аварийного запаса.

Посредством исследований указанных образцов, включавших проведение механических испытаний, оптическую и электронную микроскопию и рентгеноспектральный анализ, устанавливались причины образования расслоений. Также определялась возможность неразрушающей оценки типов расслоений, для чего использовались методы измерения твердости и микротвердости. Такой выбор обусловлен тем, что механические методы имеют более понятную причинно-следственную связь между структурными процессами в металле и измеряемыми характеристиками, в сравнении с электромагнитными и акустическими (коэрцитивной силой, акустической эмиссией, ультразвуком и т. д.).

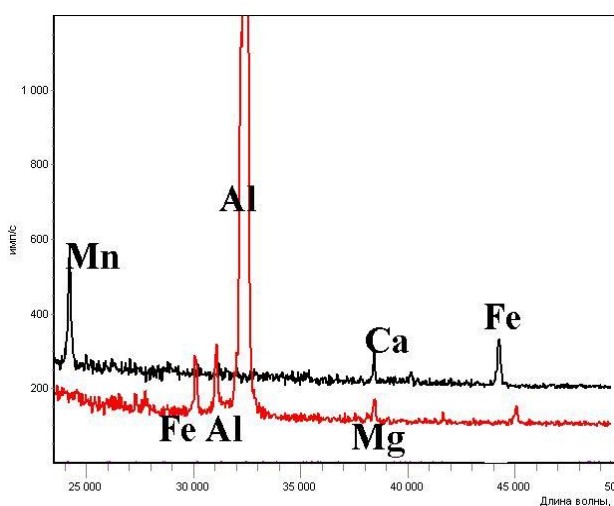


Рисунок 9 – Рентгеновский спектр постороннего неметаллического включения в зоне расслоения

Полученные результаты показали, что в двух случаях причина образования расслоений была чисто металлургическая – концентрация неметаллических включений, прежде всего оксида алюминия (рисунок 9). В одном случае расслоение появилось в результате водородного охрупчивания. Характерным признаком такого расслоения является выпучивание трубы в зоне дефекта (рисунок 10). И в трех случаях причиной дефектов являлось возникновение карбидной сетки по границам зерен металла как в зоне расслоений, так и на поверхности (рисунок 11).



Рисунок 10 – Расслоение водородного типа

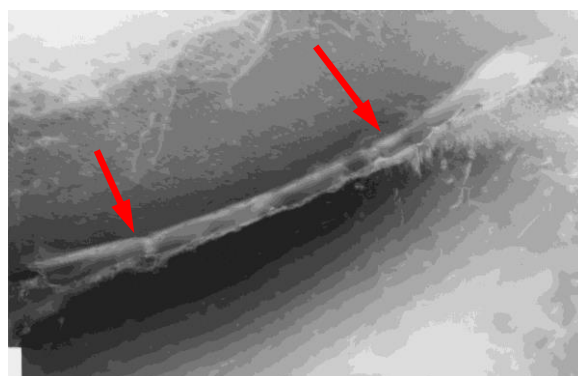
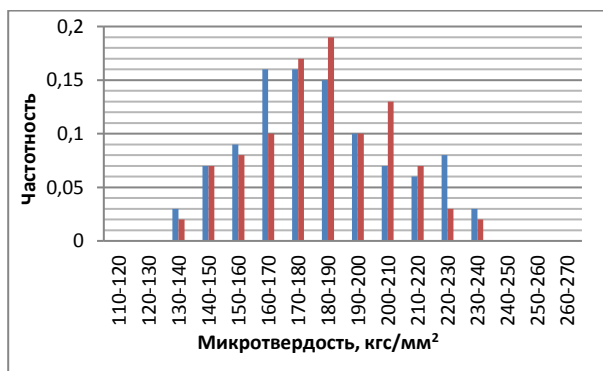


Рисунок 11 – Микроструктура металла с выделениями карбидов (x 15 000)

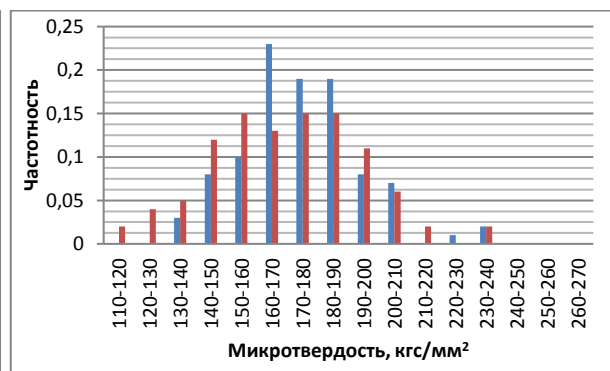
В части идентификации типов расслоений было установлено, что метод измерения твердости не подходит для этой цели. Значения твердости отражают макромасштабное упрочнение (или разупрочнение), и не реагируют на такие процессы, как выделение карбидов или образование микротрещин.

Способ неразрушающей оценки состояния металла с применением метода микротвердости, предложенный А.Е. Зориным, показал хорошие результаты. В зоне дефектов, имеющих чисто ликвационную природу, не наблюдалось отличий на гистограмме поверхностной микротвердости, в сравнении с исходным состоянием (рисунок 12, а). В случае образования расслоений по причине протекания отмеченных структурных изменений на гистограмме микротвердости появлялся массив более низких значений (рисунок 12, б). И в случае расслоений водородного типа, в распределении появлялись единичные провалы значений, соответствующие попаданию индентора в микротрещины или предельно хрупкие зоны (рисунок 12, в).

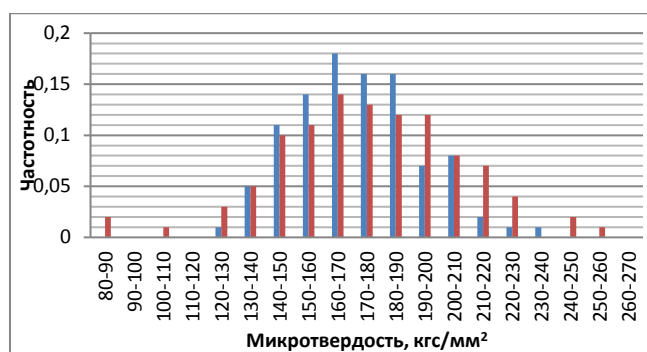
Помимо установления новой причины образования дефектов расслоения – выделение карбидных включений по границам зерен металла, было также обнаружено, что различная природа расслоений наделяет их разной степенью опасности: механические испытания металла с указанными структурными изменениями показали существенный провал значений ударной вязкости (среднее значение $KCV_{-20} = 40,07$ МДж/см², при норме в 58,8 МДж/см²).



а



б



В

■ – металл в зоне расслоения; ■ – бездефектный металл

Рисунок 12 – Распределение поверхностной микротвердости образцов а – образец с металлургическим расслоением (■); б – образец с расслоением, вызванным старением (■); в - образец с расслоением водородного типа (■)

Четвертая глава посвящена разработке практических подходов к техническому диагностированию, позволяющих повысить эффективность обслуживания трубопроводов с дефектами расслоения.

Поскольку использование магнитных внутритрубных снарядов не позволяет обнаруживать большинство расслоений металла газопроводов, возникает необходимость в создании



Рисунок 13 – Общий вид NDM18 «TESTMASTER»

средств, способных делать это при выполнении других работ: диагностики в шурфах или капитального ремонта.

Для достижения указанной цели был создан магнитный диагностический комплекс NDM18 «TESTMASTER» (рисунок 13). Он предназначен для магнитного контроля поверхности труб Ду 520-1420 мм, и имеет важное преимущество, по сравнению с другими приборами семейства наружных сканеров-дефектоскопов индикаторного типа,

заключающееся в возможности обследования труб, покрытых изоляцией.

Время развертывания сканера занимает не более 15 минут, а скорость его движения вдоль трубы составляет 4 м/мин (для Ду 1400 мм).

В основе сканера лежит магнитный блок, возбуждающий на трубе проникающее на глубину до 10 мм магнитное поле. Для обеспечения высокой чувствительности и достоверности результатов контроля сканирующая система оснащена современными объемно-матричными магнитными датчиками и устройством высокоскоростной регистрации информации.

Шасси сканера исполнено в виде кольцеобразной рамы, включающей четыре отдельных функциональных блока (рисунок 14).

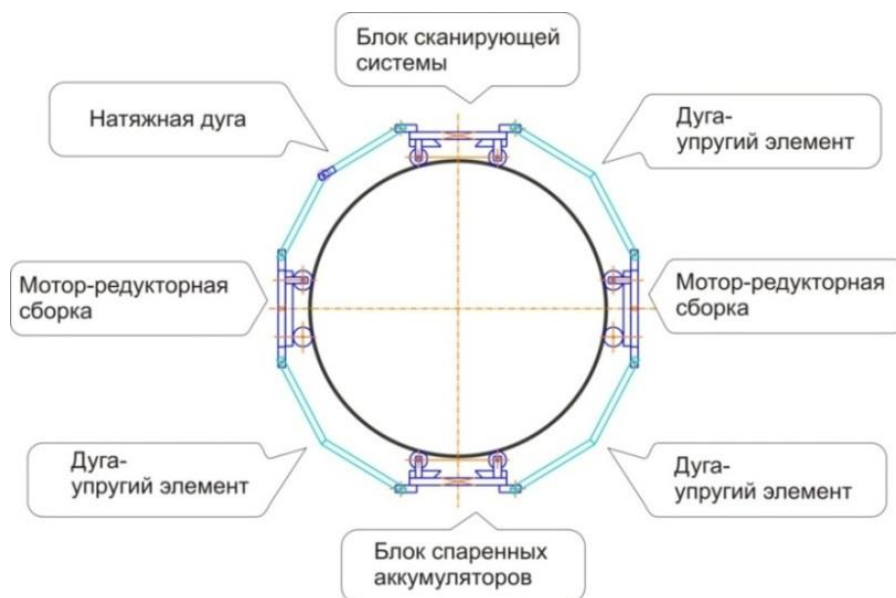


Рисунок 14 – Принципиальная схема NDM18 «TESTMASTER»

Тестовые испытания NDM18 «TESTMASTER» выполнялись в шурфах на участке МГ «Петровск-Новопсков», а также в составе ремонтной колонны на участке МГ «Уренгой-Новопсков». Сканер показал высокую выявляемость таких дефектов, как дефекты потери металла, трещины, дефекты геометрии труб, дефекты типа расслоения. Причем указанные результаты были получены несмотря на наличие изгибов оси и овальность труб, а также низкое качество очистки поверхности.

Комиссионные испытания проводились при отрицательных температурах на участке 1204-1228 км газопровода «Ухта-Торжок-2», Ду 1200 мм. Они подтвердили функциональные возможности сканера, следствием чего явился его допуск к опытной эксплуатации на капитальном ремонте лупинга МГ «Аксай-Гудермес-Грозный», АО «Чеченгазпром».

Для учета установленных факторов влияния дефектов расслоения на работоспособность труб при выполнении технического диагностирования потребовалось создание соответствующей методики (рисунок 15). Ниже приводится описание входящих в нее технологических и методических решений.

Ia и Ib. Обнаружение расслоений в процессе эксплуатации трубопроводов может быть выполнено как посредством ВТД, так и при контроле труб в шурфах (в том числе с использованием NDM18 «TESTMASTER»).

При капитальном ремонте NDM18 «TESTMASTER» рекомендуется применять в дополнение к ручным приборам неразрушающего контроля.

IIa и IIб. Существует две группы методов определения НДС трубопровода: через измерение характеристик металла, связанных с его напряженным состоянием (тепловизионный, магнитный контроль и т.д.) и путем обработки данных о пространственном положении трубопровода. Вторая группа методов является более достоверной. В ней в последнее время получили развитие технологии установления положения трубопровода при пропуске внутритрубных устройств, которые являются наиболее перспективными.

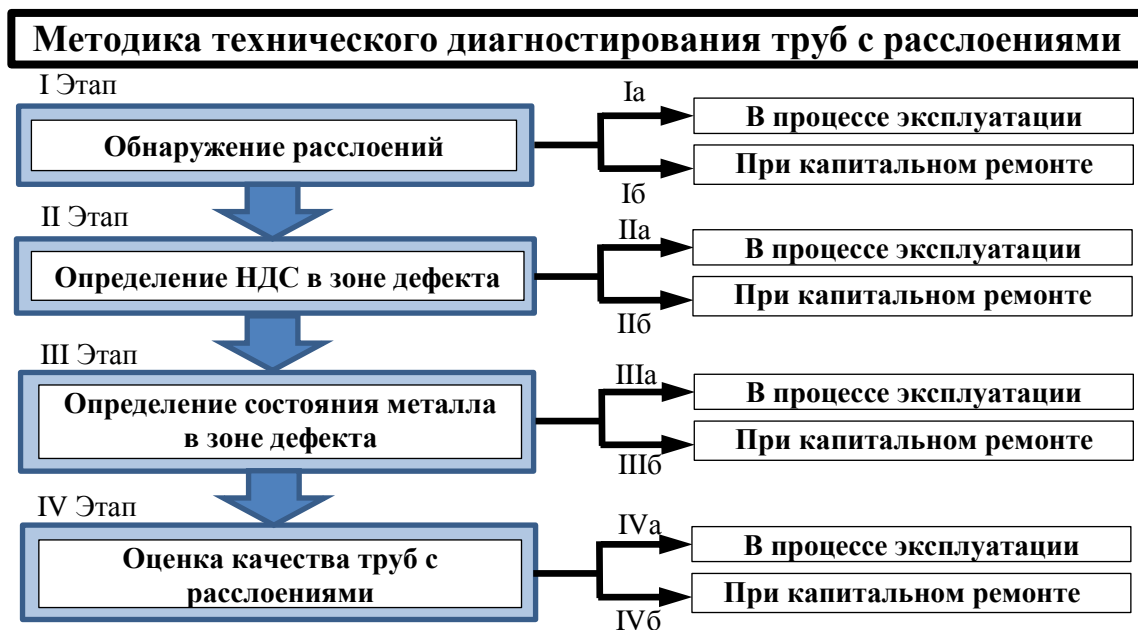


Рисунок 15 – Методика технического диагностирования труб с расслоениями

IIIa и IIIб. Для получения информации о состоянии металла труб в зоне расслоения целесообразно использовать способ неразрушающей оценки состояния металла, основанный на сравнении выборки значений его поверхностной микротвердости до и после эксплуатации.

IVa и IVб. На основании результатов проведенных исследований предложены нормы оценки качества труб с расслоениями (таблица 3), учитывающие как тип данных дефектов, так и характер нагрузок, действующий в зоне расслоения.

Для этого за основу было взято условие пластичности Губера-Мизеса и в качестве контрольного показателя использован критерий работоспособности из СТО Газпром 2-2.3-112-2007. В таком случае результирующая интенсивность напряжений в зоне расслоения будет находиться как сумма интенсивностей напряжения от действия внутреннего давления $\sigma_{i_вн}$, изгиба $\sigma_{i_изг}$ и кручения $\sigma_{i_кр}$ и оцениваться по условию:

$$\sigma_{i_изг} + \sigma_{i_кр} + \sigma_{i_вн} < \sigma_B / K, \quad (2)$$

где K – коэффициент запаса из СТО Газпром 2-2.3-112-2007.

Для вычисления $\sigma_{i_вн}$ используется выражение (1), в котором σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} и τ_{zx} равны 0, а σ_x и σ_y – соответственно продольные и кольцевые напряжения, вычисляемые по СП 36.13330.2012. Для определения $\sigma_{i_изг}$ и $\sigma_{i_кр}$ были использованы результаты моделирования из главы 2, в соответствии с которыми аппроксимирующие функции зависимости интенсивности напряжений в зоне расслоения от действующих нагрузок изгиба и кручения составили:

$$\sigma_{i_кр} = 2\tau_{кр} = 2G\gamma; \sigma_{i_изг} = 0,043\sigma_{пр}^{1,93} = 0,043(ED/2\rho)^{1,93} \quad (3)$$

где G – модуль сдвига при кручении, МПа; γ – угол сдвига; E – модуль упругости, МПа; D – наружный диаметр трубы, м; ρ – радиус упругого изгиба оси трубопровода в зоне расслоения, м.

В результате было получено эмпирическое выражение для определения порогового уровня НДС зоны трубы с расслоением, превышение которого свидетельствует о несоответствии существующему критерию работоспособности:

$$0,043\sigma_{\text{пр}}^{1,93} + 2\tau_{\text{кр}} + \sigma_{i_{\text{вн}}} < \sigma_{\text{в}}/K \quad (4)$$

Представленный подход является основой разработанных в ООО «Газпром трансгаз Волгоград» «Методических рекомендаций по выполнению технического диагностирования трубопроводов, содержащих внутренние расслоения металла».

Таблица 3 - Нормы оценки соответствия качества труб с расслоениями

№ п/п	Конфигурация расслоения	Местоположение расслоения	Нагруженность в зоне дефекта ¹	Тип расслоения	Рекомендации
1	Внутреннее	В границах расслоения отсутствуют вмятины, гофры, а также дефекты потери металла, недопустимые в соответствии с расчетами на несущую способность стенки трубы. В зоне ближе 150 мм от границы расслоения нет сварных швов	$0,043\sigma_{np}^{1,93} + 2\tau_{кр} + \sigma_{i_вн} < \sigma_{\sigma}/K$	Металлургическое	ОЭ ²
2			$0,043\sigma_{np}^{1,93} + 2\tau_{кр} + \sigma_{i_вн} \geq \sigma_{\sigma}/K$		КМ ³
3	Не важно	В границах расслоения есть вмятины, гофры, либо дефекты потери металла, недопустимые в соответствии с расчетами на несущую способность стенки трубы, или в зоне ближе 150 мм от границы расслоения есть сварной шов	Не важно	Не важно	ЗК/ЗТ ⁴
4	С выходом на поверхность	Не важно	-<<-	-<<-	
5	Не важно	-<<-	-<<-	Не металлургическое	

¹ Критерий допустимости расслоения от действующих в зоне дефекта нагрузок.

² Оставить в эксплуатации. Допускается эксплуатация без необходимости проведения профилактических мероприятий.

³ Необходимо выполнение компенсирующих мероприятий: снижение давления, устранение изгибных напряжений, выполнение ремонта муфтами и т. д. При проведении капитального ремонта возможна вырезка трубы с дефектом и перемещение ее в другое место ремонтируемого участка, удовлетворяющего норме 1.

⁴ Замена катушки/Замена трубы. По нормам 3, 4 допускается установка муфт на дефектную зону эксплуатируемого трубопровода в случае, если такой ремонт является экономически целесообразным.

Основные результаты работы и выводы.

1. Установлено, что расслоения металла труб являются дефектами, способными к образованию и развитию в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов, и могут приводить к снижению их надежности. Существующие нормы оценки качества труб с данными дефектами не отражают влияния факторов, определяющих их опасность, и не могут считаться оптимальными.

2. По результатам проведенных экспериментальных и аналитических исследований показано, что воздействие таких эксплуатационных нагрузок, как изгиб и кручение приводит к повышенной концентрации напряжений в зонах расслоений металла труб. Определены величины указанных нагрузок, являющиеся допустимыми для рассматриваемых дефектов по применяемому в ПАО «Газпром» критерию работоспособности.

3. В рамках комплексного изучения фрагментов труб с расслоениями установлено существенное влияние на сопротивляемость разрушению трубопровода природы возникновения данных дефектов. Также, обнаружена новая причина образования расслоений, связанная с протеканием структурных изменений в феррито-перлитных сталях.

4. Предложена и подтверждена возможность использования способа неразрушающей экспресс-диагностики состояния металла, основанного на получении значений поверхностной микротвердости, для идентификации различных типов расслоений: вызванных производственной ликвиацией, водородным охрупчиванием или структурными изменениями в металле.

5. Разработан современный магнитный диагностический комплекс NDM18 «TESTMASTER», позволяющий в автоматизированном режиме без необходимости снятия изоляционного покрытия выполнять оперативное сканирование трубопроводов и выявлять различные дефекты труб, в том числе расслоения металла.

6. Разработана и принята к внедрению в ООО «Газпром трансгаз Волгоград» усовершенствованная методика технического диагностирования участков трубопроводов, позволяющая обеспечить более достоверное выявление и обоснованную оценку опасности расслоений в трубах. Методика включает использование современных технологий диагностики, определения состояния металла и НДС в зоне дефекта, а также актуализированные нормы оценки качества труб с расслоениями.

Основные результаты диссертационной работы представлены в следующих публикациях:

1. Зорин, Е.Е. Напряженно-деформированное состояние трубопроводов подземной прокладки в условиях криолитозоны / Е.Е. Зорин, А.Э. Толстов, В.М. Ефимов // Нефть, газ и бизнес.- 2015.- №9.- С. 9-12.

2. Толстов, А.Э. Структурные особенности трубных сталей, склонных к расслоению в процессе эксплуатации / А.Э. Толстов, Е.Е. Зорин // Обслуживание и ремонт газонефтепроводов – 2014: Материалы 7-й международной конференции.– М.: МАКС Пресс, 2015.– 444 с.– С. 169-175.

3. Зорин, Е.Е. Влияние вида нагружения на формирование в стенке трубопровода дефекта типа «расслоение» / Е.Е. Зорин, А.Э. Толстов, В.М. Ефимов // Обслуживание и ремонт газонефтепроводов – 2014: Материалы 7-й международной конференции.– М.: МАКС Пресс, 2015.– 444 с.– С. 165-168.
4. Зорин, Е.Е. Оценка напряженно-деформированного состояния и дефектности сварных соединений бесконтактным тепловым методом / Е.Е. Зорин, В.А. Распопов, А.Э. Толстов // Сварочное производство.- 2016.- №9.- С.30-34.
5. Zorin, E.E. Evaluation of the stress-strain state and defectiveness of welded joints by the contactless thermal method / E.E. Zorin, V.A. Raspopov, A.E. Tolstov // Welding International.- 2017.- №8.- P. 657-660.
6. Толстов, А.Э. Экспериментальные исследования влияния расслоений металла на работоспособность трубопроводов / А.Э. Толстов, А.Е. Зорин, Е.Е. Зорин // Экспозиция Нефть Газ.- 2018.- №7(67).- С. 62-65.
7. Зорин, А.Е. Изучение генезиса образования расслоений в металле труб: влияние на опасность данных дефектов и способы идентификации / А.Е. Зорин, А.Э. Толстов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов.- 2018.- №6(116).- С.110-118.
8. Толстов, А.Э. Автоматизированный сканер-дефектоскоп для контроля линейной части магистральных газопроводов NDM18 «TESTMASTER» /А.Э. Толстов, Ю.Г. Путников // Надежность и безопасность эксплуатации линейной части магистральных газонефтепроводов: Сборник научных трудов экспертно-инжиниринговой компании «ЭКСИКОМ» №2.- М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019.- 149 с.- С. 119-127.
9. Толстов, А.Э. Оценка опасности расслоений металла труб под действием сложного НДС методом математического моделирования / А.Э. Толстов, А.Е. Зорин // Надежность и безопасность эксплуатации линейной части магистральных газонефтепроводов: Сборник научных трудов экспертно-инжиниринговой компании «ЭКСИКОМ» №2.- М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019.- 149 с.- С.65-74.

Подписано к печати « » _____ 2019 г.

Заказ №

Тираж 100 экз.

1 уч. – изд.л, ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

По адресу: 142717, Московская область,

Ленинский район,

сельское поселение Развилковское, пос. Развилка,

Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1.