

На правах рукописи



ТИГУЛЕВ ЕГОР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ФОРМ И СВОЙСТВ ИХ МЕХАНИЧЕСКОЙ
НЕОДНОРОДНОСТИ**

2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2023

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте трубопроводного транспорта (ООО «НИИ Транснефть»).

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Кантемиров Игорь Финсурович

Официальные оппоненты: **Земенкова Мария Юрьевна**
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный университет» /
кафедра «Транспорт углеводородных ресурсов»,
профессор кафедры (г. Тюмень)

Игнатик Анатолий Александрович
кандидат технических наук
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ухтинский государственный технический
университет» / кафедра «Проектирование и
эксплуатация магистральных газонефтепроводов»,
доцент кафедры (г. Ухта)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II» (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится «04» марта 2024 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время при проектировании магистральных трубопроводов используется расчетный метод анализа прочности, в основу которого заложено условие равнопрочности сварного соединения и основного металла трубопровода. При этом опыт эксплуатации магистральных трубопроводов показывает, что сварное соединение является концентратором потенциально опасных факторов, влияющих на целостность трубопровода. Вопросы управления техническим состоянием магистральных трубопроводов неразрывно связаны с корректной оценкой результатов их технического диагностирования. Стратегические программные документы развития магистрального трубопроводного транспорта в РФ, включая Программу инновационного развития ПАО «Транснефть» на период 2022-2026, предполагают внедрение современных передовых технологий, обеспечивающих высокий уровень надежности, в том числе разработку высокоточных внутритрубных диагностических комплексов. Высокая точность определения местоположения дефектов требует точной оценки прочности и долговечности дефектного участка, включая детальную информацию о зонах сварных соединений. Результаты исследования механической неоднородности, причин и факторов, влияющих на ее формирование, позволят более точно учитывать влияние механической неоднородности на прочность, а также прогнозировать зоны сварного соединения, где происходит локальный переход металла в пластическое состояние.

Степень разработанности темы

Известно, что технологический процесс изготовления сварных конструкций порождает возникновение механической неоднородности в зоне сварного шва. Пренебрежение этим фактором может привести к значительным погрешностям в оценке прочности и долговечности сварной конструкции. Вопрос оценки влияния механической неоднородности на прочность сварных узлов вызывает повышенный интерес применительно к стыковым соединениям. В этой связи большое значение имеют исследования, посвященные прочности сварных оболочек давления и работоспособности сварных соединений при различных условиях нагружения, описанные в работах С.А. Куркина, В.А. Винокурова, Н.А. Махутова, Е.Е. Зорина, О.А. Бакши, М.В. Шахматова, Р.С. Зайнуллина, Ю.В. Лисина, Д.А. Неганова, В.Л. Дильмана, А.Г. Гумерова, К.М. Гумерова, В.П. Ерофеева, С.Ф. Айметова и ряда других авторов.

При анализе влияния механической неоднородности на прочность сварных соединений основное внимание в предыдущих работах уделялось их наименее прочным участкам – «мягким прослойкам», в качестве которых могут выступать: шов, зона термического влияния при сварке термоупрочненных или нагартованных материалов, спай в паяных соединениях и т.д.

Прочности сварных соединений с мягкими прослойками уделяется большое внимание в научной литературе. Однако некоторые вопросы, представляющие значительный научный и практический интерес, изучены недостаточно. В частности, почти не исследована несущая способность механически неоднородных сварных соединений в условиях эксплуатационных нагрузок трубопроводов, характер распределения неоднородности в которых имеет сложную форму. В литературе имеются лишь отдельные работы теоретического характера, посвященные анализу работоспособности сварных соединений со сложной формой механической неоднородности.

В то же время значительный объем исследований, выполненных для случая нагружения сварных конструкций в условиях статического растяжения для схематизированных форм механической неоднородности, показал многообразие характера механического поведения данных соединений в зависимости от основных конструктивно-геометрических параметров, что позволило производить более точную оценку несущей способности сварного соединения. Практический интерес представляют и аналогичные задачи оценки прочности сварных соединений с учетом выявления сложных форм механической неоднородности.

Цель работы

Разработка методики расчета на прочность сварных соединений магистральных трубопроводов из низколегированной стали с учетом влияния форм и свойств механической неоднородности.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи исследования:**

1. Выполнить сравнительный анализ полученных по существующим методикам результатов оценки прочности стыковых сварных соединений для магистральных трубопроводов, а также установить возможность учета в данных методиках влияния механической неоднородности сварных соединений на прочность.

2. Разработать метод определения форм зон механической неоднородности сварных соединений магистральных трубопроводов по результатам замеров твердости на макрошлифе.

3. Установить функциональную зависимость между размерами локальных зон повышенных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов и формами зон механической неоднородности с учетом механических свойств данных зон.

4. Определить порядок учета локализации повышенных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов при определении напряженно-деформированного состояния в нетто-сечении поверхностного трещиноподобного дефекта.

5. Разработать методику расчета прочности сварных соединений магистральных трубопроводов, учитывающую влияние форм и свойств их механической неоднородности на концентрацию напряжений.

Научная новизна

1. На основании разработанного метода определения форм и свойств зон механической неоднородности введен и научно обоснован условный коэффициент двухосности нагружения $n_{\text{усл}}$, учитывающий связь между расположением локальных зон повышенных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов и формами зон механической неоднородности с учетом механических свойств данных зон.

2. Получены зависимости для расчета прочности участка сварного соединения магистрального трубопровода, изготовленного из низколегированной стали, с поверхностным трещиноподобным дефектом, позволяющие учитывать его расположение относительно зон механической неоднородности, оказывающих влияние на локализацию напряжений в нетто-сечении дефекта.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что полученная методика расчета прочности позволяет теоретически исследовать напряженно-деформированное состояние сварных соединений, применяемых при сооружении и ремонте магистральных трубопроводов, и учитывать дополнительную концентрацию напряжений, создаваемую взаимным влиянием зон механической неоднородности с криволинейными границами, при различных исходных данных, в том числе на упруго и упруго-пластических стадиях работы материала сварного соединения в нетто-сечении участка с

искусственным концентратором напряжений.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в том, что для сварных соединений низколегированных сталей, используемых при сооружении магистральных трубопроводов, получены фактические картины распределения физико-механической неоднородности, с учетом которых разработана методика, позволяющая диагностическим организациям и научным институтам выполнять расчет прочности при эксплуатационных нагрузках в нетто-сечении участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом, выявленным по результатам технического диагностирования.

Методология и методы исследования

Решение поставленных задач проводилось на основе лабораторных экспериментальных исследований с использованием оборудования для механических испытаний и металлографического анализа, современных алгоритмов цифровой обработки результатов исследований, с использованием компьютерной графики и компьютерного моделирования. В работе использованы экспериментальные и теоретические методы оценки прочностных характеристик образцов сварных соединений с заданными свойствами.

Расчеты проводились с использованием современных лицензированных программных продуктов, включая программный комплекс конечно-элементного моделирования ANSYS, а также программный пакет для обработки данных MS Office.

Положения, выносимые на защиту

1. Применение метода линейного изменения механических свойств между точками замера твердости на макрошлифах сварных соединений магистральных трубопроводов и группирование свойств по зонам механической неоднородности позволяет формировать картину распределения механических свойств в основных видах сварных соединений магистральных трубопроводов.

2. Введение условного коэффициента двухосности учитывает криволинейное изменение контактной границы между зонами механической неоднородности в сварных соединениях магистрального трубопровода.

3. Методика расчета прочности участка, ослабленного поверхностным трещиноподобным дефектом, расположенного в сварном соединении магистрального трубопровода, позволяет численно определить уровень концентрации напряжений в нетто-сечении сварного соединения с учетом расположения дефекта относительно зон механической неоднородности.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов обеспечивалась использованием поверенного и сертифицированного оборудования и измерительных средств, современных цифровых приборов, применением автоматизированных систем на базе персонального компьютера, общепризнанных математических методов обработки данных, а также компьютерного и математического моделирования процессов, высокой сходимостью результатов обработки данных, результатами сопоставления данных, приведенных в научной и нормативной литературе.

Апробация результатов

Результаты работы докладывались и обсуждались на Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и «Химия нефти и газа» в рамках Международного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций» (Томск), XV Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2020», посвященной 90-летию со дня рождения профессора П.И. Тугунова и 45-летию образования Факультета трубопроводного транспорта (Уфа), Международном форуме «Нефть и газ – 2021» (Москва), XVI Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2021».

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.8.5. «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» – п. 2 «Научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в т.ч. 5 работ – в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

Министерства образования и науки РФ, из них 4 статьи – в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы, включающего 132 наименования. Работа содержит 69 рисунков и 10 таблиц и изложена на 194 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** выполнен анализ методик оценки прочности сварных соединений. Дано определение механической неоднородности с точки зрения физико-химических процессов, происходящих в рамках термомеханического цикла сварки низколегированных сталей, а также с точки зрения влияния структурной неоднородности на градиентное состояние механической прочности.

На прочность участка магистрального трубопровода из низколегированной стали влияет целый ряд факторов, в том числе механические характеристики металла трубопровода и его геометрические параметры, наличие дефектов, комбинация действующих нагрузок, общие и локальные особенности деформирования участка конструкции и т.д. Предельные состояния металла определяются прочностью, пластичностью, чувствительностью к концентрации напряжений. При этом существенным образом на распределение напряженно-деформированного состояния влияют как геометрические характеристики сварного шва и остаточные напряжения, так и наличие зон структурно-механической неоднородности сварного шва.

В главе проанализированы основные нормативные требования к определению прочности магистральных трубопроводов, показано, что данные требования не имеют физически обоснованных критериев для учета влияния зон механической неоднородности на несущую способность участка трубопровода.

Под механической неоднородностью понимается различие механических свойств определенных участков сварных соединений вследствие влияния

термодеформационного цикла сварки на структурно-химические изменения в материале.

Проведенные ранее многочисленные исследования подтверждают влияние механической неоднородности на поведение сварных соединений вследствие разной сопротивляемости его участков при деформации. Разные участки соединения не одновременно вступают в пластическую стадию деформации, сдерживаясь на краях смежных участков материалом, имеющим более высокий предел текучести.

Принцип образования участков с разными механическими характеристиками таков, что они располагаются в сварных соединениях в виде так называемых прослоек. В главе проанализированы основные подходы научных школ, которые проводили исследования по учету механической неоднородности при определении прочности сварного соединения. Показано, что большинство подходов используют схематизированные формы прослоек механической неоднородности, не отражающие в полной мере реальную форму, образующуюся при сварке стыковых соединений плавящимся электродом.

В качестве основного критерия учета механической неоднородности в предшествующих исследованиях использовался коэффициент контактного упрочнения, который показывал, в какой степени более прочные зоны механической неоднородности сдерживают развитие пластических деформаций в наименее прочной зоне, являющейся лимитирующим фактором для всего сварного соединения. При одноосном растяжении временное сопротивление σ_B с учетом определенной по геометрическим параметрам наименее прочной («мягкой») прослойки степени контактного упрочнения определялось по формуле:

$$\sigma_B = \sigma_B^M K_K, \quad (1)$$

где σ_B^M – временное сопротивление менее прочной зоны металла;

K_K – коэффициент контактного упрочнения.

Дополнительно в предшествующих исследованиях обосновываются случаи, когда контактное упрочнение реализуется не в полной мере, тогда в выражение (1) вводили коэффициент реализации контактного упрочнения $K_p \leq 1$:

$$\sigma_B = \sigma_B^M K_K K_p. \quad (2)$$

Указанные выражения получены с применением ограничений гипотезы Прандтля о постоянстве касательных напряжений вдоль пластической полосы.

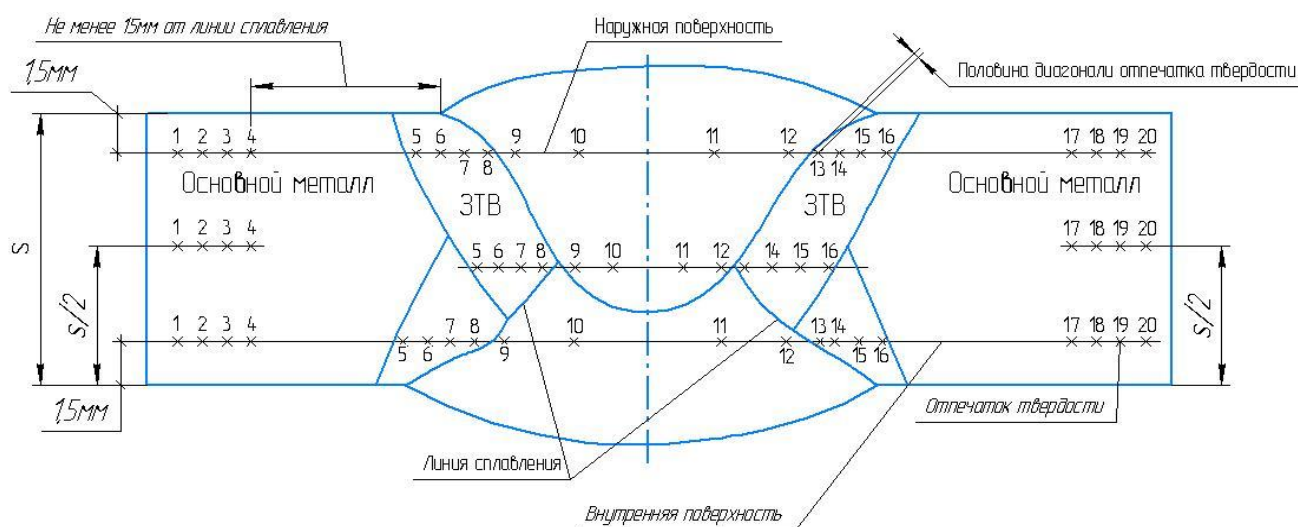
Данное допущение не учитывает краевые эффекты и предназначено для прослоек с высокой степенью механической неоднородности.

Данный фактор вносит существенные ограничения в использование методики при учете сложной формы зоны механической неоднородности и степени механической неоднородности не более 20 % по пределу текучести для низколегированной стали.

Таким образом, анализ исследований в области работоспособности сварных соединений оболочковых конструкции показал отсутствие методик расчета прочности сварных соединений, учитывающих формы зон механической неоднородности и их влияние на изменение напряженно-деформированного состояния по объему сварного соединения.

В главе 2 приводятся исследования, обосновывающие прямую корреляцию механических характеристик вязких сталей, к которым относятся низколегированные стали, и показателей твердости. На основе выявленной взаимосвязи параметров твердости и механических характеристик проведен анализ результатов определения механических характеристик сварных соединений из низколегированных сталей по испытаниям на твердость для более чем 100 образцов стыковых сварных соединений магистральных трубопроводов, выполненных четырьмя видами сварки: ручной дуговой сваркой, автоматической сваркой порошковой проволокой, автоматической сваркой в среде защитных газов сплошной проволокой, автоматической сваркой под флюсом.

Схема измерения твердости представлена на Рисунке 1.



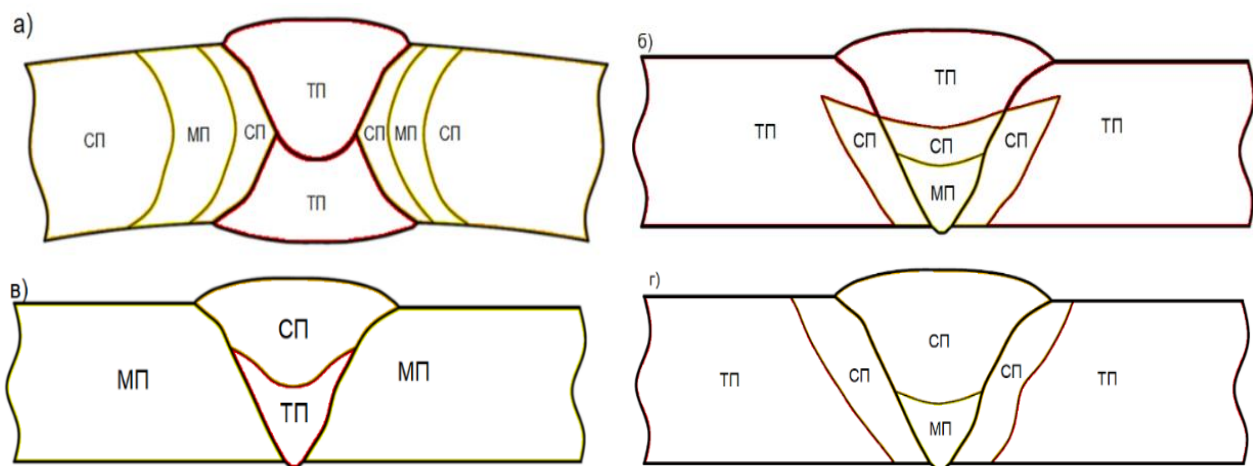
S – толщина стенки трубопровода, ЗТВ – зона термического влияния

Рисунок 1 – Схема контроля твердости на образцах сварных соединений

По полученным значениям твердости установлено наличие механической неоднородности в абсолютном большинстве стыковых сварных соединений из низколегированной стали. На основе предложенной в работе методики аппроксимации значений твердости для основных типов сварных соединений магистральных трубопроводов построены картины распределения механических свойств по группам (Рисунок 2).

Полученные результаты анализа исследований твердости механически неоднородных сварных соединений позволили сделать выводы о сложной форме (топографии) зон механической неоднородности сварного соединения, а также определили необходимость оценки влияния формы зоны механической неоднородности на прочность сварного соединения при статических нагрузках.

Также в главе 2 рассмотрена возможность применения методик определения прочности сварного соединения, основанных на допущениях гипотезы Прандтля о постоянстве касательных напряжений по длине пластической полосы, на расчетных схемах, где формы зон механической неоднородности имеют криволинейный характер.



а) продольный шов трубопровода, автоматическая сварка под флюсом;

б) кольцевой шов трубопровода, автоматическая сварка под флюсом;

в) кольцевой шов трубопровода, автоматическая сварка в среде защитных газов;

г) кольцевой шов трубопровода, автоматическая сварка порошковой проволокой

Рисунок 2 – Формы зон механической неоднородности для стыковых сварных соединений низколегированной стали, где по группам ТП (твердая прослойка) – более прочная зона, МП (мягкая прослойка) – менее прочная зона,

СП (прослойка средней прочности) – зона средней прочности

Учет геометрии зон механической неоднородности необходим для формирования уточненной расчетной модели сварного соединения, подверженного эксплуатационным нагрузкам, характерным для сварных соединений магистральных трубопроводов. Для учета влияния форм зон механической неоднородности требуется определение параметра контактной границы.

В качестве такого параметра был введен условный коэффициент двухосности $n_{\text{усл}}$. Его физическое обоснование заключается во внесении поправок при определении коэффициента двухосности напряженного состояния сварного соединения магистрального трубопровода. Данные поправки учитывают изменение параметра двухосности по длине контактной границы между зонами механической неоднородности.

С введением указанного параметра удалось аналитически на основе метода характеристик (линий скольжения) и метода расчета углов центрированного поля определить зоны перехода участков сварного соединения в пластическое состояние, то есть зоны концентрации напряжений. Функции изменения коэффициента двухосности (n_o) через условный коэффициент двухосности получены путем проведения полиномиальной аппроксимации выявленных контактных границ зон механической неоднородности:

$$n_o = n \cdot \frac{df(n_{\text{усл}})}{dx}, \quad (3)$$

где x – координата оси абсцисс, мм.

Угол наклона линии скольжения определится через коэффициент двухосности:

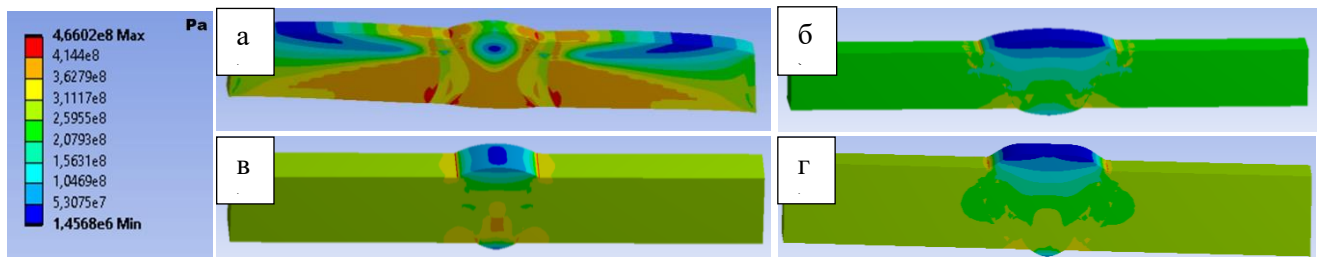
$$\alpha_{\text{ск}} = \frac{1}{2} \arccos\left(\frac{1-2n_o}{3}\right). \quad (4)$$

Для построения углов центрированных полей в точках концентрации напряжений составлена система уравнений через степень механической неоднородности (K):

$$\begin{cases} \omega_{\text{БП-СП}} = \frac{K-1}{2K} \left(1 + \frac{(K-1)^2}{8K}\right) \frac{f_x(n_{\text{усл}})}{n}; \\ \omega_{\text{СП-БП}} = \frac{K-1}{2K} \left(1 + \frac{(K-1)^2}{16}\right) \frac{f_x(n_{\text{усл}})}{n}; \\ \omega_{\text{СП-МП}} = \frac{K-1}{2} \left(\frac{K}{2} + \frac{(K+1)(K-1)^2}{16}\right) \frac{f_x(n_{\text{усл}})}{n}; \\ \omega_{\text{МП-СП}} = \frac{K-1}{2} \left(1 + \frac{(K+1)(K-1)^2}{16}\right) \frac{f_x(n_{\text{усл}})}{n}. \end{cases} \quad (5)$$

Образование указанных зон также было подтверждено методом конечно-элементного моделирования статического растяжения сварных соединений, имеющих сложные формы зон механической неоднородности (Рисунок 3).

Выявлено, что размеры и величины напряжений в локальных областях их концентрации зависят от степени механической неоднородности и формы контактной границы.



а) продольный шов трубопровода, автоматическая сварка под флюсом;

б) кольцевой шов трубопровода, автоматическая сварка под флюсом;

в) кольцевой шов трубопровода, автоматическая сварка в среде защитных газов;

г) кольцевой шов трубопровода, автоматическая сварка порошковой проволокой

Рисунок 3 – Моделирование образования локальных зон пластических деформаций исследованных типов сварных соединений магистральных трубопроводов

В главе 3 обоснованы и проведены комплексные экспериментальные исследования, которые включали определение характеристик сварного соединения магистрального трубопровода, выполненного методом ручной дуговой сварки, путем замеров твердости по Виккерсу, определение статической прочности образцов сварных соединений с трещиноподобным дефектом.

Алгоритм проведения экспериментальных исследований статической прочности сварного соединения с учетом определения зон механической неоднородности и нанесения поверхностного трещиноподобного дефекта представлен на Рисунке 4.

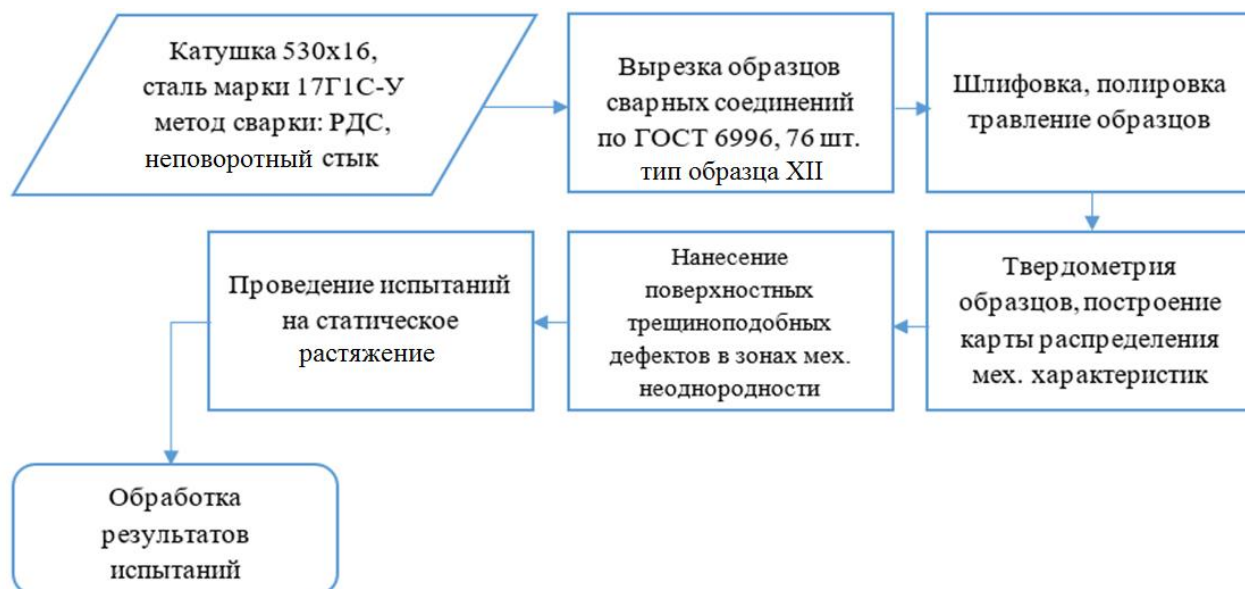


Рисунок 4 – Алгоритм проведения испытаний

Образцы изготовлены из конструкционной низколегированной стали 17Г1С-У, являющейся на сегодняшний день одной из наиболее применяемых сталей при сооружении магистральных трубопроводов.

Вырезка образцов из катушки осуществлялась согласно схеме, представленной на Рисунке 5.

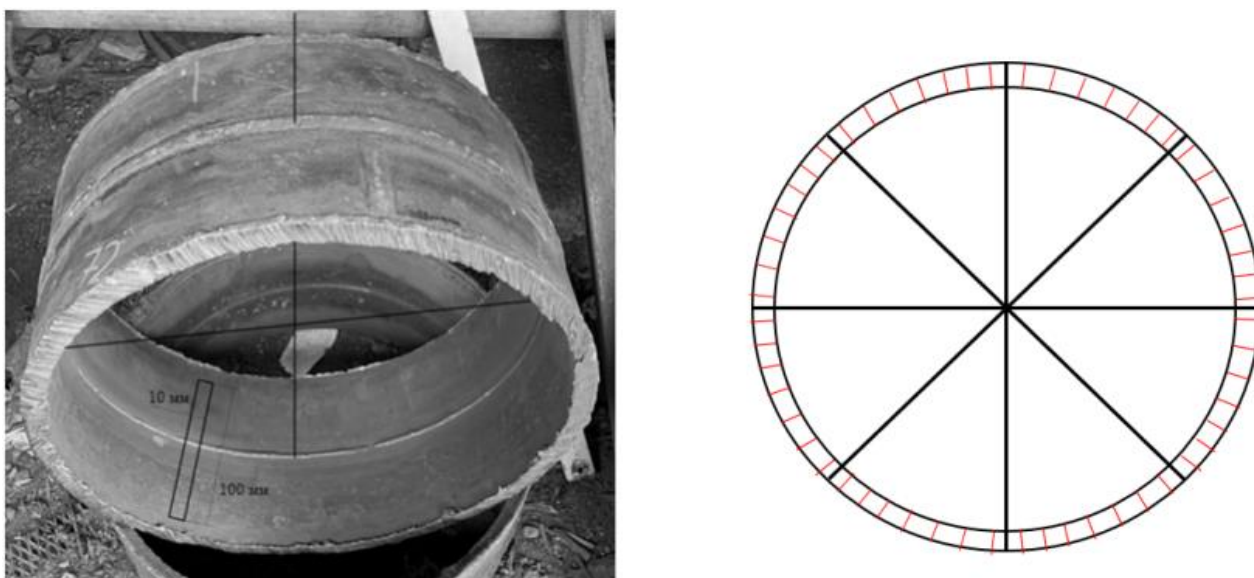


Рисунок 5 – Схема вырезки образцов для испытаний

Всего по результатам вырезки образцов из катушки получено 76 образцов.

Для травления подготовленных образцов использовался 5%-й раствор азотной кислоты (Рисунок 6).



а) образец протравленного образца сварного соединения; б) инвертированный микроскоп;
в) структурная неоднородность сварного шва на увеличении 200х

Рисунок 6 – Определение зон механической неоднородности

По результатам травления были определены точки замера твердости по макрошлифу. Всего для каждого образца было определено 59 точек на 5 линиях замера (Рисунок 7). Установленное количество точек замера твердости позволяет определять зоны с условно идентичными механическими характеристиками, работающими как прослойка в механически неоднородном сварном соединении. Несмотря на то, что разделение на прослойки не обходится без допущений, количество точек замера позволяет считать достаточной частоту деления и определения границ, где изменения механических свойств претерпевают скачок.

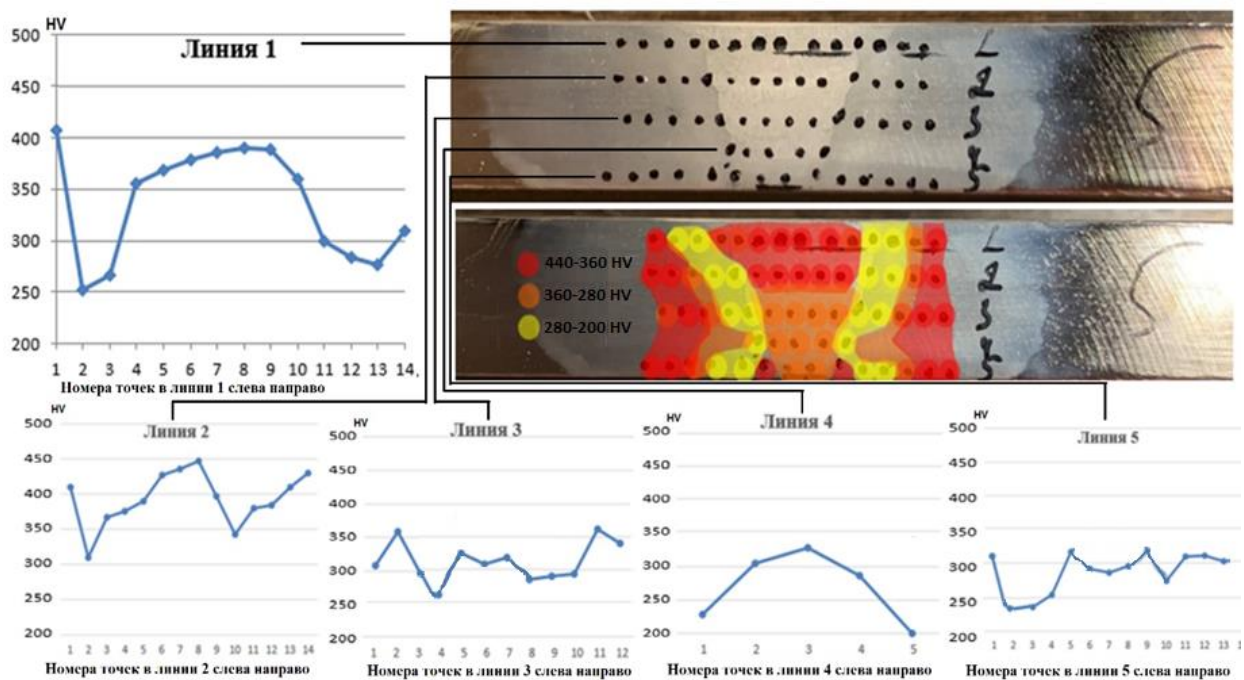


Рисунок 7 – Данные по линии замера твердости по макрошлифу сварного соединения

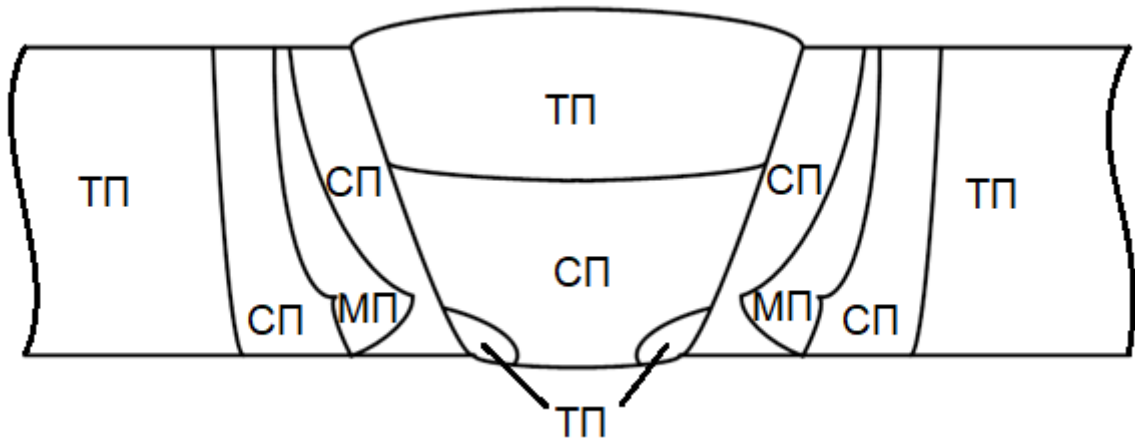


Рисунок 8 – Определение границ зон механической неоднородности на основе значений твердости по Виккерсу и линейной аппроксимации между полученными значениями

Для каждого из образцов были составлены карты распределения значений твердости (Рисунок 8), на основе обобщения которых были сформированы схемы зон механической неоднородности, которые наиболее адекватно отражают распределение значений пределов прочности между участками стыкового сварного соединения, выполненного методом ручной дуговой сварки.

Также были определены характерные зоны нанесения поверхностного трещиноподобного дефекта для проверки несущей способности образцов с дефектами в разных зонах механической неоднородности и построения соответствующих расчетных моделей (Рисунок 9).

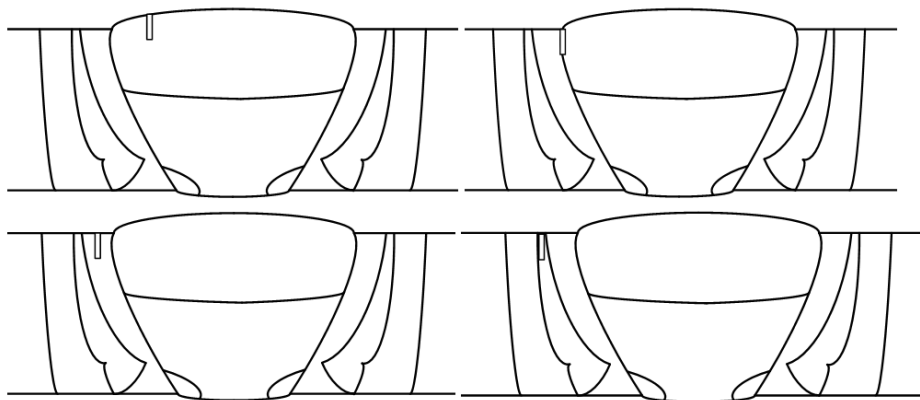
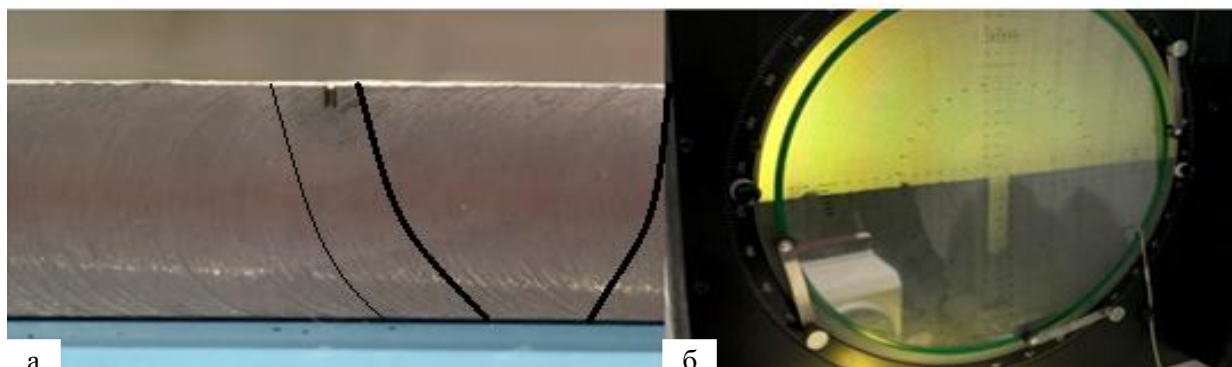


Рисунок 9 – Трещиноподобные дефекты в зонах механической неоднородности

Нанесение трещиноподобного дефекта производилось при помощи электроэрозионного станка. Параметры трещиноподобного дефекта определены как 10 % глубины образца (Рисунок 10).



а) трещиноподобный дефект на участке сварного соединения; б) трещиноподобный дефект на профильном проекторе

Рисунок 10 – Вид трещиноподобного дефекта

Статические испытания проводились на испытательной машине Instron, развивающей усилие до 100 кН, нагружение производилось со скоростью 2 мм/мин.

Результаты испытаний на растяжение представлены на следующей гистограмме, где показаны первичные данные по усилиям разрыва образцов в зависимости от расположения трещиноподобного дефекта (Рисунок 11).

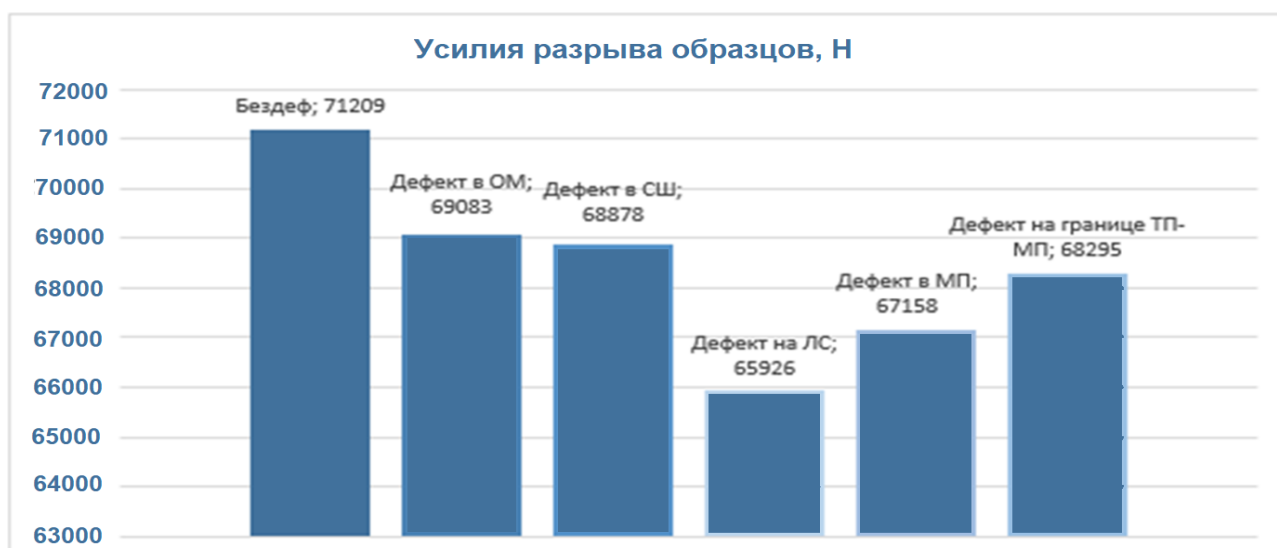


Рисунок 11 – Усилия разрыва групп образцов с размещением дефекта на разных участках

Результаты испытаний показали соответствие первичных значений усилий разрыва группам образцов по схемами нанесения трещиноподобного дефекта. На Рисунке 11 отображены средние значения усилий разрыва образцов с дефектами, нанесенными в определенных зонах механической неоднородности. Также в главе 3 отмечено существенное для низколегированной стали различие усилий разрыва для трещиноподобных дефектов в разных зонах механической неоднородности, предложенных в работе, которое требует научного обоснования.

В главе 4 произведена постановка задачи математического моделирования для исследования напряженного состояния участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом.

В соответствии с рассмотренной в главе 2 методикой для полученных экспериментально контактных границ были построены кривые распределения условного параметра двухосности. Применялась полиномиальная аппроксимация формы контактных границ (Рисунок 12).

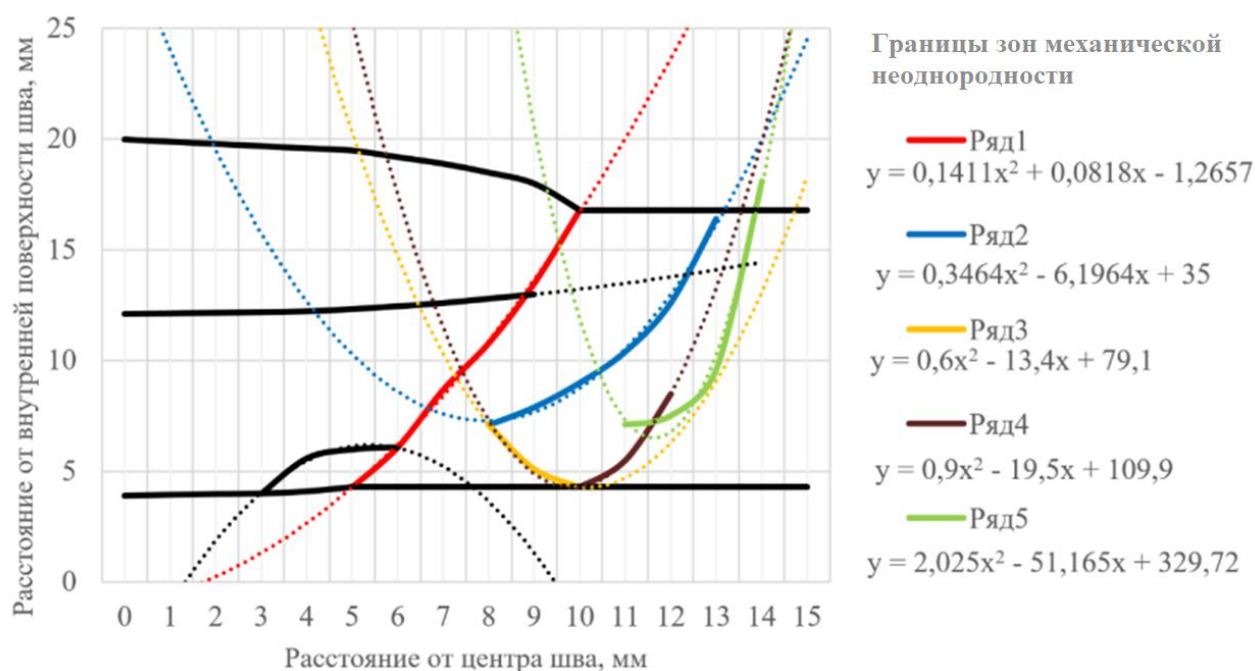


Рисунок 12 – Принцип использования полиномиальной аппроксимации для описания уравнений контактных границ зон механической неоднородности

В соответствии с предложенной методикой были определены значения условных коэффициентов двухосности, применение которых позволило определить локальные зоны концентрации напряжений, а также средние критические напряжения в наиболее ослабленной зоне:

$$\sigma_y = \frac{2}{3} k \sqrt{(1 + n_0)(2 - n_0)} \cdot \frac{2x}{h} \cdot \left[1 - \frac{h}{x} \sqrt{1 - \frac{4y^2}{h^2}} \right], \quad (6)$$

где h – толщина стенки в координате x ;

k – постоянная пластичности.

$$\begin{cases} y = k_1 \cdot x^2, & \text{при } x_1 \leq x \leq x'_1; \\ y + y'_2 = k_2 \cdot x^2 + x_2, & \text{при } x \leq x'_2; \\ y + y'_3 = k_3 \cdot x^2 + x_3, & \text{при } x_2 \leq x \leq x_3; \\ y + y'_3 = k_4 \cdot x^2 + x_3, & \text{при } x_3 \leq x \leq x_4, \end{cases} \quad (7)$$

где y – координата по оси ординат;

$y'_1 \dots y'_n$ – расстояние начала зоны механической неоднородности по оси ординат.

Также при помощи численного моделирования определена картина распределения напряжений под действием растягивающих нагрузок на образец (Рисунок 13).

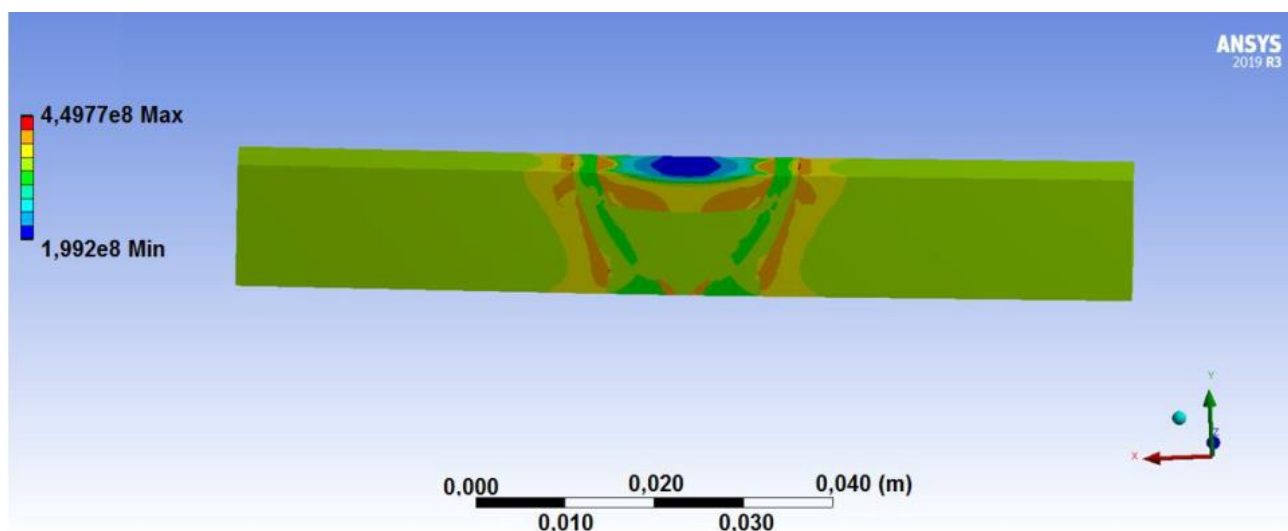


Рисунок 13 – Результаты численного моделирования напряженного состояния исследованного образца при действии статического растяжения

Для математического описания физических процессов влияния зон механической неоднородности на пластические деформации в районе трещиноподобного дефекта в главе использована комбинация метода характеристик и метода нахождения линий разрыва напряжений, показанная в предшествующих исследованиях.

По определенным в главе 3 схемам расположения дефекта сформированы четыре расчетные схемы:

- расчетная схема с трещиноподобным дефектом в сварном шве или в основном металле;
- расчетная схема с трещиноподобным дефектом на линии сплавления;
- расчетная схема с трещиноподобным дефектом по схеме твердая прослойка – мягкая прослойка – твердая прослойка (ТП – МП – ТП);
- расчетная схема с трещиноподобным дефектом по схеме твердая прослойка – прослойка средней прочности – мягкая прослойка (ТП – СП – МП).

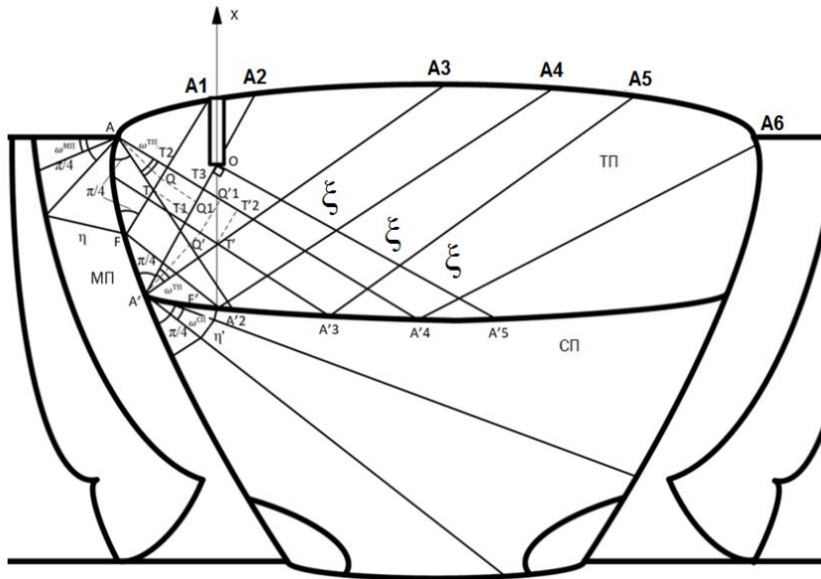
Каждая расчетная схема соответствует группе образцов, на которые наносились трещиноподобные дефекты. Результаты испытаний образцов позволили верифицировать значения критических напряжений, определенных по использованной в расчетных схемах математической модели.

На основе проведенных ранее исследований и численного моделирования расчетной схемы (Рисунок 13) установлено, что на прочность участка с трещиноподобным дефектом, который является искусственным концентратором напряжений, влияет расположение в нетто-сечении зон естественной концентрации напряжений, вызванных влиянием как геометрических концентраторов, так и концентраторов механической неоднородности. Решение системы уравнений пластического равновесия будет определяться линиями скольжения, то есть полем характеристик, которое строится в каждой расчетной схеме (пример построения поля характеристик представлен на Рисунке 14). Напряженное состояние, определяемое линиями скольжения в пластических зонах, возможно продолжить на все сварное соединение по принципу удовлетворения уравнения равновесия, условий текучести и граничных условий.

Перечисленные принципы и параметры экспериментальных исследований в главе 3 позволили сформировать необходимые и достаточные граничные условия для получения конечных решений по каждой расчетной схеме.

Расчетная схема для определения напряженного состояния участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом в сварном шве (в твердой прослойке для РДС) будет выглядеть как показано на Рисунке 14.

Соединение находится под действием растягивающей нагрузки в условиях плоской деформации. Для получения решения в расчетной схеме была построена сетка характеристик (линий скольжения), угол наклона которой изменялся в зависимости от условного параметра двухосности, степени механической неоднородности соседних зон, размеров дефекта.



МП – мягкая прослойка, ТП – твердая прослойка, СП – прослойка средней прочности

Рисунок 14 – Расчетная схема с трещиноподобным дефектом в сварном шве с нанесенной сеткой линий скольжения

Комбинация ослабляющих и усиливающих факторов в нетто-сечении дефекта была учтена путем введения интегрального коэффициента учета механической неоднородности β :

$$\beta = \left[\left(2 + \frac{(K-1)(3-K)}{2} \right) \frac{df(n_{усл})}{dx} n - \left(\frac{(K-1)(3K-1)}{2} \right) \left(1 - \frac{3g}{m} \right) \right] \frac{1}{\sqrt{3}}; \quad (8)$$

$$\sigma_y = \beta \sigma_B^{БП}, \quad (9)$$

где K – степень механической неоднородности соседних зон;

g – расстояние от трещиноподобного дефекта до соседней зоны механической неоднородности;

m – остаточная толщина сварного соединения в зоне дефекта (размер нетто-сечения).

В рассмотренном модельном случае расположение вблизи дефекта МП участка снижает прочность соединения. Количественно оценка напряженного состояния в нетто-сечении будет зависеть от размеров локальных зон концентрации напряжений, находящихся вблизи нетто-сечения, а также от степени механической неоднородности. Данные параметры по аналогии с главой 2 определены в работе на основе комбинации метода характеристик (линий скольжения) и метода нахождения линий разрыва напряжений.

В рамках описанных расчетных схем также исследованы расчетные случаи, которые касаются конечного расположения трещиноподобного дефекта

относительно выявленных зон механической неоднородности и определяют порядок учета их влияния на начало развития пластических деформаций в нетто-сечении дефекта.

Аналогично вышеприведенному примеру рассмотрены оставшиеся расчетные схемы.

В главе 4 также рассмотрены вопросы практического применения методики определения влияния локальных зон пластического деформирования на прочность сварных соединений с искусственными концентраторами напряжений. Ввиду сложности и уникальности расчетных моделей с дефектами с учетом механической неоднородности предложен унифицированный подход, который учитывает концентрацию напряжений в локальных зонах вследствие сложного взаимодействия прослоек механической неоднородности. Подход заключается в определении дополнительного коэффициента концентрации напряжений в зависимости от расположения дефекта в сварном соединении относительно линии сплавления. Локализация ослабленных участков, которые преждевременно (раньше всего металла трубопровода) переходят в пластическую стадию, происходит по объему сварного соединения; в работе предлагаются максимально возможные коэффициенты концентрации, определяющие пониженную прочность участка, которая на практике идет в запас.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сравнительный анализ методик оценки прочности стыковых сварных соединений применительно к магистральным трубопроводам из низколегированной стали показал использование в них схематизированных форм зон механической неоднородности, не отражающих распределение механических свойств в сварных соединениях магистральных трубопроводов.

2. Разработан метод определения форм и свойств зон механической неоднородности на основании результатов замера твердости макрошлифов сварных соединений. По результатам анализа замеров твердости макрошлифов выполнена оценка форм и свойств механической неоднородности основных типов сварных соединений магистральных трубопроводов. Форма зон механической неоднородности отличается от классических типовых расчетных схем, определяющих напряженно-деформированное состояние сварных соединений с механической неоднородностью.

3. Предложен механизм учета формы и свойств зон механической неоднородности при расчете на прочность через введение условного коэффициента двухосности. Полученные коэффициенты позволяют определить размеры и значения напряжений в локальных областях перехода к пластическому деформированию внутри сварного соединения. Указанные локальные области являются естественными концентраторами напряжений.

4. На основании проведенных экспериментальных исследований определен порядок учета влияния механической неоднородности при расчете статической прочности бездефектных участков и участков с поверхностным трещиноподобным дефектом в сварных соединениях магистральных трубопроводов. Показано изменение параметров локальных областей пластических деформаций, возникающих вследствие изменения форм и свойств зон механической неоднородности сварных соединений трубопровода из низколегированной стали.

5. На основании аналитического и численного методов разработана методика оценки прочности участка сварного соединения с поверхностным трещиноподобным дефектом с учетом взаимного влияния концентратора напряжений и зон механической неоднородности. Получены и экспериментально подтверждены коэффициенты концентрации напряжений для расчетных схем сварных соединений. Определено существенное влияние расположения трещиноподобного дефекта относительно зон механической неоднородности (снижение прочности в нетто-сечении по линии контакта более прочной и менее прочной зон достигает 10 %).

Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:

Ведущие рецензируемые научные издания

1. Тигулев, Е.А. Оценка механической неоднородности сварных соединений трубопроводов / Ямилев М.З., Тигулев Е.А., Юшин А.А., Распопов А.А. и др. // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 11. – С. 128-131.

2. Тигулев, Е.А. Оценка степени контактного упрочнения сварных соединений трубных сталей / Ямилев М.З., Тигулев Е.А., Распопов А.А. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 252-262.

3. Тигулев, Е.А. Исследование напряженного состояния механически неоднородных сварных соединений магистральных трубопроводов с поверхностным трещиноподобным дефектом / Ямилев М.З., Кантемиров И.Ф., Распопов А.А. // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 5. – С. 122-126.

4. Тигулев, Е.А. Об экспериментально-аналитическом подходе к определению степени влияния зон механической неоднородности сварных соединений на напряженно-

деформированное состояние участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом / М.З. Ямилев, Е.А. Тигулев, Т.И. Безымянников, И.Ф. Кантемиров и др. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – № 6.

5. Тигулев, Е.А. Оценка прочности механически неоднородных сварных соединений магистральных трубопроводов с трещиноподобным дефектом / Кантемиров И.Ф. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – № 5.

6. Тигулев, Е.А. Определение влияния механической неоднородности на напряженно-деформированное состояние сварного соединения с трещиноподобным дефектом / М.З. Ямилев, Е.А. Тигулев, Т.И. Безымянников и др. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – Т. 12, № 3. – С. 277-283.

Публикации в других изданиях

7. Тигулев, Е.А. Влияние механических свойств неоднородных сварных соединений на их несущую способность / Распопов А.А., Ямилев М.З., Тигулев Е.А. // В книге: Тезисы докладов Международных конференций «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и «Химия нефти и газа» в рамках Международного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций». – 2018. – С. 537-538.

8. Тигулев, Е.А. Факторы, влияющие на формирование сложной топографии механической неоднородности в сварных соединениях углеродистых и низколегированных сталей / Тигулев Е.А., Ямилев М.З. // Сборник трудов XV Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2020».

9. Тигулев, Е.А. Направления совершенствования расчетных методов определения несущей способности сварного соединения / Тигулев Е.А., Ямилев М.З. // Сборник трудов 75-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2021».

10. Тигулев, Е.А. О стадиях усталостного разрушения механически неоднородных сварных соединений при циклических нагрузках / Тигулев Е.А., Ямилев М.З. // Сборник трудов 75-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2021».