

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»)

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Кантемиров Игорь Финсурович

Уфа – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	13
1.1 Нормативные требования к оценке прочности сварных соединений	13
1.2 Понятие механической неоднородности	22
1.3 Учет механической неоднородности при прочностных расчетах сварных соединений	26
1.4 Выбор методов теоретического исследования. Основные условия и допущения	44
1.5 Деформационные характеристики зон механической неоднородности	44
1.6 Выводы по главе 1	49
1.7 Цели и задачи исследования	50
ГЛАВА 2. МЕХАНИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	52
2.1 Оценка влияния распределения механических характеристик сварного соединения на параметры твердости в разных зонах	52
2.2 Оценка структуры зон механической неоднородности сварных соединений магистральных трубопроводов по данным твердометрии макрошлифа	57
2.3 Методика определения зон механической неоднородности по показаниям твердости	66
2.4 Условия наступления локальных пластических деформаций в зонах механической неоднородности сварных соединений магистральных трубопроводов	68
2.5 Эффекты напряженно-деформированного состояния бездефектных участков сварных соединений с механической неоднородностью	73

2.6 Учет криволинейности контактной границы зон механической неоднородности через показатель двухосности нагружения сварных соединений трубопроводов	89
2.7 Определение локальных областей перехода в пластическое состояние механически неоднородных сварных соединений магистральных трубопроводов	95
2.8 Выводы по главе 2	102
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЯ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ	105
3.1 Постановка задачи	105
3.2 Планирование экспериментальных исследований по определению степени влияния механической неоднородности на прочность сварных соединений	106
3.3 Технология сварки и конструкция сварных образцов из низколегированной стали 17Г1СУ	112
3.4 Порядок определения зон механической неоднородности сварных соединений низколегированной стали 17Г1С-У	116
3.5 Исследования прочности зон механической неоднородности с трещиноподобными дефектами	132
3.6 Статические испытания образцов с трещиноподобным дефектом	133
3.7 Выводы по главе 3	136
ГЛАВА 4. РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ НАЛИЧИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕЩИНОПОДОБНОГО ДЕФЕКТА	138
4.1 Существующие способы расчета прочности участков сварных соединений с трещиноподобным дефектом	139

4.2 Определение условного показателя двухосности нагружения для экспериментально определенной формы контактной границы бездефектного сварного соединения	145
4.3 Подход к моделированию и исследованию напряженного состояния участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом	149
4.4 Математическое моделирование напряженного состояния соединения с трещиноподобным дефектом	154
4.5 Практический учет влияния механической неоднородности и формы ее контактной границы на напряженно-деформированное состояние участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом	164
4.6 Выводы по главе 4	173
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ	174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	176
ПРИЛОЖЕНИЕ А	187
Механические характеристики трубы, использованной для подготовки образцов	187
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	189
Диаграммы растяжения образцов	189
ПРИЛОЖЕНИЕ В	193
Справки о внедрении	193

ВВЕДЕНИЕ

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 негативных факторов, влияющих на целостность трубопровода. Расчетные методы оценки прочности уже эксплуатирующихся трубопроводов рассматривают сварное соединение как ослабленный участок, однако не учитывают ряд факторов, которые могут оказывать решающее влияние на прочность и долговечность участка трубопровода, особенно при наличии опасных концентраторов напряжений в виде трещиноподобных дефектов. Одним из существенных факторов является механическая неоднородность сварных соединений. Под механической неоднородностью понимается разность сопротивления разных участков сварных соединений действующим эксплуатационным нагрузкам. Результаты исследования механической неоднородности сварных соединений магистральных трубопроводов, причин и факторов, влияющих на ее формирование, позволят более точно учитывать условия работы таких участков трубопроводов при определении прочности и долговечности, а также оценить влияние механической неоднородности на напряженное состояние участка сварного соединения с дефектом.

Существующие исследования, рассматривающие механическую неоднородность сварных соединений, получили большое развитие для разных сварных конструкций, включая оболочковые и корпусные конструкции. Однако общие подходы, применяемые в исследованиях механической неоднородности, не могут быть применены к существующим сварным соединениям магистральных трубопроводов по причине существенной схематизации форм зон механической неоднородности и недостаточной изученности реализации эффектов

взаимодействия данных зон механической неоднородности непосредственно в сварных соединениях магистральных трубопроводов.

Масштабный анализ аварийности магистральных нефте- и нефетпродуктопроводов за период 2011–2017 гг., приведенный в работе [100], показывает, что основной причиной отказов является дефектность трубопровода, которая возникает вследствие сочетания факторов коррозионного воздействия на дефекты сварных швов типа подрезов, непроваров, отклонений от допустимой формы усиления швов, в том числе после их ремонта, которые в последующем могут привести к развитию трещин. В процентном соотношении доля таких отказов может достигать 79 %. Кроме того, в работе [100] отмечается, что статистика отказов указывает на преобладающую опасность продольных сварных швов над другими элементами трубопровода. Возникающие аварии на трубопроводах, согласно [100], связанные с дефектами труб, в подавляющем большинстве случаев относятся к сварным соединениям, при этом 80 % из этих случаев – к продольным, и 20 % – к кольцевым. Такое распределение в первую очередь объясняется расположением указанных типов сварных соединений относительно главных напряжений – окружных и продольных, при этом действие окружных усилий, превышающих продольные усилия в среднем в 2 раза, ориентировано на наиболее ослабленные участки именно продольных заводских сварных швов, что при наличии дефектов на данных участках может приводить к авариям.

Таким образом, расчет сварных соединений эксплуатируемых магистральных трубопроводов на прочность требует развития с учетом влияния форм и свойств механической неоднородности. Полученные результаты оценки влияния механической неоднородности должны уточнить нормы отбраковки участков трубопроводов с дефектами.

Степень разработанности темы

На сегодняшний день накоплен достаточно большой объем знаний в области прочности и надежности сварных оболочек давления, к которым относится и магистральный трубопровод, благодаря трудам отечественных ученых, в том числе В.А. Винокурова [30], Г.А. Николаева [95], С.А. Куркина

[82], Н.А. Махутова [88], Е.Е. Зорина [63], Р.С. Зайнуллина [62], а также зарубежных ученых, в том числе Х. Свифта [130], Б. Сторакерса [131], З. Марциньяка [128], Е.А. Девиса [132]. При этом алгоритмы расчета именно сварных соединений в составе оболочек давления с учетом выявления дополнительных факторов, оказывающих влияние на прочность, в числе которых остаточные сварочные напряжения, механическая неоднородность, требуют дальнейшего совершенствования. Существующие стандарты по расчетам сварных конструкций и оболочек давления, в том числе трубопроводов (СП 36.13330.2012, СП 16.13330.2017, ASME В31.3-2018 и др.), практически не содержат расчетов сварных соединений, что не позволяет производить учет влияния свойств сварных соединений на общую прочность таких оболочковых конструкций, как магистральные трубопроводы.

Технологический процесс изготовления сварных соединений, в том числе в трубопроводах, является причиной возникновения механической неоднородности, то есть разности сопротивления отдельных участков сварных соединений эксплуатационным усилиям. При этом совершенствование технологии сварки не может в полной мере гарантировать исключение возникновения механической неоднородности. В связи с этим вопросу учета механической неоднородности в расчетных методах оценки прочности посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований таких авторов, как О.А. Бакши [9], Н.О. Окерблом [103], М.В. Шахматов [117], В.Л. Дильман [54], Р.З. Шрон [20,21], В.П. Ерофеев [57], А.А. Остсемин [104], С.Ф. Айметов [2], А.А. Распопов [112], Г.Р. Гумерова [46] и др. Некоторые положения исследований, проведенных перечисленными учеными, нашли свое отражение в рекомендациях ВНИИСТ 155-74. При этом следует отметить, что данные работы имеют обобщенный характер и не могут быть применены для оценки прочности сварных соединений магистральных трубопроводов без уточнения как форм механической неоднородности, так и характера, и условий их нагружения при эксплуатации магистральных трубопроводов.

Значительный практический интерес также представляет применение уточненного расчета с учетом влияния форм и свойств механической

неоднородности сварных соединений магистральных трубопроводов к участкам сварных соединений с дефектами. Следует отметить, что расчеты на прочность и долговечность трубопроводов с дефектами базируются либо на детерминированных, либо на вероятностных подходах [100]. Анализ прочностных методов посвящено множество работ, в том числе П.П. Бородавкина [26], Р.С. Гаспарянца [36], А.Г. Гумерова [45], К.М. Гумерова [124], Ю.В. Лисина [83], Н.А. Махутова [88], Д.А. Неганова [100], Ф.М. Мустафина [94] и других ученых. Среди зарубежных исследователей можно назвать С. Каруппанана (S. Karuppanan) [128], Дж. Кифнера (J. Kiefner), А. Кошама (A. Cosham), Г. Плювинажа (G. Pluvinage) [129] и др. Отдельного упоминания также заслуживает методика определения прочности и долговечности участков труб и сварных соединений с дефектами, отраженная в работе [65], где свойства сварного соединения учитываются на основе стандартных испытаний сварных образцов, то есть детерминированные методы скомбинированы со статистическими методами определения свойств сварных соединений. Кроме того, широкое распространение получают методы оценки участков трубопроводов с дефектами на основе численных методов [128].

Обобщая результаты перечисленных исследований, следует отметить, что одним из наиболее опасных дефектов трубопроводов является поверхностный трещиноподобный (плоскостной) дефект, расположенный на участке сварного соединения. Данный вывод подтверждается большим количеством экспериментальных исследований и статистических данных реальной эксплуатации трубопроводов [84, 100]. При этом приведенные детерминированные расчетные методы не включают оценку влияния форм и свойств механической неоднородности сварного соединения магистрального трубопровода на прочность как бездефектного участка, так и на участок с поверхностным трещиноподобным дефектом.

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».

Цель работы

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

Задачи

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 результатов работы

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 и практическая значимость результатов работы

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 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 выполнить 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 металлографических исследований, 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 позволит сформировать 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 и апробация 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, результатами сопоставления данных, приведенных в научной и нормативной литературе.

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» (Уфа).

Публикации

По теме диссертации опубликованы 10 научных работ, в т.ч. 5 – в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, среди них 4 статьи – в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных Scopus и Web of Science.

Объем и структура работы

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

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

1.1 Нормативные требования к оценке прочности сварных соединений

Проектирование стальных конструкций

Расчет прочности сварных соединений при проектировании стальных конструкций регламентируется сводом правил СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Расчетные сопротивления сварных соединений в соответствии с приведенным нормативным документом варьируются в зависимости от видов сварных соединений и напряженных состояний.

Расчетные требования к растягивающим, сжимающим и изгибающим нагрузкам, согласно своду правил, для стыковых сварных соединений включают в себя определение критериев предельной прочности и предельной пластичности для свариваемых сталей. Таким образом, данные требования подразумевают равную прочность сварного соединения и основного металла. Указанные расчетные требования применяются для сварных соединений, полученных автоматической, механизированной или ручной сваркой. При отсутствии неразрушающего контроля требования к сварному соединению ужесточаются, и расчетное сопротивление при растяжении и изгибе следует принимать с уменьшением предела текучести основного металла на 15 %.

Кроме того, дополнительный запас в нормативных требованиях учитывается за счет введения коэффициентов надежности по металлу шва, применение которых регламентируется только в случаях расчета угловых швов на условный срез, а также за счет коэффициентов условий работы, которые в приведенном нормативном документе учитывают в основном стальные конструкции общегражданских зданий и сооружений и не имеют прямой связи с физическими причинами ослабления сварного соединения, а ориентированы на

условия работы здания или сооружения и его ответственность. Максимальное снижение расчетного сопротивления, согласно данным из приведенного нормативного документа, составляет 25 %. При этом требования данного документа не распространяются на сварные соединения магистральных трубопроводов.

Проектирование линейной части магистрального трубопровода

Расчет прочности сварных соединений магистральных трубопроводов основан на принципах оценки предельных состояний, при которых сварное соединение перестает удовлетворять заданным требованиям равнопрочности основному металлу. Выделяют две группы предельных состояний, к первой из которых относят потерю несущей способности или предельное состояние по пределу прочности, ко второй – потерю устойчивости деформирования или предельное состояние по пределу текучести. Принципы оценки предельных состояний заложены в нормативных требованиях по расчету критериев прочности сварных соединений как в случае их применения при проектировании магистральных трубопроводов, так и в рамках их расчета при определении прочности и долговечности сварных соединений магистральных трубопроводов с дефектами.

Основным нормативным документом, регламентирующим вопросы обеспечения надежности магистральных трубопроводов при проектировании, является СП 36.13330.2012. В частности, он устанавливает требования о равнопрочности сварного соединения основному металлу трубы, как для продольных сварных швов в заводском исполнении, так и для кольцевых сварных соединений в полевых условиях. Сварные швы труб должны быть плотными, непровары и трещины любой протяженности не допускаются.

Вместе с тем важно отметить, что заданное в целом условие равнопрочности сварных соединений выполняется, однако не учтены следующие аспекты:

- сварное соединение получается в результате термомодеформационного цикла сварки, который влияет как на металл шва, так и на основной металл;
- учитывая многопроходность сварки магистральных трубопроводов, каждый слой сварки оказывает дополнительное влияние на структуру подстилающих слоев (корневого и заполняющих), а также на основной металл в зоне термического влияния;
- применение ручной дуговой сварки в полевых условиях снижает степень однородности сварного соединения ввиду несовершенств самой технологии РДС вне зависимости от квалификации сварщика.

Нормативные сопротивления растяжению и сжатию металла труб R_1^H и R_2^H могут быть отнесены одинаково как к основному металлу, так и к сварным соединениям. Такой подход предполагает прочность труб и сварных соединений равной, а действие эксплуатационных нагрузок на сварные соединения – равным действием таких нагрузок на основной металл труб.

Значения нормативных сопротивлений определяется по результатам стандартных испытаний образцов металла труб на растяжение.

Далее для определения расчетных сопротивлений растяжению с учетом нормативных сопротивлений используется ряд коэффициентов:

m – коэффициент условий работы трубопровода, принимаемый в соответствии с условиями прокладки того или иного участка линейной части магистрального трубопровода. Условия работы участка разделены на пять категорий, от высшей до 4-й категории. К высшей категории относят сложные участки прокладки, такие как подземные и надземные переходы через крупные водные преграды, болота 3-го типа. Также категория зависит от номинального диаметра трубопровода;

k_1 – коэффициент надежности по материалу, учитывающий характеристики труб, изготовленных в заводских условиях, и зависящий от типа сварки, уровня подготовки основного металла, объема контроля металла и сварного соединения на сплошность неразрушающими методами. Данный коэффициент применяется при определении расчетного сопротивления по пределу прочности. Важно

отметить, что выбор значения коэффициента обосновывается скорее эксплуатационными и экспертными критериями, при этом научные критерии для обоснования выбора коэффициента в нормативных требованиях не приводятся;

k_2 – коэффициент надежности по материалу, учитывающий характеристики труб, изготовленных в заводских условиях, и зависящий от типа стали, из которой изготовлены трубы (малоуглеродистые, низколегированные, высокопрочные), технологии изготовления трубы (бесшовная, прямошовная, спиралешовная), соотношения нормативных сопротивлений, определяемых по пределу текучести и пределу прочности. Данный коэффициент аналогично с предыдущим имеет в большей степени эксплуатационное значение и выведен в результате большого анализа эксплуатационных данных. Ссылки на научные работы, в результате которых получены значения данного коэффициента, отсутствуют;

k_H – коэффициент надежности по ответственности трубопровода, который определяется по критериям номинального диаметра трубопровода (менее 500 мм, 600–1000, 1200, 1400 мм), назначения трубопровода (газопровод, нефтепровод, нефтепродуктопровод), а также для газопровода существует деление по рабочему давлению (менее 5,5 МПа, до 7,5 МПа, до 10 МПа).

Комплекс описанных коэффициентов определяет значение расчетного сопротивления трубопровода нагрузкам по следующим формулам:

$$R_1 = \frac{m \cdot R_1^H}{k_1 \cdot k_H}; \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{m \cdot R_2^H}{k_2 \cdot k_H}. \quad (2)$$

Вместе с тем, как показывает целый ряд исследований, в том числе в сфере трубопроводного транспорта [84, 90, 100, 130], сопротивление труб и сварных соединений эксплуатационным нагрузкам не равны и зависят от целого комплекса факторов, к которым относятся время эксплуатации и процессы деградации внутренней структуры металла, общие условия эксплуатации, включая

транспортируемую среду, применение тех или иных сварочных технологий при сооружении магистральных трубопроводов и многие другие.

Очевидно, что весь комплекс реально действующих факторов, влияющих на прочность и долговечность участков трубопроводов, невозможно учесть при проектировании. Поэтому введенные коэффициенты запаса разработчиками свода правил предполагали с высокой степенью вероятности перекрытие всех действующих негативных факторов на участках трубопроводов по зонам ответственности.

Вместе с тем для уже построенного трубопровода также требуется оценка прочности, особенно для участков с выявленными по результатам диагностики дефектами. Соответственно, для таких участков уже может быть определено конечное число основных факторов, определяющих его прочность и долговечность.

Оценка прочности и долговечности участков сварных соединений с дефектами

На прочность и долговечность участка трубопровода влияет целый ряд факторов: механические характеристики металла трубопровода и его геометрические параметры, наличие технологических дефектов, комбинация действующих нагрузок, общие и локальные особенности деформирования участка конструкции и т.д.

Также в [88] отмечается, что существенным фактором, влияющим на прочность, являются процессы деградации механических характеристик металла труб и сварных соединений, в том числе снижение значений механических характеристик металла и охрупчивание. Кроме того, возникновение и развитие эксплуатационных дефектов в металле труб и сварных соединений вследствие накопления повреждений также оказывает существенное влияние на прочность магистрального трубопровода.

Достижение предельных состояний металла находится в прямой зависимости с такими свойствами, как прочность, пластичность и

чувствительность к концентрации напряжений. Указанные характеристики имеют также сложную взаимозависимость, которая может изменяться при соответствующих изменениях структурных свойств металла вследствие перечисленных выше факторов (деградация механических свойств, структурно-фазовые превращения в сварном соединении исследуемого объекта и т.д.).

Под прочностью понимается способность металла воспринимать нагрузку; таким образом, достижение предела прочности количественно определяет способность металла выдерживать прикладываемые нагрузки и не разрушаться. Стандартным испытанием для определения такого предела является испытание на одноосное растяжение. Под пластичностью понимается деформационная способность металла до разрушения, то есть в количественном понимании – достижение предела деформаций металла до разрушения. Такая деформационная способность определяется сужением в шейке разрушившегося образца.

Процесс разрушения образца металла описывается как уровень накопления повреждений. При этом повреждения могут накапливаться как при статическом нагружении, так и при разного рода циклических нагрузках.

Одной из наиболее комплексных методик по определению несущей способности труб и сварных соединений, имеющих нарушения сплошности металла – дефекты, является методика, рассмотренная в работе [65]. В качестве экспериментально-теоретической базы указанной методики используются энергетические критерии прочности и устойчивости, общий подход к расчету дефектов на прочность и долговечность (итерационное уточнение концентрации напряжений в области дефекта), применение упругопластических решений при определении деформаций с учетом геометрии и особенностей дефектов. Также указанная методика учитывает возможности комбинации дефектов разной степени опасности и природы, их общее влияние на прочность участка трубопровода.

В рамках рассмотренной методики возможно провести ранжирование дефектов, полученных по результатам технической диагностики магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов, по степени их опасности. Результатом

определения напряженно-деформированного состояния участков трубопровода с дефектами является определение максимально допустимого эксплуатационного давления в участке трубопровода, а также допустимый срок эксплуатации участка трубопровода с дефектом, полученный на основе прогнозирования процесса деформаций.

В качестве расчетных схем используются участки трубопровода в бездефектном состоянии, которые позволяют получить данные о номинальных значениях интенсивностей напряжений и деформаций. На основе полученных номинальных значений далее выполняется расчет по нескольким расчетным схемам дефектов. При этом, как отмечалось выше, напряженно-деформированное состояние для всех типов дефектов определяется по единой схеме, согласно которой на первом этапе рассчитываются условно-упругие компоненты напряжений и деформаций в нетто-сечении дефекта как объемного, на втором этапе выполняется расчет упругопластических компонентов напряженно-деформированного состояния.

Исходные параметры дефектов определяются по результатам внутритрубной диагностики и дополнительного дефектоскопического контроля. Результаты расчета позволяют вывести относительные критерии предельной прочности и предельной пластичности по пределу прочности и пределу текучести, соответственно:

$$S_u(\varepsilon_i, \varepsilon_0, \varphi_\varepsilon) \leq 1; \quad (3)$$

$$S_c(\varepsilon_i, \varepsilon_0) \leq 1, \quad (4)$$

где ε_i – интенсивность деформаций участка сварного соединения;

ε_0 – объемная деформация участка сварного соединения;

φ_ε – угол подобия девиатора деформаций.

Несмотря на перечисленный в данной методике широкий спектр факторов, влияющих на определение прочности, аналитически остались неучтенными факторы остаточных сварочных напряжений и механической неоднородности сварного соединения, которые являются результатом термомодеформационного процесса сварки.

Механическая неоднородность отмечается в методике как важный фактор, однако расчетные процедуры, которые учитывали бы влияние такой неоднородности на прочностные свойства участка сварного соединения, в данной методике не отражены. В качестве исходных данных для расчета в методике предлагается использовать значения механических характеристик для случаев расположения дефекта в шве и дефекта, примыкающего к сварному шву. Следует отметить, что такие характеристики, как условный предел текучести, предел прочности не отличаются от значений, соответствующих основному металлу трубы, при этом величина относительного сужения в шейке после разрыва должна быть снижена на 15 %. Данное снижение приводит к изменению значений разрушающей объемной деформации и разрушающей интенсивности деформаций. При этом влияние термомодеформационного цикла на деформационное упрочнение и многие другие характеристики в данной методике не учитываются. Используемый в методике подход также не учитывает изменение несущей способности участка в зависимости от расположения дефекта относительно сварного шва.

Сравнение нормативных требований в части определения несущей способности сварного соединения

Резюмируя результаты оценки нормативных требований к прочности сварных соединений в конструкции, одним из основных выводов является стремление достижения равнопрочности сварного соединения с основным металлом. При этом общее ослабление конструкции может учитываться, но зависит в первую очередь от эксплуатационных параметров объекта.

Для оценки подхода к учету степени ослабления конструкций в местах сварного соединения целесообразно провести сравнение между рассмотренными нормативными требованиями. В качестве критерия сравнения было выбрано расчетное сопротивление участка сварной конструкции растяжению. Расчетное сопротивление выбиралось по критерию недопущения пластических деформаций, то есть по пределу текучести.

В качестве исходных данных рассмотрена трубопроводная сталь 17Г1С-У (предел текучести 410 МПа). Во всех нормативных требованиях несущая способность определяется именно по основному металлу труб (стальных конструкций). Сравнение приведено в Таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные сопротивления сварных соединений в соответствии с нормативными требованиями

№ п/п	Наименование НД	Расчетная формула	Значение расчетного сопротивления для стали 17Г1С при растяжении, МПа
1	СП 16.13330.2017	$R_{wy} = 0,85R_y$	348,5 ¹⁾
2	СП 36.13330.2012	$R_2 = \frac{R_2^H \cdot m}{k_2 \cdot k_H}$	186,0 ²⁾
3	Рекомендации ВНИИСТ Р 155-74	$R_{wy} = \sigma_T^{CB} = \sigma_T^K \cdot K_{\varepsilon}$ $K_{\varepsilon} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3} \cdot \varepsilon \cdot \alpha}$ $\sigma_T^K = \sigma_T^T (1 - \theta) + \sigma_T^M \cdot \theta$ $\theta = \frac{d_M}{\delta}$ $\alpha = \frac{1 - (1 - \frac{1}{K})\theta}{1 + (1 - \theta)^2 - (1 - \frac{1}{K}\theta)^2}$ $\varepsilon = \frac{F}{\delta^2}$	323,7 ³⁾
4	Методика оценки прочности и долговечности участков труб и	$R_y = \sigma_{02}^*(\varepsilon_{ic_cu} / \varepsilon_{ic_om})$	310,6 ⁴⁾

№ п/п	Наименование НД	Расчетная формула	Значение расчетного сопротивления для стали 17Г1С при растяжении, МПа
	сварных соединений с дефектом		

Примечания: ¹⁾ Требования стандарта дублируют требования к расчетному сопротивлению, в частности, ASME B31.3-2018 и др. зарубежных стандартов.

²⁾ При выборе коэффициентов, входящих в формулу расчетного сопротивления, выбирались наихудшие условия, позволяющие максимально снизить значение сопротивления.

³⁾ Указанные рекомендации используют схематизированные формы прослоек и не учитывают влияния краевых эффектов.

⁴⁾ Снижение расчетного сопротивления по представленной методике для участка сварного соединения не предусматривается за счет пересмотра пределов прочности и текучести. Для приближения к условиям эксплуатации сварного соединения дополнительно был рассчитан коэффициент концентрации деформаций как отношение интенсивностей деформации по характеристикам материалов в сварном шве и основном металле.

По результатам анализа расчетных сопротивлений, полученных при помощи разных методик, можно выделить следующие недостатки:

- расчетное сопротивление, определенное по требованиям СП 16.13330.2017, является фиксированным вне зависимости от типа сварного соединения и проектируемого участка;

- расчетное сопротивление, определенное по требованиям СП 36.13330.2012, не дифференцируется между сварным соединением и основным металлом трубопровода;

- расчетное сопротивление, определенное по методике при расчете прочности участков сварных соединений, не дифференцирует ослабленные участки сварного соединения, а рассматривает его несущую способность в целом.

1.2 Понятие механической неоднородности

Понятие механической неоднородности сварного соединения является многозначным. Она проявляется в различии свойств материалов определенных участков сварных соединений, что объясняется следствием структурно-химических изменений в материале соединения от воздействия

термодеформационного цикла сварки. В целом, анализируя структуру любого сварного соединения, можно сделать вывод о той или иной степени его механической неоднородности.

Механическая неоднородность сварного соединения может быть оценена с нескольких структурно-масштабных позиций [77]. При этом существующие научные исследования [77, 109] показывают наличие иерархического согласования масштабов структурно-механической неоднородности. Иерархические уровни механической неоднородности от микроуровня (с масштабом от 0,2 до 100 нм) до макроуровня (с масштабом 0,2 до 1 мм) оказывают влияние на формы и свойства механической неоднородности, что, в свою очередь, приводит к дифференцированному восприятию нагрузок различного типа: статических, циклических.

Исследователи в своих трудах [37, 108] выделяют разные иерархические уровни и для многофазных сталей (например, феррито-перлитного класса), к которым относятся низколегированные стали магистральных трубопроводов. Общими характерными уровнями для структурно-механической неоднородности являются: микроуровень, мезоуровень, макроуровень [109].

Термодеформационный цикл, сопровождающий сварочные процессы, описанные, в частности, в работе К.В. Багрянского [7], приводит к образованию нескольких типов неоднородности, которая имеет масштабную иерархическую взаимосвязь, начиная с наименьших масштабов – внутрикристаллитная неоднородность, а далее по возрастанию – межкристаллитная, слоистая и зональная.

На наименьшем масштабном уровне неоднородность проявляется в виде разности химического состава металла осей и межосных пространств дендритов.

Следующий масштабный уровень характеризуется неоднородностью, вызванной перемещением к границам растущих кристаллов примесей и легкоплавких эвтектик. Такие процессы определяют создание межкристаллитных прослоек, которые, в свою очередь, затрудняют диффузию

атомов в ходе сварочного цикла и характеризуются выраженной дендритной структурой.

Периодичность процесса кристаллизации металла шва порождает слоистую неоднородность, также тесно связанную с неоднородностью на меньших масштабных иерархических уровнях. Слой металла неоднородности в сварном шве после кристаллизации имеет размеры порядка нескольких микрон, а также характеризуется повышенной концентрацией примесей. Фронт кристаллизации совпадает с температурным градиентом, а слои по своему размеру увеличиваются от центра сварного соединения к его периферии. На более масштабном уровне формируется неоднородность, называемая зональной ликвацией, которая характеризуется разностью структуры вследствие неравномерной кристаллизации металла по направлению градиента температур. Рост кристаллов по периферии сварочной ванны вызывает перемещение примесей в центр шва [7].

Таким образом, процессы образования неоднородностей на разных иерархических уровнях имеют тесную взаимосвязь [2, 7, 30, 37, 94] и позволяют охарактеризовать процесс образования механической неоднородности как естественный. То есть учет механической неоднородности, неразрывно связанной с термомодеформационным циклом сварки, при определении сопротивляемости сварных соединений нагрузкам является необходимым. В результате протекания процессов термомодеформационного цикла в качестве неоднородных зон выделяют сварной шов (СШ), зону сплавления (ЗС), зону термического влияния (ЗТВ) и основной металл (ОМ). Свойства сварного шва (СШ) на зональном иерархическом уровне определяются свойствами сварочных материалов, присадочных материалов и режимов сварки (Рисунок 1).

Зона сплавления (ЗС) является сравнительно небольшим участком, на котором на фоне выраженных эффектов диффузии и перемешивания происходит соединение основного металла и металла сварного соединения [30].

Зона термического влияния (ЗТВ) – участок основного металла, который определяется границами зоны сплавления и основного металла, где проявлены структурные и фазовые превращения вследствие влияния цикла сварки [30, 109].

При этом ЗТВ часто подразделяют на несколько подучастков. На первом подучастке ЗТВ температура достигает температуры плавления, при этом данный подучасток распространяется на расстояние в несколько размеров зерен, где происходит формирование кристаллов шва от частично оплавленных зерен основного металла. Второй подучасток, где температура достигает 1100–1300 °С, происходит аллотропическое превращение с ростом первичных зерен. Последующие подучастки характеризуются соответствующими температурными градиентами полной и неполной перекристаллизации. Размеры подучастков ЗТВ изменяются в зависимости от способа и режимов сварки, то есть от длительности сварочного цикла и количественных показателей тепловложения.

Кроме того, зона термического влияния характеризуется условиями для возникновения временных и остаточных напряжений и деформаций, которые вызваны структурными и фазовыми превращениями, а также существенной стесненностью свариваемых деталей и невозможностью релаксации указанных напряжений.

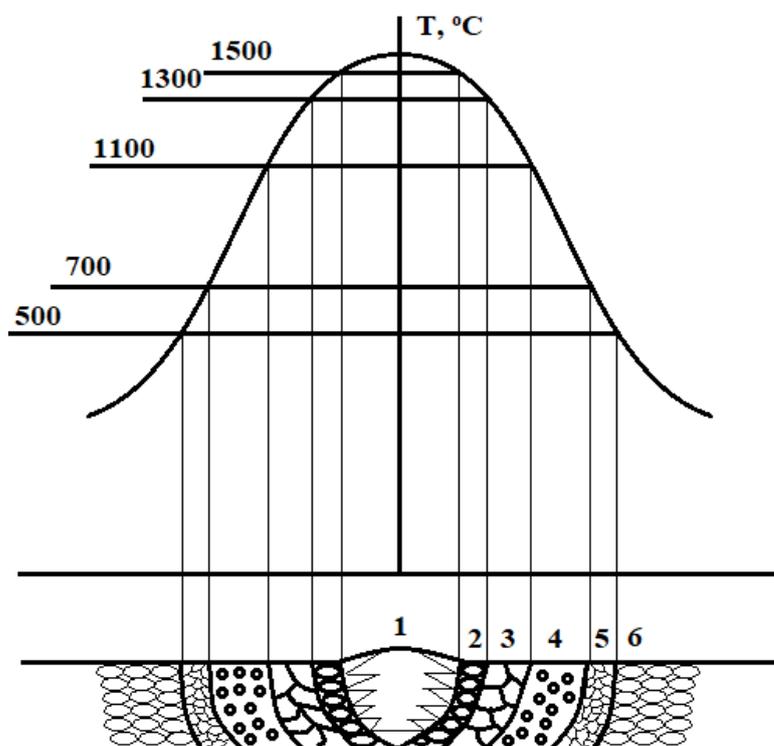


Рисунок 1 – Продольная зональность сварного соединения при ручной дуговой сварке с V-образной разделкой кромок

Зональная структурная неоднородность, выделяющаяся на верхнем иерархическом уровне, определяет также механическую неоднородность, которая от одной зоны к другой может существенно менять свойства. Малые размеры зон механической неоднородности затрудняют верификацию их механических параметров посредством прямых механических испытаний. Таким образом, количественную оценку степени механической неоднородности производят при помощи измерения твердости, предполагая, что между показаниями твердости и механическими характеристиками существует тесная корреляционная связь [87]. На основе определения механических характеристик выделяют зоны механической неоднородности, называемые прослойками.

1.3 Учет механической неоднородности при прочностных расчетах сварных соединений

Проявление влияния механической неоднородности выражается в виде сдерживания деформаций менее прочных участков сварного соединения более прочными при нагружении. В качестве примера во многих источниках рассматривается одноосное осевое растяжение сварного соединения, которое приводит к неодновременному переходу в стадию пластического деформирования. Результатом проявления подобного эффекта сдерживания отдельных участков сварного соединения от перехода в стадию пластического деформирования является одновременное упрочнение менее прочных участков сварного соединения и ослабление более прочных участков.

Как было определено выше, морфология образования участков с разными механическими характеристиками является следствием влияния термомодеформационного цикла на металл трубопровода и сварочной проволоки на всех иерархических уровнях.

Исследованиями вязкой прочности оболочечных конструкций в целом с учетом структурно-механической неоднородности и дефектов занимались многие ученые в России и за рубежом. Базовые принципы определения силовых и

деформационных критериев несущей способности конструкций со сварными соединениями разрабатывались в работах Х. Свифта [129], З. Марциньяка [128], С.А. Куркина [82], В.А. Винокурова [30], Г.А. Николаева [95], Н.А. Махутова [88] и др.

Механическая неоднородность в составе сварного соединения является причиной трансформации напряженного состояния в сложное даже при общем воздействии на исследуемое соединение простых силовых факторов (одноосное растягивающее усилие, двухосное растяжение), что, в свою очередь, приводит к изменению всех критериев прочности как статического, так и циклического происхождения.

На основе разработанных принципов определения критериев потери несущей способности рядом авторов (А.Н. Моношков [93], Г.И. Ковальчук [75] и др.) в разработанных методиках оценки несущей способности и сопротивляемости разрушению исследованы случаи сложного напряженно-деформированного состояния, в том числе и для оболочечных конструкций. При этом, как отмечается в проанализированных исследованиях, сложное напряженное состояние характерно как для упругой, так и для пластической стадии работы конструкции, то есть упругие характеристики в механически неоднородном сварном соединении также характеризуются дифференциацией при переходе от одной зоны к другой. Зависимость параметров участков сварных соединений в упругой и пластической стадиях деформирования при этом имеет не прямой характер, таким образом, при разных условиях деформирования могут реализовываться разные механизмы разрушения отдельных зон – вязкий или хрупкий.

Участки соединений, в пределах которых механические свойства металла примерно одинаковы, практически располагаются в соединениях в виде так называемых прослоек. Прослойки, металл которых имеет предел текучести меньший, чем у металла соседних участков, условно обозначаются «мягкими прослойками». Тогда металл более прочных участков сварных соединений характеризуется как «твердая прослойка» с повышенным пределом текучести.

Восприятие сварным соединением нагрузок обусловлено взаимным влиянием как мягких, так и твердых прослоек. Менее прочные мягкие прослойки локализуют возникающие в них пластические деформации и лимитируют несущую способность всего сварного соединения.

В некоторых случаях стесненность деформаций мягкой прослойки предопределяет проявление эффекта сдерживания деформаций более прочными соседними участками сварного соединения. В результате возникает эффект «контактного упрочнения» мягкой прослойки, который зависит от относительной толщины прослойки $\kappa = h/d$ и формы поперечного сечения элемента (Рисунок 2).

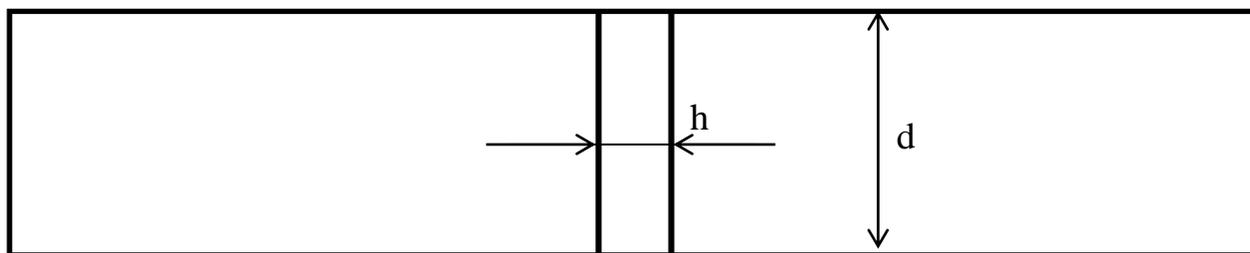


Рисунок 2 – Параметры для определения относительной толщины прослойки

Эффект сдерживания деформаций отдельных менее прочных участков имеет свои ограничения на размер менее прочных зон. Выявлено, что с увеличением размера менее прочной зоны общая прочность снижается и эффект сдерживания или контактного упрочнения не проявляется. Таким образом, прочность сварного соединения при достижении некоторого критического размера менее прочной зоны полностью определяется свойствами менее прочной зоны. Учитывая фактическую криволинейную форму контактных границ менее прочных зон, актуальной задачей становится также установление критериев формы менее прочных зон, которые приводят к максимальному ослаблению сварного соединения до уровня прочности менее прочной зоны. Аналогичной задачей является определения такого размера, формы и свойств менее прочной зоны, когда эффект сдерживания работает максимально, то есть сопротивление менее прочной зоны деформациям находится на уровне сопротивления соседних более прочных зон. При этом важно отметить, что основным критерием является

решение краевой задачи, то есть определение условия перехода части металла в область пластического деформирования, а эффект сдерживания может проявляться только в случае, когда соседние с менее прочной зоной участки все еще деформируются упруго.

Значительный вклад в развитие направления исследования напряженного состояния мягких прослоек, испытывающих разные виды нагрузок, и учета НДС мягких прослоек в определении несущей способности конструкций со сварными соединениями, внесли работы О.А. Бакши [8–19], Л.М. Качанова [68–71], Р.З. Шрона [20, 21], А.Л. Немчинского [72]. Исследования, проведенные в рамках данных работ, сформировали отдельное направление оценки несущей способности сварных соединений с учетом влияния механической неоднородности. В дальнейшем данное направление развивалось в трудах Н.А. Махутова [88–90], С.Е. Александрова [3], Р.С. Зайнуллина [62], В.Л. Дильмана [54], а также исследователей научной школы Челябинского политехнического института (Южно-Уральского государственного университета), основанной О.А. Бакши, – В.П. Ерофеева, М.В. Шахматова, А.А. Распопова, С.Ф. Айметова и др., и исследователей Уфимской научной школы (ВНИИСПТнефть), основанной Р.С. Зайнуллиным, – А.Г. Вахитова, Г.Р. Гумеровой, Ю.Н. Антипова и др.

Расчетная оценка влияния механической неоднородности на предел прочности при статическом одноосном растяжении может быть выполнена при помощи введения коэффициента контактного упрочнения. При этом лимит прочности определяется пределом прочности мягкой прослойки с учетом увеличения за счет эффекта сдерживания деформаций:

$$\sigma_B = \sigma_B^M K_\kappa, \quad (5)$$

где: σ_B^M – временное сопротивление мягкого металла;

K_{κ} – коэффициент контактного упрочнения, величина которого зависит от геометрических параметров мягкой прослойки, степени механической неоднородности и т.д.

Изначально в работах О.А. Бакши, Л.М. Качанова, Р.З. Шрона, А.Л. Немчинского авторами рассматривались механически неоднородные соединения листовых и стержневых конструкций в силу повышенной сложности экспериментальных и теоретических исследований других типов конструкций со сварными соединениями. Для получения зависимостей с учетом упрощений наиболее часто использовалась гипотеза о линейности касательных напряжений по длине мягкой прослойки. Соответственно, авторами были выведены соответствующие коэффициенты контактного упрочнения для пластины и стержня с поперечной мягкой прослойкой следующего вида:

$$K_{\kappa} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{4\kappa} \right); K_{\kappa} = \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}\kappa} \right). \quad (6)$$

Следует отметить, что перечисленные исследования не учитывали вовлечение более прочного металла в пластическое деформирование, а также не учитывалось деформационное упрочнение. Решение, приведенное по формулам (3), (4), распространялось на весь слой, включая область выхода мягкой прослойки на свободную поверхность. При этом для свободной поверхности будут однозначно отличаться граничные условия, а решения на ней не будут совпадать с решением для средней части мягкой прослойки. Степень влияния свободной поверхности на решение о величине критической нагрузки при этом будет зависеть от относительной толщины прослойки. С увеличением относительной толщины прослойки будет увеличиваться расхождение решений в середине мягкого слоя и на свободной поверхности. Также указанные формулы давали расхождение с экспериментальными данными при некоторых значениях относительной толщины прослойки, поэтому как самими авторами [9, 123 и др.], так и в других работах [2] предлагались поправки в формулы (5), (6) или альтернативные формулы, основанные на локальных экспериментальных данных.

Основной причиной несоответствия между полученными теоретическими значениями и экспериментами выделялась так называемая неполная реализация контактного упрочнения вследствие вовлечения основного металла в пластическое деформирование.

При неполной реализации эффекта контактного упрочнения формула (5) преобразовывалась, добавлялся коэффициент реализации контактного упрочнения $K_p \leq 1$:

$$\sigma_B = \sigma_B^M K_\chi K_p. \quad (7)$$

Процесс вовлечения более прочного металла в пластическое деформирование также исследовалось как явление в работах О.А. Бакши [11–15], М.В. Шахматова [123, 124], А.А. Распопова [114] и др. Для случая плоской деформации авторами был применен метод характеристик (линий скольжения) в виде циклоид с использованием гипотезы Прандтля. Корректность построения линий характеристик в виде циклоид, фиксирующих участки с постоянными касательными напряжениями, подтверждалась распределением муаровых полос при деформации. Построение поля линий скольжения с учетом и без учета вовлечения соседнего более прочного металла в пластическую деформацию представлено на Рисунке 3. С учетом построенных характеристик для показанного случая было получено выражение, которое определяет граничные условия перехода пластических деформаций с мягкой прослойки на соседние более прочные зоны:

$$\sigma_{cp} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_B^M \left[\frac{1}{K_B} + \left(\frac{K_B - 1}{K_B} \right) K_\chi \right], \quad (8)$$

где: K_χ – коэффициент контактного упрочнения мягкой прослойки в условиях его реализации ($K_\chi = \frac{1}{2} + \frac{1}{4\chi} + \frac{\chi}{4}$ – для соединений с тонкой мягкой прослойкой; $K_\chi = \frac{1}{3\chi} + \chi - \frac{\chi^2}{3}$ – для соединений с толстой мягкой прослойкой).

Вместе с тем проведенный в работе В.Л. Дильмана [54] масштабный анализ подходов к определению несущей способности выявил неточности в отображении линий характеристик на границах между мягкой и твердой прослойками, а также в центре мягкой прослойки. В работе В.Л. Дильмана [54] подчеркивается, что напряжения при переходе от менее прочной части к более прочной претерпевают разрыв, а описание линий характеристик гладкими кривыми одного типа может повлиять на конечный результат определения несущей способности участка сварного соединения.

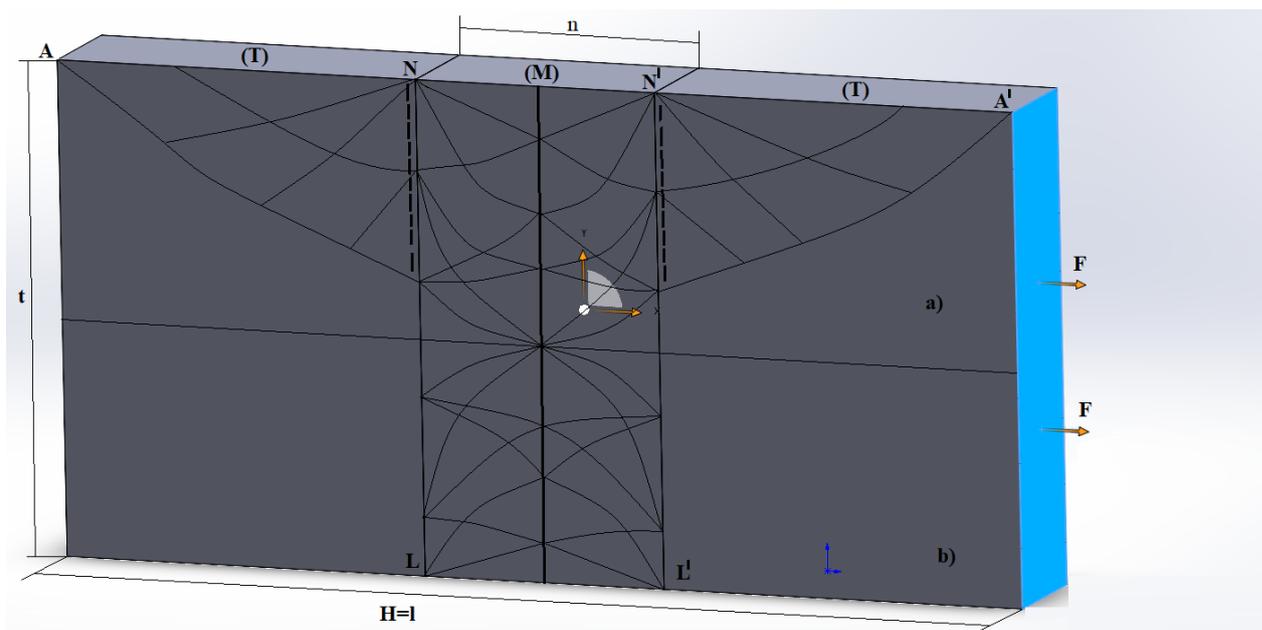


Рисунок 3 – Поле линий скольжения для сварных соединений с мягкой прослойкой с учетом (а) и без учета (б) вовлечения основного металла в пластическую деформацию [2]

В работе [54] в результате математической обработки экспериментальных данных получена зависимость среднего временного сопротивления разрыву от параметров мягкой прослойки, включая механические свойства, степень

упрочнения мягкого металла. При помощи данной зависимости может быть выполнен учет вовлечения основного металла в пластическую деформацию:

$$\sigma_B^{cp} = \sigma_B^T - K \cdot \delta_M \cdot \gamma_M \cdot \chi \cdot 10^2, \quad (9)$$

где: K – коэффициент, зависящий от параметра наклепываемости прослойки;
 δ_M – относительное удлинение металла мягкой прослойки;

$$\gamma_M = \sigma_B^M / \sigma_T^M. \quad (10)$$

Проблеме вовлечения основного металла в пластическую деформацию также посвящена работа [2]. Степень вовлечения металла в пластическую деформацию как для мягкой части деформируемого образца, так и для более твердых частей требует дополнительного исследования для сварных соединений. В рамках работы [2] выполнен теоретический анализ с применением метода верхней оценки (Рисунок 4), который заключается в представлении очага пластической деформации в виде жестких треугольников, имеющих относительную степень свободы по жесткой границе между собой. В результате применения такого метода получены выражения для расчета прочности сварных соединений в условиях плоской деформации с учетом неполной реализации контактного упрочнения мягкой прослойки:

$$\sigma_{cp} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_B^M \left[\frac{K_B}{\sin(2\alpha)} - \frac{\chi(K_B-1)}{2\sin^2(\alpha)} \right]. \quad (11)$$

Угол у вершин треугольников пластической деформации, построенных в соответствии с методом верхней оценки или методом жестких треугольников, принимался равным 2α , что согласно принципам теории пластичности является предельным значением для развития верхней предельной нагрузки и

соответствует максимальному значению энергии развития пластической деформации.

Несколько отличающийся подход при определении несущей способности сварных соединений с механической неоднородностью рассмотрен в работах Р.С. Зайнуллина и его учеников [62]. На основе анализа линий скольжения и муаровых полос при экспериментальных исследованиях делается вывод о существенном изменении касательных напряжений в мягкой прослойке и в конечном итоге – зависимости введенного авторами коэффициента несущей способности конструктивного элемента с механической неоднородностью. В целом это решение также восходит к решению Прандтля о пластической деформации бесконечной полосы менее прочного материала и также не учитывает краевые эффекты на свободной поверхности. Кроме того, похожий подход (на основе лазерной интерферометрии муаровых полос) используется для экспериментальной оценки напряженно-деформированного состояния и остаточных сварочных напряжений. Такие исследования проводились в том числе на кафедре «Сварка и мониторинг нефтегазовых сооружений» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина.

Визуальная интерпретация распределения напряжений позволяет прогнозировать направление развития деформаций, а также влияние разных по механическим свойствам участков металла в общем случае, сварного соединения – в частности, на направление и относительную величину напряжений как локального участка, так и в целом элемента, его напряженно-деформированное состояние. В настоящей работе также показана взаимосвязь между микроструктурой металла, ее влиянием на направления и величину напряжений на макроуровне.

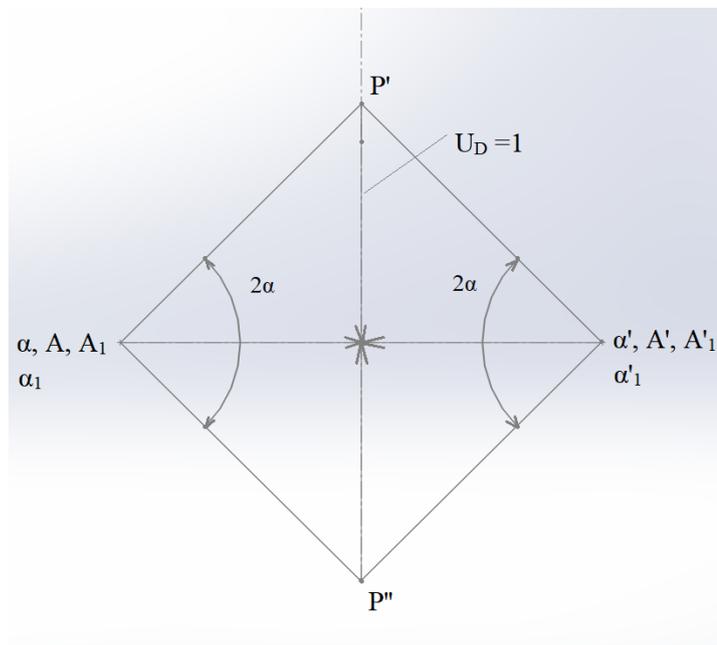
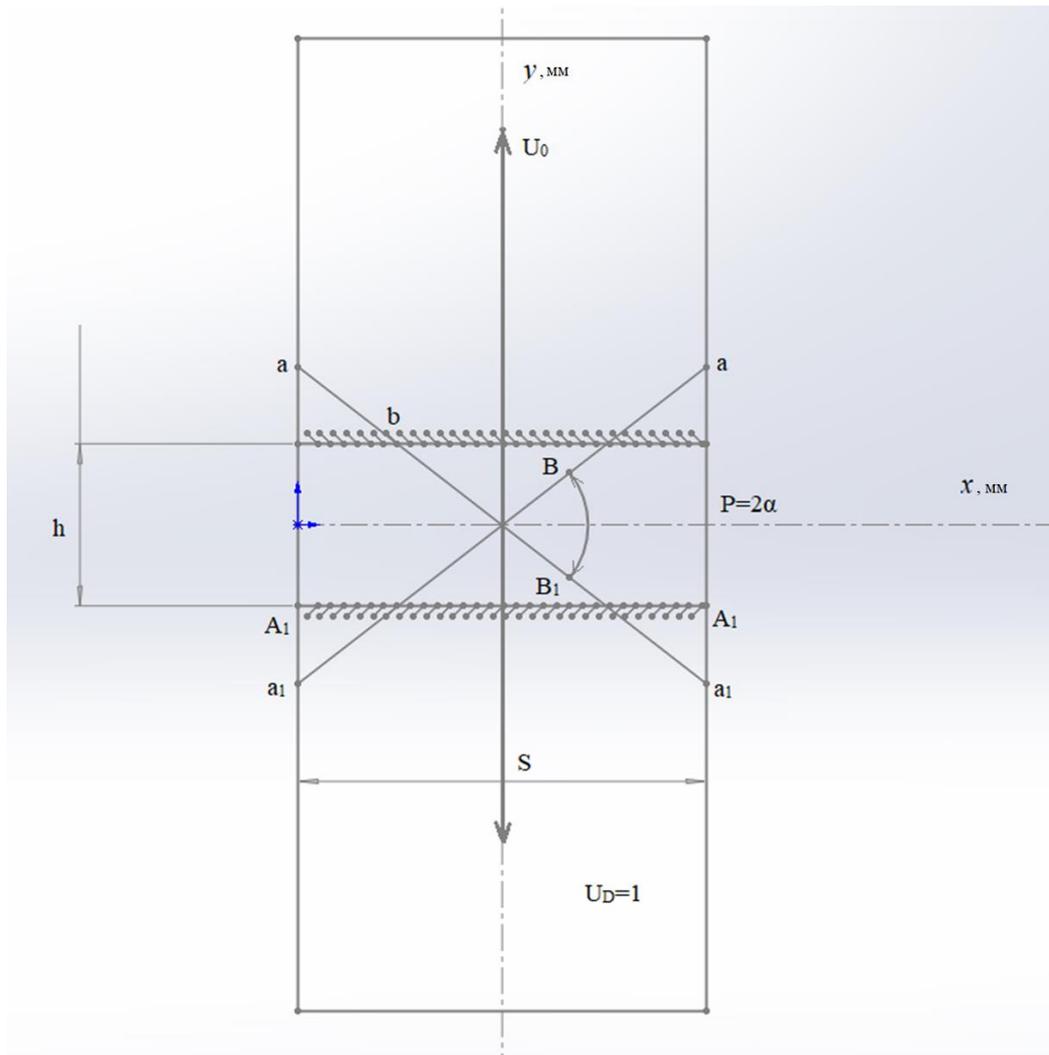


Рисунок 4 – Расчетная схема очага деформации сварного соединения с мягкой прослойкой при растяжении [2]

В работе Г.И. Ковальчука [75] рассматривается вопрос определения критических деформаций и напряжений, соответствующих моментам общей потери устойчивости пластического деформирования и локального пластического деформирования, на основании критерия Свифта – Марциньяка для тонкостенной цилиндрической оболочки, находящейся в условиях простого двухосного нагружения (внутреннее давление и осевая сила). На основании данной работы, а также имеющихся методов гипотезы о постоянстве касательных напряжений, линий скольжения и гипотезы Прандтля, а также с учетом решения краевой задачи в работе В.Л. Дильмана [54] рассмотрены усовершенствованные методы определения несущей способности для сварных соединений с механической неоднородностью и дефектами трещиноподобного типа. В работе рассмотрены разные случаи размещения трещиноподобного дефекта относительно зон механической неоднородности. Вместе с тем работа [54] носит фундаментальный и теоретический характер, и методика оценки работоспособности сварных соединений магистральных трубопроводов с трещиноподобным дефектом требует уточнения. В частности, важно оценить влияние криволинейной формы контактной границы между зонами механической неоднородности на напряженное состояние в области дефекта.

В работе С.Ф. Айметова [2] отмечается, что в случае изгибных напряжений, как и в случае с одноосным растяжением, решения для условной «однородной» пластины и для образца с механической неоднородностью существенно отличаются. При этом наличие поверхностного дефекта является более опасным случаем при изгибающих нагрузках, чем наличие внутреннего дефекта таких же размеров. Разница – в прочности между поверхностными и внутренними дефектами, находящимся в равных условиях изгибного нагружения отсутствием для поверхностных дефектов эффекта сдерживания перехода областей дефекта в пластическую зону деформаций. Похожий эффект «контактного упрочнения» реализуется при соседстве нескольких разных участков механически неоднородных сварных соединений. Сдерживание пластических деформаций обеспечивает отличную от однородного случая способность к сопротивлению

разным видам нагрузок. Также в работе С.Ф. Айметова [2] показано, что приравнивание расчетных случаев для однородного материала и материала, имеющего в своем составе механическую неоднородность, может привести к существенным погрешностям при любых формах нагружения. Пример оценки несущей способности, рассмотренный в работе [114], показывает несколько расчетных случаев с учетом и без учета вовлечения соседнего с плоскостным дефектом основного металла в пластическую деформацию. В работе [114] приведено обоснование условий перехода с применением линий скольжения участка к вязкому разрушению. При этом оценка проводилась с учетом двухосного напряженно-деформированного состояния (σ_x, σ_y) и степени механической неоднородности пластины K_M . Как показано на эпюре осевых компонент напряжений, при отсутствии вовлечения основного металла в пластическую деформацию обе компоненты напряжений, показанные в формуле (12), имеют большее значение по сравнению со значениями этих же компонент в условиях вовлечения основного металла в пластическую деформацию. Обоим случаям (Рисунок 5 а, б) может соответствовать определенная стадия деформации; таким образом, общая эпюра напряжений для прослоек с пониженной прочностью после вовлечения основного металла в пластическую деформацию должна претерпевать скачкообразное снижение, релаксацию напряжений.

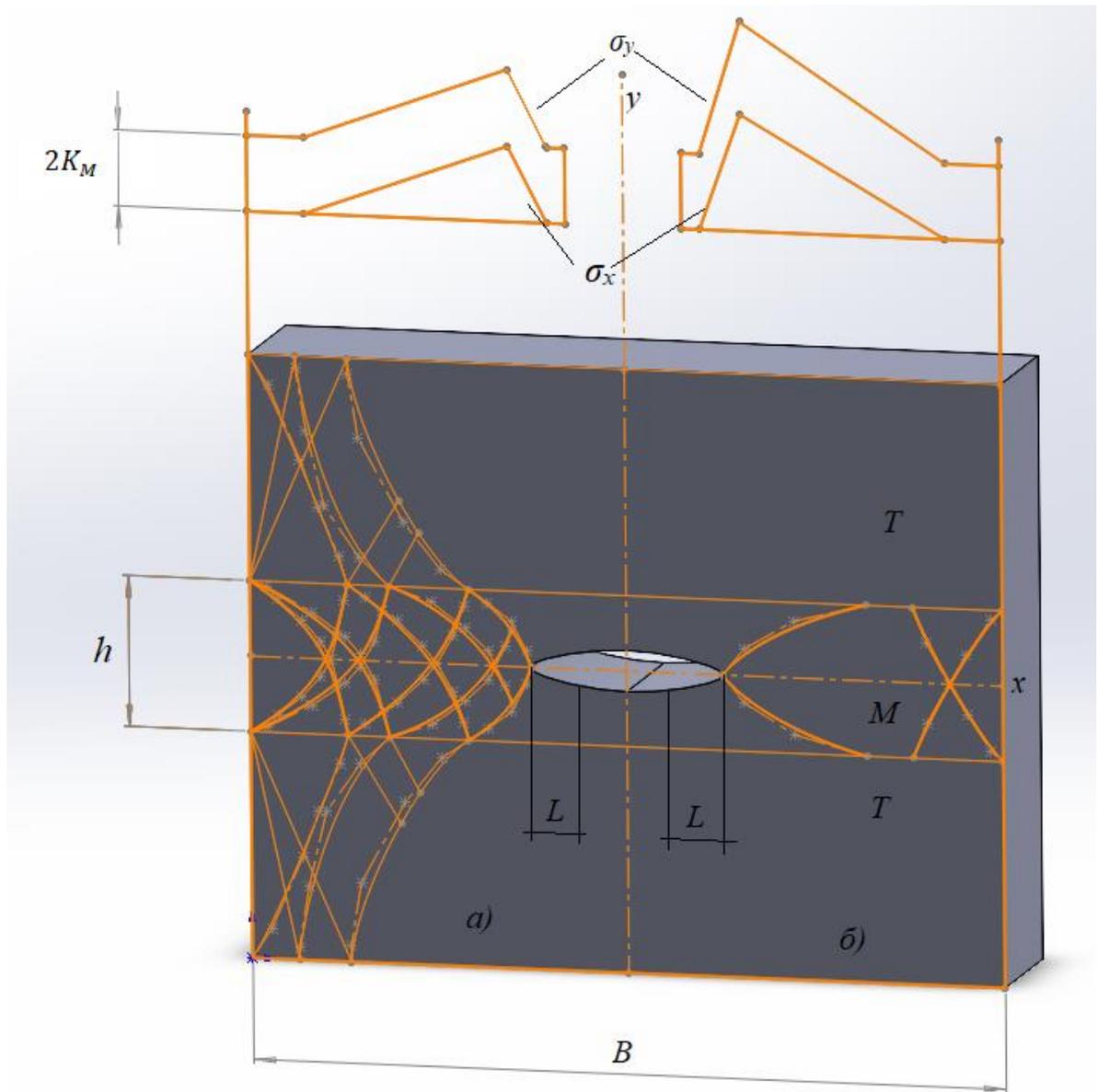


Рисунок 5 – Поле линий скольжения и эпюры напряжений (в плоскости дефекта для сварных соединений с центральным дефектом в мягкой прослойке с учетом (а) и без учета (б) вовлечения основного металла в пластическую деформацию

[114]

$$\sigma_{cp} \in \left[\frac{\sigma_x}{2K_M}, \frac{\sigma_y}{2K_M} \right]. \quad (12)$$

С учетом геометрии и расположения дефекта в центральной части прослойки с пониженной прочностью (отсутствуют краевые эффекты от

концентрации напряжений в вершинах дефекта) в работе [114] получено выражение для оценки средних предельных напряжений:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_B^M \left[\frac{1-l/B}{K_B} + \left(\frac{K_B-1}{K_B} \right) K'_{\chi} \right], \quad (13)$$

где K'_{χ} – коэффициент контактного упрочнения мягкой прослойки (шва) при наличии трещиноподобного дефекта в ее центральной части:

$$K'_{\chi} = \frac{1}{2} (1 - l/B) + \frac{(1-l/B)}{4\chi} + \frac{\chi}{4}. \quad (14)$$

Согласно (13) и (14) прочность сварных соединений с дефектом в центре мягкого шва изменяется в пределах от прочности однородных соединений из менее прочного металла с дефектом до прочности соединений из основного металла, определенной с учетом нетто-сечения в диапазоне относительных размеров мягкого шва $\chi_p \leq \chi \leq \chi_k$. Уровень влияния механической неоднородности на прочность в нетто-сечении при этом определяется линейно исходя из относительных размеров шва, дефекта и степени механической неоднородности.

Степень механической неоднородности определяется отношением предела текучести твердого материала (твердой прослойки, Т) и мягкого материала (мягкой прослойки, М). В выражении (14) $\chi_k = 1 - l/B$ – относительная толщина мягкой прослойки металла, начиная с которой в последнем проявляется эффект контактного упрочнения. Значение χ_p , соответствующее достижению равнопрочности мягкого материала с твердым (в частном случае сварного соединения и основного металла, отдельных зон сварного соединения и основного металла), определяется выражением:

$$\chi_p = \left[(2K_B + 1) - \sqrt{(2K_B + 1)^2 - 1} \right] (1 - l/B). \quad (15)$$

Аналогичное решение в [2] получено для дефекта с краевым расположением в мягкой прослойке. Однако для определения коэффициента контактного упрочнения ограничились случаем, когда основной металл не вовлекается в пластическую деформацию ($K_B > 4$). Соответствующие поля линий скольжения и эпюры напряжений представлены на Рисунке 6. Вместе с тем стоит отметить, что процесс вовлечения основного металла в пластическую деформацию практически неизбежно происходит при реализации механизма вязкого разрушения образца. Если рассматривать обратную ситуацию, когда происходит деформация твердой прослойки, окруженной более мягкими участками, то в таких случаях более вероятна реализация механизма хрупкого разрушения, тогда при определенных условиях деформация мягких участков может проходить в упругой зоне.

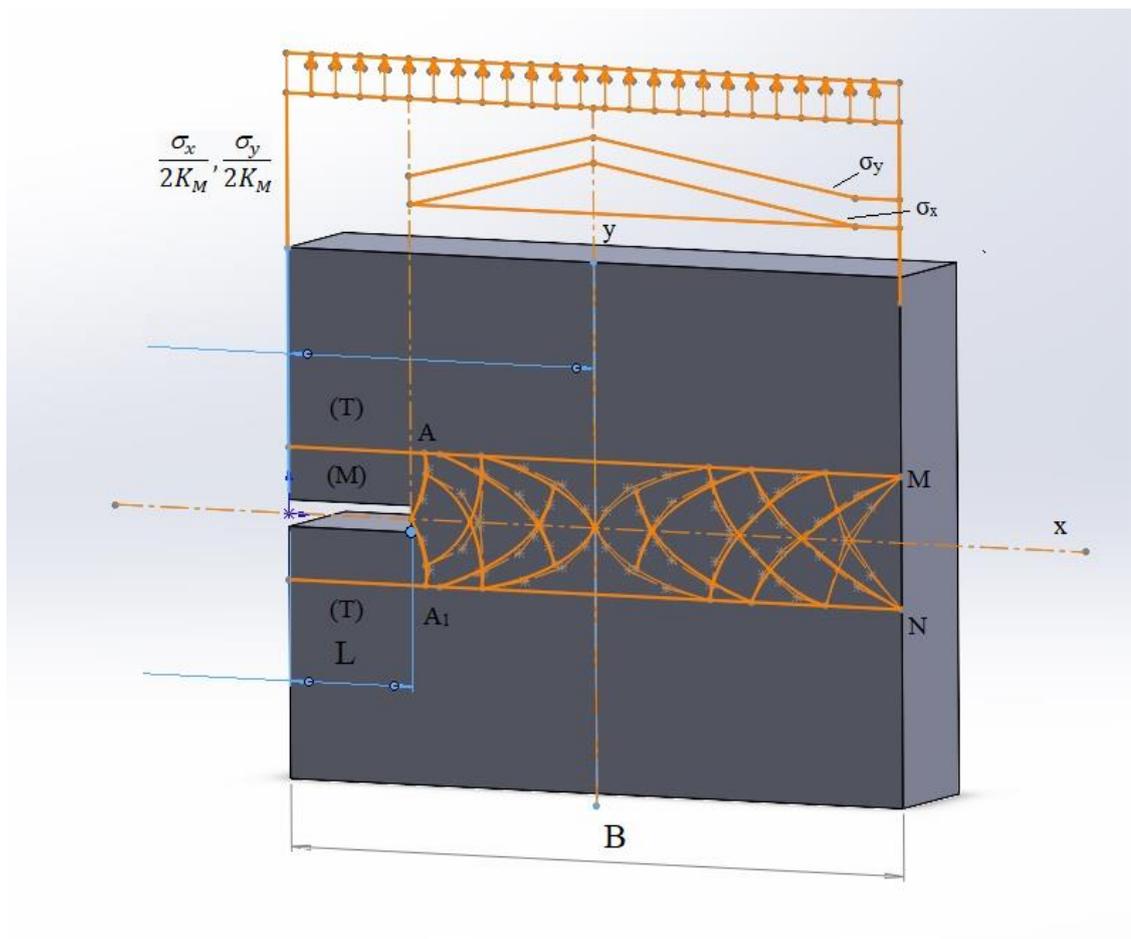


Рисунок 6 – Поля линий скольжения и эпюра напряжений (в плоскости дефекта) в сварных соединениях с односторонним дефектом в мягком шве [114]

Для оценки несущей способности соединений с краевым дефектом используется формула (14). Но при этом коэффициент контактного упрочнения прослойки K_{χ}^{l2} определяется из следующего выражения:

$$K_{\chi}^{l2} = K'_{\chi} + \psi_2(\chi, l/B). \quad (16)$$

Здесь $\psi_2(\chi, l/B)$ – поправочная функция на местоположение дефекта:

$$l/B \geq \chi/2; \psi_2(\chi, l/B) = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{l}{B}\right) - \frac{3}{16} \chi; \quad (17)$$

$$l/B < \chi/2; \psi_2(\chi, l/B) = \frac{1}{4\chi B} \left(2 - \frac{l}{B}\right) - \frac{l}{2B}. \quad (18)$$

Таким образом, неоднородность механических свойств разных зон сварного соединения может приводить к снижению максимально возможной прочности элемента со стыковым швом по сравнению с элементом из однородного металла, а степень такого снижения сложным образом зависит от ряда параметров. Кроме того, зоны механической неоднородности в условиях эксплуатационных нагрузок, которые испытывает магистральный трубопровод, могут оказывать существенное влияние на напряженное состояние участков сварных соединений с трещиноподобным дефектом. Оценка такого влияния применительно к сварным соединениям магистральных трубопроводов в предшествующих работах не встречалась.

В целом вопрос уточнения оценки прочности сварных соединений с механической неоднородностью имеет несколько направлений. Основы для решения задачи оценки несущей способности механически неоднородных сварных соединений закладываются при определении статической прочности. Несмотря на большое количество исследований по данной проблематике, для сварных соединений магистральных трубопроводов решение задачи оценки

влияния механической неоднородности является актуальным по следующим причинам:

– в проанализированных работах принципы расчета сварных соединений с механической неоднородностью на прочность не учитывают специфику создания стыковых сварных соединений магистральных трубопроводов и, соответственно, формы зон механической неоднородности.

– оценка влияния статических нагрузок на несущую способность участков сварных соединений с поверхностным трещиноподобным дефектом, учитывая форму зон механической неоднородности, требует уточнения.

Целесообразным выглядит проведение сравнения основных подходов к оценке бездефектного сварного соединения для выявления имеющихся закономерностей в построении математической модели и корреляции результатов с экспериментальными исследованиями. Для унификации требований и максимального приближения к условиям механической неоднородности сварных соединений магистральных трубопроводов в качестве начальных условий был выбран коэффициент механической неоднородности $K_B = 1,5$, а в качестве зависимой величины – критическое напряжение в ослабленной зоне, изменялся при этом относительный размер зоны механической неоднородности (Рисунок 7).

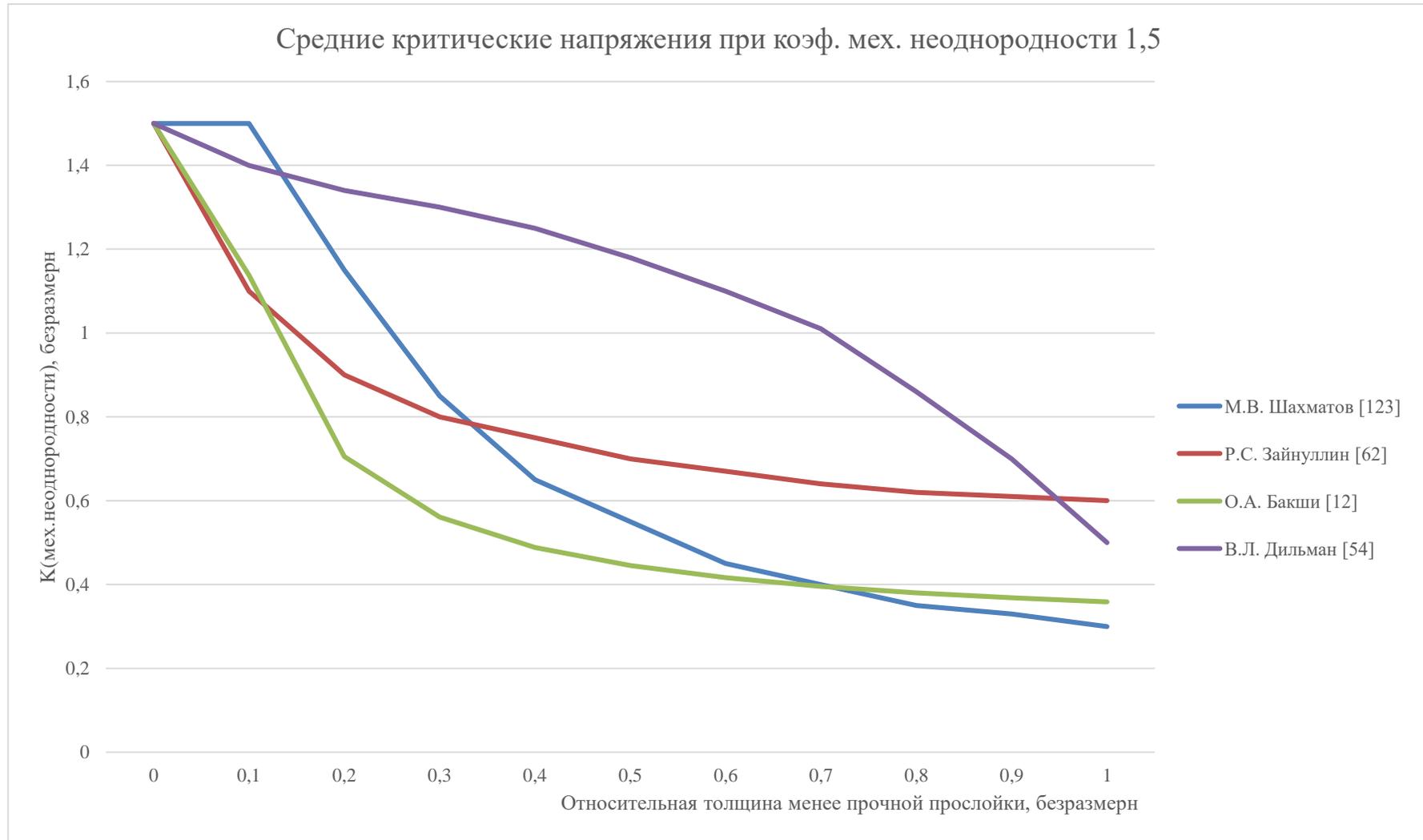


Рисунок 7 – Зависимость статической прочности бездефектных сварных соединений от степени механической неоднородности и относительной толщины мягкой прослойки согласно расчетным методикам

1.4 Выбор методов теоретического исследования. Основные условия и допущения

Разность сопротивления участков сварного соединения деформациям, определяемая механической неоднородностью, соответствующим образом сказывается на общих деформационных характеристиках участка трубопровода и требует учета.

Для анализа характеристик деформирования и разрушения ведется построение диаграмм деформирования, которые получаются на основе механических испытаний гладких образцов, образцов с концентраторами напряжений и образцов с трещинами.

1.5 Деформационные характеристики зон механической неоднородности

Процесс деформирования в целом можно разделить на стадии. Первая стадия определяется как стадия упругого деформирования, когда образец под действием растягивающей нагрузки деформируется упруго, то есть восстанавливает свою форму после снятия нагрузки. Вторая стадия, упругопластическая, когда образец под действием продолжающейся нарастание нагрузки деформируется, но после снятия нагрузки восстанавливает свою форму не полностью. Третья стадия, пластическая, когда образец при действии нарастающей нагрузки активно деформируется и после снятия нагрузки не возвращает свою первоначальную форму. Завершением пластической стадии являются потеря устойчивости пластического деформирования, образование шейки и разрыв.

В предыдущем разделе отмечалось, что зоны механической неоднородности вступают в стадию пластического деформирования не одновременно. Диаграмма деформирования механически неоднородного сварного соединения укрупненно будет учитывать влияние всех эффектов сдерживания пластических деформаций более прочными зонами, эффектов деформационного упрочнения, общей потери

устойчивости пластического деформирования. Наступления упругопластических и пластических деформаций локально на ослабленных участках сварного соединения ввиду разности их механических свойств являются основой для определения несущей способности механически неоднородных сварных соединений. На проверке данных условий построены основные зависимости, касающиеся прочности сварных соединений с механической неоднородностью, показанные в разделе 1.3.

Наличие в сварных соединениях трубопроводов зон механической неоднородности определяет неоднородное и неоднородное напряженное состояние. Кроме того, разное сопротивление зон механической неоднородности эксплуатационным усилиям приводит, как отмечалось выше, к локализации напряжений и деформаций. В присутствии концентраторов напряжений, таких как, например, трещиноподобные дефекты, на участке сварного соединения, находящегося в целом в упругой зоне, происходит локализация упругопластических деформаций, которые могут быть описаны через соответствующие коэффициенты концентрации напряжений.

Анализ упругих напряженных состояний в зонах концентрации проводился в большом количестве фундаментальных работ по решению краевых задач теории упругости (Н.И. Мусхелишвили, Г.Н. Савин, Г. Нейбер, Р. Петерсон и др.) [88]. Результаты приведенных работ позволили определить подходы к определению теоретических коэффициентов концентраций и градиентов напряжений. Использование теоретических коэффициентов концентрации в приложении к трещиноподобным концентраторам в механически неоднородных сварных соединениях позволит связать результаты, полученные аналитически и численно для локальных зон упругопластических деформаций, с методом определения прочности участков сварных соединений с дефектом, описанном ранее [88]. Существенной является зависимость теоретического коэффициента концентрации от геометрии концентратора, способа нагружения и размеров зон концентрации. Зоны концентрации при этом определяются взаимным влиянием зон механической неоднородности. Установив связь геометрии зон механической

неоднородности с размерами зон концентрации напряжений, становится возможным определение через соответствующий коэффициент уровня максимальной местной нагруженности и определение прочности по деформационным критериям.

Локальные упругопластические деформации и напряжения в областях концентрации являются причиной изменения тензора напряжений и, соответственно, значений коэффициентов концентрации напряжений. Направления и количественные значения изменения тензора напряжений находятся в прямой зависимости от сопротивления отдельных участков сварного соединения деформациям согласно формам и свойствам зон механической неоднородности. Наиболее сложными для определения в областях концентрации напряжений остаются краевые или граничные эффекты при переходе из стадий упругого в упругопластическое и пластическое деформирование. Согласно [88] приближенные решения таких нелинейных задач в областях концентрации напряжений могут быть найдены при помощи теории пластичности, в том числе при помощи переменных модулей упругости, методов упругих решений. В последнее время также получили развитие численные методы решений, в том числе метод конечных элементов, разностные и вариационные методы. Одновременно с аналитическими методами развивались и экспериментальные, в том числе методы муаровых полос, тензометрии, голографии, оптической и лазерной интерферометрии. При этом многие перечисленные методы должны быть использованы для решения каждого частного случая локализации пластической деформации, то есть не являются универсальными, как отмечается в [88]. Выявленные приближенные принципы перераспределения локальных напряжений и деформаций, в частности, в сварном соединении на основе сочетания как аналитических, так и численных и экспериментальных методов решения привели к выводу соответствующих зависимостей, которые могут быть использованы в инженерных расчетах. При этом, как отмечалось ранее, инженерные расчеты прочности сварных соединений магистральных трубопроводов с дефектом, использующиеся на практике, не учитывают

перераспределения коэффициентов концентрации напряжений в сварном соединении вследствие механической неоднородности, однако в практике эксплуатации регулярно регистрируются случаи дифференцированного восприятия дефектами в области влияния сварного соединения эксплуатационных нагрузок. Учет форм и свойств механической неоднородности, а также подходов к приближенному пересчету коэффициентов концентрации позволит разработать детерминированный метод учета влияния механической неоднородности на прочность участков сварных соединений с дефектами.

Наиболее распространенным методом расчета максимальных местных напряжений и деформаций стал расчет по формуле Нейбера [88]. Данная формула позволяет определить коэффициенты концентрации напряжений и деформаций в упругопластической области по известным значениям коэффициента концентрации напряжений в упругой области. Для конкретных случаев при оценке зон механической неоднородности коэффициенты концентрации в упругой области могут быть получены экспериментальным путем из анализа диаграммы деформирования по отношению напряжений и деформаций в упругой зоне образцов с дефектом к напряжениям и деформациям бездефектного образца. Значение теоретического коэффициента концентрации будет получено путем возвращения квадратного корня из произведения коэффициентов концентрации напряжений и деформаций в упругой зоне.

Максимальные значения интенсивности местных упругопластических деформаций и напряжений для концентраторов напряжений в зонах механической неоднородности будут зависеть от соответствующих коэффициентов концентрации:

$$\bar{\epsilon}_{\max k} = \bar{\epsilon}_n K_e; \bar{\sigma}_{\max k} = \bar{\sigma}_n K_e, \quad (19)$$

где $\bar{\epsilon}_n$ и $\bar{\sigma}_n$ – интенсивность номинальных деформаций и напряжений, определяемая в относительных величинах как отношение номинальных значений

напряжений и деформаций в бездефектном сварном соединении к пределу текучести наиболее ослабленной зоны механической неоднородности.

В соответствии с зависимостью Нейбера далее определяются коэффициенты концентрации напряжений и деформаций, и на основе линейной или степенной аппроксимации диаграммы деформирования бездефектного образца механически неоднородного сварного соединения вычисляются количественные показатели указанных коэффициентов.

При степенной аппроксимации:

$$\begin{aligned}
 K_e &= \frac{\alpha_\sigma^{2/(1+m)} \bar{\sigma}^{(1-m)/(1+m)}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_H)^{n(1-m)[1-(\bar{\sigma}_H-1/\alpha_\sigma)]/(1+m)}}; \\
 K_e &= \frac{\alpha_\sigma^{2/(1+m)}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_H)^{n(1-m)[1-(\bar{\sigma}_H-1/\alpha_\sigma)]/(1+m)}}; \\
 K_\sigma &= \frac{\alpha_\sigma^{2m/(1+m)}}{\bar{\sigma}_H^{(1-m)/(1+m)} (\alpha_\sigma \bar{\sigma}_H)^{n(1-m)[1-(\bar{\sigma}_H-1/\alpha_\sigma)]/(1+m)}}; \\
 K_\sigma &= \frac{\alpha_\sigma^{2m/(1+m)}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_H)^{n(1-m)[1-(\bar{\sigma}_H-1/\alpha_\sigma)]/(1+m)}};
 \end{aligned} \tag{20}$$

При линейной аппроксимации:

$$\begin{aligned}
 K_e &= \sqrt{\frac{\alpha_\sigma^2}{\bar{E}_T (\alpha_\sigma \bar{\sigma}_H)^{n(1-\bar{E}_T)[1-(\bar{\sigma}_H-1/\alpha_\sigma)]}} + \frac{(1-\bar{E}_T)^2}{4\bar{E}_T^2 \bar{\sigma}_H^2} - \frac{1-\bar{E}_T}{2\bar{E}_T \bar{\sigma}_H}}; \\
 K_e &= \sqrt{\frac{\alpha_\sigma^2 \bar{\sigma}_H}{\bar{E}_T \bar{e}_H (\alpha_\sigma \bar{\sigma}_H)^{n(1-\bar{E}_T)[1-(\bar{\sigma}_H-1/\alpha_\sigma)]}} + \frac{(1-\bar{E}_T)^2}{4\bar{E}_T^2 \bar{\sigma}_H^2} - \frac{1-\bar{E}_T}{2\bar{E}_T \bar{e}_H}}; \\
 K_\sigma &= \sqrt{\frac{\alpha_\sigma^2 \bar{\sigma}_T}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_H)^{n(1-\bar{E}_T)[1-(\bar{\sigma}_H-1/\alpha_\sigma)]}} + \frac{(1-\bar{E}_T)^2}{4\bar{\sigma}_H^2} - \frac{1-\bar{E}_T}{2\bar{\sigma}_H}}; \\
 K_\sigma &= \sqrt{\frac{\alpha_\sigma^2 \bar{E}_T \bar{e}_H}{\bar{\sigma}_H (\alpha_\sigma \bar{\sigma}_H)^{n(1-\bar{E}_T)[1-(\bar{\sigma}_H-1/\alpha_\sigma)]}} + \frac{(1-\bar{E}_T)^2}{4\bar{\sigma}_H^2} + \frac{1-\bar{E}_T}{2\bar{\sigma}_H}}.
 \end{aligned} \tag{21}$$

Количественные показатели коэффициентов концентрации получены по результатам обработки диаграмм деформирования экспериментальных образцов по результатам испытаний на растяжение.

1.6 Выводы по главе 1

1. Выполнен обзор нормативных требований к расчету прочности магистральных трубопроводов при проектировании. Выявлено, что принятые методики не учитывают ряд особенностей сварных соединений, которые могут оказать влияние на оценку прочности и долговечности участка. В числе важнейших факторов, влияющих на общую прочность сварного соединения, необходимо учитывать механическую неоднородность сварного соединения.

2. Установлено, что формула для расчетного сопротивления трубопровода растягивающим усилиям не учитывает неоднородность сварного соединения и, соответственно, разную сопротивляемость отдельных участков сварного соединения. При расчете участков трубопровода на прочность и долговечность с дефектом используются усовершенствованные критерии по двум группам предельных состояний, однако неоднородность сварных соединений при этом не дифференцируется, а влияние зон механической неоднородности на указанные дефекты не рассчитывается.

3. Проведен обзор исследований, показывающих взаимосвязь термомодеформационного цикла сварки с неоднородностью механических свойств сварных соединений, выполненных из низколегированных сталей. Механизм образования неоднородности сварных соединений является основанием для отнесения абсолютного большинства сварных соединений к механически неоднородным и для исследования влияния особенностей сопротивляемости зон механической неоднородности эксплуатационным нагрузкам.

4. Рассмотрены параметры аналитического учета и математические модели работы сварных соединений, имеющих упрощенные формы механической неоднородности. При этом более сложные формы и механизмы влияния отдельных зон механической неоднородности должны быть в дальнейшем исследованы и учтены в соответствующих методиках.

5. Рассмотрены механизмы учета ослабляющего действия зон механической неоднородности на прочность сварного соединения через параметры и условия перехода к локальным упругопластическим деформациям. Основными параметрами являются коэффициенты концентрации напряжений и деформаций, позволяющие определить максимальные значения локальных напряжений и деформаций. Кроме того, полученные значения коэффициентов концентрации позволяют осуществить оценку напряженно-деформированного состояния в зонах механической неоднородности через построение соответствующей численной модели для бездефектного случая и случаев с поверхностным трещиноподобным дефектом в качестве концентратора напряжений, а также на основе экспериментальной проверки концентрации напряжений от поверхностного трещиноподобного дефекта в разных зонах механической неоднородности.

1.7 Цели и задачи исследования

Результаты анализа нормативных требований к сварным соединениям трубопроводов показали, что ослабление конструкции линейной части трубопровода в местах сварки монтажных стыков не учитывается при проектировании, а цели надежной эксплуатации достигаются применением коэффициентов запаса, снижающих предельное сопротивление практически в 2 раза. Нормативные требования при расчете эксплуатируемых участков трубопровода на прочность при этом учитывают влияние сварного соединения на прочность через деформационные критерии, однако не дифференцируют участки сварного соединения по степени ослабления.

Анализ существующих исследований в области оценки влияния механической неоднородности показал, что напряженное состояние под действием статических нагрузок для стыковых сварных соединений с зонами механической неоднородности изучен довольно полно. Однако следует отметить, что непосредственного приложения разработанной методической базы к сварным

соединениям магистральных трубопроводов не проводилось, а реальная форма механической неоднородности в подобных соединениях подробно не исследовалась.

Таким образом, основной **целью** исследования является разработка расчетной методики оценки прочности сварных соединений магистральных трубопроводов с учетом механической неоднородности при статических нагрузках.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

- оценить степень и форму механической неоднородности сварных соединений магистральных трубопроводов на основе большой выборки экспериментальных данных. Обосновать связь показаний твердости и механических характеристик участков сварного соединения;

- разработать и обосновать параметр, учитывающий криволинейную форму зон механической неоднородности, для существующей методики оценки напряженного состояния участков сварного соединения с применением гипотезы о постоянстве касательных напряжений, гипотезы Прандтля, линий скольжения и учета краевых эффектов на свободной поверхности. Проанализировать результаты расчета для соответствующих способов сварки сварных соединений магистральных трубопроводов;

- провести экспериментальную проверку расчетного сопротивления сварных соединений, полученного в соответствии с расчетной оценкой по усовершенствованной модели. Выполнить оценку снижения несущей способности для поверхностных трещиноподобных дефектов, расположенных в разных зонах механической неоднородности;

- разработать параметр учета концентрации напряжений в вершине трещиноподобных дефектов, расположенных в разных зонах механической неоднородности. Предложить порядок учета указанного параметра в методике определения прочности участков сварных соединений с дефектами.

ГЛАВА 2. МЕХАНИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

2.1 Оценка влияния распределения механических характеристик сварного соединения на параметры твердости в разных зонах

Под твердостью понимается способность металла сопротивляться проникновению через внешнюю поверхность. Испытания на твердость являются разновидностью механических испытаний. При этом в результате постепенного увеличения нагрузки на индентор металл ведет себя так же, как и при любом другом виде механических испытаний, и в общем случае претерпевает последовательно три стадии: упругую, пластическую и разрушение. В зависимости от того, в какой области происходит вдавливание, можно определять механические характеристики сопротивления упругому или пластическому деформированию.

Возможность определения механических свойств по измерению твердости впервые была показана И. Бринеллем. Последующие многочисленные экспериментальные исследования Н.А. Минкевича, Н.Н. Давиденкова, Н.С. Курнакова, Л.А. Гликмана, И.Ф. Кантемирова и др. прямо или косвенно подтвердили это.

Поведение металлов под воздействием внешних нагрузок наиболее полно характеризует диаграмма зависимости между деформацией и напряжением. Диаграмма растяжения, устанавливающая связь между напряжением и удлинением при одноосном растяжении, широко используется при расчетах на прочность. Современные научные знания о твердости металлов позволяют построить диаграмму твердости также и при других видах нагружения.

При построении диаграммы твердости в упругой области важным является вопрос о методике измерения фактических размеров площадки контакта

сжимаемых тел под нагрузкой. Ключевым фактором является стабильность результатов, наиболее точно отражающих действительные параметры контакта тел.

Существующие способы оценки площадки контакта со сферическим индентором:

– способ уровня: о диаметре невозстановленного отпечатка после снятия нагрузки судят по нарушенному слою сажи, масла, краски и т.д., предварительно нанесенному на контактируемые поверхности;

– способ силуэта: использование оптического микроскопа, при совмещении оптической оси объектива с плоскостью испытуемого образца. Диаметр контакта оценивают по величине хорды;

– способ прозрачных инденторов (прямой способ): способ возможен при использовании прозрачного индентора при измерении деформации при нагрузке с помощью окулярного микроскопа.

В развитие теории связи твердости и механических свойств М.П. Марковцом в работе [87] разработан способ оценки количественной корреляции между твердостью металла и пределом текучести. Предложенный способ основан на оценке усилия вдавливания сферического индентора, которое необходимо для получения остаточных деформаций на уровне 0,2 % (условный предел текучести). Оценка размеров остаточной деформации лунки может быть выполнена согласно следующей зависимости:

$$\psi_H = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \right] = \frac{t}{D}, \quad (22)$$

где d и D – диаметр отпечатка и шарика, t – глубина невозстановленной лунки. Автор показал, что общая деформация в лунке $\psi = 0,2\%$ достигается при отношении $d/D = 0,09$.

Таким образом, твердость $H_{0,2}$ металла, в который вдавливаются сферический индентор, определяется по усилию, которое необходимо для

достижения остаточного размера лунки, равного 9 % от диаметра шарика. Если принять диаметр индентора равным 10 мм, размер невосстановленной лунки должен составлять 0,9 мм. При этом значение твердости определится как нагрузка, необходимая для образования остаточной лунки площадью 0,636 мм², поделенная на данную площадь:

$$H_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{0,636}. \quad (23)$$

Исходя из полученных в описанной методике выражений, можно сделать вывод о прямой связи твердости и предела текучести, при этом коэффициент пропорциональности будет характеризовать свойства металла, показывающие его восприятие нагрузки вдавливанием. Безусловно, использование данной методики также связано с масштабным фактором, суть которого заключается в снижении достоверности результатов оценки предела текучести элемента с увеличением размера элемента. Вместе с тем миллиметровый масштаб задачи по определению механических свойств зон сварных соединений позволяет говорить о достаточной достоверности результатов, показывающих связь твердости с пределом текучести, а также относительную разницу между соседними зонами механической неоднородности, которая общепотребительно называется степенью механической неоднородности. В общем случае такая связь выразится:

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{0,2} = b \cdot H_{0,2} = b \cdot HB, \quad (24)$$

где b – коэффициент, который учитывает взаимосвязь НДС на пределе текучести при растяжении с НДС при вдавливании.

Полученная общая зависимость (24) должна быть уточнена для типов стали, что связано с соотношением между упругой и остаточной деформацией в отпечатке индентора. В [87] показано, что для мягких металлов ($\sigma_{0,2} < 500$ МПа) коэффициент $b < 0,333$, тогда как для более твердых металлов ($\sigma_{0,2} > 500$ МПа) $b > 0,333$. Особенно заметное изменение коэффициента с наблюдается в металлах

с пределом текучести больше 700 МПа. Исследуемая группа низколегированных феррито-перлитных сталей, применяющихся для трубопроводов, в большей степени относится к группе мягких металлов, таким образом, коэффициент пропорциональности должен учитывать свойства данных металлов.

А.Ю. Ишлинский [67], используя условия полной пластичности (два главных напряжения равны, гипотеза Хаара – Кармана), при осесимметричной задаче о давлении шара на идеальную пластическую среду (с плоской границей) и в предположении, что сила трения в зоне контакта среды и шара отсутствует, получил систему дифференциальных уравнений, допускающих численное интегрирование вдоль линий скольжения. Решая полученную систему уравнений графическим способом, получил следующее соотношение между пределом текучести и твердости по Бринеллю:

$$\sigma_{\tau} = 0,383HB. \quad (25)$$

Однако такая постановка задачи не учитывает сил трения и использует допущение о наступлении 8%-й деформации, что для конструкционных углеродистых и легированных перлитных сталей говорит о достижении предела временному сопротивлению (S_B).

В работах М.П. Марковца выполнены экспериментальные исследования, учитывающие связь S_B и σ_B :

$$S_B = \frac{\sigma_B}{1-\varphi}; \quad \varphi = 8 \%. \quad (26)$$

Таким образом:

$$\sigma_B = 0,383 * 0,96 * HB = 0,352HB, \quad (27)$$

что хорошо согласуется с экспериментами, представленными в работах Марковца.

Напряжение в лунке и при растяжении следует сопоставлять при одинаковых по величине деформациях. Время выдержки под нагрузкой и скорость нагружения при вдавливании шара влияют на НВ.

Широкое распространение характеристика твердости по Бринеллю получила для конструкционных углеродистых и легированных сталей. Это связано с тем, что для этих сталей НВ практически совпадает с H_{\max} . Соответственно характеристика твердости, в зависимости от того, на какой стадии деформации производится измерение, имеет самостоятельный физический смысл. Дальнейшие исследования в данной области показали высокую степень корреляции параметров всех типов измерений твердости и, соответственно, их согласование со значениями пределов прочности и текучести материалов.

Связь показаний твердости по Виккерсу с механическими характеристиками зон механической неоднородности

Использование корреляционной связи между показаниями твердости и механическими характеристиками зон механической неоднородности является одним из наиболее практически осуществимых способов определения распределения механических характеристик по сварным соединениям магистральных трубопроводов.

Вместе с тем использование метода измерения твердости по Бринеллю имеет ограничение в части обеспечения кучности измерений на сравнительно небольших масштабах макрошлифа сварного соединения. Поэтому для определения твердости применяется метод Виккерса. Технический процесс измерения твердости по Виккерсу состоит во вдавливании в исследуемую поверхность макрошлифа алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды под действием статической нагрузки. Результат измерения твердости по Виккерсу заключается в нахождении частного от деления нагрузки на площадь боковой поверхности отпечатка.

2.2 Оценка структуры зон механической неоднородности сварных соединений магистральных трубопроводов по данным твердометрии макрошлифа

Условия термомеханического цикла сварки приводят к образованию в локальных областях сварного соединения зон механической, структурной и химической неоднородности. При этом указанные зоны, в основном совпадающие по своим размерам при учете в разных классификационных группах (структурная, механическая, химическая неоднородность), определяют сопротивляемость сварного соединения и локализацию зон концентрации напряжений [30]. Как отмечалось в анализе предыдущих исследований, разные по своим механическим свойствам участки разделяются на условно мягкие (М) и условно твердые (Т).

Классическое представление о неоднородности сварных соединений представлено на Рисунке 8.

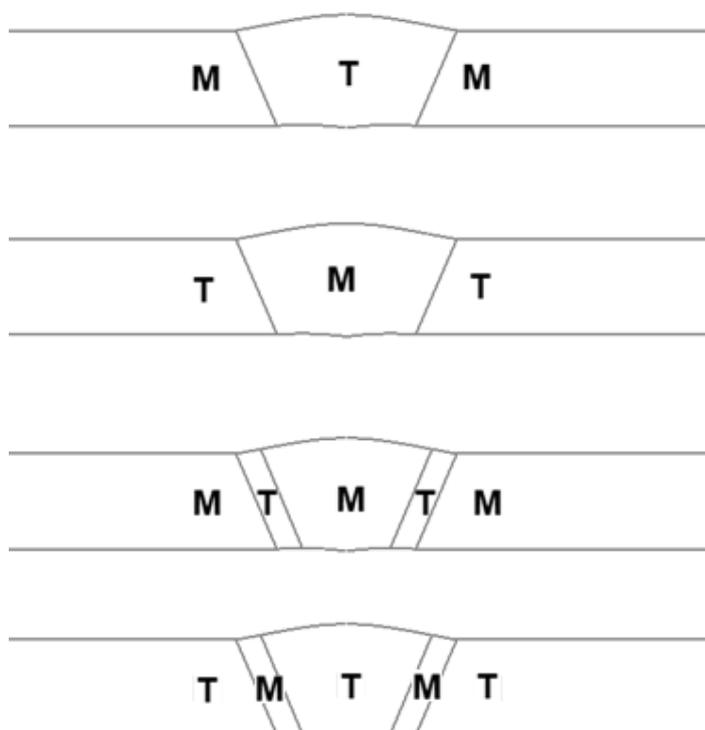


Рисунок 8 – Унифицированные формы механической неоднородности в сварных соединениях низколегированных сталей

Для определения твердости металла шва, ЗТВ, ЛС и основного металла испытания проводились по ГОСТ 2999 (определение твердости по Виккерсу, нагрузка 10 кг). Форма образцов и схема измерения твердости приведена на Рисунке 9.

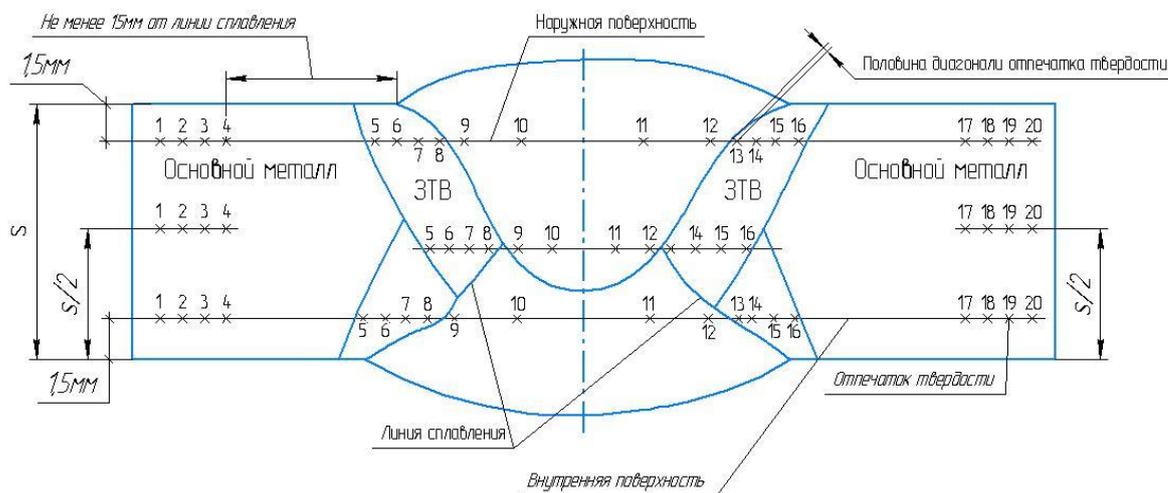


Рисунок 9 – Схема контроля твердости на образцах кольцевых сварных соединений

При изготовлении образца и при подготовке его поверхности приняты меры, предотвращающие возможность изменения свойств металла из-за нагрева или наклепа. Поверхность испытуемого образца имеет шероховатость не более 0,16 мкм по ГОСТ 2789-73. При измерении твердости обеспечена перпендикулярность приложения действующего усилия к испытуемой поверхности.

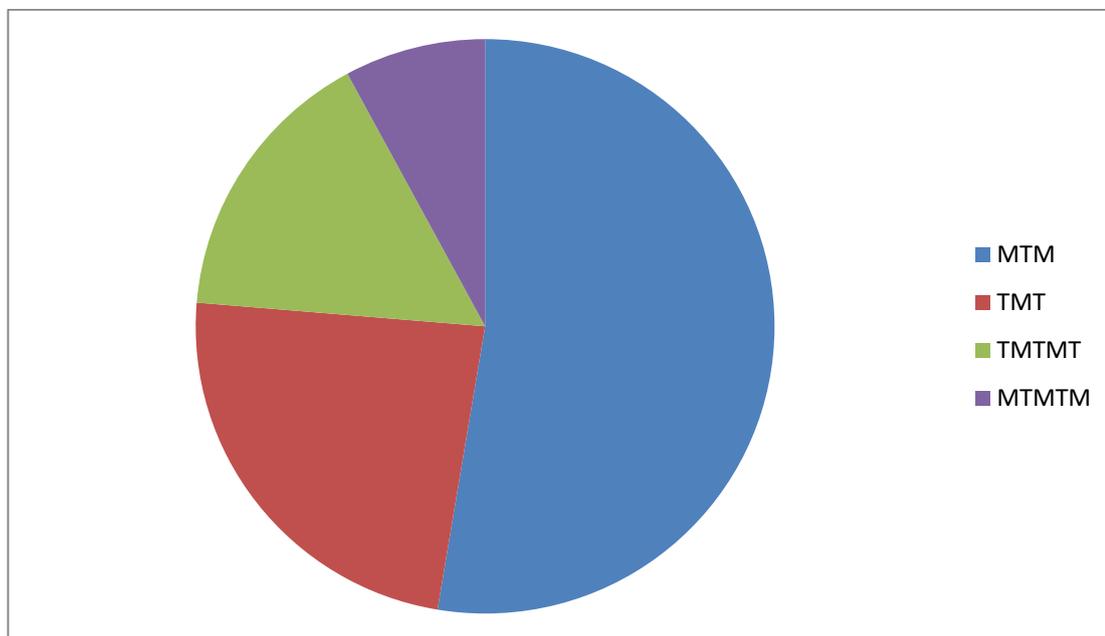
Для оценки механических характеристик сварных соединений были проанализированы результаты замеров твердости по образцам кольцевых и продольных сварных соединений магистральных трубопроводов (Рисунок 9).

Общее количество образцов для испытаний составило 150 шт. При этом доля стыков с заметной механической неоднородностью составила 97 %.

Механическая неоднородность в кольцевых сварных соединениях трубопроводов

Распределение доли схем приведено на Рисунке 10.

Примечательным результатом является значительное превышение твердости шва для режима сварки АПГ схема МТМ для всех образцов.



а) I тун, б) II тун, в) III тун г) IV тун

Рисунок 10 – Круговая диаграмма

Измерения твердости производились для образцов, изготовленных с применением следующих технологий сварки:

- ручная дуговая сварка покрытым электродом с основным покрытием всех слоев сварного шва (РД);

- ручная дуговая сварка покрытым электродом с основным покрытием корневого слоя шва, механизированная сварка самозащитной проволокой (МПС) для остальных слоев;

- механизированная сварка корневого слоя шва проволокой сплошного сечения, автоматическая сварка порошковой проволокой в среде защитных газов и смесях остальных слоев шва (МП + АППГ);

- автоматическая сварка проволокой сплошного сечения в защитных газах всех слоев шва (АППГ);

– автоматическая сварка под флюсом (АФ) для продольных сварных соединений.

Все отмеченные способы сварки являются наиболее часто применяемыми при выполнении сварки кольцевых и продольных соединений магистральных трубопроводов.

Результаты измерений твердости для образцов, изготовленных ручной дуговой сваркой, представлены на диаграмме (Рисунок 11).

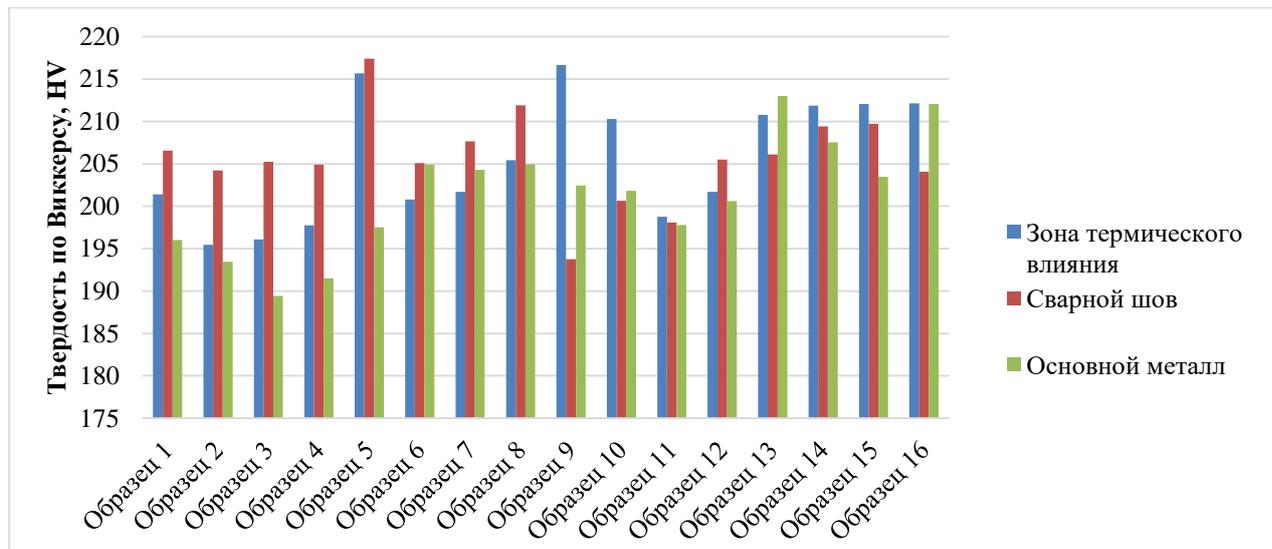


Рисунок 11 – Результаты измерений твердости образцов по зонам сварного соединения, полученного методом ручной дуговой сварки

Ручная дуговая сварка плавящимся электродом является самым распространенным методом соединения металлов ввиду своей простоты, универсальности и экономичности. Для выполнения сварных соединений с использованием ручной дуговой сварки не требуется дополнительная защита сварочной зоны с помощью газа или флюса, поскольку с этой задачей справляется электрод. Еще одно преимущество данного метода сварки – возможность работать практически в любых условиях с обеспечением удовлетворительного качества сварных соединений.

Для ручной дуговой сварки характерны значительные тепловложения и высокий градиент температур.

Электрод нагревают два источника тепла: сварочная дуга, вводящая тепло через пятно нагрева на торце электрода, и тепло, выделяемое электрическим током, протекающим по электродному стержню, в соответствии с законом Джоуля – Ленца. Электрод расплавляется главным образом под действием сварочной дуги.

Практика ручной дуговой сварки показывает, что к концу плавления электрода температура стержня его не должна превышать 600–650 °С.

Характерным для РДС является значительная степень неоднородности механических характеристик.

Результаты АППГ представлены на диаграмме (Рисунок 12).

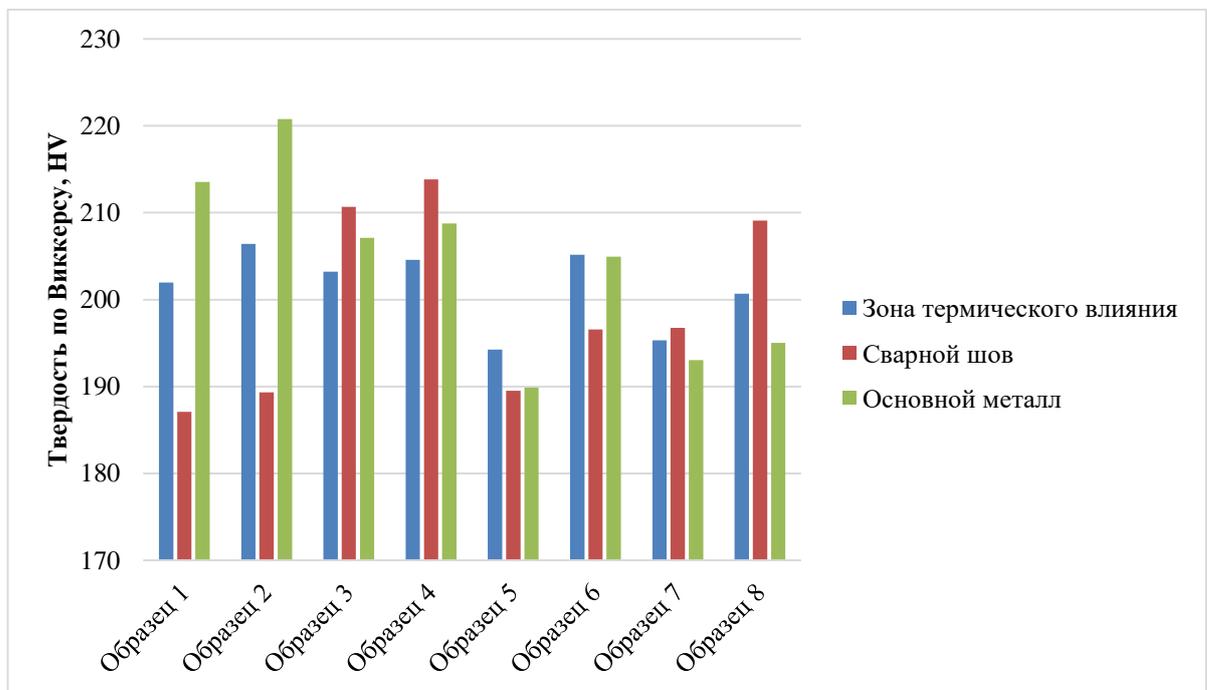


Рисунок 12 – Результаты измерений твердости образцов по зонам сварного соединения, полученного методом автоматической сварки порошковой проволокой

Сварка порошковой проволокой – один из способов механизированной дуговой сварки плавлением, когда в качестве электродного материала применяется проволока трубчатой или более сложной конструкции с порошкообразным наполнителем (сердечником).

Сердечник состоит из смеси материалов – руд, ферросплавов, металлических порошков и других материалов, обеспечивающих защиту расплавленного металла от воздуха, раскисление и легирование металла, стабилизацию дугового разряда и т.д. Плавление присадочного материала с открытой дугой приводит к интенсификации процесса окисления и образования различных технологических дефектов сварки. Исключение данных процессов осуществляется за счет добавок элементов, более активно вступающих в реакцию с кислородом, в том числе алюминия, титана, циркония. При помощи данных легирующих элементов молекулярные кислород, азот и сера связываются в стойкие неметаллические соединения, позволяющие улучшить свойства сварного соединения по прочности и пластичности. Добавление легирующих элементов также является фактором, приводящим к разности свойств отдельных зон сварного соединения, что, в свою очередь, приводит к разности их сопротивления эксплуатационным нагрузкам.

Результаты измерения твердости для АПГ представлены на диаграмме (Рисунок 13).

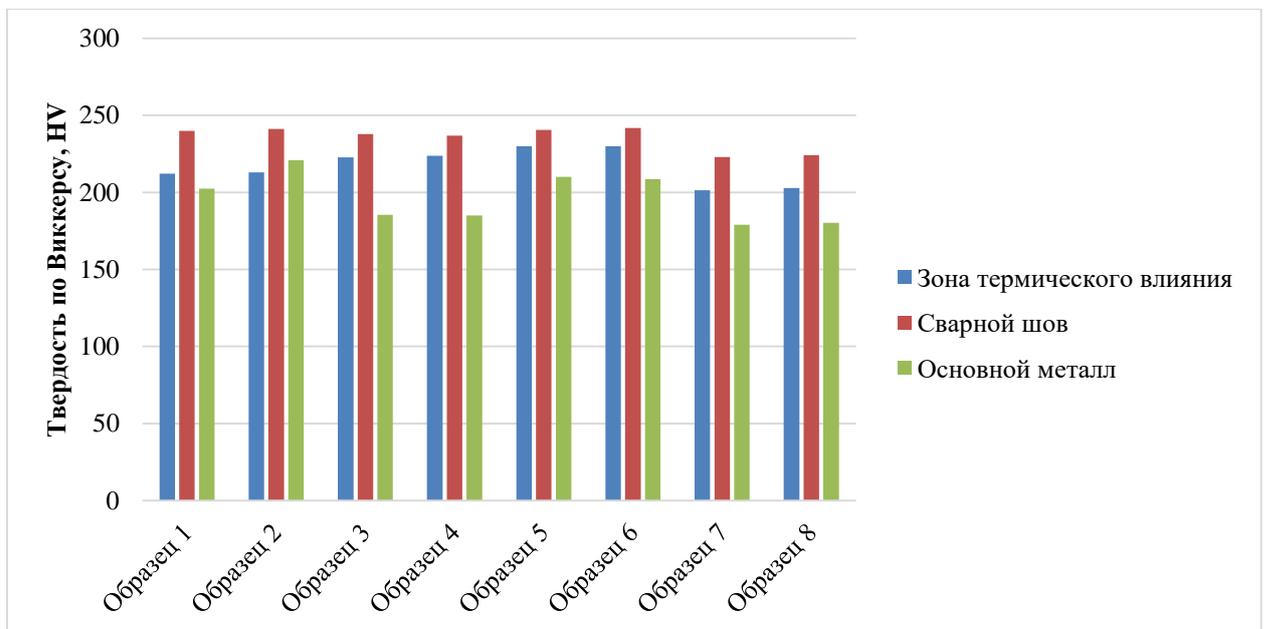


Рисунок 13 – Результаты измерений твердости образцов по зонам сварного соединения, полученного методом автоматической сварки в среде защитных газов

К преимуществам сварки в защитных газах можно отнести возможность визуального контроля сварочного процесса, высокий уровень качества свариваемых изделий. Кроме того, в отличие от флюса сварка в среде защитных газов может производиться в разных пространственных положениях, а также применение защитных газов по сравнению с флюсом является экономически более эффективным.

В качестве защитных газов применяют инертные (аргон и гелий) и активные (углекислый газ, водород, кислород и азот) газы, а также их смеси ($Ar + He$; $Ar + CO_2$; $Ar + O_2$; $CO_2 + O_2$ и др.).

Кроме вышеперечисленных преимуществ, в качестве дополнительных преимуществ метода сварки в среде защитных газов специалистами отмечается возможность сварки большого спектра металлов, а также для широкого диапазона толщин с использованием плавящихся и неплавящихся электродов.

Для АПГ характерны высокая плотность показаний механических характеристик участков сварных соединений и низкий разброс показателей твердости по образцам.

Результаты измерения твердости для АФ представлены на диаграмме (Рисунок 14).

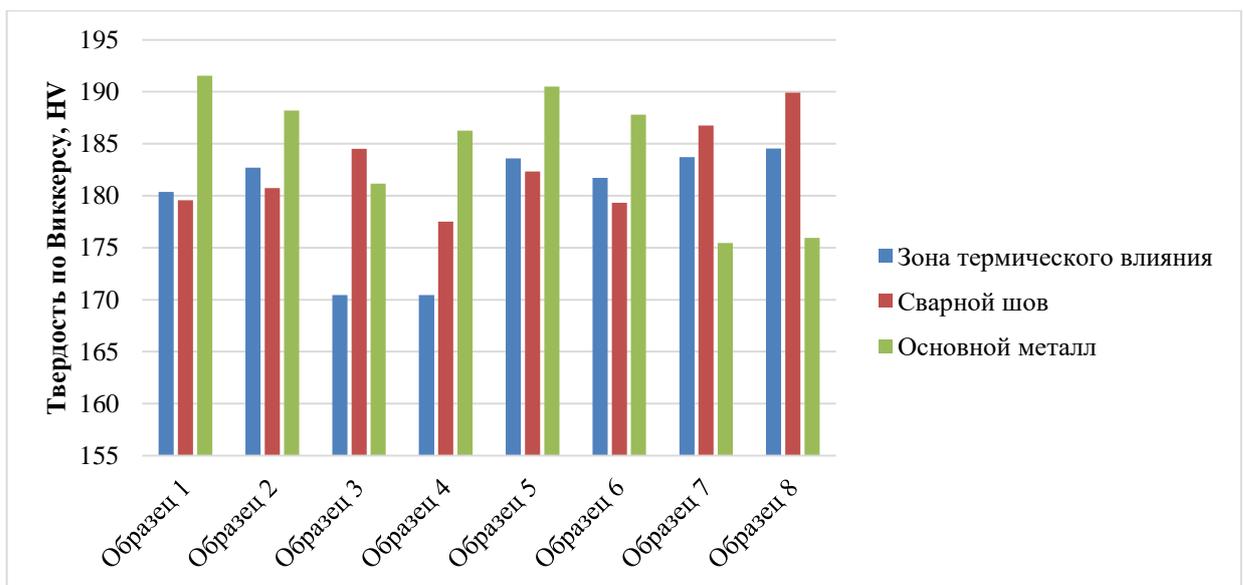


Рисунок 14 – Результаты измерений твердости образцов по зонам сварного соединения, полученного методом автоматической сварки под флюсом

Механическая неоднородность образцов, изготовленных АФ, характеризуется, в основном, снижением твердости шва и околошовной зоны.

Таким образом, был произведен анализ твердости образцов, изготовленных по разным технологиям. Полученные результаты позволяют говорить о том, что сварные соединения обладают значительной механической неоднородностью. Результатом испытаний служит вывод о том, что наиболее благоприятной с точки зрения однородности механических характеристик является АПГ. При этом для всех типов сварки выявлены разные схемы компоновки механической неоднородности.

Дополнительно была проведена оценка твердости по толщине образцов для характерных зон механической неоднородности. Результаты представлены на диаграмме (Рисунок 15).

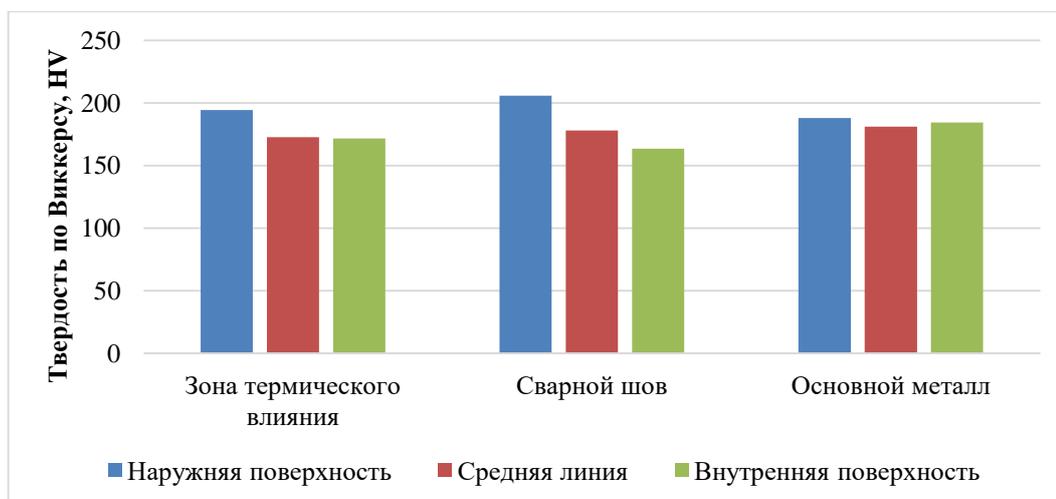


Рисунок 15 – Механическая неоднородность по толщине сварного соединения

Таким образом, следствием многослойности шва является не только продольная, но и поперечная зональность сварного соединения. Изменения в сопротивляемости участков сварного соединения также характерны при переходе от слоя к слою при выполнении многослойной сварки.

Полученные результаты говорят о необходимости выполнения более подробного исследования геометрии зон механической неоднородности,

выделения закономерностей их образования и прогнозирования их механического сопротивления нагрузкам, характерным для магистральных трубопроводов.

Механическая неоднородность в продольных сварных соединениях магистральных трубопроводов

Большая доля сварных соединений магистральных трубопроводов относится к продольным сварным соединениям труб, получаемым в заводских условиях. Несмотря на то, что технология сварки продольных швов более стабильная и контролируемая в условиях на трубопрокатном заводе, как отмечалось выше, преобладающая доля отказов и дефектного состояния отмечается именно в продольных швах. Такая тенденция определяется в первую очередь повышенной нагруженностью под действием кольцевых (окружных) напряжений. В связи с этим определение характера распределения механической неоднородности в продольном сварном соединении является важной задачей с точки зрения определения локализации напряжений и деформаций, а также влияния локальных упругопластических областей на концентраторы напряжений в виде трещиноподобных дефектов.

Исследуемые образцы продольных сварных швов получены из электросварных прямошовных труб диаметром 1020 мм.

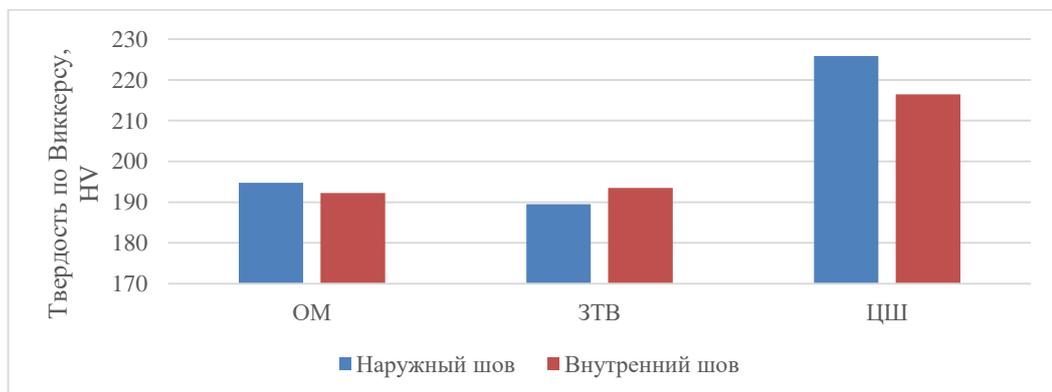


Рисунок 16 – Результаты замеров твердости по продольному сварному соединению трубы из низколегированной стали, полученному автоматической сваркой под флюсом

2.3 Методика определения зон механической неоднородности по показаниям твердости

Для получения картины механической неоднородности сварных соединений хорошие результаты дают известные методы измерения твердости [87]. Показания твердости разных зон макрошлифов реальных сварных соединений позволяют разграничить зоны механической неоднородности, определить их формы и дать приближенную оценку механических характеристик металла отдельных участков сварного соединения [120]. При этом точность определения границ зон механической неоднородности будет напрямую зависеть от количества точек замера твердости. При достаточной плотности точек (не менее четырех на 1 см²) возможно провести линейную аппроксимацию значений твердости между ними. Увязывая далее полученные значения твердости с прочностными характеристиками участков сварного соединения и околошовной зоны основного металла (обоснованность связи этих параметров показана во многих работах, включая [87]), становится возможным выделение зон механической неоднородности.

Границы зон определяются посредством линейной аппроксимации.

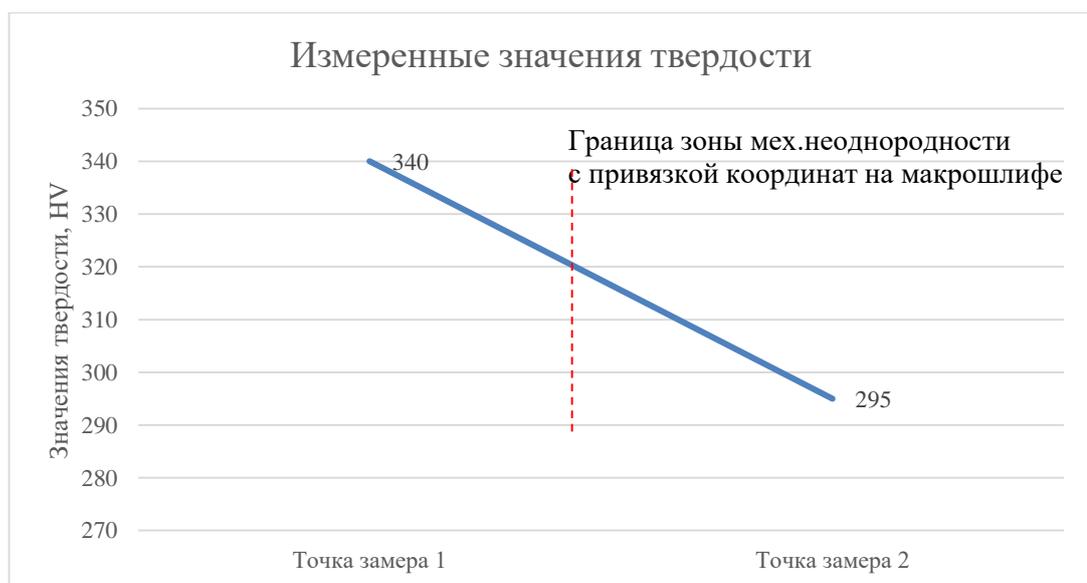


Рисунок 17 – Принцип линейной аппроксимации значений твердости на макрошлифе

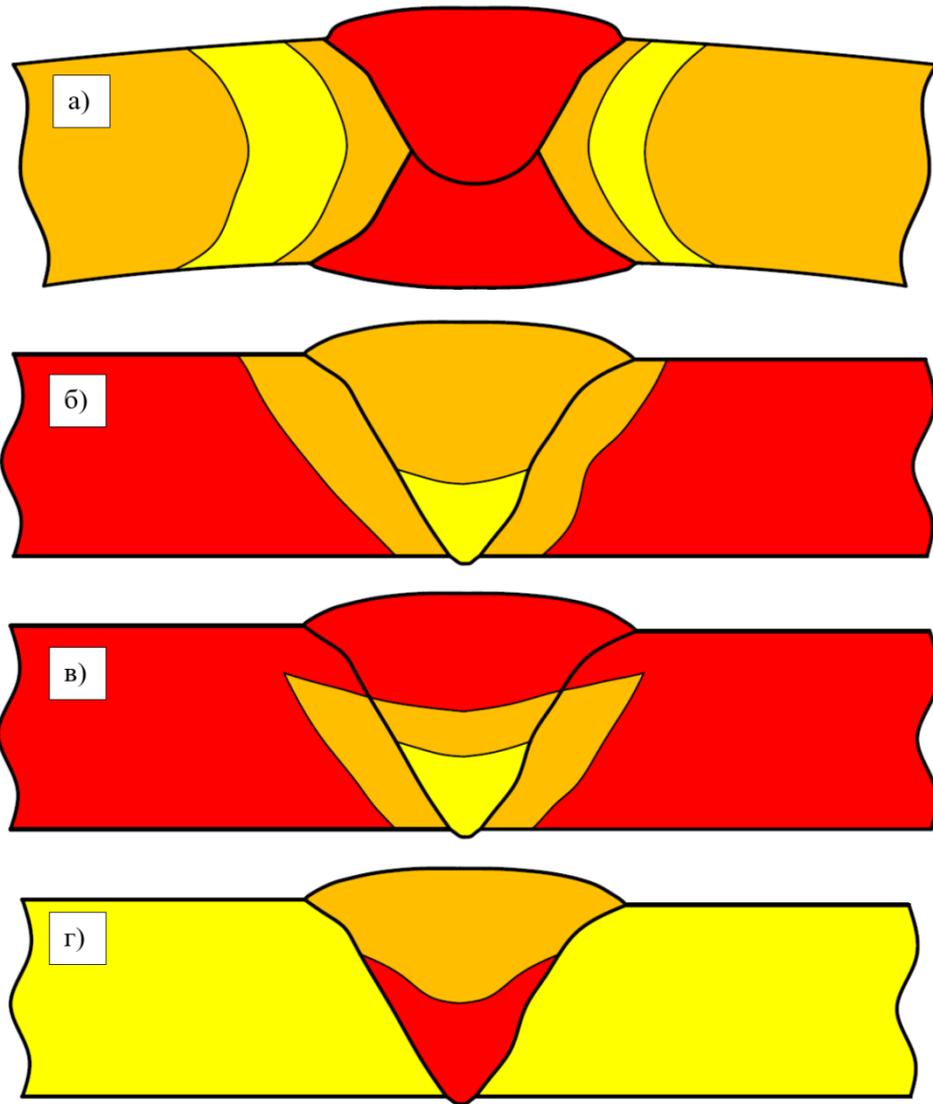
Как показано в работе [120], указанный принцип аппроксимации реализуется в относительных единицах расстояния между точками замера твердости. Таким образом, граница, определенная из уровня доверительной вероятности и исключения выбросов значений по группам зон механической неоднородности, будет получаться исходя из линейного закона изменения твердости между точками.

Проанализированные данные замеров твердости по макрошлифам основных типов сварных соединений магистральных трубопроводов также позволяют применить описанный выше принцип линейной аппроксимации и построить карты распределения твердости.

По аналогии с выполнением математической операции по приведению к необходимому уровню доверительной вероятности значений замеров твердости осуществляется отнесение их к той или иной группе (зоне) механической неоднородности. При этом становится возможным установить некоторые типовые карты распределения механической неоднородности в зависимости от типов сварных соединений.

Кроме распределения твердости для каждого типа сварного соединения также были проанализированы закономерности распределения и состав легирующих элементов, которые совместно с термомодеформационным циклом влияют на распределение механических характеристик по объему сварного шва, что показано в разделе 2.2.

На основе физико-химических факторов и показаний твердости по объему исследованных типов сварных соединений получены обобщенные закономерности распределения механических характеристик, представленные на Рисунке 18.



*(а) – продольный сварной шов АФ; (б) – кольцевой сварной шов АППГ;
 (в) – кольцевой сварной шов АФ; (г) – кольцевой сварной шов АГ*

Рисунок 18 – Распределение механических характеристик в сварном шве магистрального трубопровода для разных типов сварки

2.4 Условия наступления локальных пластических деформаций в зонах механической неоднородности сварных соединений магистральных трубопроводов

Для рассмотренных типов сварных соединений важно определить условия наступления локальных пластических деформаций в зонах механической

неоднородности. Очевидно, что, учитывая коэффициенты запаса, с которыми проектируются магистральные трубопроводы, условия достижения локальных пластических деформаций в сварном соединении могут наступать при максимально неблагоприятных условиях нагружения.

Максимальные суммарные продольные напряжения, МПа, определяются от всех (с учетом их сочетания) нормативных нагрузок и воздействий с учетом поперечных и продольных перемещений трубопровода в соответствии с правилами строительной механики. При определении жесткости и напряженного состояния отвода следует учитывать условия его сопряжения с трубой и влияние внутреннего давления.

В частности, для прямолинейных и упруго-изогнутых участков трубопроводов при отсутствии продольных и поперечных перемещений трубопровода, просадок и пучения грунта максимальные суммарные продольные напряжения от нормативных нагрузок и воздействий – внутреннего давления, температурного перепада и упругого изгиба:

$$\sigma_{\text{пр}}^{\text{н}} = \mu\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}} - \alpha E \Delta t \pm \frac{E D_{\text{н}}}{2\rho}, \quad (28)$$

где μ – переменный коэффициент поперечной деформации стали (коэффициент Пуассона);

α – коэффициент линейного расширения металла трубы, град⁻¹;

E – переменный параметр упругости (модуль Юнга), МПа;

Δt – расчетный температурный перепад, принимаемый положительным при нагревании, °С;

$D_{\text{н}}$ – наружный диаметр трубопровода, м;

ρ – минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода, м;

$$E = \frac{\sigma_i / \varepsilon_i}{1 + \frac{1 - 2\mu_0 \sigma_i}{3E_0 \varepsilon_i}}, \quad (29)$$

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} \frac{1-2\mu_0 \sigma_i}{3E_0} \varepsilon_i}{1 + \frac{1-2\mu_0 \sigma_i}{3E_0} \varepsilon_i} \quad (30)$$

σ_i – интенсивность напряжений, определяемая через главные напряжения; для случаев напряженного состояния магистрального трубопровода будет определяться:

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_{кц}^H)^2 + (\sigma_{пр}^H)^2} - \sigma_{кц}^H \sigma_{пр}^H, \quad (31)$$

где ε_i – интенсивность деформаций, определяемая по интенсивности напряжений в соответствии с диаграммой деформирования, рассчитываемой по нормированной диаграмме растяжения $\sigma - \varepsilon$:

$$\sigma_i = \sigma; \quad (32)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon - \frac{1-2\mu_0}{3E_0} \sigma, \quad (33)$$

где μ_0 – коэффициент поперечной деформации в упругой области;

E_0 – модуль упругости, МПа.

Максимальные кольцевые напряжения могут возникнуть в трубопроводе в силу скачка давления продукта, которое, в свою очередь, может зависеть от расположения участка трубопровода (сразу после НПС, в низменных участках рельефа и т.д.).

Размах давления с учетом гидравлического уклона в трубопроводе описывается по формуле:

$$\Delta p_{\text{проект}} = \frac{\Delta p_{\text{вых}(i)}}{p_{\text{вых}(i)}} [p_{\text{проект}} + \rho_{\text{н}} g (Z_{\text{тр}} - Z_{\text{НПС}})]. \quad (34)$$

Размах давления $\Delta p_{\text{вых}(i)}$, действующий в наиболее нагруженной секции на выходе с i -ой головной или промежуточной НПС, принимается равным 2,0 МПа.

Тогда давление в наиболее нагруженной секции будет равно:

$$p = p_{\text{проект}} + \Delta p_{\text{проект}}. \quad (35)$$

Тогда нормативные кольцевые напряжения в трубопроводе определяются:

$$\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}} = \frac{pD_{\text{вн}}}{2\delta}. \quad (36)$$

Как отмечалось ранее, для разных типов сварных соединений будут реализовываться разные схемы двухосного нагружения. Так, продольные сварные соединения будут испытывать в направлении изменения зон механической неоднородности кольцевые нагрузки (Рисунок 19).

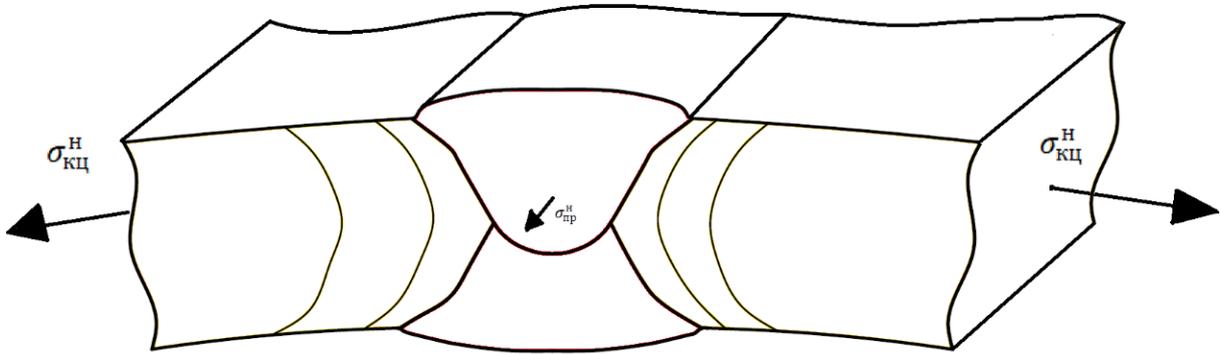


Рисунок 19 – Схема нагружения продольного сварного соединения

Максимальные продольные напряжения, напротив, будут воспринимать кольцевые сварные соединения. Схема нагружения на примере сварного соединения, полученного односторонней автоматической сваркой под флюсом, представлена на Рисунке 20.

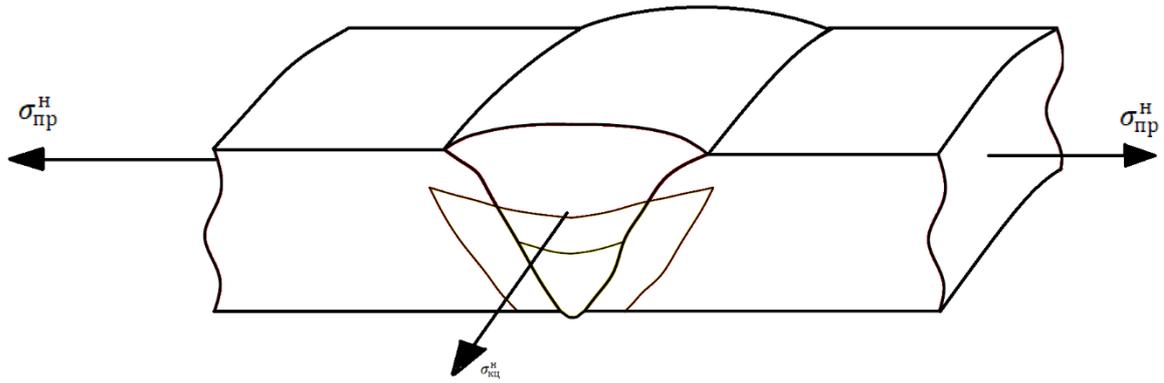


Рисунок 20 – Схема нагружения кольцевого сварного соединения

Полученные схемы нагружения позволяют установить максимально возможные в условиях эксплуатации магистральных трубопроводов напряжения, приводящие к возможному образованию в сварном соединении локальных зон пластического течения.

Формы и свойства зон механической неоднородности будут оказывать прямое влияние на расположение и условия наступления стадии пластического деформирования в локальных областях сварного соединения.

Процесс нагружения и изменение напряженного состояния в сварном соединении может быть показан на графике (Рисунок 21).

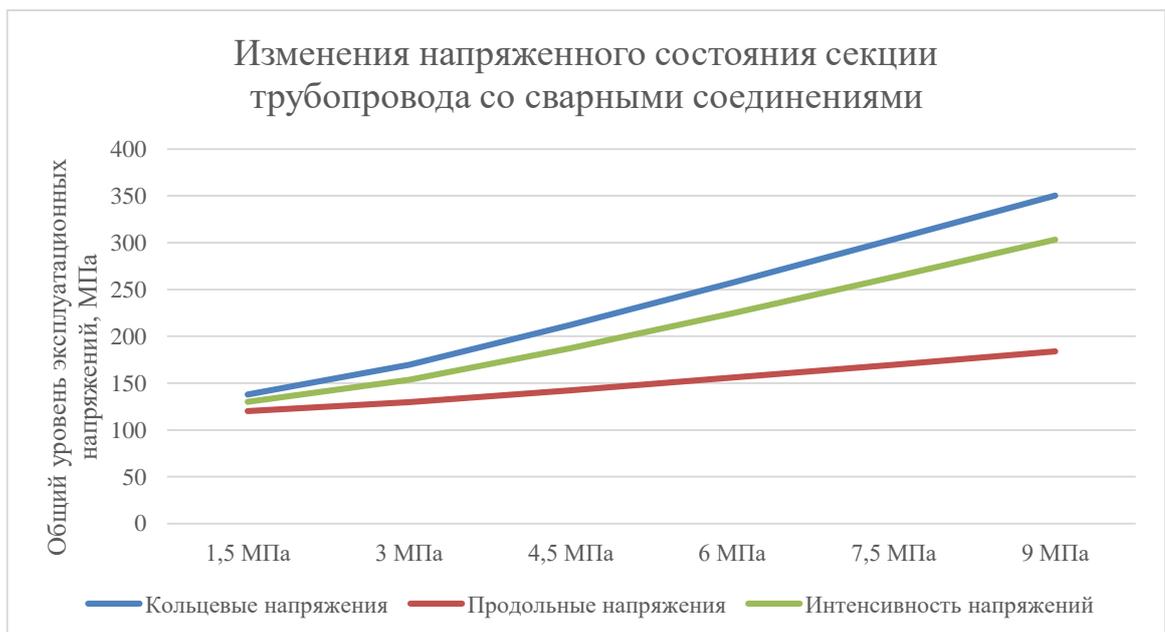


Рисунок 21 – Эксплуатационные напряжения в МТП

2.5 Эффекты напряженно-деформированного состояния бездефектных участков сварных соединений с механической неоднородностью

Перераспределение напряжений внутри сварного соединения в зависимости от взаимного влияния механически неоднородных прослоек внутри играет роль при определении зоны локализации и накоплений деформаций. Количественная оценка напряженного состояния в области упругих и пластических деформаций является многофакторной задачей, в число определяющих факторов которой входит оценка перераспределения деформаций вследствие механической неоднородности, влияние остаточных напряжений на исходное напряженное состояние.

С учетом вышеизложенного может быть установлена связь условий разрушения сварных соединений при циклических и статических нагрузках от распределения объемных полей интенсивности деформаций в упругой и пластической зонах, которые, в свою очередь, в том числе зависят от законов распределения механических свойств по сварному соединению вследствие механической неоднородности.

Анализ распределения механической неоднородности в рассмотренных в разделе 2.2 сварных соединениях показывает, что форма прослоек с условно одинаковыми механическими характеристиками отличается от рассмотренных ранее в работах [12, 54, 62, 123] форм прослоек, что, в свою очередь, может приводить к упрощению результатов расчета прочности механически неоднородного сварного соединения и повышать погрешность в результатах расчетов, которые могут оказать серьезное влияние на общую оценку несущей способности сварного соединения.

Таким образом, учет геометрии зон механической неоднородности необходим для формирования уточненной расчетной модели сварного соединения, подверженного эксплуатационным нагрузкам, характерным для сварных соединений магистральных трубопроводов.

Исходя из задачи учета более сложной геометрии зон с разными механическими свойствами, предположим, что для оценки сложного напряженно-деформированного состояния механически неоднородного сварного соединения возможно актуализировать существующие зависимости для учета механической неоднородности путем определения фактических размеров зон.

Следует отметить, что при рассмотрении действия растягивающих усилий на зону механической неоднородности – мягкую прослойку, напряженное состояние, действующее в прослойке, является объемным, а распределение напряжений – неравномерным. Максимум нормальных напряжений в прослойке характерен для центральной ее части, а при приближении к контактной границе между зонами механической неоднородности возрастает роль касательных напряжений. Выявленная в главе 2 сложная геометрия зон механической неоднородности определяет условия ненулевого значения объемного тензора касательных напряжений:

$$\tau_{(x,y,z)} \neq 0. \quad (37)$$

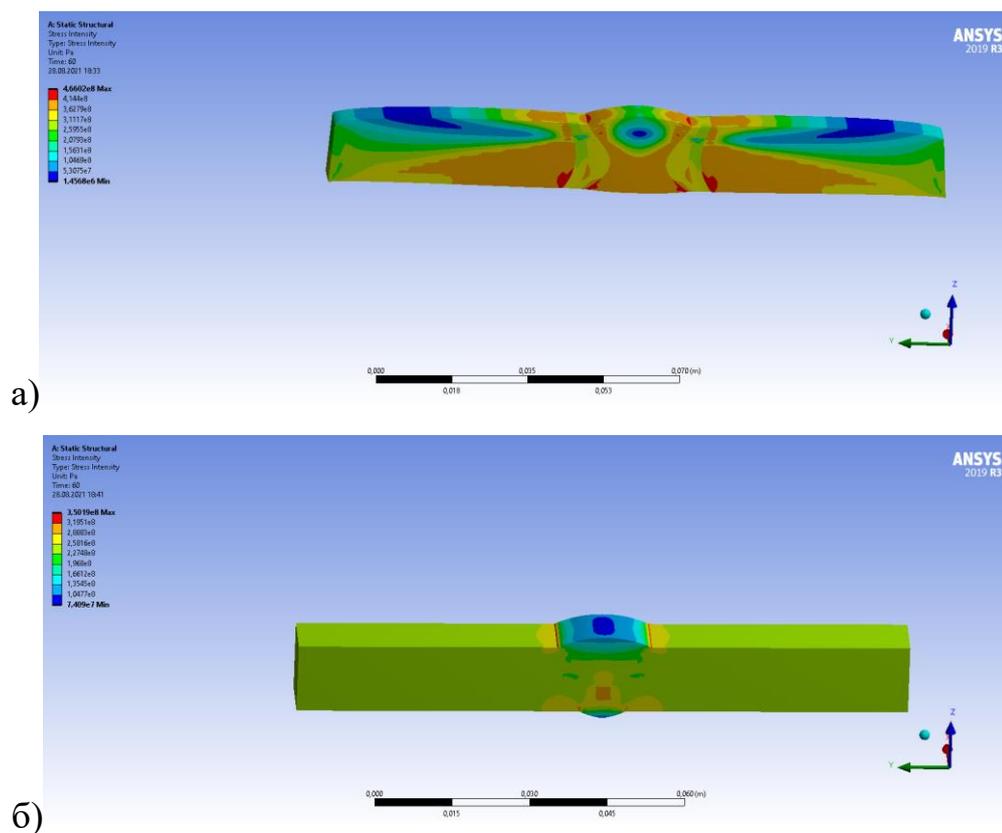
Условия достижения предельного состояния определяются значением касательных напряжений $\tau_T^M = \sigma_T^M / \sqrt{3}$ на контактных плоскостях зон механической неоднородности (плоскостях скольжения). Вместе с тем сложная геометрия зон механической неоднородности будет обуславливать достижение предельного состояния при отличных от осредненных значений параметров касательных напряжений, зависящих в том числе от направлений и взаимной ориентации плоскостей скольжения. Действительно, опыт эксплуатации сварных соединений магистральных трубопроводов, отмечаемый во многих источниках, например [100], показывает наличие более сложной закономерности процесса деформирования в области влияния механической неоднородности сварного соединения.

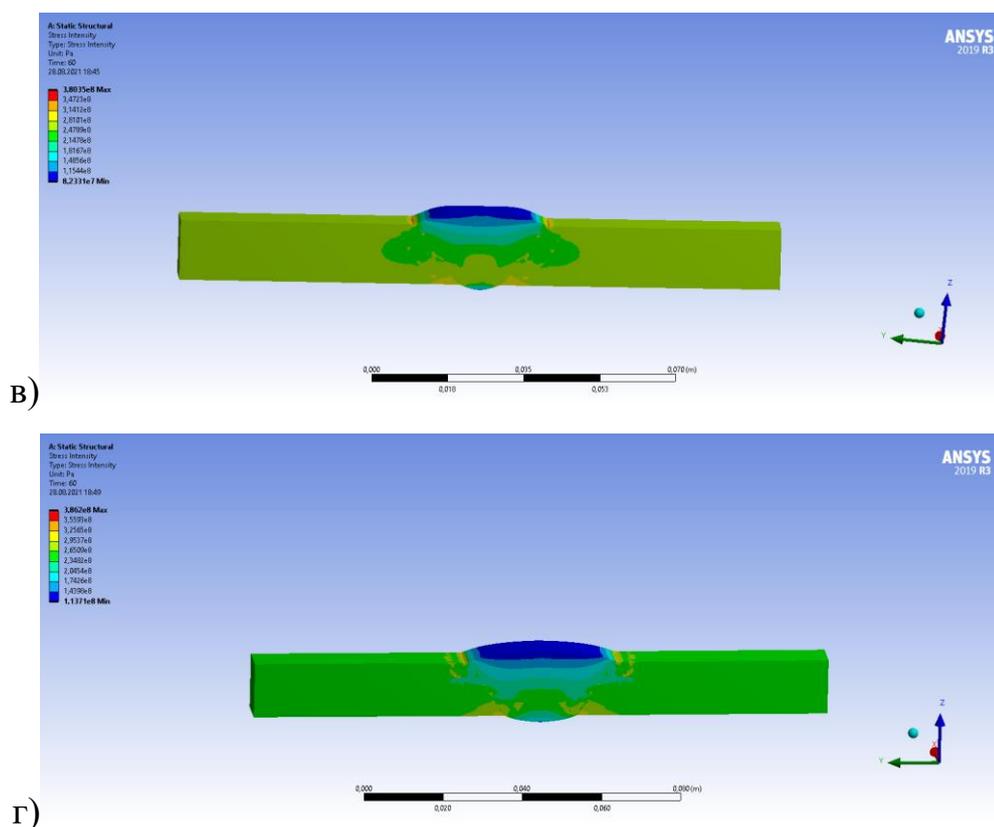
Для установления общих закономерностей нагружения механически неоднородных сварных соединений магистральных трубопроводов до

предельного состояния и получения математических выражений распространенным методом является метод линий скольжения с учетом установленных условий и допущений в разделе 2.3.

Расчетная оценка статической прочности рассматриваемых сварных соединений магистральных трубопроводов будет зависеть от напряженно-деформированного состояния при двухосном нагружении, описанном в разделе 2.3. Оценку влияния двухосного поля нагружения на напряженно-деформированное состояние ослабленных зон механической неоднородности, деформируемых в предельной стадии, целесообразно проводить численными методами (методом конечных элементов).

Проведенный в разделе 2.3 численный расчет показал, что для диапазона значений механической неоднородности контактные участки более прочной зоны вовлекаются в пластическую деформацию (Рисунок 22).





- а) продольное сварное соединение (автоматическая сварка под флюсом);
 б) кольцевое сварное соединение АПГ; в) АПГГ; г) АФ

Рисунок 22 – Распределение напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов с учетом зон механической неоднородности

Распределение напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} в области пластических деформаций имеет сложный характер, который, однако, может быть качественно описан при помощи метода линий скольжения. Фактическое распределение касательных напряжений на контактной границе между зонами механической неоднородности позволит определить специфику напряженного состояния

В работе [54] установлено, что касательные напряжения τ_{xy} во всех случаях, $(x, n) = var$, при степени механической неоднородности $K_e \leq 2$, не достигают предела текучести менее прочного материала при чистом сдвиге $k_M = \frac{\sigma_m^M}{\sqrt{3}}$, что в целом соответствует основной массе случаев механической неоднородности в сварных соединениях магистральных трубопроводов. Характеру распределения касательных напряжений свойственна стадия насыщения, на которой роста значений не происходит. По толщине прослойки,

согласно работе [54], изменения касательных напряжений происходят почти по линейному закону, возрастая от центра прослойки к контактной границе.

Также в предшествующих работах [12, 54, 114] установлено, что касательные напряжения инвариантно уменьшаются при уменьшении относительных размеров зоны механической неоднородности. Вместе с тем при достижении характерного размера прослойки фактором, влияющим на касательные напряжения, остается форма контактных границ зон механической неоднородности. Дифференциальные уравнения равновесия $\sigma_x = \int_0^x \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx = \sigma_x(x)$, приведенные в [54], а также результаты численных расчетов показывают, что касательные напряжения вносят свой вклад в условие пластичности.

Получение точного выражения для распределения касательных напряжений в каждой точке контактной границы между зонами механической неоднородности является сложной задачей. В данной ситуации во многих исследованиях были использованы методы осреднения касательных напряжений путем замены эпюры их распределения другой с равновеликой площадью [12]. Показанная в работе [114] линейная аппроксимация эпюры касательных напряжений для случая плоской осесимметричной деформации тонких прослоек дает удовлетворительные результаты $\tau_{xy} = \frac{K_\epsilon - 1}{K_\epsilon} k_M$. Тонкими считаются прослойки относительной толщиной не более 0,25. Учитывая параметры сварных соединений магистральных трубопроводов, выделенные в разделе 2.3, прослойки могут быть отнесены к тонким.

Вместе с тем, как было отмечено выше, касательные напряжения зависят от параметра двухосности n , который в приведенной линейной аппроксимации может быть учтен для всего диапазона изменений относительной толщины прослойки ϵ :

$$\tau_{xy} = \frac{K_\epsilon - 1}{K_\epsilon} k_M \cdot f(n). \quad (38)$$

В работах [54, 114] показано, что в условиях двухосного нагружения направление скольжения в деформируемом теле (наклон линий скольжения) определяется соотношением действующих эксплуатационных напряжений – кольцевого и продольного – $n = \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{кц}}$ (вариативен в зависимости от типа сварного соединения магистрального трубопровода). При этом отмечается, что направление скольжения не совпадает с траекториями максимальных касательных напряжений.

Для общего случая двухосного нагружения в [114] получено выражение для определения траектории скольжения в деформируемом теле:

$$\alpha_{ск} = 0,5arccos\left(\frac{1-2n}{3}\right), \quad (39)$$

где $\alpha_{ск}$ – угол скольжения, то есть угол между нормалью плоскости скольжения и вектором главного напряжения.

При рассмотрении в разделе 2.2 зон механической неоднородности сварных соединений могут быть использованы подходы метода линий скольжения для решения задачи перехода участков сварного соединения к пластическому деформированию в плоской постановке.

Анализ выполнен на примере кольцевого механически неоднородного сварного соединения магистрального трубопровода, сваренного автоматической односторонней сваркой в среде защитных газов.

Параметр двухосности для кольцевого сварного соединения $n = \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{кц}}$, где продольные напряжения приняты максимальными с учетом сложения негативных условий эксплуатации.

Как было показано в работах [54, 114], в сварных соединениях с распределением механической неоднородности, подобному сварным соединениям магистральных трубопроводов, в результате стеснения пластических деформаций менее прочной прослойки со стороны более прочной соседней зоны возникает объемное напряженное состояние, вызывающее контактное упрочнение мягкой

прослойки. При этом за счет уменьшения относительной толщины прослойки происходит изменение величины контактного упрочнения, что, в свою очередь, оказывает влияние на общую статическую прочность всего соединения с мягкой прослойкой от уровня прочности мягкого материала до уровня прочности твердой зоны. Характер изменения прочности мягкой прослойки в сварном соединении магистрального трубопровода находится под влиянием как факторов, рассмотренных в классической постановке задач (относительная толщина, степень механической неоднородности, общее соотношение главных напряжений), так и под влиянием формы контактной границы с соседними более прочными зонами. Аналогично более прочные зоны подпадают под влияние менее прочных при развитии упругопластических деформаций.

В связи с изложенным целесообразно решить задачу учета дополнительно введенных факторов, влияющих на упругопластическое деформирование зон механической неоднородности в сварных соединениях магистральных трубопроводов. Базовую математическую модель предлагается построить на принципах определения плоскостей скольжения каждой из зон механической неоднородности в зависимости от степени механической неоднородности, параметра двухосности и изменения угла наклона контактной границы.

Деформирование для сварных соединений, наиболее часто используемых для сварки продольных и кольцевых стыков магистральных трубопроводов, в условиях двухосного нагружения, определенного максимальными реализуемыми напряжениями от внутреннего давления и осевых нагрузок, сопровождается возникновением касательных напряжений, которые в предельном состоянии достигают своего максимального значения $\tau_{xy} = k_c$ (k_c – касательные напряжения, действующие на линии скольжения). Для двухосного нагружения в [54] получено, что величина k_c зависит от параметра двухосности n :

$$k_c = k_M \sin 2\alpha_{ск} = \frac{2}{3} k_M \sqrt{(n+1)(2-n)}. \quad (40)$$

Графически указанная зависимость показана на графике (Рисунок 23).

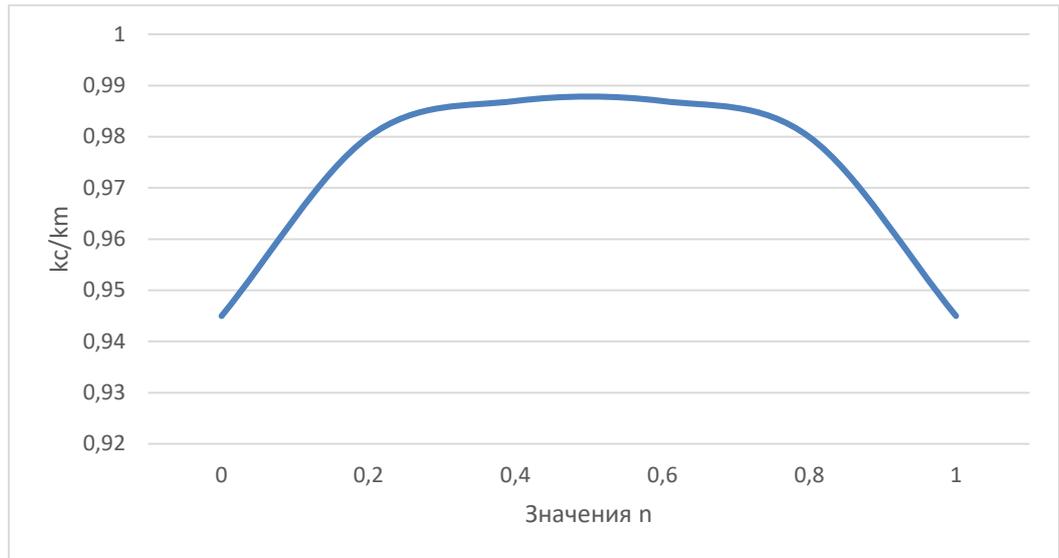


Рисунок 23 – Зависимость касательных напряжений от параметра двухосности

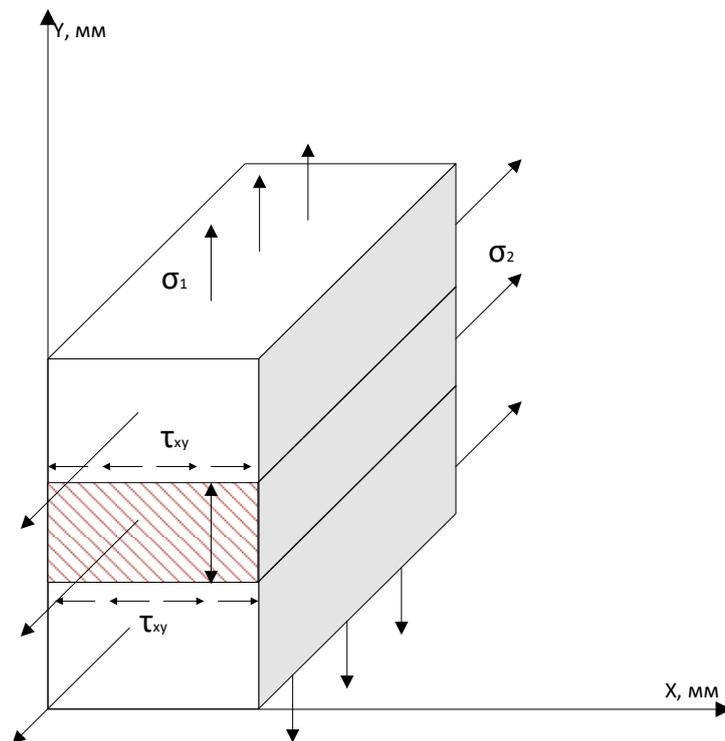


Рисунок 24 – Распределение касательных напряжений при двухосном нагружении [114]

В соответствии с анализом, выполненным в работе [114], посредством метода конечных элементов для схематизированных форм прослоек,

принималось, что касательные напряжения возрастают от центра прослойки к контактной границе (Рисунок 24) и распределяются по линейному закону $\tau_{xy} = ay + b$, где a и b – некоторые постоянные, определяющиеся из граничных условий: а) $y = 0$, $\tau_{xy} = 0$; б) $y = \pm \frac{h}{2}$, $\tau_{xy} = k_c$ (считается, что контактные поверхности каждой из прослоек являются огибающими сеток линий скольжения, а при переходе линии скольжения соответственно изменению уровня прочности претерпевают разрыв).

Таким образом, касательные напряжения по прослойке будут равны:

$$\tau_{xy} = \pm \frac{2k_c}{h} y = \frac{4}{3} \frac{k_M}{h} \sqrt{(n+1)(2-n)}. \quad (41)$$

В работе [114] показано, что сетки линий скольжения могут быть представлены в виде циклоид, которые при этом должны пересекать линию $\tau_{xy} = 0$ под углом $\alpha_{ск} = 0,5 \arccos\left(\frac{1-2n}{3}\right)$, выходить на свободную поверхность под углом $\frac{\pi}{2} - \alpha_{ск}$, а в силу граничных условий подходить к контактными границам под нулевым углом.

Поскольку для сварных соединений трубопроводов рассматриваются криволинейные формы контактных границ, для прослоек сложной формы могут быть использованы элементы частных случаев циклоид, которые, в свою очередь, также будут зависеть от параметра двухосности. Уравнения характеристик такого поля в общем виде будут выглядеть:

$$\frac{dy}{dx_1} = \frac{(1-2n)\cos 2\alpha + 2\sqrt{(n+1)(2-n)} \cdot \sin 2\alpha}{3\sqrt{\frac{2-n}{1+n}} + [2\sqrt{(n+1)(2-n)} \cdot \cos 2\alpha - (1-2n)\sin 2\alpha]}; \quad (42)$$

$$\frac{dy}{dx_2} = \frac{(1-2n)\cos 2\alpha + 2\sqrt{(n+1)(2-n)} \cdot \sin 2\alpha}{3\sqrt{\frac{2-n}{1+n}} + [2\sqrt{(n+1)(2-n)} \cdot \cos 2\alpha - (1-2n)\sin 2\alpha]}. \quad (43)$$

При одноосном нагружении, в отличие от случая плоского течения или осесимметричной деформации, описанных в работах [12, 13, 123], напряжения в любой точке рассматриваемого деформируемого тела, представленные диаграммой Мора (Рисунок 25) и удовлетворяющие условию пластичности, определяются соотношениями:

$$\tau_{xy} = \frac{3}{2\sqrt{(n+1)(2-n)}} \cdot k_c \sin 2\left(0,5 \arccos\left(\frac{1-2n}{3}\right) - \alpha\right); \quad (44)$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{1-2n}{2\sqrt{(n+1)(2-n)}} \cdot k_c - \frac{3}{2\sqrt{(n+1)(2-n)}} \cdot k_c \cos 2\left(0,5 \arccos\left(\frac{1-2n}{3}\right) - \alpha\right); \quad (45)$$

$$\sigma_x = \sigma_0 + \frac{1-2n}{2\sqrt{(n+1)(2-n)}} \cdot k_c - \frac{3}{2\sqrt{(n+1)(2-n)}} \cdot k_c \cos 2\left(0,5 \arccos\left(\frac{1-2n}{3}\right) - \alpha\right). \quad (46)$$

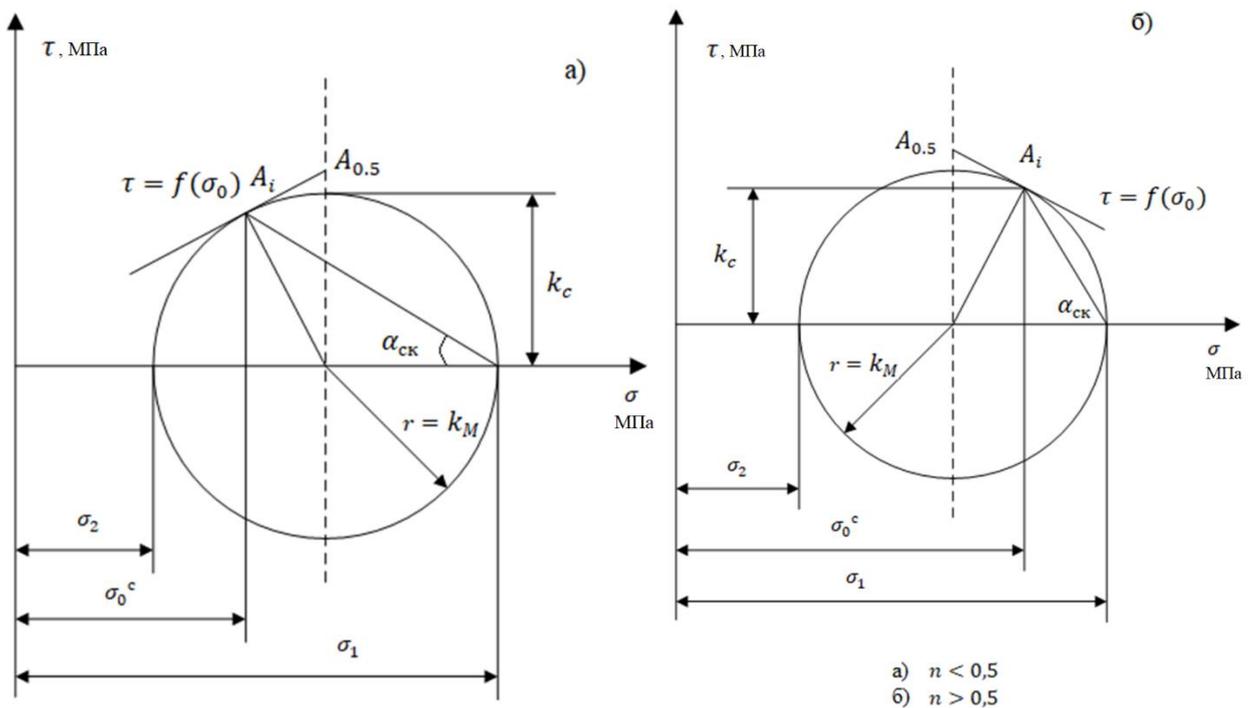


Рисунок 25 – Круги Мора [114]

Уравнение для касательных напряжений в сочетании с уравнениями характеристик позволяет далее определить виды параметрических уравнений для первого ξ и второго η семейства линий скольжения. Семейство ξ :

$$x = \frac{3}{2\sqrt{(n+1)(2-n)}} \cdot \frac{h}{2} \left[2\sqrt{(n+1)(2-n)}\alpha + \cos 2\left(0,5\arccos\left(\frac{1-2n}{3}\right) - \alpha\right) \right]; \quad (47)$$

$$y = \frac{3}{2\sqrt{(n+1)(2-n)}} \cdot \frac{h}{2} \cdot \sin 2\left(0,5\arccos\left(\frac{1-2n}{3}\right) - \alpha\right). \quad (48)$$

Семейство η :

$$x = \frac{3}{2\sqrt{(n+1)(2-n)}} \cdot \frac{h}{2} \left[2\sqrt{(n+1)(2-n)}\alpha + \cos 2\left(0,5\arccos\left(\frac{1-2n}{3}\right) - \alpha\right) \right]; \quad (49)$$

$$y = \frac{3}{2\sqrt{(n+1)(2-n)}} \cdot \frac{h}{2} \cdot \sin 2\left(0,5\arccos\left(\frac{1-2n}{3}\right) - \alpha\right). \quad (50)$$

Данные семейства в зоне механической неоднородности при двухосном нагружении на сварное соединение представляет собой элементы частного случая циклоид – трохоид, получаемые качением производящего круга с радиусом $r_{\text{ц}} = \frac{3}{2\sqrt{(n+1)(2-n)}} \frac{h}{2}$ соответственно по контактными поверхностям $y = \pm \frac{h}{2}$ и смещением линий трохоид на параметр $p_r = r_{\text{ц}} \sqrt{\frac{n+1}{2-n}}$ (Рисунок 25).

В отличие от случаев, описанных в работах [12, 123], сетка линий скольжения получается не ортогональной, то есть семейства линий скольжения, пересекаясь, не образуют прямой угол.

Для прямой схематизированной прослойки поле линий скольжения будет выглядеть, как показано на Рисунке 26.

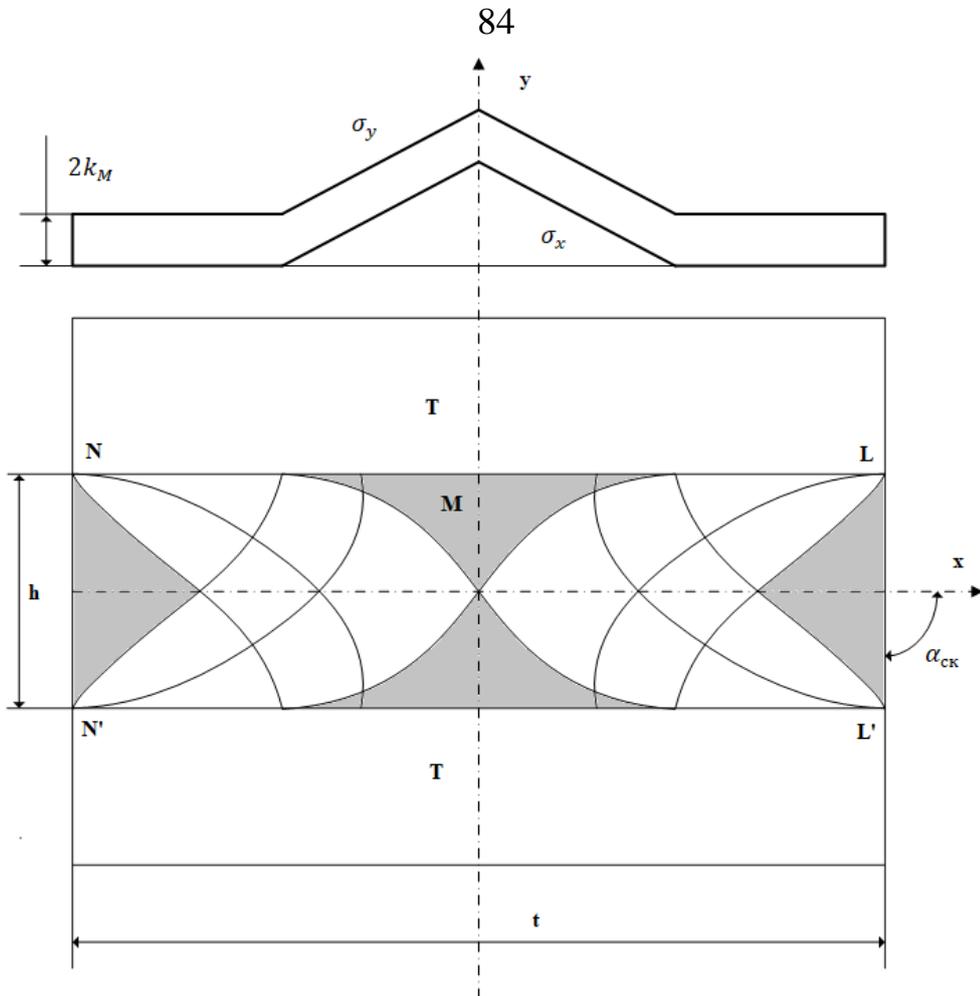


Рисунок 26 – Поле линий скольжения для случая равенства главных напряжений при двухосном напряженном состоянии ($n = 1$)

В качестве общей записи характеристического соотношения вдоль линий скольжения, построенных для каждой из выделенных зон механической неоднородности, используется интеграл Генки [38,114]:

$$G(\sigma_0) \pm \alpha = const, \quad (51)$$

где:

$$G(\sigma_0) = \frac{1}{2} \int \sqrt{1 - \tau'^2} \cdot \frac{\partial \sigma_0}{k_M}, \quad (52)$$

где $\tau' = \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_0}$ – угол наклона предельной огибающей $\tau = f(\sigma_0)$ к предельным кругам Мора, \pm – относится к семействам линий скольжения ξ и η .

Согласно [38] и [114], предельная огибающая является касательной к кругам Мора в точках A_i , расположение которых определяется видом напряженного состояния $\nu_B = 2n - 1$. После преобразований, выполняемых для разных видов напряженного состояния, характеристические уравнения Генки имеют вид [114]:

$$\tau' = \frac{1-2n}{\sqrt{(n+1)(2-n)}}; \quad (53)$$

$$\sigma_0 + \frac{1-2n}{2\sqrt{(2-n)(n+1)}} k_c \pm \frac{1}{G(\sigma_0)} \cdot \alpha = const; \quad (54)$$

$$\sigma_0 + \frac{1-2n}{2\sqrt{(2-n)(n+1)}} k_c \pm \frac{3k_c}{\sqrt{1+5n-5n^2}} \cdot \alpha = const. \quad (55)$$

Полученные параметрические соотношения, уравнения линий скольжения и выражения, результирующие анализ кругов Мора, позволяют определить зависимости для компонентов напряженного состояния менее прочной зоны механической неоднородности в составе сварного соединения при ее двухосном нагружении [114]:

$$\tau_{xy} = \frac{2}{3} k_M \sqrt{(1+n)(2-n)} \cdot \frac{2y}{h}; \quad (56)$$

$$\sigma_y = \frac{2}{3} k_M \sqrt{(1+n)(2-n)} \cdot \frac{2x}{h} + C; \quad (57)$$

$$\sigma_x = \frac{2}{3} k_M \sqrt{(1+n)(2-n)} \cdot \frac{2x}{h} \left[1 - \frac{h}{x} \sqrt{1 - \frac{4y^2}{h^2}} \right] + C, \quad (58)$$

где C – постоянная интегрирования, которая в классическом представлении должна находиться из равенства $\sigma_y = 2k_M$ в треугольных областях, прилегающих к свободным поверхностям:

$$\sigma_y = \frac{2k_M}{h} \frac{2}{3} \sqrt{(1+n)(2-n)} \cdot \left[x - \frac{h}{2} \sqrt{\frac{2-n}{n+1}} \right] + 2k_M. \quad (59)$$

Полученное выражение удовлетворительно описывает напряженное состояние в менее прочной зоне сварного соединения по центру прослойки, при этом краевые эффекты в концентраторах напряжений требуют дополнительного уточнения, так как выражение не учитывает вовлечение более прочной соседней зоны механической неоднородности.

Достаточно достоверные результаты определения условий вовлечения более прочной соседней зоны в пластическое деформирование получены в работе [54]. В проведенном исследовании исследовались углы, под которыми линии характеристик подходят к контактной границе между зонами. Показано, что данные углы зависят от степени механической неоднородности, а также от углов центрированного поля в менее прочной зоне механической неоднородности. Указанное центрированное поле строится в окрестности точки концентрации напряжений, которая в случае со сварными соединениями магистральных трубопроводов предположительно чаще влияет на наступление пластического деформирования, нежели локальная потеря устойчивости деформирования в центре прослойки (вследствие относительно низкой степени механической неоднородности). Согласно [54] существует такое значение угла центрированного поля в точке концентрации напряжений, которое приводит к вовлечению более прочной зоны в пластическое деформирование.

Результаты численного моделирования позволяют определить потенциально опасные концентраторы локальных пластических деформаций в механически неоднородном сварном соединении.

Применяя к выделенным концентраторами на сварных соединениях метод определения углов центрированных полей, становится возможно математически определить локальные зоны перехода в пластическое состояние как менее прочных, так и более прочных зон механической неоднородности:

$$\omega^{\text{БП}} \approx \frac{K-1}{2K} \left(1 + \frac{(K-1)^2}{8K} \right); \quad (60)$$

$$\omega^{\text{МП}} \approx \frac{K-1}{2} \left(1 + \frac{(K+1)(K-1)^2}{16} \right). \quad (61)$$

Углы центрированных полей позволяют решить задачу сопряжения соседних зон механической неоднородности и определить значение нормального напряжения до характерной точки перехода локальной области от пластической стадии до упругопластической и упругой.

$$\sigma_F = \sigma_y(F) \approx 2 + \frac{(K-1)(3-K)}{2}. \quad (62)$$

Нормальные напряжения далее дополняют в качестве постоянной интегрирования в зоне концентрации напряжений.

Абсцисса точки перехода x_F находится согласно [54] через степень механической неоднородности и относительную толщину прослойки в прямоугольной форме:

$$x_F \cong 1 - \frac{2\alpha}{K+1}. \quad (63)$$

На основе статической эквивалентности напряжений σ_y внешнему удельному усилию $\sigma_{\text{ср}}$ можно определить величину изменения прочности ослабленной зоны механической неоднородности:

$$\sigma_{\text{ср}} = \sigma_M^B \left[\frac{1}{K} + \frac{K-1}{K} \cdot K_{\alpha} \right]. \quad (64)$$

При совершенствовании математической модели нагружения сварных соединений со сложными формами зон механической неоднородности очевидной является необходимость учета переменного угла наклона контактных плоскостей

между зонами механической неоднородности и направлением приложения внешней нагрузки [120, 121].

Напряжения в зонах механической неоднородности и на контактных поверхностях смежных зон определяются как механическими свойствами каждой из зон, так и углом наклона контактной поверхности в конкретной точке к направлению внешней нагрузки, главного напряжения и касательных напряжений на контактных поверхностях.

Оценка степени влияния угла наклона на сложное напряженное состояние в сварном соединении является одной из задач настоящего исследования. Анализ большого объема предшествующих исследований показал, что изменение угла наклона контактной границы между зонами механической неоднородности может приводить не только к снижению, но также и к полному исчезновению эффекта контактного упрочнения менее прочной зоны сварного соединения. Вместе с тем предшествующие исследования схематизировали вид контактной границы для получения общих зависимостей, при этом не учитывали реального влияния термомодеформационного цикла сварки на форму контактной границы.

Увеличение нагрузки, провоцирующее переход отдельных зон в область пластических деформаций, приводит к перераспределению напряжений по толщине образца в направлении приложения нагрузки.

Следовательно, для оценки несущей способности сварного соединения в целом требуется определение среднеинтегрального напряжения по всей зоне механической неоднородности. Учитывая, что в направлении границ контактных поверхностей напряжения остаются неизменными, все компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций не зависят от координаты в направлении границ контактных зон, что позволяет решать задачу в плоскости «среза» или в плоскости макрошлифа сварного соединения.

В предшествующих исследованиях показано, что одним из недостатков существующих решений по оценке несущей способности механически неоднородных сварных соединений является использование непрерывных математических моделей (однородных функций по толщине механически

неоднородного сварного соединения) для оценки напряженного состояния в зонах такой неоднородности. Разрывность решений для таких зон возникает в условиях действия ослабляющего или упрочняющего эффекта, оказываемого соседней зоной механической неоднородности. При этом поля линий скольжения, формируемые совместным действием соседних зон механической неоднородности и свободной поверхностью, могут накладываться друг на друга при увеличении нагрузок [54].

Под влиянием наложения полей характеристик нормальные напряжения, действующие на контактной границе, претерпевают скачок, математически обусловленный разрывностью решений при переходе от одной зоны механической неоднородности к другой. Степень влияния на общее напряженно-деформированное состояние такого наложения зависит от многих факторов, а именно:

- степени механической неоднородности смежных зон;
- размеров и форм зон;
- координат точки определения НДС по сварному соединению.

2.6 Учет криволинейности контактной границы зон механической неоднородности через показатель двухосности нагружения сварных соединений трубопроводов

Представленные в разделе 2.5 выводы о степени влияния изменения наклона контактных границ зон механической неоднородности требуют количественной оценки. Действительно, определение функций контактных границ и затем их относительных толщин через площадь каждой прослойки не только требует скрупулезных вычислений для каждого конкретного случая (при одновременных упрощениях), но и физически не учитывает влияние касательных напряжений на напряженно-деформированное состояние участка.

Вместе с тем дискретный участок сварного соединения магистрального трубопровода под действием эксплуатационных нагрузок рассчитывается в

условиях плоского напряженно-деформированного состояния, когда из трех главных напряжений, действующих на трубопровод в цилиндрической системе координат, радиальное напряжение принимается равным нулю (ввиду его малости по сравнению с кольцевым и продольным). Характерным параметром плоского напряженно-деформированного состояния является показатель двухосности, представляющий собой отношение двух ненулевых компонент главных напряжений. В инженерных расчетах трубопроводов при проектировании показатель двухосности применяется как константная величина.

Изменение напряженно-деформированного состояния участка сварного соединения может быть представлено путем варьирования показателя двухосности нагружения зоны механической неоднородности по ее толщине в зависимости от наклона контактной границы зон. При этом такая постановка задачи в первую очередь отражает количественную разницу во вкладе основных напряжений в развитие деформаций зон механической неоднородности. Физически действие главных напряжений при плоской деформации в масштабе всего соединения задается граничными условиями эксплуатационного нагружения.

Большинство результатов исследований особенностей наступления предельного состояния сварных соединений относится к построению критериев их разрушения на уровне, равном основному металлу. При этом критерии разрушения принимаются в условных единицах, что, в частности для магистральных трубопроводов, характеризует реализацию максимальных нагрузок и максимальных равномерных деформаций при условии совместного действия внутреннего давления и комплекса осевых нагрузок, вызванных температурными деформациями, радиусом изгиба трубопровода и внутренним давлением. В зависимости от соотношений напряжений в двух главных плоскостях варьируются параметры двухосности напряженного состояния. К настоящему времени разработан ряд методов оценки влияния наступления момента неустойчивости пластического деформирования на положение границ разрушения при двухосном нагружении. Обобщение результатов исследований

позволяет определить направления совершенствования расчетных методов. При этом следует отметить, что ошибки физического и математического порядка могут также возникать при пренебрежении условиями истощения несущей способности отдельных зон механической неоднородности под действием эксплуатационных нагрузок. Истощение несущей способности зон сварных соединений связано со многими факторами, однако в контексте сложных геометрических форм механической неоднородности в сварных соединениях магистральных трубопроводов вопрос истощения не рассматривался.

Глубокий анализ вопроса о потере устойчивости пластического деформирования тонкостенных оболочек с учетом параметра двухосности как переменной величины, представлен в работе [54]. В данной работе показано, что во многих предшествующих исследованиях параметр двухосности рассматривался как критерий выбора механизма потери несущей способности через зависимость от схемы нагружения. По сути, сложная форма зон механической неоднородности может быть представлена как изменчивость схемы нагружения, а следовательно, и параметра двухосности нагружения.

В исследовании [114] показано, что простое нагружение трубопровода, то есть цилиндрической оболочки, при действии растягивающей осевой силы и внутреннего давления вызывает истощение несущей способности. Значение параметра двухосности варьируется от 0 до 2 ($n' = \sigma_{кц}/\sigma_{пр}$ – соотношение кольцевых и продольных напряжений).

При этом в случае превышения соотношения параметра двухосности значения, равного двум, происходит истощение локальной неустойчивости в кольцевом сечении.

Таким образом, необходимо определить как общую характерную схему деформаций для сварных соединений магистральных трубопроводов низколегированного класса, так и функциональную зависимость изменения параметра двухосности по контактной границе зон механической неоднородности.

Анализ предшествующих исследований [114] предельного состояния оболочковой конструкции трубопровода показал условие перехода от общей к локальной потере устойчивости пластического деформирования:

$$\frac{d\sigma_H}{d\varepsilon_H} = \frac{\sigma_H}{\frac{2\sqrt{1-n+n^2}}{2-n} + \varepsilon_H}, \text{ где } n = 1/n' \leq 0,5, \quad (65)$$

где n – параметр двухосности, определяющий отношения продольных напряжений к кольцевым.

Учитывая влияние параметра двухосности на количественную оценку плоского напряженно-деформированного состояния с одной стороны, и связь параметра двухосности со степенью механической неоднородности зон сварного соединения и углом наклона контактной границы с другой, становится возможным перейти к практической оценке влияния зон механической неоднородности на напряженно-деформированное состояние в области сварного соединения при соответствующих нагрузках.

В разделе 2.2 показано наличие зон механической неоднородности в сварных соединениях трубопроводов из низколегированных сталей. Важно также отметить, что относительные размеры зон механической неоднородности достаточно малы, чтобы наиболее ослабленные зоны сварного соединения за счет деформационного упрочнения и эффекта контактного упрочнения обеспечивали относительную (в пределах 2 %, см. раздел 2.3) равнопрочность с основным металлом и металлом сварного шва. Такая особенность «поведения» прослоек в бездефектном сварном соединении позволяет в инженерных расчетах руководствоваться предельным состоянием по основному металлу. При этом процесс перехода к нестабильному пластическому деформированию в данном случае начинается с общей потери устойчивости или локальной потери устойчивости в присутствии концентраторов напряжений.

Однако в большинстве случаев именно механическая неоднородность определяет условия локализации деформаций при потере устойчивости

пластического деформирования, что делает необходимым описание условий истощения несущей способности через критерии двухосности и, соответственно, степени механической неоднородности.

Изменение критерия двухосности по толщине сварного соединения, как количественной оценки изменения напряженного состояния, базируется на координатной привязке влияния одного из главных напряжений на величину касательных напряжений на контактной границе.

При классической интерпретации реализации контактного упрочнения касательные напряжения на контактной границе оказывают сдерживающее влияние на деформацию ослабленного участка, как показано на Рисунке 27. Исходя из фактического более сложного расположения зоны механической неоднородности, компонента одного из главных напряжений ($\sigma_1 = \sigma_{\text{пр}}$) будет зависеть от угла наклона контактной поверхности.

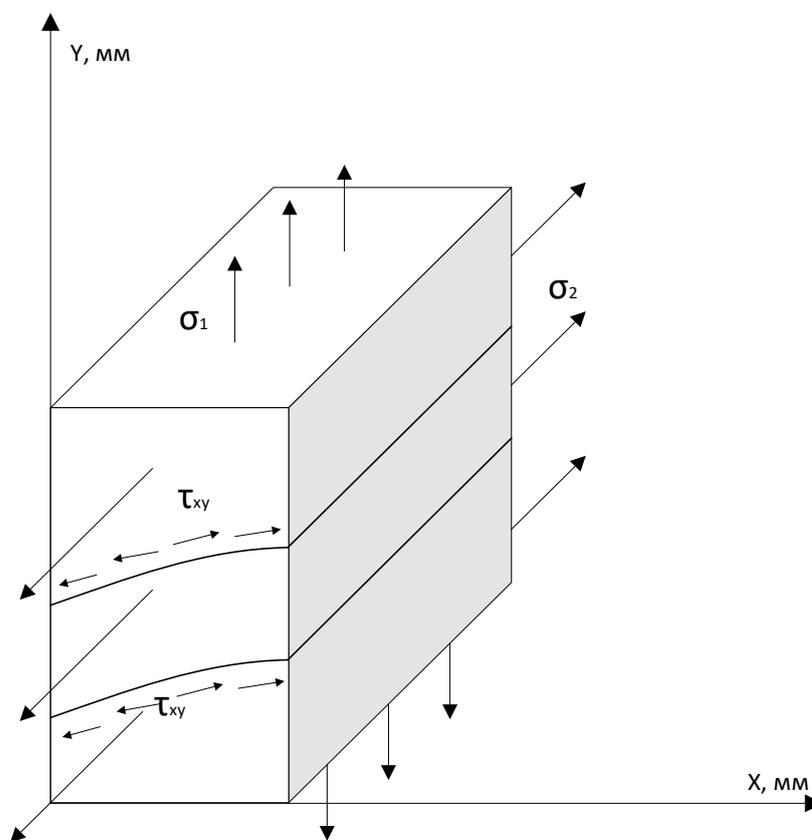


Рисунок 27 – Действие главных и касательных напряжений в механически неоднородном сварном соединении

Тогда фактический параметр двухосности также будет поставлен в зависимость от угла наклона контактной границы. Одновременно, сдерживающий фактор касательного напряжения при плоской деформации также должен быть пересмотрен. В предыдущих исследованиях [2, 12, 123] авторами, исходя из результатов экспериментов, вводился коэффициент реализации контактного упрочнения, однако физические обоснования ввода коэффициента реализации остаются неоднозначными.

Параметр двухосности $n = \sigma'_{\text{пр}} / \sigma_{\text{кц}}$, включающий продольные напряжения, должен определяться как функция угла наклона контактной границы $\sigma'_{\text{пр}} = \sigma_{\text{пр}} \cdot \cos(f(\alpha))$.

Далее для частного случая параболической формы контактной границы (также встречающаяся схематизация контактной границы зоны механической неоднородности) график изменения параметра двухосности показан на Рисунке 28.

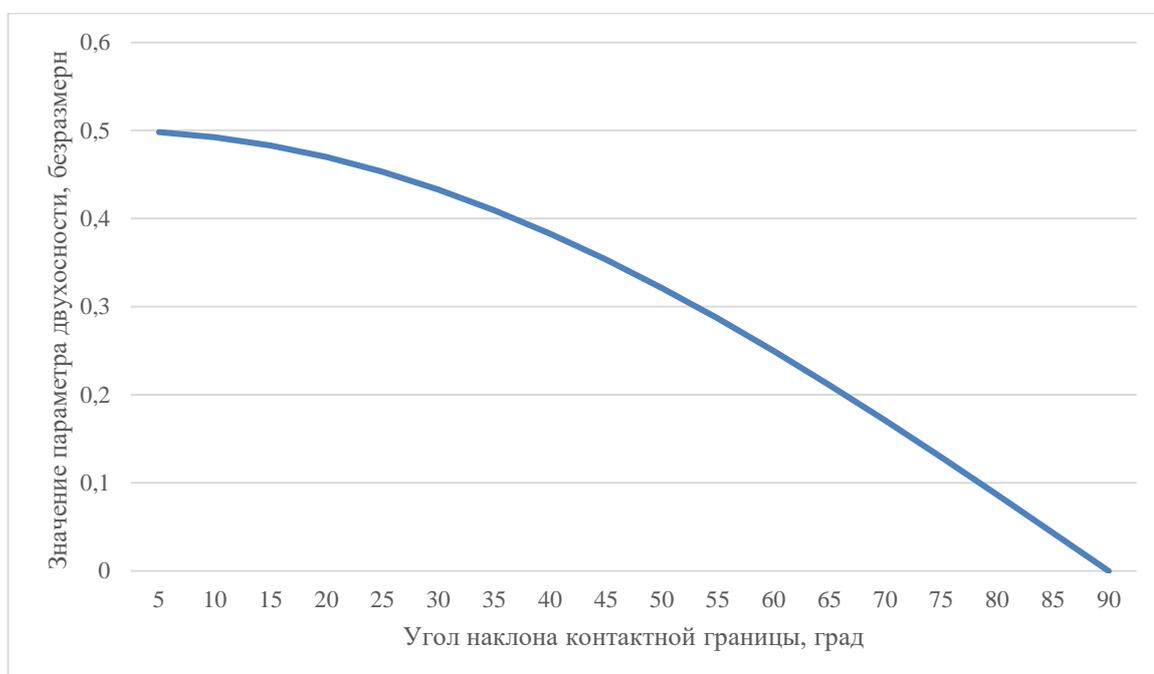


Рисунок 28 – Изменение условного коэффициента двухосности в зависимости от угла наклона контактной границы (простая парабола)

Построение систем уравнений контактных границ, выявленных по результатам твердомерии для наиболее распространенных типов сварных соединений магистральных трубопроводов, позволит определить характер изменения взаимного расположения главных и касательных напряжений и выполнить подстройку уравнений, определяющих плоское напряженно-деформированное состояние участка сварного соединения. Изменение взаимного расположения напряжений на участке сварного соединения может быть выражено через условный коэффициент двухосности, который далее может быть использован в задаче определения напряженно-деформированного состояния прослойки методом Прандтля и характеристик в плоской постановке. Действие истинных главных напряжений в зоне сварного соединения магистрального трубопровода (см. раздел 2.3), как отмечалось во многих работах ранее [14, 54, 114, 123 и др.], позволяет с достаточной точностью говорить о плоском напряженно-деформированном состоянии.

Таким образом, общей стадией деформирования при потере несущей способности сварных соединений является равномерное неустойчивое деформирование, переходящее в локальное накопление деформаций на наиболее ослабленном участке при постоянной внешней нагрузке.

2.7 Определение локальных областей перехода в пластическое состояние механически неоднородных сварных соединений магистральных трубопроводов

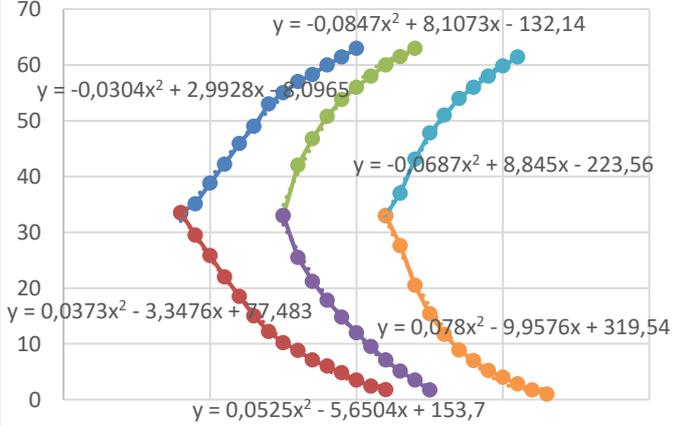
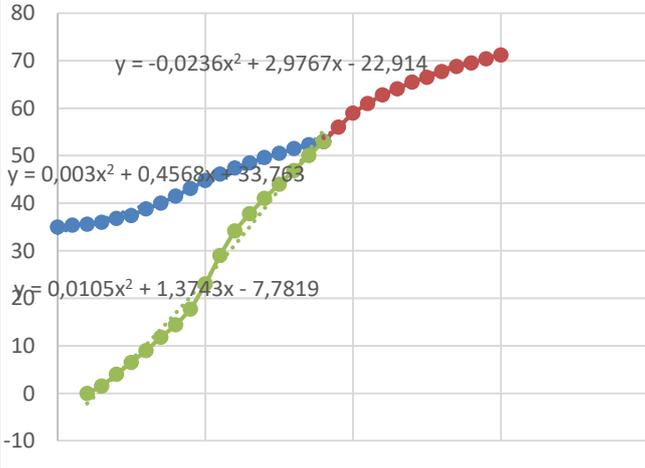
Как отмечалось в разделе 2.6, определение напряженного состояния в зонах механической неоднородности сварных соединений позволит выявить локальные области перехода в пластическое состояние. По сути, выявление таких зон позволит определить наиболее опасные участки сварного соединения, с которых может начаться разрушение.

В разделе 2.4 численно определены зоны локализации, однако аналитическое решение, позволяющее определить их размеры с учетом сложной

формы границ зон механической неоднородности, в предшествующих исследованиях получено не было.

Методом параболической аппроксимации линий контактных границ между зонами механической неоднородности для каждого исследованного типа сварного соединения были определены соответствующие уравнения. Данные уравнения позволили получить соответствующие дифференциальные уравнения первого порядка и вычислить условный коэффициент двухосности для каждого из сварных соединений (Таблица 2).

Таблица 2 – Значения условных коэффициентов двухосности для каждого типа сварных соединений

Тип сварного соединения	Рисунок с уравнениями контактных границ	Значения условного коэффициента двухосности
Продольный	 <p>The graph displays six distinct curves representing contact boundaries, each fitted with a quadratic equation. The equations are:</p> <ul style="list-style-type: none"> $y = -0,0847x^2 + 8,1073x - 132,14$ $y = -0,0304x^2 + 2,9928x - 8,0965$ $y = -0,0687x^2 + 8,845x - 223,56$ $y = 0,0373x^2 - 3,3476x + 77,483$ $y = 0,078x^2 - 9,9576x + 319,54$ $y = 0,0525x^2 - 5,6504x + 153,7$ 	$n_1 = 1,473$ $n_2 = -1,256$ $n_3 = 1,347$ $n_4 = -1,102$ $n_5 = 1,189$ $n_6 = -1,224$
Кольцевой АПГ	 <p>The graph displays three distinct curves representing contact boundaries, each fitted with a quadratic equation. The equations are:</p> <ul style="list-style-type: none"> $y = -0,0236x^2 + 2,9767x - 22,914$ $y = 0,003x^2 + 0,4568x - 33,763$ $y = 0,0105x^2 + 1,3743x - 7,7819$ 	$n_1 = 0,667$ $n_2 = 1,797$ $n_3 = 2,004$

Тип сварного соединения	Рисунок с уравнениями контактных границ	Значения условного коэффициента двухосности
Кольцевой АППГ		$n_1 = 0,348$ $n_2 = 1,984$ $n_3 = 1,196$ $n_4 = -1,885$ $n_5 = -0,018$
Кольцевой АФ		$n_1 = 0,227$ $n_2 = 0,529$ $n_3 = 2,180$ $n_4 = 1,298$

Полученные значения условного коэффициента двухосности далее позволяют построить линии скольжения для зон механической неоднородности каждого из исследуемых типов сварных соединений.

Параметры двухосности и степень механической неоднородности также позволяют определить углы центрированного поля в концентраторах напряжений в сварном соединении, к которым относятся геометрические концентраторы напряжений (переход от усиления валика шва к основному металлу), структурные концентраторы напряжений – зоны механической неоднородности.

Для продольного сварного соединения, сваренного двусторонней автоматической сваркой под флюсом, картина линий характеристик показана на Рисунке 29.

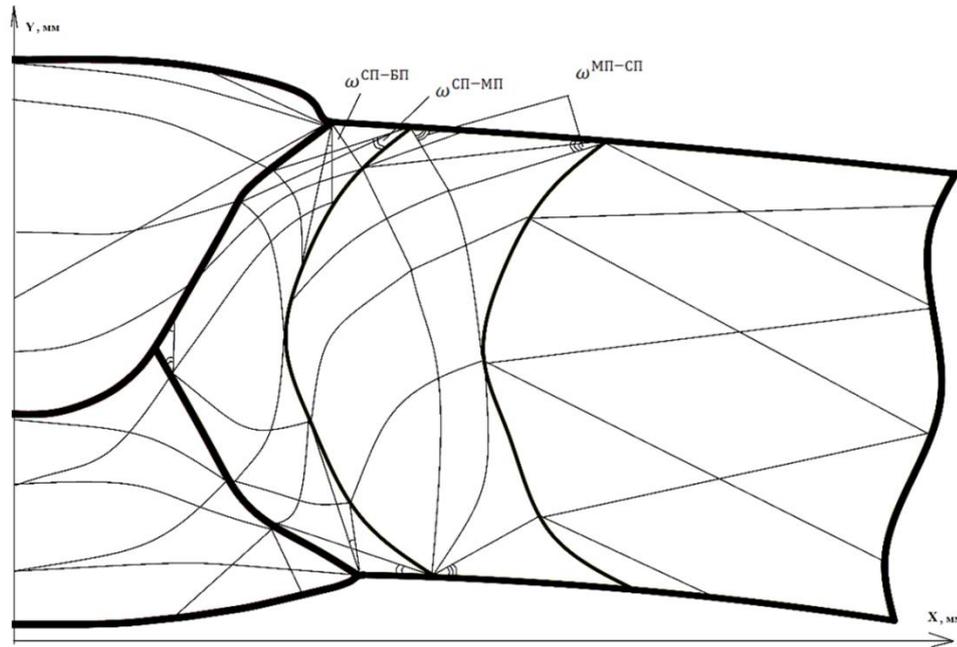


Рисунок 29 – Картина линий характеристик, определяющих напряженное состояние в области концентраторов и зон механической неоднородности для продольного сварного соединения

Размеры центрированных полей в выявленных концентраторах будут определяться выражениями:

$$\omega_{БП-СП} = \frac{K-1}{2K} \left(1 + \frac{(K-1)^2}{8K} \right) \frac{f(n')}{n}; \quad (66)$$

$$\omega_{СП-БП} = \frac{K-1}{2K} \left(1 + \frac{(K-1)^2}{16} \right) \frac{f(n')}{n}; \quad (67)$$

$$\omega_{СП-МП} = \frac{K-1}{2} \left(\frac{K}{2} + \frac{(K+1)(K-1)^2}{16} \right) \frac{f(n')}{n}; \quad (68)$$

$$\omega^{\text{МП-СП}} = \frac{K-1}{2} \left(1 + \frac{(K+1)(K-1)^2}{16} \right) \frac{f(n')}{n}, \quad (69)$$

$$\alpha_{\text{СК}} = 0,5 \arccos \left(\frac{1-2n'}{3} \right). \quad (70)$$

Соответствующие координаты циклоид для построения сетки характеристик определялись из уравнений (45–48).

Для кольцевого сварного соединения, сваренного односторонней сваркой в среде защитных газов, картина линий показана на Рисунке 30.

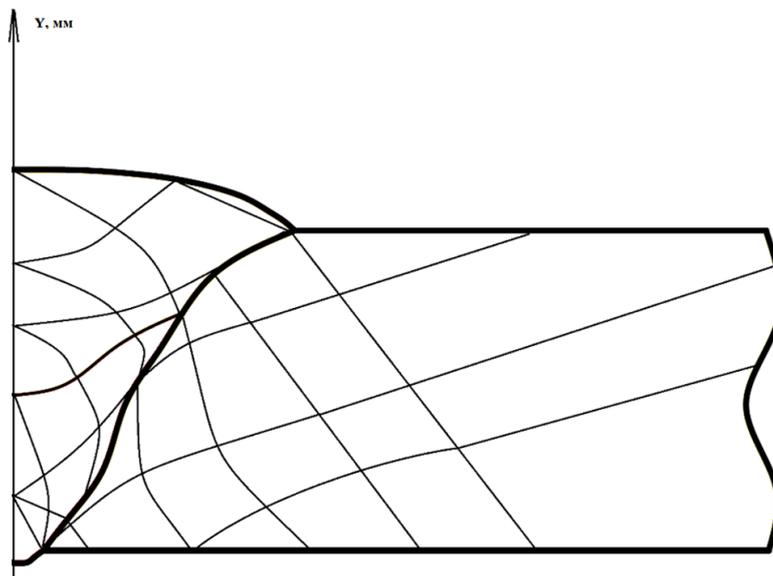


Рисунок 30 – Картина линий характеристик, определяющих напряженное состояние в области концентраторов и зон механической неоднородности для кольцевого сварного соединения АПГ

Соответственно изменится размер и конфигурация центрированных полей, где «преждевременно» наступает стадия пластического деформирования. Вместе с тем указанное изменение будет зависеть только от изменения соответствующей конфигурации условного коэффициента двухосности, при этом соотношения при взаимодействии полей прослоек в зависимости от степени неоднородности не изменятся.

По аналогии с представленными выше картинами распределения линий скольжения по соответствующим зонам механической неоднородности были построены картины для оставшихся типов сварных соединений (Рисунок 31).

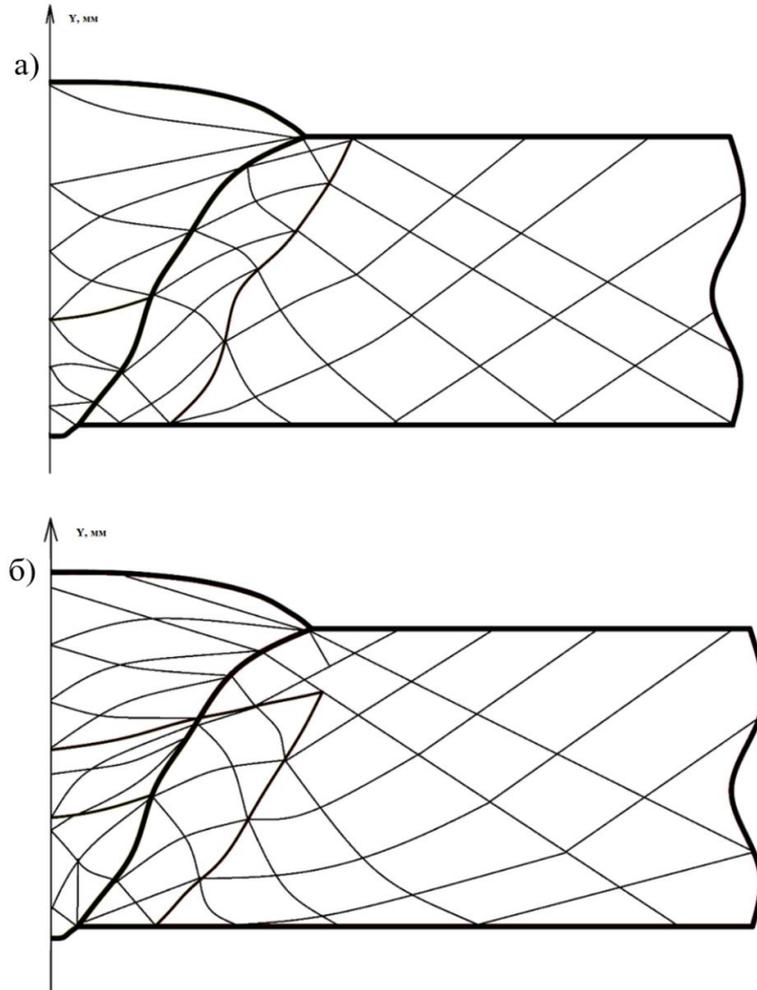


Рисунок 31 – Картина линий характеристик, определяющих напряженное состояние в области концентраторов и зон механической неоднородности для кольцевых сварных соединений АППГ (а) и АФ (б)

Для каждого типа сварного соединения были определены теоретические значения напряжений в нетто-сечении, где располагается концентратор напряжений разного типа:

$$\sigma_y = \frac{2k_M}{h} \frac{2}{3} \sqrt{\left(1 + \frac{df(n')}{dx} n\right) \left(2 - \frac{df(n')}{dx} n\right)} \cdot \left[x - \frac{h}{2} \sqrt{\frac{2 - \frac{df(n')}{dx} n}{\frac{df(n')}{dx} n+1}} \right] + \left(2 + \frac{(K-1)(3-K)}{2}\right) \frac{df(n')}{dx} n, \quad (71)$$

при этом соблюдается условие:

$$\left(2 + \frac{(K-1)(3-K)}{2}\right) \frac{df(n')}{dx} n \leq 2k_M. \quad (72)$$

Таким образом, в зонах концентрации напряжений сварных соединений магистральных трубопроводов локальные напряжения при эксплуатационных нагрузках могут достигать больших значений (Таблица 3).

Таблица 3 – Значения интенсивности напряжений в локальных областях, определенных методом характеристик

Наименование типа сварного соединения	Изображение схемы типа сварного соединения с линиями характеристик	Значения напряжений в локальных областях
Продольный, двусторонняя автоматическая сварка под флюсом		466 МПа
Кольцевой, односторонняя автоматическая сварка под флюсом		386 МПа
Кольцевой, односторонняя автоматическая сварка в среде защитных газов		350 МПа
Кольцевой, односторонняя сварка порошковой проволокой		380 МПа

По результатам проведенных расчетов выявлено, что картина распределения напряжений довольно значительно меняется в зависимости от типов сварных соединений. Таким образом, локализация пластических деформаций происходит в разных частях сварного соединения, что, в свою очередь, влияет на общую несущую способность сварного соединения.

Следует отметить, что с увеличением степени механической неоднородности эффекты, описанные в данном разделе, должны усиливаться. Для магистральных трубопроводов, работающих длительный срок, важно определить участки сварного соединения, с которых может начаться разрушение. Выявляя локальные зоны пластического течения, становится возможным установить наиболее ослабленные участки в масштабе сварного соединения и при наличии дополнительных искусственных концентраторов – дефектов – сделать более точную оценку прочности участка сварного соединения.

Рассмотренные ранее в главе 1 требования к сварным соединениям магистральных трубопроводов за счет введения коэффициентов запасов, позволяют при определении статической прочности уже построенного трубопровода не учитывать некоторое ослабление участков сварных соединений. Однако на особо нагруженных участках линейной части магистральных трубопроводов, определенных в разделе 2.4, на отдельных участках сварного соединения могут наступать локальные пластические деформации, под влиянием которых дефекты на участках сварных соединений могут привести к общей потере устойчивости пластического деформирования.

2.8 Выводы по главе 2

1. Проведен анализ исследований зависимости механических характеристик и показаний твердости. В рассмотренных исследованиях доказывается прямая корреляционная зависимость значений твердости и пределов прочности и текучести. На основе данной теории определена возможность выделения зон механической неоднородности по показателям твердости на макрошлифе сварных

соединений. Наиболее удобным для определения механических характеристик зон сварных соединений оказался метод твердометрии по Виккерсу, так как его индентор может обеспечить достаточную плотность измерения на единицу площади макрошлифа.

2. На основе принятой корреляционной зависимости между показаниями твердости и механическими характеристиками зон сварных соединений были проанализированы значения твердости и их распределение по объему наиболее часто применяемых сварных швов магистральных трубопроводов. Выявлено, что механическая неоднородность является характерной особенностью всех сварных соединений магистральных трубопроводов из низколегированных сталей. Для выявления характера распределения механических характеристик по объему сварных соединений разных типов была проработана методика, которая базируется на линейной аппроксимации изменений значений твердости между соответствующими пограничными точками замеров. По результатам оценки механической неоднородности определено, что каждый из типов сварных соединений имеет свои особенности распределения механических свойств, при этом сварные соединения одного типа могут быть сгруппированы в единую схему при расчете прочности.

3. Проанализированы условия наступления локальных пластических деформаций в выявленных зонах механической неоднородности в зависимости от расположения сварного соединения и условий его эксплуатации. Показано, что существуют такие условия эксплуатации, которые могут привести к нарастанию главных напряжений до уровня начала локального перехода участков сварного соединения в пластическое состояние. Проведено численное моделирование полученных сварных соединений, которое подтвердило образование локальных зон пластического течения.

4. Проведен анализ существующих методов определения напряженно-деформированного состояния сварных соединений с механической неоднородностью. Достаточной точностью обладает метод характеристик, который определяет в зоне механической неоднородности плоскости действия

максимальных касательных напряжений. При этом данный метод должен быть уточнен на контактных и свободных границах прослойки с помощью угла центрированного поля, зависящего от степени механической неоднородности соседних зон и параметра двухосности нагружения. К недостаткам исследованного метода можно отнести схематизацию форм зон механической неоднородности, что может приводить к неточному количественному определению контактного упрочнения менее прочной зоны механической неоднородности.

5. Для решения вопроса учета криволинейной формы зон механической неоднородности в работе предложено введение условных коэффициентов двухосности. Указанные коэффициенты зависят от переменного положения главных и касательных напряжений в каждой точке сварного соединения. С помощью уравнений кривых, условно разграничивающих зоны механической неоднородности, показана возможность учета изменения взаимного положения напряжений на каждом участке контактной границы зон механической неоднородности.

6. При помощи полученных для каждого типа сварных соединений условных коэффициентов двухосности построены линии характеристик, учитывающих как степень механической неоднородности, так и криволинейную контактную границу.

7. Полученные линии характеристик позволили определить напряженно-деформированное состояние разных типов сварных соединений. Кроме того, с помощью аналитических выражений получены параметры области пластического течения, которые возможно отнести к дополнительным концентраторам напряжений, влияющим на процессы потери устойчивости деформирования и перехода в пластическую стадию.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЯ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Как показал анализ результатов замеров твердости образцов, приведенный в главе 2, структурная и механическая неоднородность является характерной особенностью низколегированных сталей, являющихся наиболее распространенными для сооружения магистральных трубопроводов. Расчет прочности таких сварных соединений должен основываться на изучении закономерностей фундаментального распределения механических свойств зон сварных соединений. Полученный в главе 2 массив статистических данных позволил сформулировать принципы определения зон механической неоднородности и выработать методику на основе данных принципов.

Зоны механической неоднородности в числе совокупности факторов определяют процессы упругопластического деформирования участков сварного соединения, при этом степень влияния данных факторов на статическую прочность зависит от дефектного состояния того или иного участка.

Распределение локальных полей напряженно-деформированного состояния в сварном соединении с учетом структурно-механической неоднородности, степени влияния соседних участков на напряженное состояние участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом является важной задачей.

3.1 Постановка задачи

В связи с необходимостью получения более точных аналитических решений для определения несущей способности участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом на основе распределения физико-механических

свойств по объему соответствующих соединений требуется проведение комплекса экспериментальных исследований.

Комплекс исследований сварных соединений низколегированных сталей включает оценку распределения пространственных технологических особенностей в сварных соединениях, построение их феноменологической модели и исследование несущей способности сварного соединения при статических нагрузках для уточненной оценки ресурса магистральных трубопроводов, действующих в условиях эксплуатационных нагрузок.

3.2 Планирование экспериментальных исследований по определению степени влияния механической неоднородности на прочность сварных соединений

Для эффективного определения степени влияния механической неоднородности на прочность сварных соединений с трещиноподобным поверхностным дефектом потребуется комплекс исследований и испытаний.

Зачастую при проведении экспериментальных исследований по определению прочностных характеристик сварного соединения фиксировался факт наличия механической неоднородности, а затем производились разрушающие испытания. Более глубокий анализ формы механической неоднородности и зависимости напряженно-деформированного состояния в районе дефекта не производился.

Цель комплекса экспериментальных исследований – точное определение формы образовавшейся механической неоднородности сварного соединения и получение достоверных количественных данных о критическом разрушающем напряжении. Результаты эксперимента позволят сделать выводы о степени влияния формы и размеров механической неоднородности сварного соединения на его прочность, в том числе при наличии дефектов.

Объектом исследования являются кольцевые сварные соединения, сваренные из низколегированных сталей. Измерения проводились при

температуре 20 ± 3 °С, атмосферном давлении 750 мм рт. ст. Факторами исследования выбраны: положение дефекта относительно зон механической неоднородности, относительный размер зоны механической неоднородности, степень механической неоднородности соседствующих зон (Таблица 4). Структурная схема объекта исследования представлена на Рисунке 32.

Таблица 4 – Кодировка этапов определения факторов

№ этапа	Наименование этапа	Принцип определения
1	Исходный сварочный образец	
1.1	Определение степени механической неоднородности	HV_T/HV_M^*
1.2	Определение относительного размера зоны механической неоднородности	$\int FdF/\delta^2$
2	Положение дефекта относительно зон механической неоднородности	$ЛС \pm x(\text{var})$

Примечания: *НВ – показания твердости по Бринеллю; **F – интегральная площадь зоны механической неоднородности, δ – толщина образца в координате расположения зоны; ***ЛС – линия сплавления.

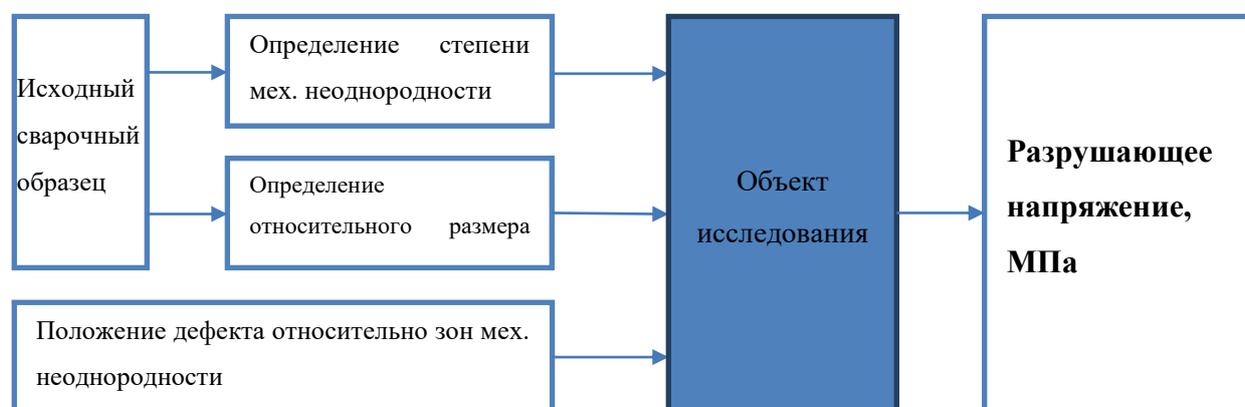


Рисунок 32 – Структурная схема объекта исследования

В соответствии с принятыми факторами комплекс экспериментальных исследований должен быть разделен на два этапа. К первому этапу относятся подготовка испытательных образцов, а также определение степени и размера зон механической неоднородности. Два указанных фактора в дальнейшем позволят верифицировать подготовленную численную и расчетную модели для определения напряженно-деформированного состояния. При этом следует отметить, что указанные факторы являются зависимыми от исходного сварочного образца

Соответственно, на первом этапе потребуется проведение подготовки всего массива образцов, а также выполнение их очистки в степени, достаточной для проведения макроструктурного анализа и дальнейшей микротвердомерии по всему макрошлифу соединения.

Ко второму этапу относятся нанесение дефектов и разрушающие испытания, которые позволят определить зависимость расположения дефекта относительно зон механической неоднородности и, соответственно, возникающих разрушающих напряжений. При этом матрица планирования эксперимента будет показана в Таблице 5.

Таблица 5 – Матрица планирования эксперимента

№ эксперимента	Расположение дефекта относительно линии сплавления	Примечание
0	-	Бездефектные образцы
1	СЩ(ОМ)	Расположение должно корректироваться по результатам определения топографии механической неоднородности
2	ЛС	согласно 1 этапу экспериментальных исследований

№ эксперимента	Расположение дефекта относительно линии сплавления	Примечание
2	Граница ТП – МП	Количество испытаний для обеспечения заданной точности выборки при степени достоверности 0,95 должно быть равно 24 шт. на каждый вид дефекта, т.е. всего 96 испытаний
3	МП	

Определение разрушающего напряжения по результатам испытаний на статическое растяжение позволяет получить графики, отражающие степень зависимости напряженно-деформированного состояния от влияния зон механической неоднородности, определенных по результатам макроструктурного анализа и микротвердомерии.

Требования к испытательным машинам и средствам измерений

При осуществлении комплекса исследований использовано следующее оборудование:

- оптический микроскоп с функцией измерения микротвердости Axiovert-100A (Carl Zeiss). Измерения микротвердости производятся по методу Виккерса с зондом, расположенным под столом микроскопа. К основным характеристикам относятся 500-кратное увеличение, усилие твердомера от 5 до 1000 г.

- универсальная напольная электромеханическая испытательная машина Instron 5982. Оборудование применяется для одноосных статических испытаний на растяжение. Основные характеристики – максимальная прикладываемая к образцу нагрузка – 100 кН, скорость испытания от 0,0001 до 1000 мм/м.

Для контроля параметров окружающей среды потребуются стандартный термометр и влагомер (гигрометр).

Для получения необходимой оценки точности и достоверности был определен объем испытаний для оценки генерального среднеквадратичного

отклонения σ искомой характеристики (максимальное разрушающее напряжение). При этом минимально необходимый объем испытаний (объем выборки) определялся по формуле:

$$(1 + \Delta_{\sigma})^2 = \frac{\chi_{\alpha/2;k}^2}{\chi_{0,5;k}^2}, \quad (73)$$

где Δ_{σ} – максимальная относительная ошибка (допуск) при оценке среднеквадратического отклонения в долях СКО; $\chi_{\alpha/2;k}^2$ и $\chi_{0,5;k}^2$ – квантили распределения Пирсона.

Допуск Δ_{σ} выберем при средней точности, то есть $\Delta_{\sigma} = 0,3$.

Для определения минимального объема испытаний определим $\chi_{\alpha/2;k}^2$ и $\chi_{0,5;k}^2$ с таким числом степеней свободы при заданном α , чтобы выполнялось равенство, приведенное выше. По найденному числу степеней свободы определим, соответственно, объем испытаний.

Уровень доверительной вероятности при инженерных расчетах примем равным 0,95. При этом $\alpha = 1 - P = 1 - 0,95 = 0,05$.

Расчет объема испытаний приведен в Таблице 6.

Таблица 6 – Объем испытаний, обеспечивающий достаточный уровень доверительной вероятности

k	$\chi_{(\alpha/2;k)}^2$	$\chi_{(0,5;k)}^2$	$(\chi_{(\alpha/2;k)}^2)/(\chi_{(0,5;k)}^2)$	Разность
1	5,023886187	0,454936423	11,04305114	9,353051143
2	7,377758908	1,386294361	5,321928095	3,631928095
3	9,348403604	2,365973884	3,951186303	2,261186303
4	11,14328678	3,35669398	3,319720787	1,629720787
5	12,83250199	4,351460191	2,949010546	1,259010546
6	14,44937534	5,348120627	2,701766909	1,011766909
7	16,01276427	6,345811196	2,523359706	0,833359706

k	$\chi_{(\alpha/2; k)}^2$	$\chi_{(0,5; k)}^2$	$(\chi_{(\alpha/2; k)}^2)/(\chi_{(0,5; k)}^2)$	Разность
8	17,53454614	7,344121498	2,387562099	0,697562099
9	19,0227678	8,342832692	2,28013296	0,59013296
10	20,48317735	9,341817766	2,19263294	0,50263294
11	21,92004926	10,34099807	2,119722787	0,429722787
12	23,33666416	11,34032238	2,057848391	0,367848391
13	24,73560488	12,33975588	2,004545724	0,314545724
14	26,11894805	13,33927415	1,958048673	0,268048673
15	27,48839286	14,33885951	1,917055735	0,227055735
16	28,84535072	15,33849889	1,880584987	0,190584987
17	30,19100912	16,33818238	1,847880531	0,157880531
18	31,52637844	17,33790237	1,818350212	0,128350212
19	32,85232686	18,3376529	1,791522996	0,101522996
20	34,1696069	19,33742923	1,767019106	0,077019106
21	35,47887591	20,33722756	1,744528638	0,054528638
22	36,78071208	21,33704481	1,723795981	0,033795981
23	38,07562725	22,33687842	1,70460825	0,01460825
24	39,36407703	23,33672631	1,686786592	0,003213408
25	40,64646912	24,3365867	1,670179538	0,019820462
26	41,9231701	25,33645812	1,654657881	0,035342119
27	43,19451097	26,33633931	1,640110665	0,049889335
28	44,46079184	27,3362292	1,62644202	0,06355798
29	45,7222858	28,33612687	1,613568644	0,076431356
30	46,97924224	29,33603152	1,601417772	0,088582228

Значение степени свободы с наименьшей разницей между левой и правой частями уравнения для заданной выборки и уровня достоверности определяет количество необходимых и достаточных испытаний для образцов.

3.3 Технология сварки и конструкция сварных образцов из низколегированной стали 17Г1СУ

Для проведения экспериментальных исследований была выбрана конструкционная низколегированная сталь 17Г1С-У, являющаяся на сегодняшний день одной из наиболее применяемых сталей при сооружении магистральных трубопроводов.

В процентном соотношении доля труб, изготовленных из стали 17Г1С или 17Г1С-У, представлена на диаграмме (Рисунок 33).

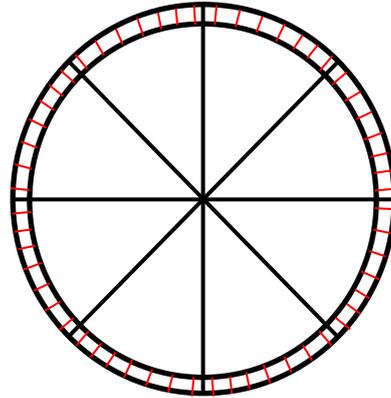


Рисунок 33 – Наиболее применяемые марки стали труб при сооружении МТП, в процентах (%)

Объектом настоящего исследования является кольцевое сварное соединение, выполненное ручной дуговой сваркой электродом марки УОНИ 13/55, для катушки диаметром 530 мм, толщиной стенки 14 мм.

Конструкция сварных образцов

Вырезка образцов из катушки осуществлялась согласно схеме, представленной на Рисунке 34.



$$\pi d = 3,14 * 530 \approx 1665 \text{ мм}$$

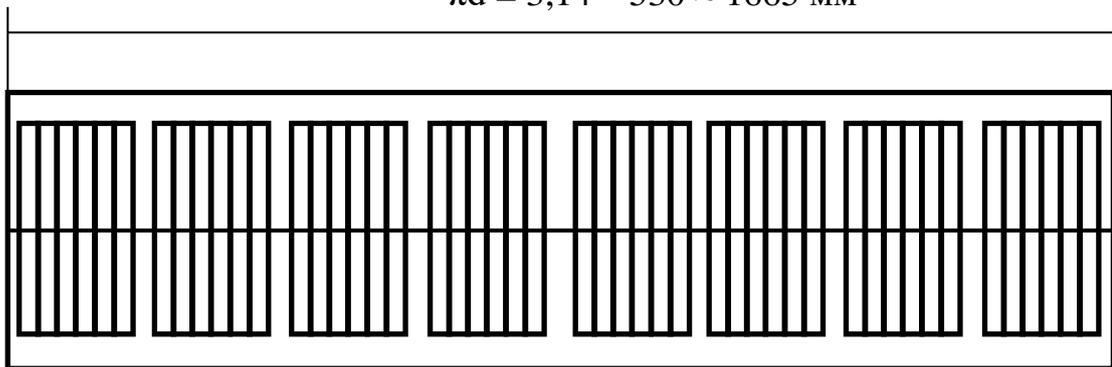


Рисунок 34 – Схема вырезки образцов для испытаний

Учитывая длину развертки и размеры образца, а также уменьшение металла при распиле, оптимальным числом образцов в каждом секторе катушки является 19, то есть суммарно: $19 * 4 = 76$ образцов.

Острые кромки плоских образцов в пределах рабочей части закруглены радиусом не более 1,0 мм путем сглаживания напильником вдоль кромки. Шероховатость поверхности в местах удаления утолщения должна быть не более 6,3 мкм.

Технология сварки образцов, сварочные материалы, сварочное оборудование и режим сварки

В качестве технологии сварки образцов, наиболее показательной с точки зрения выявления зон механической неоднородности, была выбрана многопроходная ручная дуговая сварка плавящимся электродом. Выбор в пользу данной технологии сварки также обусловлен данными, полученными с помощью анализа большого количества образцов, сваренных разными видами сварки, результаты которого приведены в главе 2.

Особенностью ручной дуговой сварки являются высокие температуры перегрева предыдущих слоев, что напрямую влияет на вертикальную зональность макрошлифа сварного соединения по механическим характеристикам.

Сварочные материалы

Для сварки низколегированной стали применялся электрод типа Э50А марки УОНИ-13/55 (ГОСТ 9467-75 Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей) диаметром 4 мм.

Сварочное оборудование

Сварка катушки из низколегированной конструкционной стали типа 17Г1С-У выполнялась постоянным током прямой полярности от инверторного источника сварочного тока, обладающего повышенными статической и динамической характеристиками.

Режимы сварки

Режимы сварки катушек приведены в Таблице 7.

Таблица 7 – Режимы сварки катушек из стали 17Г1С-У

Наименование параметров режима сварки	Значение параметров режима сварки
Сварочный ток, А	90–110
Длина сварочной дуги, мм	5
Диаметр электрода, мм	2,5–3,0
Вылет электрода, мм	15

Технологический процесс сварки

Процесс получения катушки для изготовления образцов состоял из нескольких этапов. На первом этапе выполнялась сварка двух участков труб диаметром 530 мм и толщиной стенки 14 мм. Сварка производилась с применением наружного центризатора. Последовательно выполнялась прихватка по всей окружности сварных стыков, затем сварка не менее 50 % корневого шва, затем снятие центризатора и дальнейшая сварка корневого, заполняющего и облицовочного швов. После снятия центризатора до продолжения сварки корневого шва производилась зачистка швов от окалины механическим путем. Сварка корневого слоя шва выполнялась без перемещения стыка в соответствующих пространственных положениях перемещения сварочной дуги. После сварки каждого из слоев выполнялась механическая зачистка предыдущего слоя от окалины, шлака и брызг металла. Невысокая скорость перемещения электрода обеспечивала качественное проплавление и снижение вероятности появления технологических дефектов сварки.

После проведения сварочных работ была осуществлена вырезка катушки шириной не менее 300 мм (по 150 мм в обе стороны от кольцевого шва), также был проведен неразрушающий контроль сварного соединения, в том числе радиографический контроль панорамным способом (Рисунок 35). В результате неразрушающего контроля не выявлено недопустимых дефектов кольцевого сварного соединения. После проведения неразрушающего контроля катушка с кольцевым сварным швом была размечена, были подготовлены образцы для проведения анализа макрошлифов сварного соединения.



Рисунок 35 – Радиографический снимок исследованной катушки

3.4 Порядок определения зон механической неоднородности сварных соединений низколегированной стали 17Г1С-У

Оценка распределения механических характеристик на участках сварных соединений позволит унифицировать подходы к учету взаимного влияния соседних зон механической неоднородности на напряженно-деформированное состояние участка сварного соединения с дефектом.

Методика оценки распределения механических характеристик основывается на алгоритме замеров твердости, группировке зон механической неоднородности с заданной заранее интервальной составляющей, фиксации границ зон механической неоднородности на основе линейной аппроксимации и оценки микроструктуры металла.

Для фиксации показаний твердости по всему макрошлифу сварного соединения полученные образцы кольцевых сварных соединений из катушки трубопровода далее необходимо подвергнуть полировке и травлению.

Подготовка образцов сварных соединений низколегированной стали 17Г1С к проведению твердометрии

Шлифовка

Абразивные материалы, применяемые при шлифовании, классифицируют по размеру частиц. При подготовке образцов шлифованием применяется поэтапный подход. Поэтапный подход необходим для обеспечения эффективности получения нужного результата по шероховатости и снижения скорости износа абразивов, применяемых для работы. В случае если для необходимого уровня шероховатости будет сразу применен соответствующий абразив, то его расход (износ) может кратно возрасти. При этом ценность абразива возрастает с уменьшением зерна абразива (см. Таблицу 8).

По результатам вырезки образцов контрольных сварных соединений было получено следующее качество контрольной поверхности (Рисунок 36).



Рисунок 36 – Образцы контрольных сварных соединений после вырезки

Шлифование полученных образцов начато с материала с наибольшей зернистостью, с помощью которого за 2–5 мин создана исходная ровная поверхность образца и устранен эффект вырезки. Каждая последующая операция шлифования далее сопровождалась уменьшением зернистости применяемого абразива.

Для правильного выбора шлифовальных шкурок была подобрана соответствующая маркировка, которая включает:

- тип (для металлов);
- способ нанесения абразивного материала;
- размеры листов (рулонов);
- марку бумаги-основы;
- марку абразивного материала;
- зернистость;
- тип связи;
- класс износостойкости.

Таблица 8 – Классификация абразивных порошков и шлифовальных шкур по величине зерна

Обозначения зернистости	100	120	150	180	220	240	280	320
Размер зерна абразива, мкм	150-125	125-105	105-75	34-63	75-53	63-42	53-28	42-20
Обозначения зернистости	M-28	M-20	M-14	M-10	M-7	M-8	M-5	
Размер зерна абразива, мкм	28-20	20-14	14-10	10-7	7-5	5-3,5		

С использованием водоупорных шкур на бумаге, в изготовлении которых применяется зеленый корунд, были получены металлографические шлифы требуемой чистоты (Рисунок 37). Водоупорные шкурки выпускаются под маркой КЗ для зернистости 100–320 и под маркой КЗМ для микронной зернистости (например, КЗ-240 и КЗМ-14). Первый этап выравнивания образцов был выполнен на абразивных кругах зернистостью 40–60 в условиях, исключающих нагрев образцов. При шлифовке на этих абразивах образец размещался в одном положении.

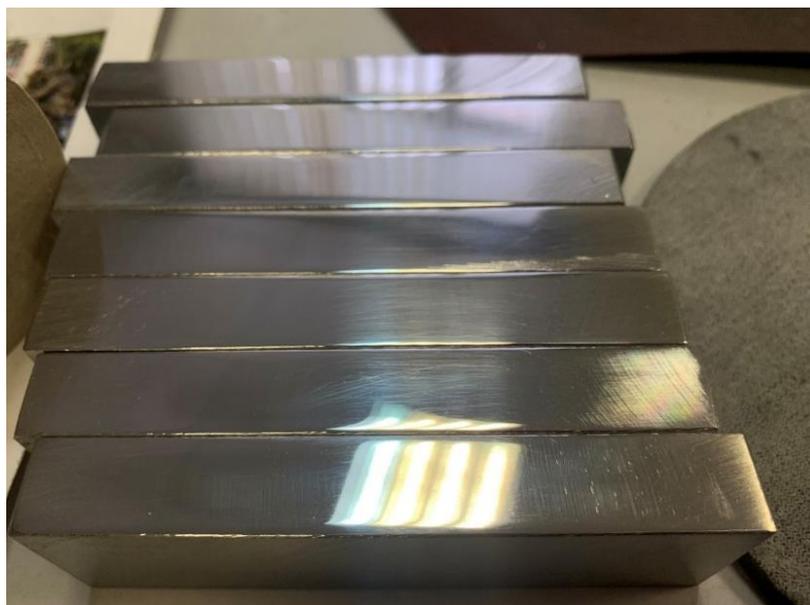


Рисунок 37 – Результат грубой шлифовки образцов

В целях предотвращения переносу частиц на более мелкозернистую шкурку при переходе от более грубой бумаги к менее грубой проводилась промывка образца. Далее переход на более мелкозернистую шкурку сопровождался сменой направления шлифования перпендикулярным предыдущему. Такая схема шлифования применялась для четкого определения окончания шлифовки на данной шкурке. При этом недопустим переход от грубых шкурок к самым тонким, так как грубые штрихи от предыдущей обработки забиваются порошком мелкого абразива и металлической пылью, что создает ложное впечатление хорошей шлифовки.

В целях обеспечения равномерности износа шлифовальной бумаги образец при шлифовке на каждой шкурке смещался от центра к периферии шлифовального диска (Рисунок 38).

Всего в ходе подготовки образцов было использовано четыре шлифовальных круга зернистостью 240, 320, М-28, М-20.



Рисунок 38 – Процесс тонкой шлифовки образцов

Полировка

После шлифовки далее была проведена полировка металлографических шлифов. Полировка проводилась с целью устранения неровностей поверхности образцов, подготовленных для проведения твердометрии. При этом полировка позволила устранить соответствующие неровности без деформирования металла. Полировка шлифа осуществлялась механическим способом. По аналогии с процессом шлифовки для полировки образцы обрабатывались тонким слоем абразива, в качестве которого в большинстве случаев применяется окиси алюминия, хрома или железа. В пропорции до 2 г порошка абразива (окись алюминия) на 1 л воды полирующей суспензией проводилась полировка подготовленных после шлифования образцов. Для полировки образцов применялся полировальный станок с диском, обтянутым сукном, через специальные каналы при полировке подавалась вода и полировальная суспензия (Рисунок 39).



Рисунок 39 – Процесс полировки с применением полировальных материалов

Процесс полировки образцов начинался с определения направления рисок от последнего этапа шлифования, что связано с удобством отслеживания исчезновения рисок после процесса полировки. В среднем процесс полировки каждого из подготовленных образцов занимал до 10 минут с фиксацией стадий полировки по степени исчезновения рисок от шлифовки. Зеркальная поверхность образца являлась индикатором окончания процесса полировки, отслеживалось полное отсутствие рисок на контролируемой стороне (Рисунок 40).



Рисунок 40 – Зеркальная поверхность сварного образца после шлифовки и полировки

Травление

Анализ готового шлифа до процесса травления включает отсутствие царапин, рисок и посторонних загрязнений. Чистота контролируемой

поверхности влияет на качество получаемого рисунка при определении зон сварного соединения. До травления образцов они были изучены на микроскопе с целью определения микротрещин, включений, пор. Обезжиривание поверхности производилось этиловым спиртом. Для промывки использовалась водопроводная вода. После промывки образцы были высушены фильтровальной бумагой и подогретым сухим воздухом. Нетравленные образцы были рассмотрены при малом увеличении (50–100 раз) для оценки чистоты образца. Большинство способов выявления микроструктуры сводится к выявлению границ между фазами, к получению рельефа на поверхности зерен и окрашиванию фаз или структурных составляющих. При больших увеличениях удается выявить качественное различие фаз, двойниковые образования, блочную структуру, ориентировку зерна относительно плоскости шлифа и взаимную ориентировку зерен. Для целей настоящего исследования необходимо было выявить укрупненно зоны термического влияния в сварном соединении для их группировки в зоны механической неоднородности.

Известными способами выявления микроструктуры являются:

1. Химическое травление растворами.
2. Электрохимическое травление с помощью электротока.
3. «Тепловое травление» действием кислорода воздуха при высоких температурах.
4. При высокой температуре с применением реагентов или в вакууме.
5. Травление в солях при относительно высоких температурах.
6. Катодное травление в вакууме с током высокого напряжения.
7. По различию магнитных и немагнитных фаз при приложении магнитного поля или без него.
8. По изменению объема при вторичных превращениях.

Наибольшее распространение получили первые два способа выявления микроструктуры.

Для подготовленных образцов использован способ травления под действием химических реагентов для выявления границ между отдельными зонами сварного

соединения. При более длительном интенсивном действии реагента на отдельные зерна выявляются фигуры травления, которые обычно имеют правильную геометрическую форму, отвечающую кристаллическому строению металла.

Процесс травления проводился с учетом следующих особенностей, касающихся механизма взаимодействия химического реагента и металла:

1. Процессы протекают на поверхности металла в течение сравнительно коротких временных отрезков.

2. Интенсивность процессов связана с различием в природе фаз и агрессивностью воздействующей среды.

3. Процесс воздействия должен быть прерван и не доведен до стадии глубокого разъедания металла.

Физические процессы, лежащие в основе проявления картины результатов травления, в частности сварных соединений низколегированных сталей, заключаются в разности электродного потенциала и свободной энергии на границах и внутри зерна металла. Указанная разница является причиной разности в скоростях растворения металла при помощи химического реагента. На границах зерен растворение происходит с большей интенсивностью. Таким образом, на границах зерен стравливание металла происходит с повышенной скоростью, при этом поверхность зерна также растворяется с меньшей скоростью. Границы травления, явно фиксируемые на полированной поверхности образцов со сварным соединением, имеют более темные линии из-за отраженного света между зернами.

Способ нанесения травящего реактива выбирается в зависимости от его состава и состава сплава. Применяется погружение образца полированной поверхностью кверху или книзу, втирание ватой (Рисунок 41), смачивание поверхности из капельницы или пипетки. Погружение образца лучше применять при травлении медленно травящихся образцов. Время травления зависит от применяемого увеличения: для малого увеличения следует травить дольше, чем для большого. После травления образцы промывают струей проточной воды и затем сушат (фильтровальной бумагой или струей воздуха).



Рисунок 41 – Процесс травления образцов

Если образец оказался недотравленным, то необходимо дотравить повторным травлением. Повторное травление должно следовать незамедлительно за первым. Если образец перетравлен, то необходимо споллировать верхний слой металла и снова произвести травление. К числу универсальных травителей относятся спиртовые и водные растворы азотной кислоты. Также могут использоваться водные растворы фтороводородной кислоты или плавиковой кислоты. Для травления подготовленных образцов использовались растворы азотной кислоты, при этом в качестве способа нанесения было выбрано смачивание полированной поверхности ваткой. Результаты травления показаны на Рисунке 42.



Рисунок 42 – Результат травления

Оценка твердости макрошлифа для определения зон механической неоднородности

Оценка твердости полученных макрошлифов сварных соединений производилась при помощи прибора измерения твердости ПМТ-3М (Рисунок 43). Прибор определяет твердость материала по отпечатку, оставленному на

выбранном участке после вдавливания в него индентора. Точки замера микротвердости выбирались исходя из полученных по результатам травления зон сварного соединения. Поскольку целью микротвердомерии было картирование зон механической неоднородности, было выбрано пять основных линий замера, каждая из линий имела от 5 до 14 точек вдавливания.

Для удобства перемещения кронштейна с тубусом микроскопа у ПМТ-3М имеется стойка с гайкой и ослабленным винтом. Тубус может перемещаться в двух режимах: макроподачи и микроподачи. В наклонной трубке тубуса имеются окуляр и объектив.

К тубусу прикреплен механизм нагружения с алмазным наконечником, представляющим собой четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136° . На основании расположен предметный столик, верхнюю часть которого при помощи винтов можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях (координатное перемещение) и рукояткой поворачивать вокруг оси приблизительно на 180° от одного упора до другого (полукруговое перемещение). На столик устанавливался образец. Центрирование прибора осуществляется винтами. Для нагружения применяют специальные грузы в форме шайб с вырезом массой 5, 10, 20, 50, 100, 200 и 500 г.



Рисунок 43 – Твердомер ПМТ-3М

При испытании полученных образцов использовалась нагрузка 200 г. Указанная нагрузка была выбрана в результате решения оптимизационной задачи, когда, с одной стороны, требовалось достаточное усилие для получения достоверных результатов твердости для низколегированной стали, а с другой, количество точек вдавливания достаточно большое, что не позволяло увеличивать силу вдавливания без влияния на соседние участки замера (Рисунок 44).

Диагональ полученного отпечатка измерялась окулярным микрометром.

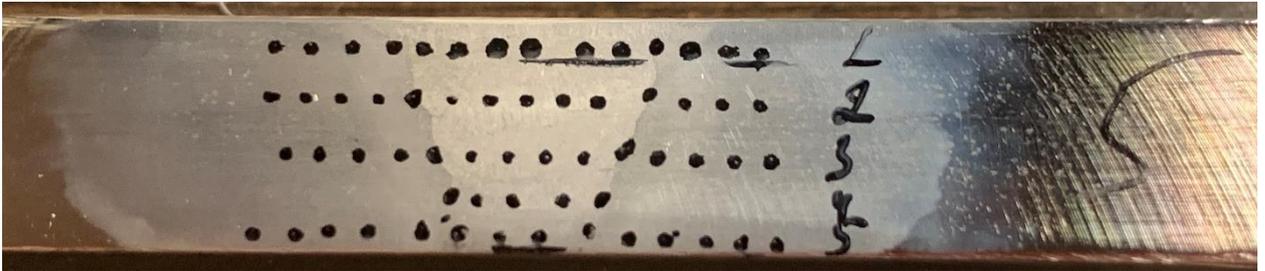


Рисунок 44 – Замеры твердости образцов

Результаты замеров микротвердости

Результаты замеров микротвердости далее в качестве первичных данных представляются в виде графиков распределения твердости по точкам (Рисунок 45)

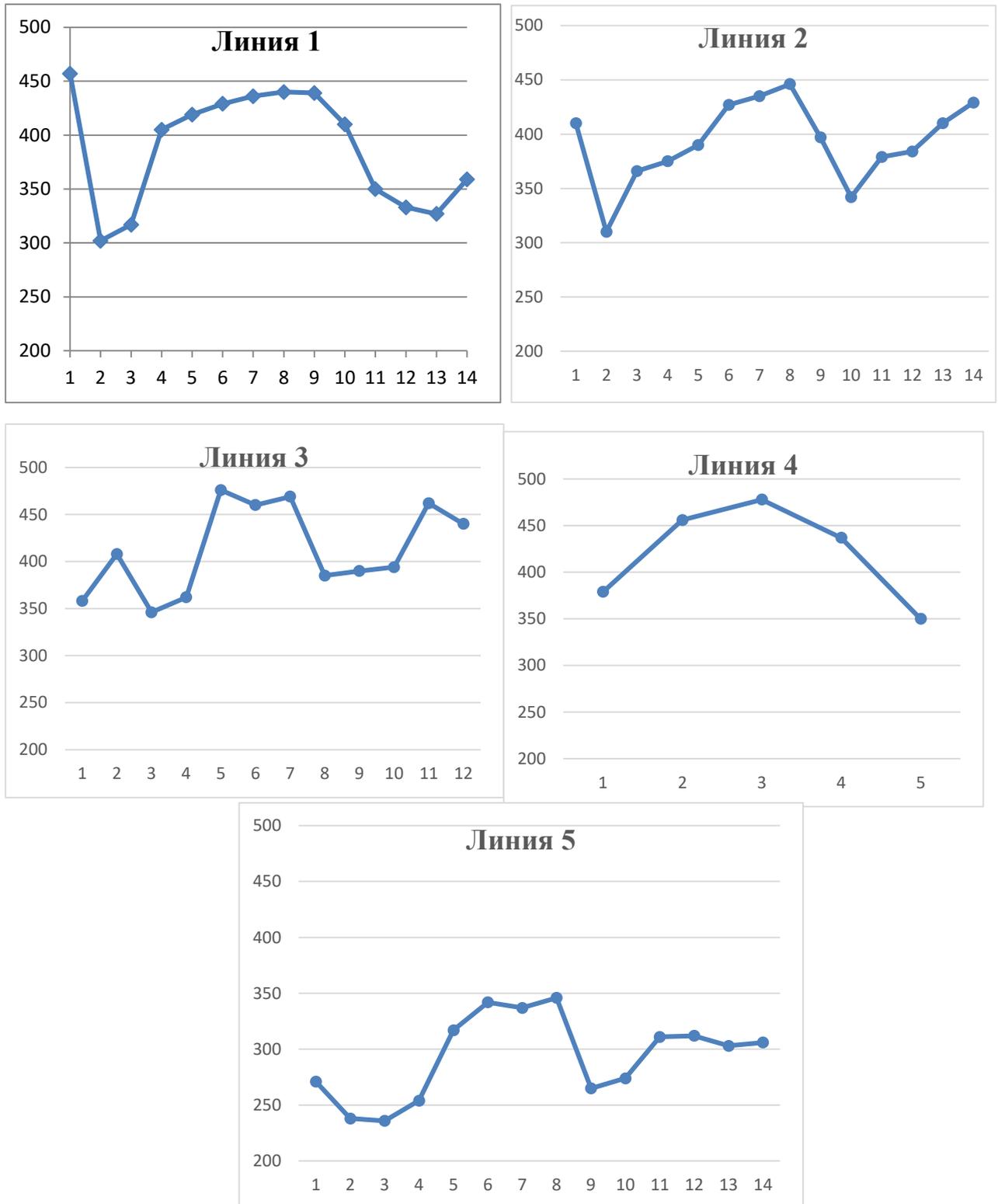


Рисунок 45 – Пример распределения микротвердости на макрошлифе

Применение методики определения зон механической неоднородности

Как показано в [121], форма зон механической неоднородности в сварных соединениях углеродистых и низколегированных сталей является сложной, обуславливает специфику их сложного напряженно-деформированного состояния при нагружении. Форма зон механической неоднородности определяется физико-химическими особенностями, технологическими условиями выполнения процесса сварки, к которым следует отнести:

- геометрическую форму разделки кромок;
- диффузионные процессы между металлом шва и основным металлом;
- вторичные тепловые воздействия на сварные швы со стороны последующих (при многопроходной сварке);
- химический состав и внешние воздействия на процессы кристаллизации металла шва и, соответственно, микроструктуру зон сварного соединения;
- температурные режимы и распределение тепловых потоков при сварке и т.д.

Для получения картины механической неоднородности сварных соединений хорошие результаты дают известные методы измерения твердости.

Показания твердости разных зон макрошлифов реальных сварных соединений позволяют разграничить зоны механической неоднородности, определить их формы и дать приближенную оценку механических характеристик металла отдельных участков сварного соединения (Рисунок 46).

Совместное влияние на зоны механической неоднородности сложной формы со стороны эксплуатационных нагрузок и друг друга определяют сложное напряженно-деформированное состояние [121].



Рисунок 46 – Пример разграничения зон механической неоднородности по показаниям микротвердости (по Виккерсу, HV)

Исследования напряженно-деформированного состояния бездефектных сварных соединений со сложными формами зон механической неоднородности представлены ранее в работах [2, 54]. Следует отметить, что для совершенствования математической модели нагружения сварных соединений со сложными формами зон механической неоднородности необходимо учитывать переменный угол наклона контактных плоскостей между зонами механической неоднородности и направлением приложения внешней нагрузки.

Напряжения в зонах механической неоднородности и на контактных поверхностях смежных зон определяются как механическими свойствами каждой из зон, так и углом наклона контактной поверхности в конкретной точке к направлению внешней нагрузки, главного напряжения и касательных напряжений на контактных поверхностях.

При увеличении нагрузки до уровня перехода отдельных зон в пластическое состояние – напряжения в направлении приложения нагрузки становятся переменными по толщине образца. Следовательно, для оценки несущей способности сварного соединения в целом требуется определение среднеинтегрального напряжения по всей зоне механической неоднородности. Учитывая, что в направлении границ контактных поверхностей напряжения остаются неизменными, все компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций не зависят от координаты в направлении границ контактных зон, что позволяет решать задачу в плоскости «среза» или в плоскости макрошлифа сварного соединения.

3.5 Исследования прочности зон механической неоднородности с трещиноподобными дефектами

Для проведения оценки влияния отдельных зон механической неоднородности на напряженно-деформированное состояние участка – на подготовленные образцы были нанесены трещиноподобные дефекты при помощи электроэрозионной машины (Рисунок 47). Использование такой машины для нанесения искусственного дефекта обусловлено возможностями выноса металла электроэрозией без существенного увеличения температуры на выбранном локальном участке. Исключение температурного влияния на зоны вырезки позволяет делать вывод о существенном снижении вероятности изменения структуры металла на локальном участке нанесения дефекта, что, в свою очередь, позволяет принимать в качестве начальных условий неизмененную микроструктуру металла при моделировании воздействий.



Рисунок 47 – Нанесение трещиноподобных дефектов на образцы

Параметры трещиноподобного дефекта определены как 10 % глубины образца (Рисунок 48). При этом для свободной поверхности нанесения трещиноподобного дефекта определены четыре группы размещения:

– СШ (ОМ) – сварной шов (основной металл) – наиболее твердый участок сварного соединения;

- ЛС – линия сплавления сварного шва с основным металлом;
- МП – менее прочная прослойка, находящаяся в окружении более прочных зон;
- граница ТП–МП – граница зон механической неоднородности.

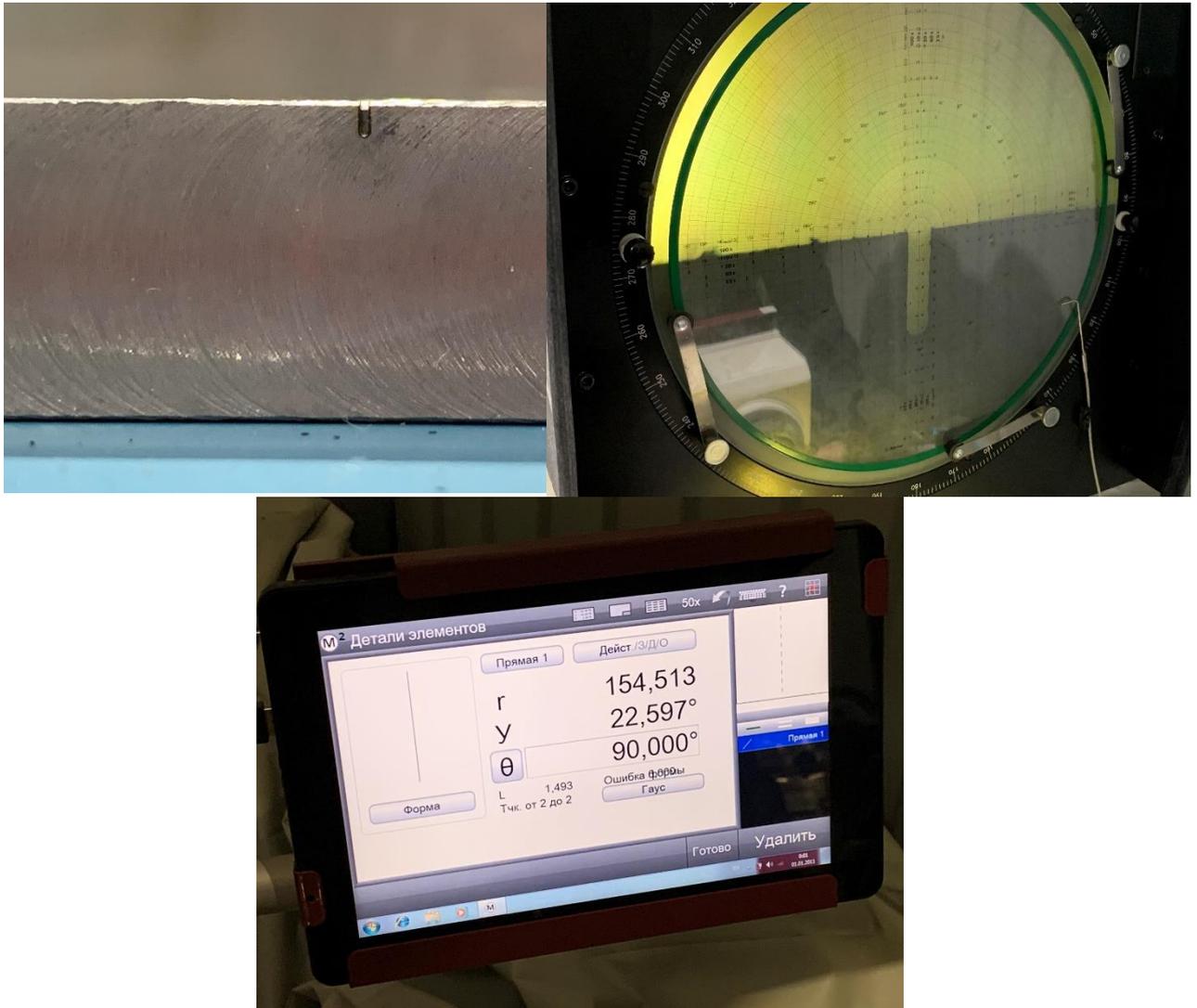


Рисунок 48 – Параметры трещиноподобного дефекта

3.6 Статические испытания образцов с трещиноподобным дефектом

Исследования проводились в закрытом помещении при нормальных климатических условиях согласно ГОСТ 15150:

- температура окружающего воздуха от +15 до +35 °С;

– относительная влажность от 45 до 80 %;

– атмосферное давление от 84,0 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.).

Освещенность рабочего места должна составлять не менее 500 люкс по СП 52.13330.2011.

После проведения сварки все контрольные сварные стыки были промаркированы.

Объем неразрушающего контроля сварных соединений: РК 100 % каждым методом.

Тип образцов – плоский согласно схеме XII по ГОСТ 6996 (Рисунок 49).

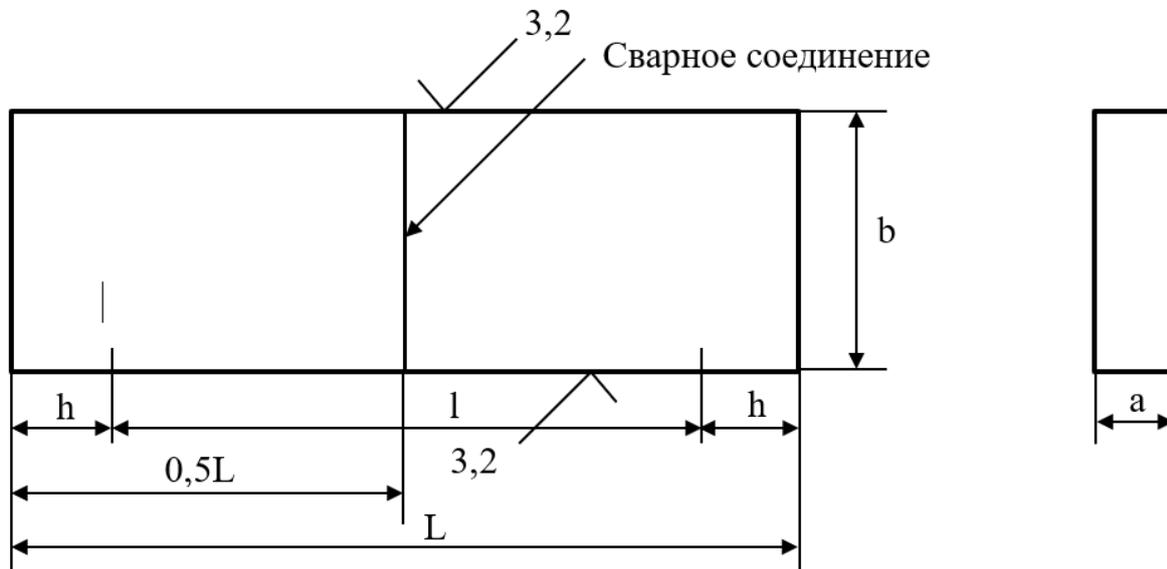


Рисунок 49 – Образцы для испытаний контрольных сварных соединений по ГОСТ 6996

Для оценки сложного напряженно-деформированного состояния механически неоднородного сварного соединения с учетом выделенных зон предлагается актуализировать существующие зависимости, включающие расчеты характеристик мягких прослоек при переходе в пластическое состояние.

Статические испытания проводились на испытательной машине Instron (Рисунок 50).



Рисунок 50 – Модель универсальной испытательной машины Instron 5966

Как отмечалось выше, важную роль в определении реального напряженно-деформированного состояния механически неоднородного сварного соединения будет играть механика взаимодействия зон механической неоднородности, находящихся в контакте.

Результаты разрывных испытаний представлены на гистограмме (Рисунок 51), на которую нанесены данные по усилиям разрыва образцов в зависимости от расположения трещиноподобного дефекта.

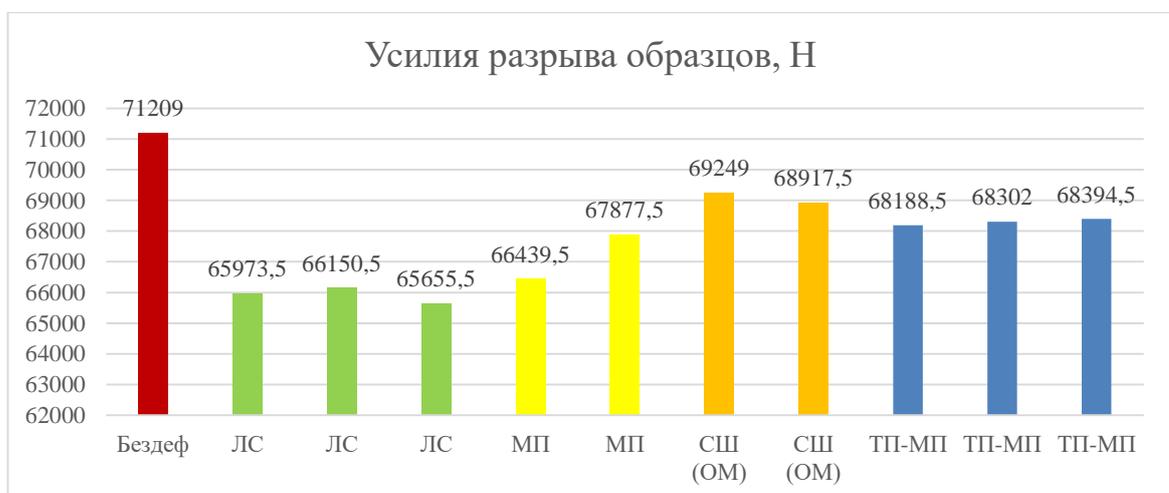


Рисунок 51 – Усилия разрушения образцов

В рамках анализа результатов испытаний образцов на статическое растяжение (Рисунок 52) можно выделить следующие характерные особенности:

– все неоднородные зоны, учтенные в рамках модели, оказывают влияние на соседние участки;

– соседние более мягкие участки скорее ослабляют более твердые, переводя их в зону пластических деформаций при действующих напряжениях, находящихся ниже уровня предела текучести для данного материала;

– переход между зонами с отличающимися механическими характеристиками является потенциально опасным, в том числе с учетом накопления деформация вдоль границ зон и потенциала снижения в приграничных зонах запаса пластичности.

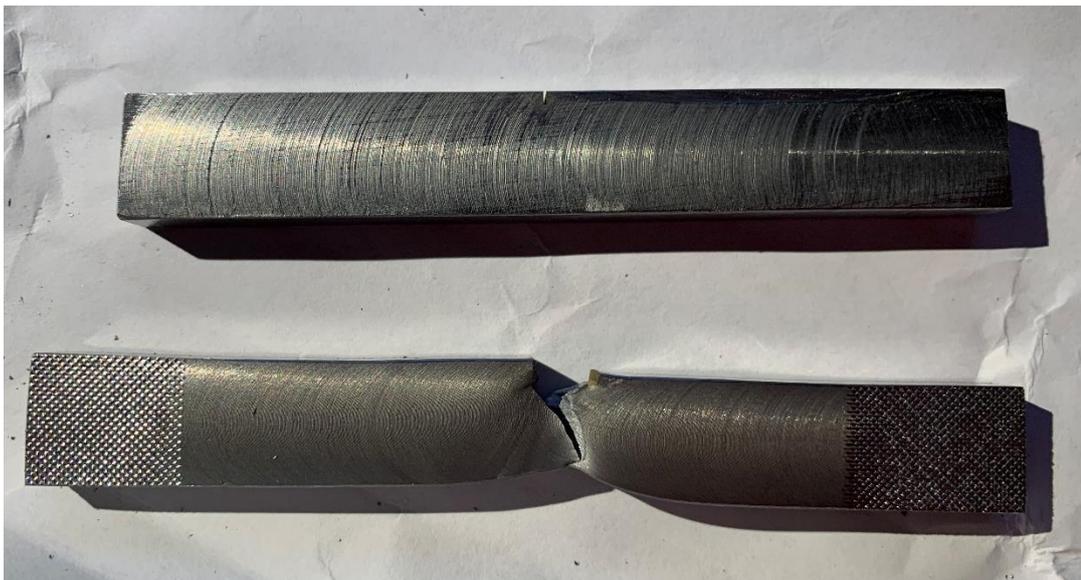


Рисунок 52 – Разрушенный образец

3.7 Выводы по главе 3

1. Для подтверждения результатов распределения значений прочности по объему сварного соединения были спланированы и проведены экспериментальные исследования на образцах кольцевых сварных соединений трубопроводной низколегированной стали, полученных ручной электродуговой

сваркой. В ходе экспериментальных исследований было выявлено, что для подобных сварных соединений, как и для других типов соединений в магистральных трубопроводах, характерна механическая неоднородность. Применение метода замеров твердости по Виккерсу дало удовлетворительные результаты на уровне доверительной вероятности 0,95. Для разграничения зон механической неоднородности был применен метод линейной аппроксимации значений.

2. По результатам испытаний полученных образцов на статическое растяжение выявлено, что прочность бездефектных образцов незначительно снижается по сравнению с нормативной прочностью низколегированной стали, что объясняется влиянием механической неоднородности как единственного естественного концентратора напряжений в рассмотренных образцах. Усиления валика сварных соединений были исключены при помощи шлифовки. Снижение прочности составило порядка 2 %.

3. В ходе экспериментальных исследований также были сформированы искусственные концентраторы напряжений – поверхностные трещиноподобные дефекты. Параметры данных дефектов были одинаковы для всех образцов. Трещиноподобные дефекты наносились в разных, заранее определенных зонах механической неоднородности. Результаты статических испытаний таких образцов на прочность показали, что усилия разрушения образцов варьируются в зависимости от расположения трещиноподобного дефекта относительно зон механической неоднородности. Разность усилий разрушения достигала 10 %. Учитывая то, что иные естественные концентраторы напряжений (усиления валика шва) были исключены, относительное влияние зон сварного соединения на трещиноподобный дефект является единственным фактором, влияющим на конечные значения усилий разрыва.

4. Разность значений усилий разрыва требует аналитического описания с точки зрения влияния зон механической неоднородности в сварном соединении. Полученные в главе 2 аналитические зависимости для определения размеров зон локального перехода к пластическому деформированию позволят описать дополнительные искусственные концентраторы напряжений (трещиноподобные дефекты) с тех же позиций методом характеристик.

ГЛАВА 4. РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ НАЛИЧИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕЩИНОПОДОБНОГО ДЕФЕКТА

Как показали исследования прочности неоднородных сварных соединений с трещиноподобным дефектом, приведенные в главе 3, в условиях статического растяжения потеря несущей способности наступает при разных нагрузках, зависящих от расположения дефекта. Безусловно, опасность дефектов, находящихся в разных зонах механически неоднородного сварного соединения, должна оцениваться с учетом нелинейного характера распределения прочности в сварном соединении под действием нагрузок [54].

Определение параметров напряженно-деформированного состояния зон механической неоднородности в составе сварного соединения отличается существенными трудностями. Для решения подобного рода задач применяются дифференциальные уравнения в частных производных. Порядок дифференциальных уравнений определяется степенью упрощения расчетной схемы. При этом даже при расчете плоской деформации изотропного материала в получаемых системах уравнений появляется большое количество неизвестных. Дополнительно усложняющим фактором является наличие дефекта в сварном соединении, который является концентратором напряжений, отчего картина локализации напряжений меняется.

Большой цикл работ о напряженном состоянии зон механической неоднородности и о дефектах в зонах механической неоднородности [8–21, 102, 114] основан на решении задачи о напряженном состоянии бесконечной пластической полосы или задачи Прандтля [111]. Часто используемым решением является также метод линий скольжения, которые используются в качестве характеристик плоскостей скольжения. Данный метод является графоаналитическим и тесно связан с решением задачи Прандтля.

Методом характеристик в главе 2 были определены локальные зоны перехода сварного соединения в пластическое состояние. Были определены естественные зоны концентрации напряжений и их влияние на общую прочность сварного соединения. Оценка влияния локальных зон концентрации напряжений на искусственные концентраторы напряжений – дефекты – позволит практически применить разрабатываемую методику при определении прочности участков с дефектами по результатам технической диагностики.

4.1 Существующие способы расчета прочности участков сварных соединений с трещиноподобным дефектом

Проведенный в работе [65] глубокий анализ методик расчета на прочность показал, что практическое применение нашла методика определения прочностных параметров и параметров долговечности участков трубопроводов с дефектами, в основе которой лежит энергетическая теория прочности. В рамках данной методики вычисляются деформационные критерии участков с учетом условий деформирования при разных уровнях напряжений и с учетом уровня концентрации напряжений от выявленного дефекта.

Данная методика стала частью отраслевых нормативных требований [65]. Указанная методика предполагает оценку концентрации напряжений и деформаций в дефектных зонах трубопроводов, которые отражают искажение полей напряжений и деформаций относительно бездефектных участков. В такой постановке становится возможной оценка влияния форм и свойств механической неоднородности на искажение полей напряжений в дефектной зоне концентрации напряжений сварного соединений.

Расчеты на прочность участков с дефектами осуществляются после проведения диагностических обследований линейной части магистральных трубопроводов. Результаты расчетов позволяют эффективно планировать ремонтные работы для обеспечения надежной и безопасной работы магистральных трубопроводов [65].

В рамках методики, все этапы расчета по которой приведены в работе [65], определяются компоненты напряженно-деформированного состояния участка трубопровода без дефекта и с выявленными в ходе диагностики дефектами (с четкими параметрами дефекта, определенными по данным внутритрубной диагностики и дополнительного дефектоскопического контроля).

Для исследования в качестве примера вопроса оценки влияния свойств и форм механической неоднородности на прочность сварного соединения магистрального трубопровода при статических нагрузках необходимо произвести расчет трещиноподобного дефекта с параметрами дефекта, исследованными в главе 3.

При проведении расчетов рассматривается поверхностная трещина с конечной протяженностью, глубиной, а также с постоянным положением относительно оси трубопровода.

В соответствии со схемой расчета на первом этапе рассматривается идентичный по условиям участок без дефекта, где определяются номинальные напряжения, интенсивность номинальных напряжений, номинальные деформации. При этом напряженно-деформированное состояние принимается плоским.

Номинальные напряжения для расчетного случая, симитированного в ходе экспериментальных исследований, представленных в главе 3, могут быть получены равными разрушающему усилию для бездефектного образца, отнесенному к площади поперечного сечения. Тогда интенсивность напряжений определится как:

$$\sigma_{i \text{ бездеф}} = \frac{N_{\text{разуш}}}{S_{\text{обр}}}. \quad (74)$$

Тогда условные компоненты напряжений в цилиндрических координатах для плоского напряженно-деформированного состояния в приложении к эксплуатационным условиям:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{i \text{ бездеф}} = \sqrt{\sigma_{\theta \text{ бездеф}}^2 + \sigma_{z \text{ бездеф}}^2} \\ \sigma_{\theta \text{ бездеф}} = \sigma_{\text{кц}} = 2\sigma_{\text{пр}} = 2\sigma_{z \text{ ном}} \end{array} \right. \quad (75)$$

Компоненты с индексом θ относятся к кольцевой составляющей напряжений в цилиндрической системе координат, тогда как компоненты с индексом z относятся к продольной составляющей напряжений. При этом радиальные компоненты напряжений не учитываются ввиду их малости по сравнению с предыдущими компонентами, а также в целях упрощения дифференциальных уравнений для плоского напряженно-деформированного состояния по сравнению с объемным напряженно-деформированным состоянием.

Бездефектные компоненты деформаций, учитывающие свойства материала и концентрацию напряжений в бездефектном сварном соединении при действии эксплуатационных напряжений, определяются через соответствующие компоненты напряжений и свойства металла шва, полученные при помощи стандартных испытаний.

Далее в рамках этапа расчета бездефектного участка определяется интенсивность деформаций для плоского напряженно-деформированного состояния.

После определения интенсивности деформаций для бездефектного участка производится двухэтапный расчет участка с дефектом. На первом этапе определяются условно-упругие компоненты напряжений и интенсивность напряжений на участке сварного соединения с дефектом (в ослабленном нетто-сечении). При этом, как и в случае с бездефектным участком, рассматривается двухосное напряженное состояние (радиальная компонента принимается равной нулю).

Значения интенсивности напряжений в сечении с дефектом далее используются для определения упругого коэффициента концентрации напряжений. Определение коэффициента концентрации позволяет определить

степень повышения напряжений в сечении с дефектом с учетом уменьшения толщины стенки:

$$\alpha_e = \frac{\sigma_{ie \text{ нетто}}}{\sigma_{i \text{ ном}}}. \quad (76)$$

Далее коэффициент концентрации уточняется для стадии наступления пластического течения в металле с учетом фактора деформационного упрочнения. Коэффициент деформационного упрочнения определяется по результатам испытаний на растяжение стандартных образцов металла, без учета сварного соединения.

Очевидно, что для получения результатов, коррелирующих с результатами испытаний образцов с трещиноподобным дефектом, должен быть исследован случай, когда в пластическую деформацию вступают уже бездефектные участки сварного соединения.

После получения значений коэффициента концентрации производится расчет упругопластических компонент местных напряжений в полярных координатах.

Аналогично этапу расчета бездефектного участка далее производится расчет компонент упругопластических деформаций, а также производится расчет интенсивности деформации на участке, ослабленном дефектом.

В рамках второго этапа расчета участка с дефектом определяется локальное напряженно-деформированное состояние вблизи вершины трещиноподобного дефекта. Определение НДС производится аналогично методам механики разрушения: вычисляются компоненты номинальных и местных напряжений в локальной системе координат, связанной с вершиной трещины. Также следует отметить, что ориентация трещиноподобного дефекта вдоль сварного соединения, как отмечено выше, определит совпадение локальной оси координат с глобальной для трубопровода.

Далее в качестве номинальных напряжений назначаются напряжения, удовлетворяющие условию принятия максимально возможных компонент условно-упругих напряжений, скорректированных на исследуемое нетто-сечение.

Выделенный локальный объем вокруг вершины трещиноподобного дефекта составляет нулевой угол ориентации с глобальной системой координат, привязанной к оси трубопровода, условно-упругие компоненты локальных напряжений определяются суммой компонентов упругопластических напряжений в бездефектной части и в нетто-сечении, отнесенных к соответствующим общим размерам дефекта и характерному размеру. Характерный размер ρ связан с работой по разрушению объема металла в рабочем сечении при испытаниях на ударную вязкость.

В связи с тем, что в рамках экспериментальных исследований рассматривалось плоское напряженно-деформированное состояние, при расчете упругопластических компонентов локальных напряжений коэффициент Пуассона будет определяться по формуле $\nu/(1 - \nu)$.

Аналогично предыдущим этапам расчета вычисляется упругий коэффициент концентрации напряжений и далее пересчитывается с учетом фактического напряженно-деформированного состояния и процессов деформационного упрочнения.

При помощи полученных коэффициентов концентрации далее могут быть вычислены упругопластические компоненты локальных напряжений.

Далее по значениям упругопластических компонент локальных напряжений производится расчет локальных деформаций и затем – интенсивность деформаций в локальном объеме в области вершины трещины.

Как уже отмечалось в главе 1, выводы по результатам расчета на прочность делаются на основе определения двухпараметрических критериев предельной прочности и предельной пластичности для каждого этапа расчета: бездефектный участок, участок с объемным дефектом (нетто-сечение стенки), область у вершины трещины.

Анализ численных значений двухпараметрических критериев при начальных и граничных условиях, заданных экспериментальными исследованиями, показал, что расчетные усилия разрыва, во-первых, не зависят от месторасположения дефекта относительно сварного соединения, во-вторых, несколько превышают значения, полученные для экспериментальных образцов. При этом такое превышение в первую очередь обусловлено масштабными особенностями деформирования оболочковой конструкции по сравнению с образцом, испытываемым на растяжение.

Динамика достижения предельного состояния участка с поверхностным трещиноподобным дефектом показана на графике (Рисунок 53).



Рисунок 53 – Значения двухфакторных критериев разрушения

Из построенного графика видно, что значения критериев предельной прочности и пластичности достигают единицы при значениях, несколько больших, чем значения усилий разрыва дефектных образцов. Численно разница может достигать 13%. Также из графика можно сделать вывод, что методика учитывает процессы деформирования трубопроводной стали, когда на определенном продолжительном участке диапазона растягивающих усилий

преобладают упругопластические законы деформирования. Далее при накоплении определенного дефектного состояния (точка пересечения кривых значений критерия предельной прочности и критерия предельной пластичности) происходит резкое изменение упругопластических свойств и с ростом усилия происходит разрушение участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом. Аналогичные процессы наблюдаются и при лабораторных испытаниях образцов.

Безусловно, факторы, влияющие на сопротивляемость участка трубопровода с трещиноподобным дефектом и сопротивляемость экспериментального образца, различаются. Вместе с тем результаты расчета по существующей методике показывают, что вопросы достижения предельной прочности и предельной пластичности требуют дополнительного раскрытия в части расположения трещиноподобного дефекта относительно зон механической неоднородности сварного соединения.

4.2 Определение условного показателя двухосности нагружения для экспериментально определенной формы контактной границы бездефектного сварного соединения

Ранее в главе 2 было показано, что криволинейная форма контактной границы между зонами механической неоднородности может быть представлена путем вариации коэффициента двухосности нагружения в каждой точке контактной границы.

После экспериментального исследования криволинейных форм контактных границ зон механической неоднородности в главах 2 и 3 становится возможным описание условной вариации коэффициента двухосности в сварных соединениях низколегированных трубопроводных сталей.

Технологические особенности получения многослойного сварного соединения магистральных трубопроводов, физика теплоотдачи от сварочной дуги к основному металлу в совокупности определяют формы границ зон

механической неоднородности, близкие к параболическим (Рисунок 54). Параболическая аппроксимация функции линий контактной границы одновременно является как более приближенной к реальной форме границ зон механической неоднородности, так и достаточно удобной для учета в инженерных расчетах.

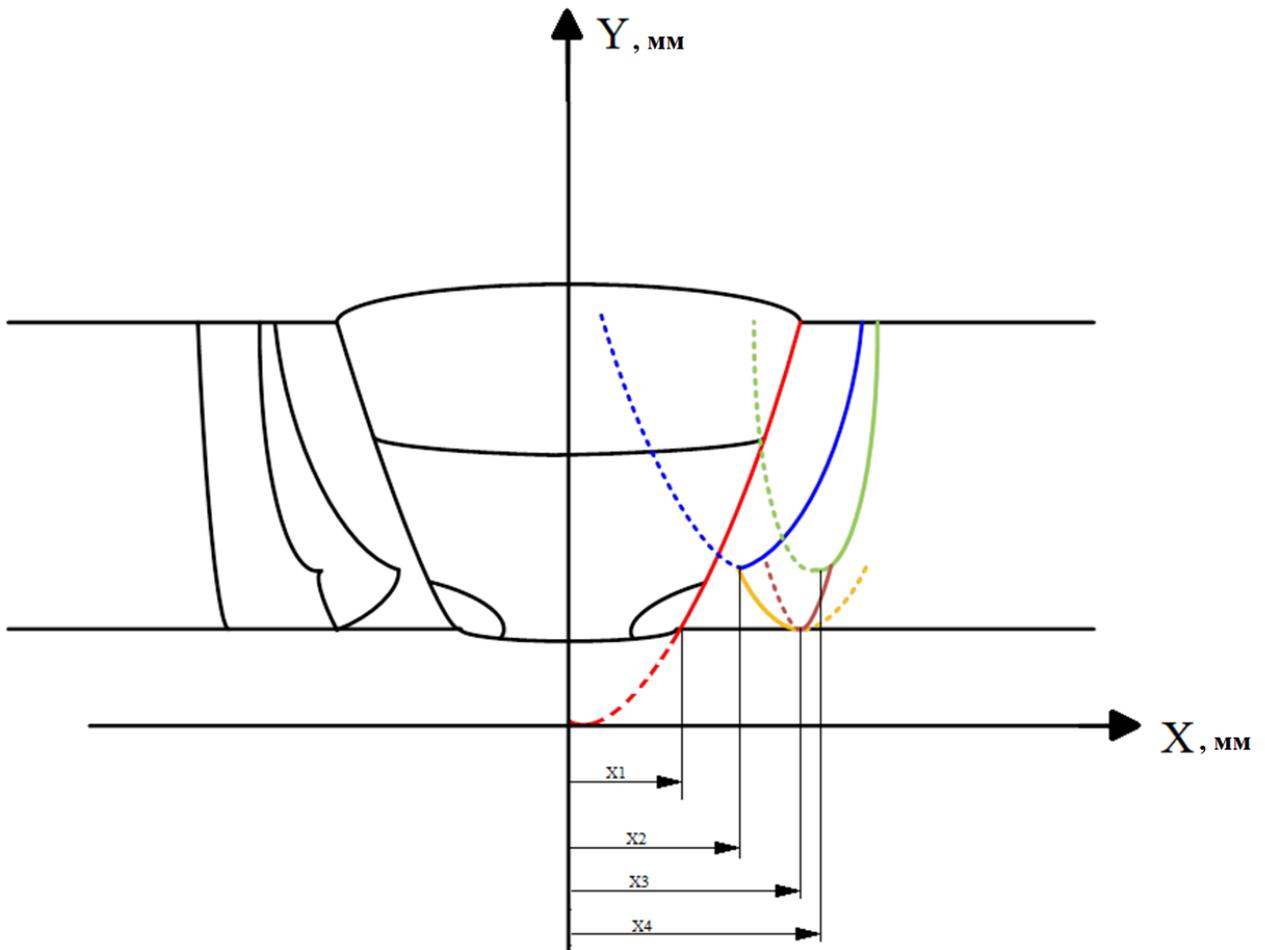


Рисунок 54 – Параболическая аппроксимация линий контактных границ зон механической неоднородности сварных соединений низколегированных сталей

Выбирая необходимые участки парабол, аппроксимирующих криволинейные границы зон механической неоднородности (Рисунок 55), становится возможным определение изменения угла наклона касательной к каждому участку в каждой точке параболы путем дифференцирования. В общем

виде система уравнений кривых контактных границ зон механической неоднородности можно представить в виде:

$$\begin{cases} y_1 = k_1 \cdot x^2, \text{ при } x_1 \leq x \leq x'_1 \\ y_2 + y'_2 = k_2 \cdot x^2 + x_2, \text{ при } x \leq x'_2 \\ y_3 + y'_3 = k_3 \cdot x^2 + x_3, \text{ при } x_2 \leq x \leq x_3 \\ y_4 + y'_3 = k_4 \cdot x^2 + x_3, \text{ при } x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases} \quad (77)$$

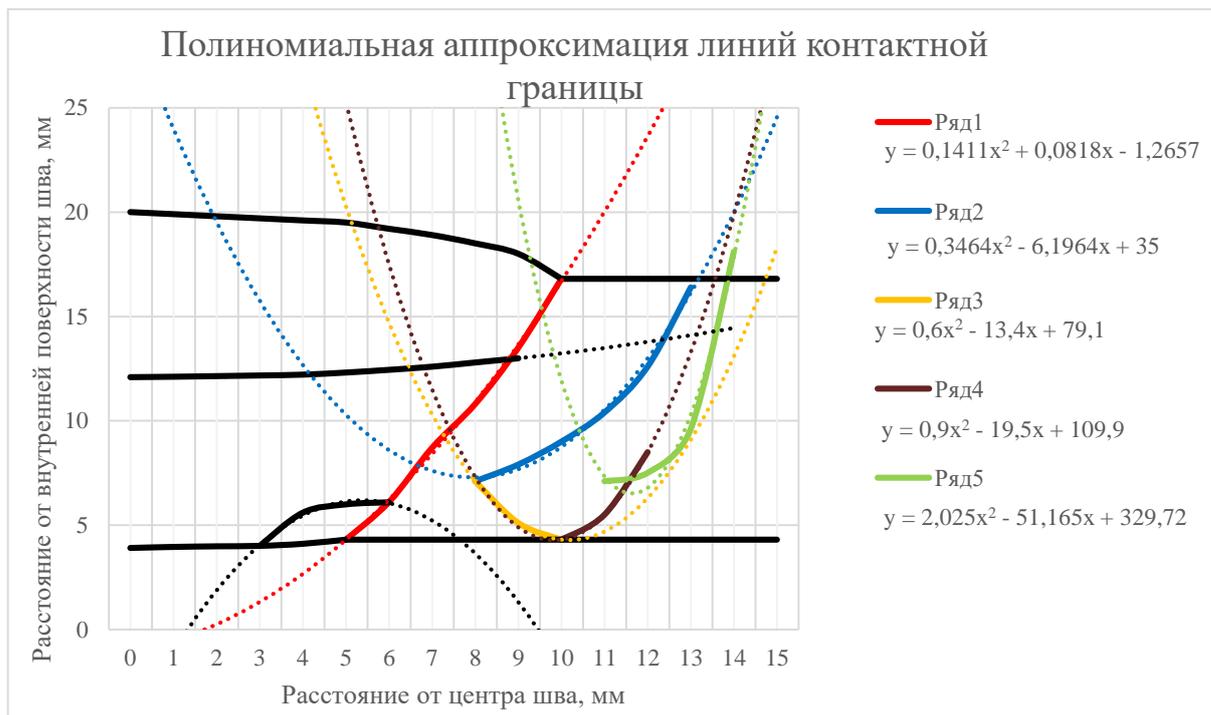


Рисунок 55 – Аппроксимация линий контактных границ сварного соединения магистрального трубопровода, полученного методом ручной дуговой сварки

Далее система дифференцируется по кусочным функциям, значения дифференциала определяют в соответствии с выводами раздела 2.6 значения условного показателя двухосности по каждой из кривых.

Конечный вид параболических кривых, определяющих форму контактных границ, будет зависеть от основных факторов, влияющих на формирование зон механической неоднородности: разделки кромок, применяемых параметров силы сварочного тока, напряжения и скорости перемещения дуги.

Учитывая усредненный вид границ зон механической неоднородности, определенный по результатам экспериментальных исследований, возможно установить конечные значения условного показателя двухосности для исследуемой большой группы сварных соединений магистральных трубопроводов.

Результаты определения показателя условной двухосности по объему сварного соединения с усредненной топографией механической неоднородности представлены на диаграмме (Рисунок 56). Следует отметить, что степень механической неоднородности между соседними зонами так же, как и угол наклона контактной границы по отношению к главным напряжениям, во многом определяет показатель двухосности.

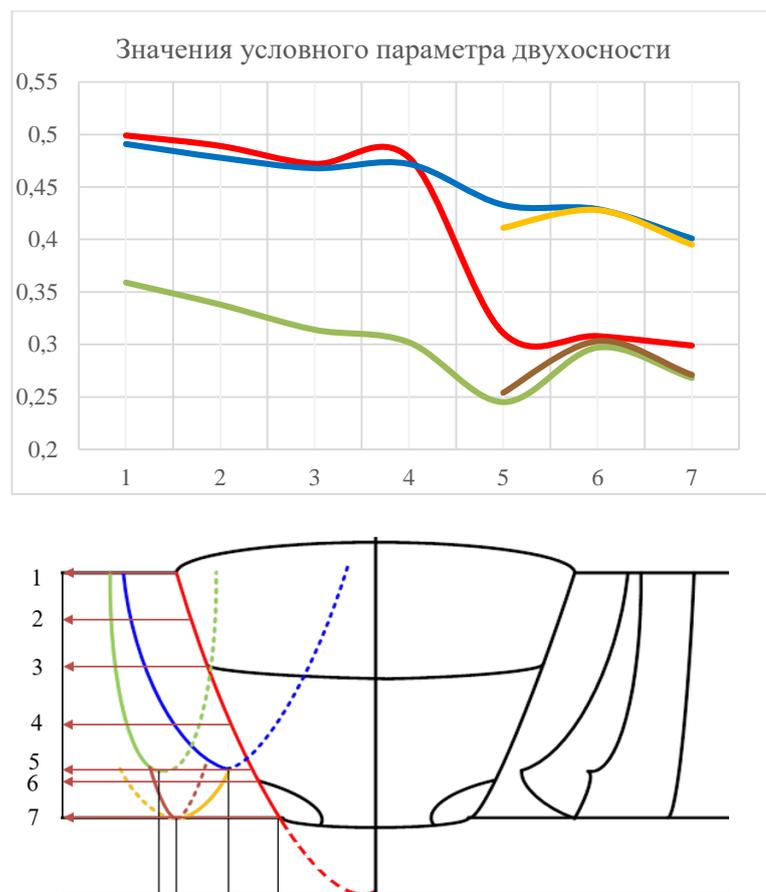


Рисунок 56 – Пример параболической аппроксимации линий контактных границ

4.3 Подход к моделированию и исследованию напряженного состояния участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом

Как отмечалось ранее во многих исследованиях, сварные соединения, в том числе сварные соединения трубопроводов, являются зонами концентрации наибольшего числа негативных факторов, влияющих на прочность объекта. К наиболее опасным дефектам относятся трещиноподобные дефекты, относящиеся к технологическим дефектам, то есть дефектам, образовавшимся вследствие нарушения технологии производства труб, монтажных сварных соединений трубопроводов. В расчетном подходе к трещиноподобным дефектам относятся непровары, несплавления, глубокие подрезы, трещины. Трещиноподобный дефект характерен наличием концентратора напряжений, приводящего к локальному переходу в пластическую зону деформирования металла. Создание таких условий деформирования само по себе создает опасность снижения прочности всего сварного соединения и в условиях существования механической неоднородности сварных соединений с криволинейными границами требует внесения соответствующих дополнений в расчетные методики.

Ранее в ряде работ, в том числе в работе [54], рассматривалась задача определения напряженно-деформированного состояния стыковых сварных соединений с трещиноподобными дефектами. Дефекты располагались в частях шва, который принимался за «мягкую» прослойку – зону с пониженными прочностными характеристиками. В центральном расположении трещиноподобного дефекта относительно сварного шва были получены зависимости, учитывающие вязкий механизм разрушения и условия вовлечения основного металла в процесс пластической деформации.

При оценке качества сварных соединений дефекты типа непроваров, подрезов относят к числу недопустимых. Подобный подход связан с тем, что трещиноподобные дефекты в сварных соединениях могут быть концентраторами напряжений высокого уровня, а также локализовывать другие напряжения, возникающие вследствие термомодеформационного цикла сварки. Изучению

влияния трещиноподобных дефектов на прочность стыковых сварных соединений также посвящено множество работ [18, 19, 37, 47, 52, 53, 65].

Вместе с тем большое количество исследований, ранее проводившихся в данной области, при оценке влияния механической неоднородности на напряженно-деформированное состояние использовали определенную схематизацию неоднородности для упрощения расчетных методик. При этом трещиноподобные дефекты в основном рассматривались в центральных зонах шва и не учитывалась сложная форма механической неоднородности сварного соединения.

Таким образом, требуется разработка метода моделирования и исследования напряженного состояния механически неоднородного сварного соединения с дефектом. Данный метод исследования должен учитывать криволинейную форму границ зон механической неоднородности и может быть основан на объединении метода характеристик и метода нахождения линий разрыва напряжений. Дефект предполагается внешним, как наиболее опасный при наличии свободной поверхности. Рассматривается этап деформирования, когда участок менее твердой прослойки или мягкой прослойки (МП), в соединении локально достиг значений предела текучести. Если трещиноподобный дефект расположен в более прочной части, твердой прослойке (ТП), то в пластической стадии деформаций находится некоторая область в окрестности вершины дефекта, содержащая нетто-сечение. Остальная часть твердой прослойки предполагается в этот момент жесткой. Структура металла на более прочных и менее прочных участках сварного соединения считается однородной, изотропной, граница между зонами механической неоднородности – определяется функциональной зависимостью, зависящей от факторов формирования механической неоднородности, описанными в настоящей работе ранее.

В рамках первой расчетной схемы исследуется напряженное состояние механически неоднородного соединения, имеющего в сечении криволинейную форму контактных границ механической неоднородности, представленную на Рисунке 57, соседствующего с менее прочной прослойкой и содержащего

трещиноподобный дефект, находящийся на более прочном участке (сварном шве) на свободной поверхности.

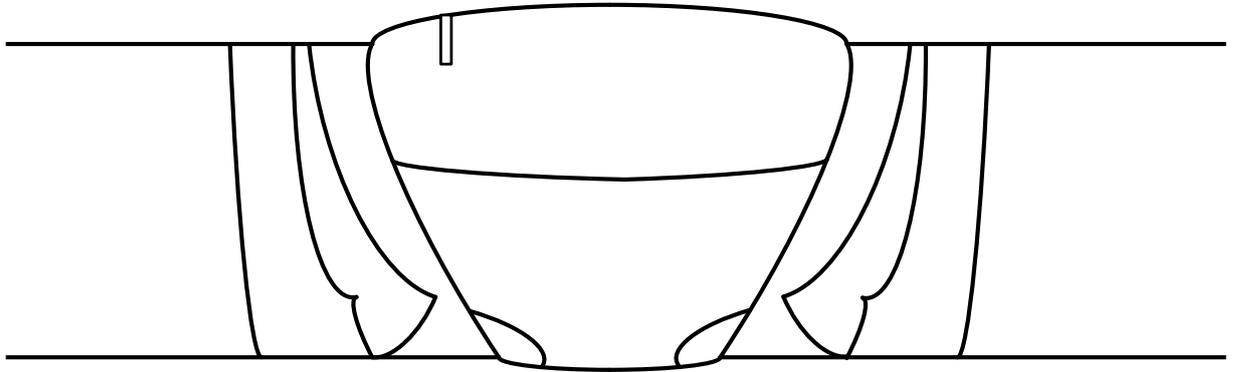


Рисунок 57 – Расчетная схема с трещиноподобным дефектом в сварном шве и основном металле

В рамках второй расчетной схемы исследуется напряженное состояние механически неоднородного соединения, имеющего в сечении криволинейную форму контактных границ механической неоднородности, представленную на Рисунке 58, соседствующего с менее прочной прослойкой и содержащего трещиноподобный дефект, находящийся на границе между более прочным участком (сварным швом) и менее прочной соседней зоной на свободной поверхности.

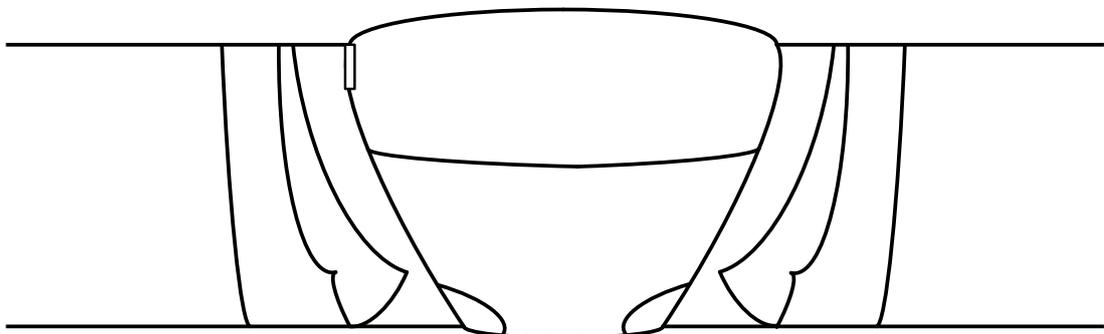


Рисунок 58 – Расчетная схема с трещиноподобным дефектом на линии сплавления

В рамках третьей расчетной схемы исследуется напряженное состояние механически неоднородного соединения, имеющего в сечении криволинейную форму контактных границ механической неоднородности, представленную на Рисунке 59, с распределением прочности по схеме менее прочной зоны в окружении более прочных зон (ТП – МП – ТП), содержащего трещиноподобный дефект, находящийся в середине менее прочной зоны между более прочными участками на свободной поверхности.

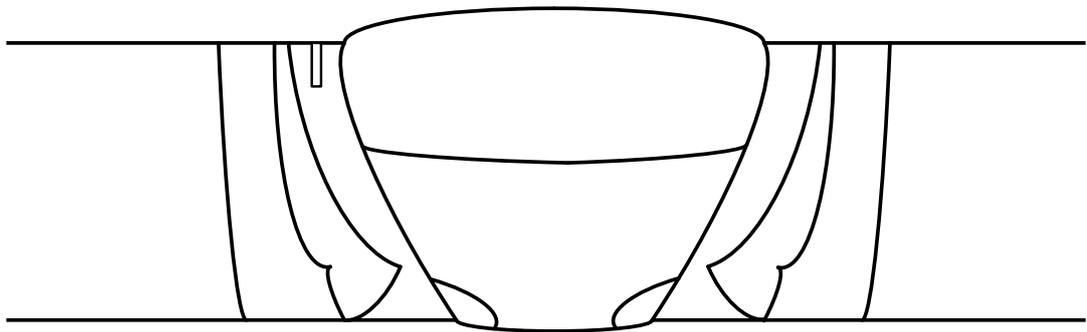


Рисунок 59 – Расчетная схема с трещиноподобным дефектом по схеме ТП – МП – ТП

В рамках четвертой расчетной схемы исследуется напряженное состояние механически неоднородного соединения, имеющего в сечении криволинейную форму контактных границ механической неоднородности, представленную на Рисунке 60, с распределением прочности по схеме зоны средней прочности в окружении более прочной зоны и менее прочной зоны (ТП – СП – МП), содержащего трещиноподобный дефект, находящийся в середине менее прочной зоны средней прочности между более прочным и менее прочным участками на свободной поверхности.

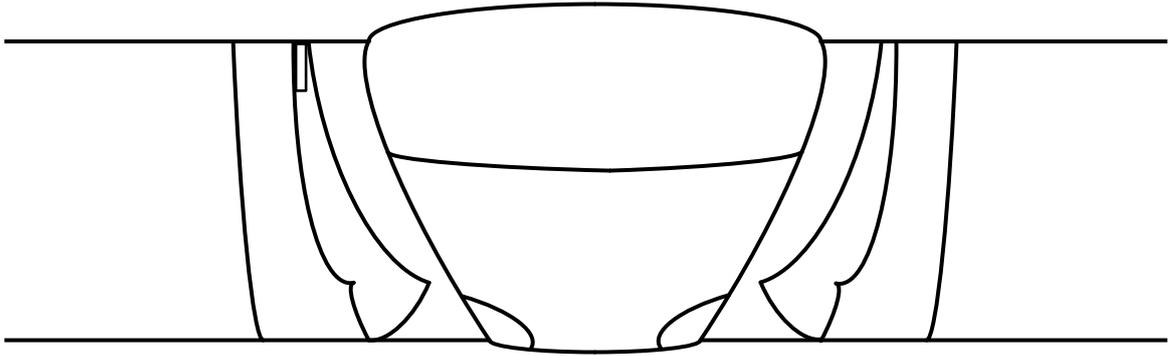


Рисунок 60 – Расчетная схема с трещиноподобным дефектом
по схеме ТП – СП – МП

В рамках пятой расчетной схемы исследуется напряженное состояние механически неоднородного соединения, имеющего в сечении криволинейную форму контактных границ механической неоднородности, представленную на Рисунке 61, с распределением прочности по схеме твердого сварного шва, соседствующего с менее прочной прослойкой и содержащего трещиноподобный дефект, находящийся на более прочном участке (основном металле) на свободной поверхности.

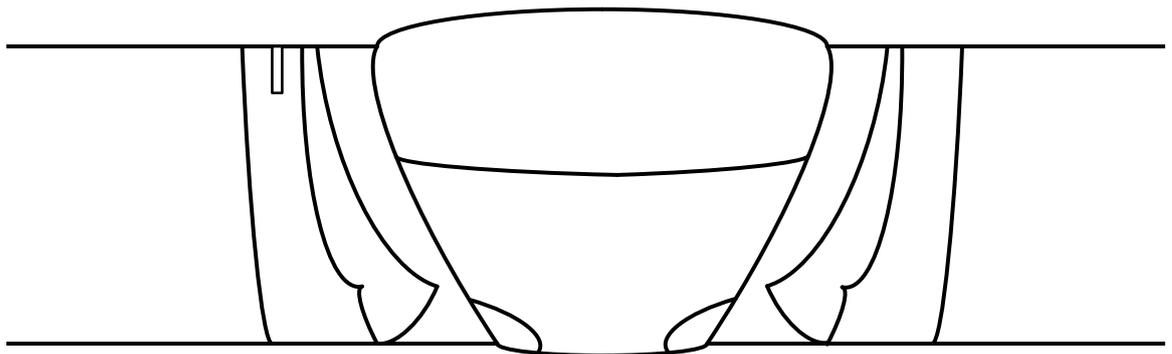


Рисунок 61 – Расчетная схема с трещиноподобным дефектом
по схеме ТП – СП

4.4 Математическое моделирование напряженного состояния соединения с трещиноподобным дефектом

Трещиноподобный дефект в сварном шве и основном металле

В качестве начальных условий примем одноосное растяжение под действием кольцевых напряжений на продольном шве магистрального трубопровода. Продольное сварное соединение находится в условиях двухосного растяжения. При этом растяжение, действующее от продольных нагрузок на продольное сварное соединение, в расчете не учитывается, так как все зоны механической неоднородности в принятой математической модели не претерпевают формоизменений от действия данной нагрузки. Таким образом, действует растягивающая нагрузка в условиях плоской деформации от внутреннего давления трубопровода. В качестве математической модели рассмотрим сетку линий скольжения. Она изображена на Рисунке 62. Построение линий скольжения как в менее прочной зоне, так и в более прочной выполняется на основе определения углов веерно-центрированных полей, которые строятся из точек пересечения границ зон со свободной поверхностью, а также с вершиной трещиноподобного дефекта [54]. Линии скольжения, показанные на Рисунке 62, в зоне, имеющей более высокие прочностные характеристики, пересекаются вследствие комбинированного влияния соседней менее прочной зоны, а также распределения напряжений в зоне концентрации от вершины трещиноподобного дефекта. Решение, основанное на соответствующем поле линий скольжения и определяемое напряжениями на линии FA , однозначно распространяется на область FAT и продолжается на область FAT_2 , а решение, определяемое на свободной границе AA_6 , – на область AT_3A_6 . В практическом приложении области наложения показывают зоны локализации пластических деформаций в более прочной части сварного соединения.

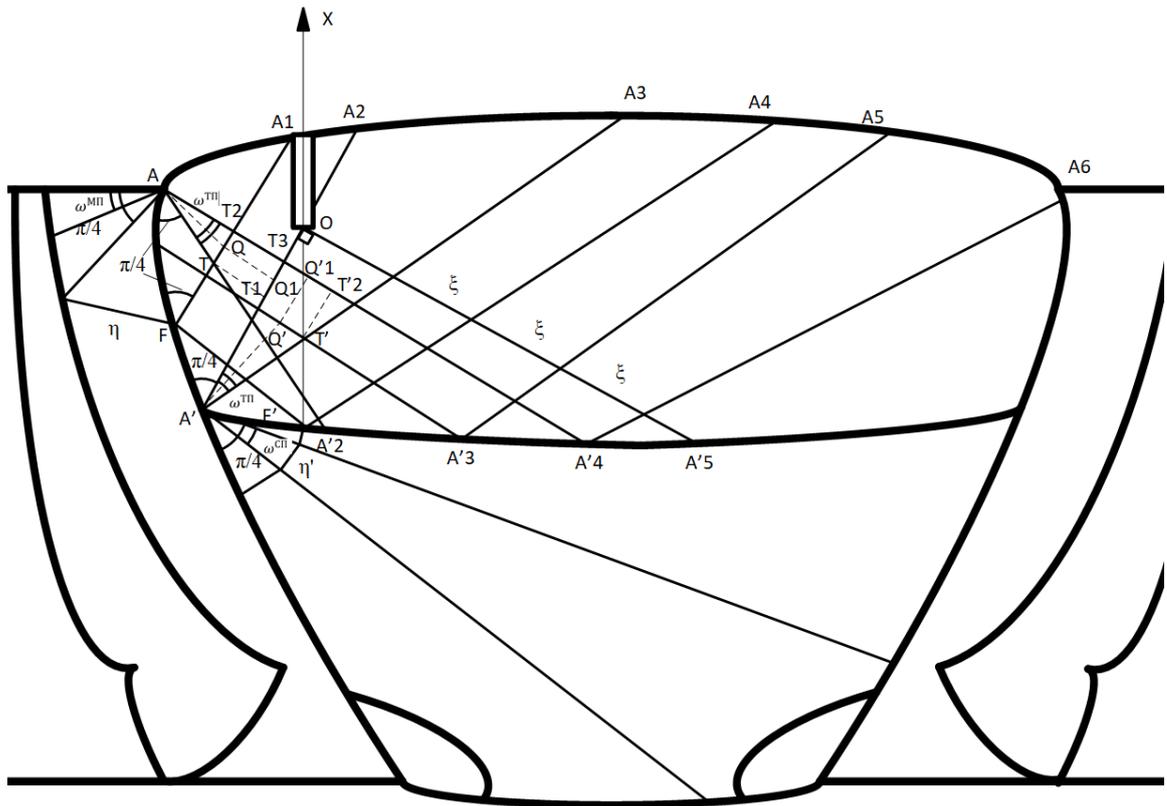


Рисунок 62 – Поле характеристик по нетто-сечению трещиноподобного дефекта в сварном шве

Наложение этих решений происходит на участке $AT_1T_3T_2$. Физически наложение указанных областей линий характеристик означает разрыв напряжений внутри области, ограниченной пересечением линий характеристик [54]. Разрыв напряжений проходит по линии AQQ_1 (Рисунок 62). На указанной линии разрыва выполняются уравнения равновесия, при этом напряжения, ориентированные по нормали к свободной поверхности сварного соединения, претерпевают скачкообразное изменение. На отрезке QQ_1 нормальные напряжения уменьшаются до нулевого значения в точке Q_1 .

Углы наклона характеристик к линии разрыва, расположенные с разных сторон от нее и имеющие эту линию в качестве общей стороны, равны друг другу. Линии характеристик будут образовывать плоскости скольжения по обе стороны от вершины трещиноподобного дефекта. С ростом нагрузки в окрестности конца дефекта (точка O на Рисунке 62) возникает пластический участок с равномерным полем напряжений. Указанный пластический участок, его размеры и

конфигурация является локальным участком пластических деформаций и будет зависеть как от геометрических параметров самого дефекта, так и от конфигурации зоны механической неоднородности, в которой он располагается, и соседних зон механической неоднородности. В результате действия одноосной нагрузки растяжения образуются два ортогональных друг другу семейства прямолинейных характеристик под углом $\pi/4$ к направлению действия нагрузки и, следовательно, к оси ОХ.

Расширение пластической зоны, образующейся в зоне концентрации напряжений у вершины дефекта, при достижении соседней зоны механической неоднородности далее происходит с изменением направления по плоскостям скольжения в зависимости от механических характеристик соответствующей зоны.

Границы между зонами, переход от усиления сварного шва к основному металлу, вершина трещиноподобного дефекта в сварном соединении – точки концентрации напряжений и смены угла наклона линий скольжения. Пересечение веерно-центрированных полей, начинающихся в точках F, A, A', O, образует зоны пластического деформирования. Степень механической неоднородности сварного соединения оказывает прямо пропорциональное влияние на конфигурацию зоны пластического деформирования. Также следует отметить, что при отсутствии доминирующего концентратора напряжений в виде, например, трещиноподобного дефекта, степень механической неоднородности также влияет на искажение полей пластического деформирования, но при этом данный эффект может «перекрываться» общей потерей устойчивости пластического деформирования в масштабе всего сварного соединения.

Расположение вблизи дефекта МП участка снижает прочность соединения. Оценим количественно величину этого снижения в зависимости от геометрических параметров, характеризующих размеры и расположение дефекта и коэффициента механической неоднородности K аналогично приведенным расчетам в [54]. Для этого вычислим величину напряжения σ_y на нетто-сечении OA'₂.

Для удобства определение напряжений выполняется в безразмерных величинах и нормируется по пластической постоянной $K = k^{МП} = \beta^{МП} \sigma^{МП} / 2$. Кроме того, необходимо ввести обозначения среднего критического напряжения всего сварного соединения ($\sigma_{ср}^*$), среднего критического напряжения по поперечному сечению ослабленной соседней зоны механической неоднородности, мягкой прослойки ($\sigma_{ср}^{*МП}$), среднее критическое напряжение по поперечному нетто-сечению, сечению более прочной части, ослабленному трещиноподобным дефектом ($\sigma_{ср}^{*П}$), среднее критическое напряжение (условное) по бездефектному поперечному сечению более прочной части сварного соединения ($\sigma_{ус}^{*П}$). Кроме того, m – геометрический параметр, расстояние от внутренней поверхности сварного соединения до вершины трещиноподобного дефекта (размер нетто-сечения), g – геометрический параметр, расстояние от края трещиноподобного дефекта до границы соседней зоны механической неоднородности.

Согласно методике, описанной в [54], в зависимости от размеров пластической зоны расчет напряжений σ_y выполняется для трех случаев.

Так как по любому сечению ослабленного участка сварного соединения, параллельному контактной линии и расположенному достаточно далеко от нее, $\sigma_{ср}^{*МП} = 2$ (в безразмерных величинах), то для всего соединения среднее значение напряжений в менее прочной зоне будет определяться по формуле:

$$\sigma_{ср}^* = \min(2, \sigma_{ус}^{*П}) \quad (78)$$

Случай 1. При условии, когда нетто-сечение OA_2 не пересекает $\Delta A'T_2A$, то есть трещиноподобный дефект находится на достаточном удалении от границ зон механической неоднородности. Тогда МП не оказывает ослабляющего влияния на прочность, то есть на всем нетто-сечении:

$$\sigma_y = 2K, \quad (79)$$

откуда:

$$\sigma_{\text{ср}}^{*\text{ТП}} = 2K = \sigma_{\text{у нетто}} \quad (80)$$

(в безразмерных величинах). Условие выполнения этого случая: $AA_4 \leq AA_2$.

Так как расположение линий характеристик под влиянием трещиноподобного дефекта определится по формуле:

$$AA_4 = ((m - g)/2) * (1 + \omega^{\text{ТП}}/2), \quad (81)$$

при этом точность выполнения условия составит до $(\omega^{\text{ТП}})^2/4$, что при небольшой степени механической неоднородности, характерной для низколегированных трубопроводных сталей и их сварных соединений (показано в главе 2), составляет десятые доли процента.

Угол наклона характеристик веерно-центрированного поля в более прочной зоне механической неоднородности определится по формуле:

$$\omega^{\text{ТП}} = (K - 1)/2. \quad (82)$$

В указанном случае, как и в последующих, показано, что истинные средние критические напряжения в нетто-сечении дефекта зависят не только от размера дефекта, но также от размеров зоны механической неоднородности, степени механической неоднородности и местоположения дефекта относительно зон механической неоднородности.

Случай 2 (см. Рисунок 62). Сечение OA_2 пересекает $\Delta A'T'_2T_3$, но не пересекает ΔAT_1T_3 , то есть влияние соседней менее прочной зоны механической неоднородности является ограниченным:

$$AA_3 = ((m - g)/2) * (1 - \omega^{\text{ТП}}/2). \quad (83)$$

Значения напряжений в нетто-сечении будут зависеть от расстояния до границы с зоной механической неоднородности:

$$\sigma_{y \text{ нетто}} = \sigma_{\text{ср}}^{*\text{ТП}} = 2K - ((K - 1)(3K - 1)(1 - 3g/m))/2K. \quad (84)$$

При этом отношение $g/m \in [(5K - 1) / (9K - 1); (3K + 1)/(11K + 1)]$.

Случай 3. Нетто-сечение OA_2 пересекает ΔAT_1T_3 ,

$$\sigma_{y \text{ нетто}} = K(1 + \cos 2v - 2v) = 2K(1 - v - v^2), \quad (85)$$

где v – переменный угол наклона контактной границы к оси O_x . Изменение угла к оси O_x задается функционально путем параболической аппроксимации и дальнейшего интегрирования получившейся эмпирической функции на заданном отрезке.

При малости угла $\omega^{\text{ТП}}$, на участке O_x напряжения σ_y далее хорошо аппроксимируются линейной функцией: так как $x = 2g(1 + v + v^2)$, с точностью до v^3 следует равенство $\sigma_y = 2K(2 - x/2g)$. Используя это и применяя на соответствующих отрезках выведенные ранее зависимости, вычислим $\sigma_{\text{ср}}^{*\text{ТП}}$ в нетто-сечении.

Если $g/m = (5K - 1) / (9K - 1)$, то $\sigma_y = 2K$; если $g/m = (3K + 1)/(11K + 1)$, то, в силу полученной выше формулы:

$$\sigma_y = 2K - ((K - 1)2(3K - 1))/(K(11K - 1)). \quad (86)$$

Результаты численного моделирования разработанной расчетной схемы в программном комплексе показаны на Рисунке 63.

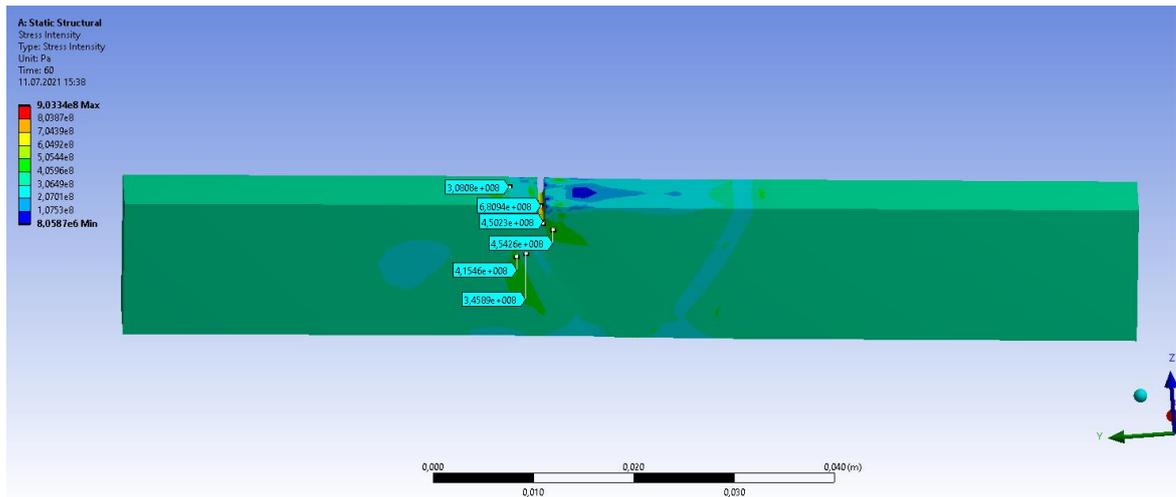


Рисунок 63 – Результат численного моделирования согласно расчетной схеме

Следует отметить, что при моделировании развития пластических зон при аналогичном трещиноподобном дефекте, расположенном в сварном соединении, имеющем заданные механические характеристики относительно соседних зон механической неоднородности, направления и относительные размеры пластических зон при соответствующих растягивающих нагрузках хорошо соотносятся с полученными результатами математического моделирования.

На линии сплавления

В рамках данной расчетной схемы рассматривается наличие поверхностного дефекта на линии сплавления между сварным швом и основным металлом. Прочность металла с обеих сторон от прослойки (например, со стороны шва и ОМ) может быть различной. Металлы считаются однородными и изотропными. Между ослабленной зоной в районе линии сплавления, сварным швом и основным металлом форма контактной границы также определяется параболической аппроксимацией, как показано ранее. При этом выход границ контакта зон механической неоднородности на внешнюю свободную поверхность сварного соединения считается ортогональным к указанной свободной поверхности.

Соединение находится под растягивающей нагрузкой в условиях плоской деформации. На линии сплавления, расположенной между ослабленной частью основного металла и более прочной частью сварного соединения (показано в главах 2, 3), располагается поверхностный или трещиноподобный дефект (Рисунок 64), который моделируется как разрез, ортогональный свободной поверхности.

Аналогично предыдущей расчетной схеме вводится параметр пластичности K , через который будут определены напряжения в нетто-сечении дефекта, расположенного на линии сплавления. Различие в механических свойствах сварного соединения и ослабленной части в районе линии сплавления определяется по коэффициентам механической неоднородности. При этом важно также учитывать влияние соседней более прочной зоны, для которой дополнительно должны быть определены все начальные параметры расчета. Углы веерно-центрированных полей в МП зонах обозначим $\omega^{\text{ТП}}$, $\omega'^{\text{ТП}}$ и $\omega^{\text{МП}}$ соответственно, а t – толщина стенки в бездефектной части соединения.

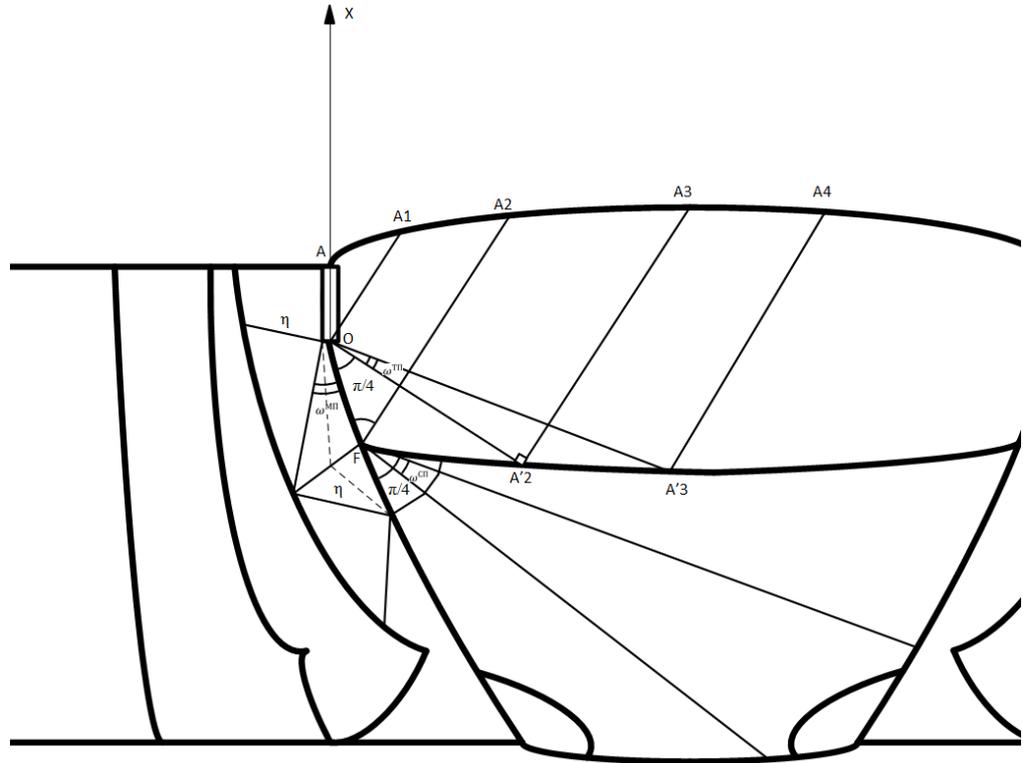


Рисунок 64 – Поле характеристик по нетто-сечению трещиноподобного дефекта на линии сплавления

$$\sigma_{y \text{ нетто}} = \begin{cases} \frac{2(m^3 + 3m^2g - mg^2 + g^3)}{m(m+g)^2}, 1 \leq m/g \leq \frac{1+K}{3-K} \text{ (случай 1)} \\ \frac{(1+4K-K^2)}{2} - \frac{g(K-1)}{m}, \frac{m}{g} \geq \frac{1+K}{3-K} \text{ (случай 2)} \end{cases} \quad (87)$$

В первом случае рассматривается относительно широкая менее прочная зона механической неоднородности, когда влияние соседних более прочных зон ограничено. Во втором случае, наиболее распространенном для данной расчетной схемы, влияние обеих более прочных зон (сварное соединение и основной металл) максимально.

Аналогичные результаты, а также интенсивное влияние более близкой прочной зоны – сварного соединения, получены при численном моделировании указанной расчетной схемы (Рисунок 65).

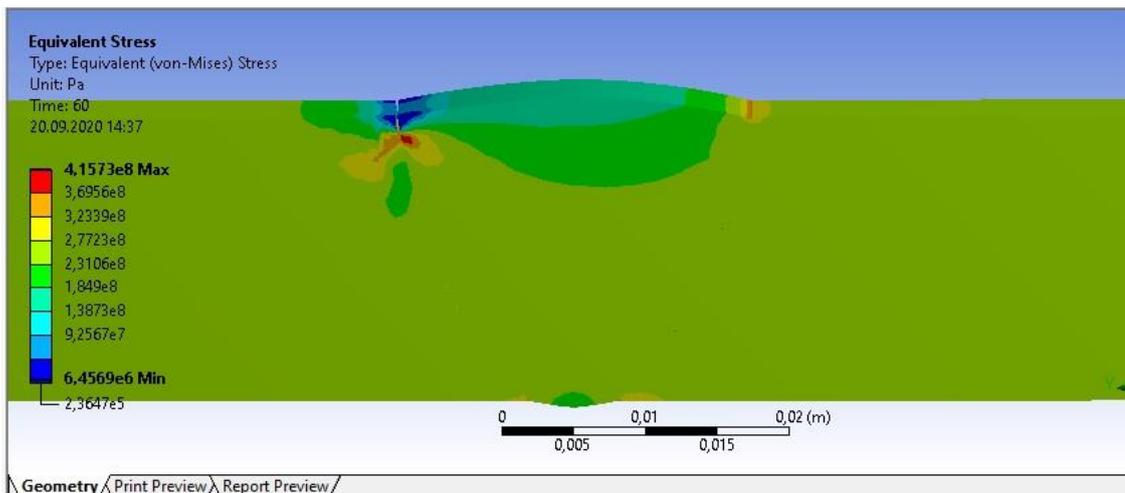


Рисунок 65 – Результат численного моделирования согласно расчетной схеме

В менее прочной зоне

При деформировании менее прочной зоны, когда трещиноподобный дефект расположен не на границе зон механической неоднородности, процесс перехода в пластическое состояние является более симметричным по сравнению с расположением дефекта на линии сплавления (Рисунок 66). Влияние более твердых зон механической неоднородности на развитие пластической

деформации в данном случае имеет сдерживающий характер, то есть в большей степени проявляется эффект контактного упрочнения, поэтому критическое напряжение перехода в пластическое состояние имеет общий характер (на линии сплавления – локальная потеря устойчивости пластического деформирования), а также в целом является более высоким количественно по сравнению с линией сплавления.

Расчет напряжений в нетто-сечении будет определяться следующей зависимостью:

$$\sigma_{\text{ср}}^{*\text{МП}} = \sigma_{\text{у нетто}} = 0,5((1 + 4K - K^2) - (K - 1) g/m). \quad (88)$$

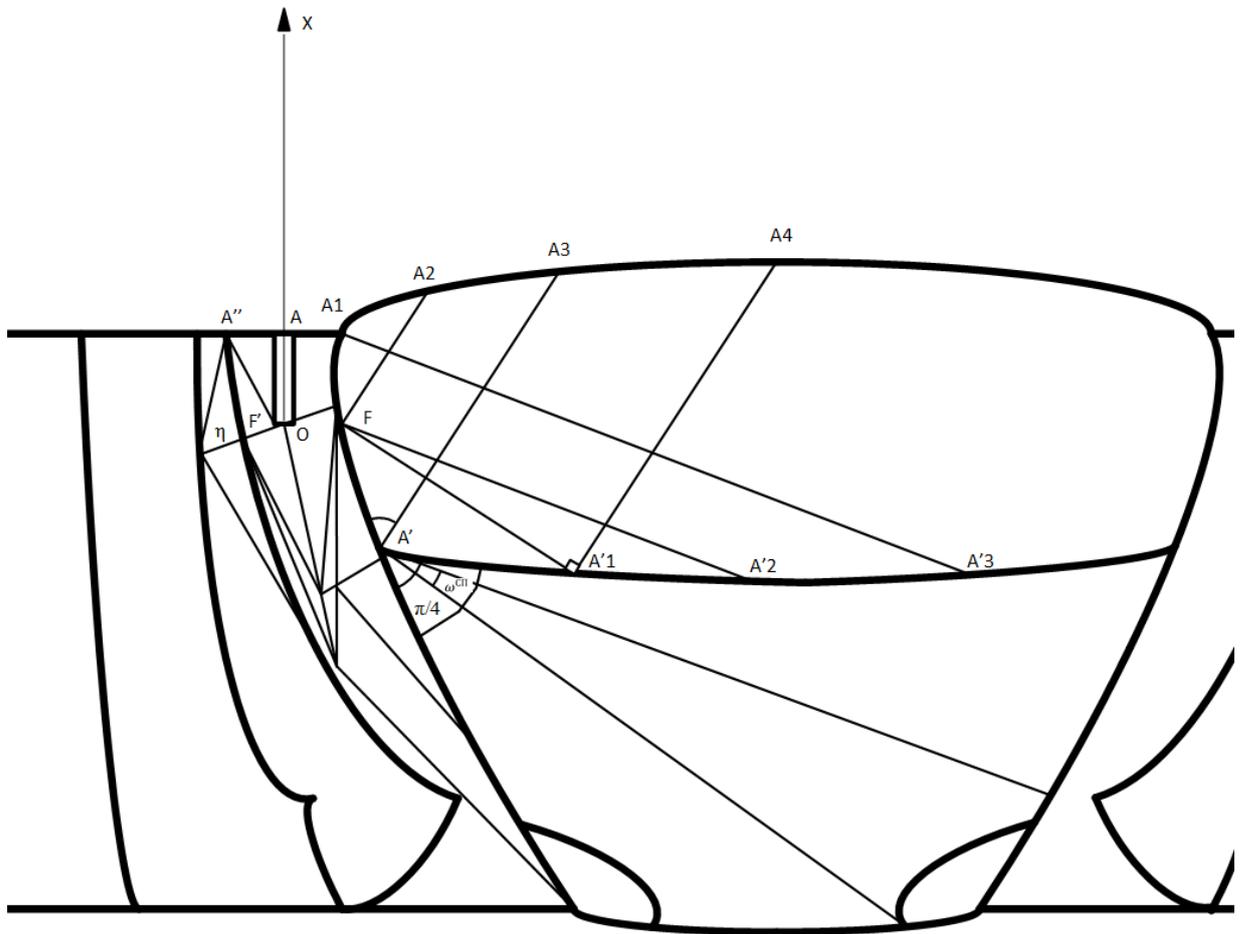


Рисунок 66 – Поле характеристик по нетто-сечению трещиноподобного дефекта в менее прочной зоне

Таким образом, данный расчетный случай является частным для условий деформирования на границе зон механической неоднородности, для которого расстояние g не равно нулю.

Численный анализ указанной расчетной схемы помимо верификации полученных плоскостей скольжения также позволяет отметить повышенное напряженное состояние соседней более прочной зоны механической неоднородности (основной металл), на которое влияет соседняя менее прочная зона с трещиноподобным дефектом (Рисунок 67).

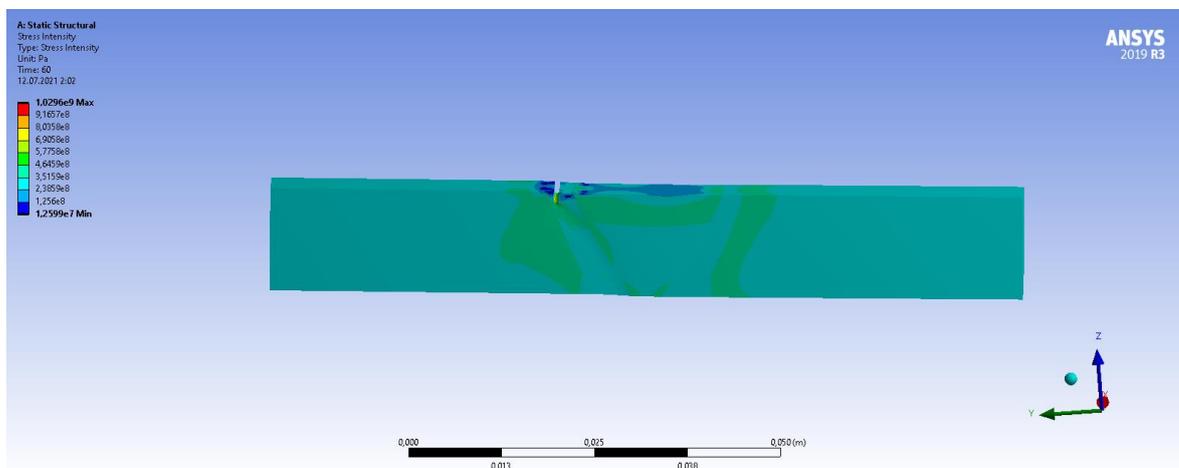


Рисунок 67 – Результаты численного моделирования согласно расчетной схеме

4.5 Практический учет влияния механической неоднородности и формы ее контактной границы на напряженно-деформированное состояние участка сварного соединения с трещиноподобным дефектом

Как ранее отмечалось в главе 3, зоны механической неоднородности оказывают существенное влияние друг на друга. Таким образом, оценка влияния соседних зон механической неоднородности на напряженно-деформированное состояние области вершины трещиноподобного дефекта, находящегося в центральной зоне, а также на границах зон, является актуальной задачей.

Аналитическая оценка такого влияния должна проводиться на основе принципа контроля перемещений и границ дефекта с учетом чувствительности металла к концентрации напряжений. Чувствительность металла к концентрации напряжений, в свою очередь, зависит от параметров зоны механической неоднородности, в которой расположен дефект и, соответственно, влияния соседних зон механической неоднородности.

Основные условия статического нагружения в магистральных трубопроводах описаны в разделе 2.4. Предел текучести заменяется на напряжение пластической неустойчивости [114] – пластическую постоянную, соответствующую моменту начала общей пластической неустойчивости. Это позволяет воспользоваться теорией идеально пластического тела, в частности, теорией линий скольжения (характеристик) в случае плоской деформации. В данном случае характеризующая предельное состояние пластическая постоянная k различна в двух рассматриваемых частях соединения.

Краевая задача для системы уравнений гиперболического типа (при плоской деформации), моделирующая напряженное состояние в зоне, в которой находится дефект, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \partial\sigma_x/\partial x + \partial\tau_{xy}/\partial y &= 0; \\
 \partial\sigma_y/\partial y + \partial\tau_{xy}/\partial x &= 0; \\
 (\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 &= 4k^2; \\
 \sigma_x(1, y) = 0; \quad \tau_{xy}(1, y) &= 0; \\
 \tau_{xy}^-(x, 0) = \tau_{xy}^+(x, 0); \quad \sigma_y^-(x, 0) &= \sigma_y^+(x, 0).
 \end{aligned}
 \tag{89}$$

Уравнения (89) определены в пластической зоне, граница которой зависит от величины приложенной нагрузки, формы и размеров соединения, а также от формы, размеров и расположения дефекта. Расчетные значения средних критических напряжений (на участке с трещиноподобным дефектом), полученных на основе комбинации метода характеристик (линий скольжения) и метода нахождения линий разрыва напряжений, позволяет далее определить характерные

значения коэффициентов учета механической неоднородности, влияющих на ослабление сопротивления в нетто-сечении с дефектом в зависимости от расположения дефектов относительно зон механической неоднородности: $\beta = \sigma_{\text{ср}}^{\text{схема}} / \sigma_{\text{т}}^{\text{ОМ}}$, где $\sigma_{\text{ср}}^{\text{схема}}$ – средние критические напряжения в нетто-сечении с трещиноподобным дефектом, зависящие от схемы расположения относительно зон механической неоднородности; $\sigma_{\text{т}}^{\text{ОМ}}$ – предел текучести основного металла как критерий достижения предельного состояния трубопровода. 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 развитие пластических деформаций и значения критических напряжений. Введем новую систему координат $(t; n)$, направив ось t по линии разрыва напряжений (Рисунок 68).

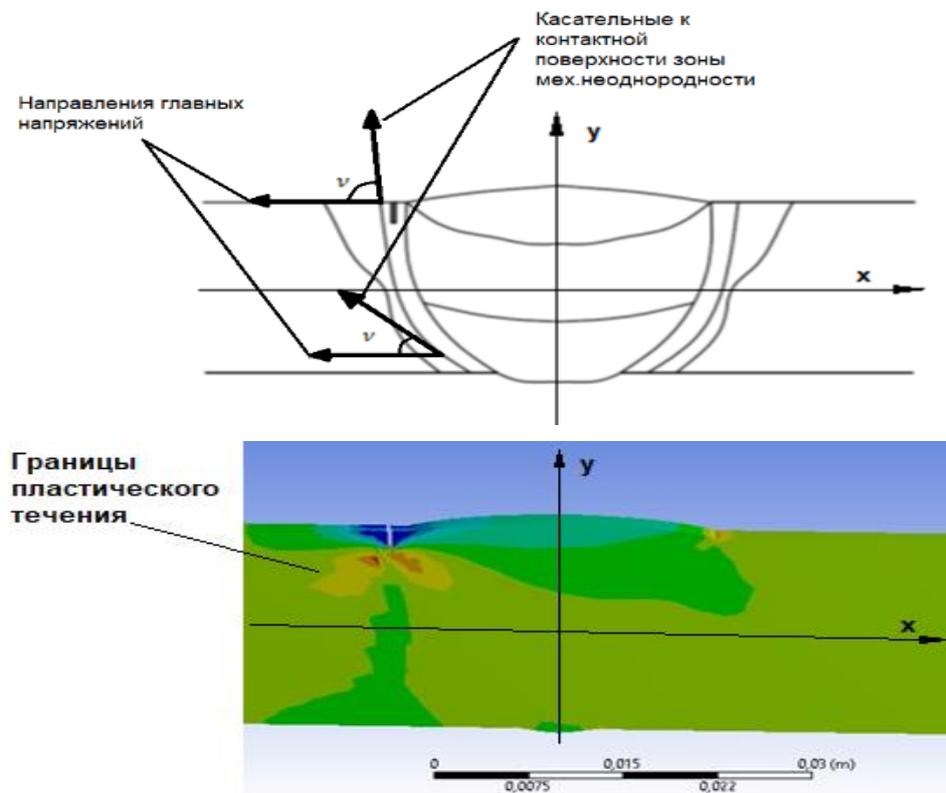


Рисунок 68 – Пример определения границы пластического течения в зоне трещиноподобного дефекта при помощи программного комплекса конечно-элементного моделирования

Таким образом, на величину напряжений при наличии дефекта и механической неоднородности влияют:

- механические свойства материала слоя, характеризующиеся пределом прочности и показателем степени механической неоднородности;
- относительный размер зоны механической неоднородности;
- угол наклона зоны механической неоднородности в точке определения (Рисунок 68);
- относительные размеры дефекта;
- расположение областей влияния соседних зон механической неоднородности.

Исходя из полученных зависимостей для средних критических напряжений согласно расчетным схемам, были определены коэффициенты влияния механической неоднородности (Таблица 9). Также в указанной таблице была выполнена оценка минимальных расстояний до контактных границ зон неоднородности, ограничивающих расчетные случаи.

Таблица 9 – Коэффициент влияния механической неоднородности на минимальное критическое напряжение потери устойчивости пластического деформирования продольного сварного соединения из низколегированной стали

Наименование	Расчетные случаи	β	d
Расчетная схема с трещиноподобным дефектом в сварном шве	Отсутствие влияния соседних зон (1-й расчетный случай)	0,879	$\frac{(9K - 1)}{(2K + 2)}$
	Влияние 1 соседней зоны (2-й расчетный случай)	0,825	$\frac{(6K - 1)}{(4K + 1)}$
	Влияние 2-х соседних зон (3-й расчетный случай)	0,741	$\frac{(5K - 1)}{(8K + 1)}$
Расчетная схема с трещиноподобным дефектом на линии сплавления	Влияние 1 соседней зоны (1-й расчетный случай)	0,802	$\frac{(K - 1)}{(11K + 1)}$
	Влияние 2-х соседних зон (2-й расчетный случай)	0,691	$\frac{(K - 1)}{(10K + 5)}$
Расчетная схема с трещиноподобным	Влияние 1 соседней зоны (1-й расчетный случай)	0,817	$\frac{(K - 1)}{(9K + 6)}$

Наименование	Расчетные случаи	β	d
дефектом в мягкой прослойке	Влияние 2-х соседних зон (2-й расчетный случай)	0,715	$\frac{(2K - 1)}{(12K + 6)}$
Расчетная схема с трещиноподобным дефектом на границе мягкой и твердой прослоек	Влияние 1 соседней зоны (1-й расчетный случай)	0,809	$\frac{(3K - 2)}{(9K + 2)}$
	Влияние 2-х соседних зон (2-й расчетный случай)	0,722	$\frac{(3K - 1)}{(8K + 3)}$
Расчетная схема с трещиноподобным дефектом в основном металле	Отсутствие влияния соседних зон (1-й расчетный случай)	0,891	$\frac{(5K + 4)}{(2K + 1)}$
	Влияние 1 соседней зоны (2-й расчетный случай)	0,803	$\frac{(3K + 1)}{(2K + 3)}$

Примечание: d – минимальное расстояние от контактной границы, ограничивающее расчетные случаи (в зависимости от коэффициента механической неоднородности $K = \sigma_{ТП} / \sigma_{МП}$)

Проведем расчет по существующей методике, но с использованием нового поправочного коэффициента α_K , учитывающего концентрацию напряжений вследствие действия контактных эффектов в зонах механической неоднородности.

Аналогично предыдущим этапам расчета, приведенным в разделе 4.1, вычисляется упругий коэффициент концентрации напряжений:

$$\alpha_e = \frac{\sigma_{ie}}{\sigma_{i\text{нетто}}}. \quad (90)$$

Далее коэффициент концентрации уточняется для стадии наступления пластического течения в металле:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_K = \alpha_e, \text{ при отсутствии влияния мех. неоднородности}^1 \\ \alpha_K = \frac{\sigma_{\text{схема}}^{\text{ср}}}{\sigma_{ie}}, \text{ при влиянии зоны мех. неоднородности}^2 \end{array} \right. \quad (91)$$

¹ Отдаление от центра шва до линии сплавления сварного шва и далее по основному металлу не менее 1 толщины стенки трубопровода.

² Дефект находится в сварном шве и далее в пределах 1 толщины стенки от линии сплавления сварного шва и основного металла.

При помощи полученных коэффициентов концентрации далее могут быть вычислены упругопластические компоненты локальных напряжений с учетом механической неоднородности и компоненты локальных деформаций

Интенсивность деформаций в локальном объеме в области вершины трещины:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_{11\text{мн}} - \varepsilon_{22\text{мн}})^2 + (\varepsilon_{22\text{мн}} - \varepsilon_{33\text{мн}})^2 + (\varepsilon_{33\text{мн}} - \varepsilon_{11\text{мн}})^2 + 6\varepsilon_{32\text{мн}}^2}. \quad (92)$$

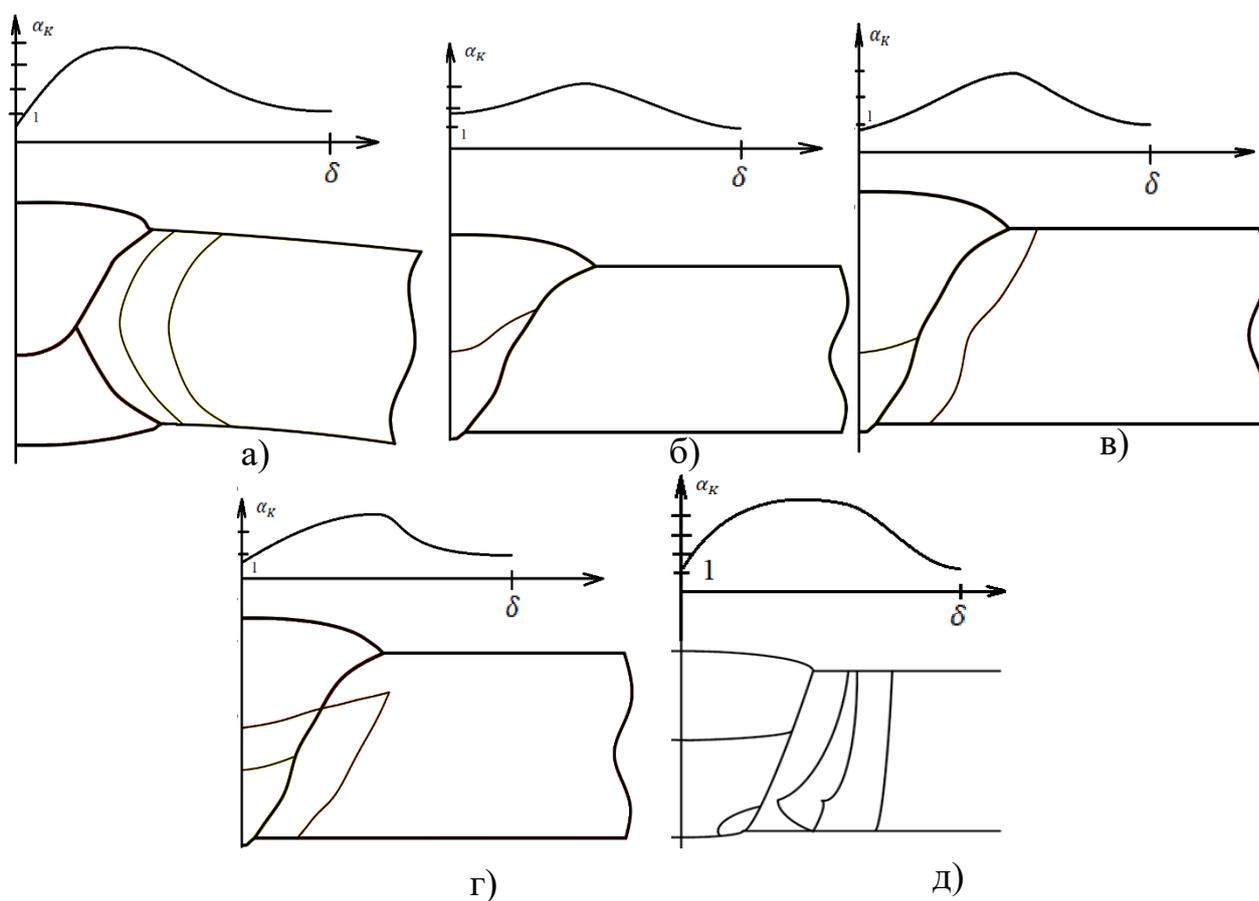
Как уже отмечалось в главе 1, выводы по результатам расчета на прочность делаются на основе определения двухпараметрических критериев предельной прочности и предельной пластичности для каждого этапа расчета: бездефектный участок, участок с объемным дефектом (нетто-сечение стенки), область у вершины трещины.

Учитывая, что определение среднего напряжения перехода в стадию пластического деформирования в нетто-сечении дефекта с учетом механической неоднородности является довольно трудоемкой задачей, наиболее прикладным инструментом должны стать значения коэффициента концентрации α_K , определенные для всего промежутка от центра шва до линии сплавления шва и далее по основному металлу до 1 толщины стенки трубопровода. При этом для того, чтобы исключить процедуры определения вершины дефекта относительно зон механической неоднородности в реальном сварном соединении, возможно установить единый для каждого типа сварного соединения характер изменения коэффициентов концентрации на основе полученных в главе 2 значений напряжений в локальных зонах пластического деформирования.

Полученные в данной главе средние напряжения в нетто-сечении трещиноподобного дефекта являются по своей сути проверочными для внедрения в описанную методику коэффициента концентрации. Использование наиболее напряженных зон в сварном соединении для определения коэффициента концентрации, в том числе и учитывающих такие концентраторы напряжений, как

усиления валика, в практической плоскости будет переходить в запас, то есть являться более консервативной оценкой для зон сварного соединения.

Графики значений коэффициента концентрации для проанализированных типов сварных соединений магистральных трубопроводов представлены на Рисунке 69.



а) продольный сварной шов (автоматическая сварка под флюсом); б) кольцевой сварной шов (автоматическая сварка в среде защитных газов); в) кольцевой сварной шов (автоматическая сварка порошковой проволокой); г) кольцевой сварной шов (автоматическая сварка под флюсом); д) кольцевой сварной шов (ручная дуговая сварка)

Рисунок 69 – Изменения коэффициентов концентрации для исследованных типов сварных соединений

Наиболее удобной формой применения нового коэффициента концентрации напряжений будет использование зависимостей, аппроксимирующих полученные графики функций:

Для случая «а»:

$$\alpha_K = 0,0106 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}}^2 - 0,452 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}} + 4,53, \quad (93)$$

где $x_{\text{ЛС-ОМ}}$ – расстояние от линии сплавления до 1 толщины стенки трубопровода в относительных единицах.

$$\alpha_K = -0,0189 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}}^2 + 0,554 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}} + 0,173, \quad (94)$$

где $x_{\text{ЦШ-ЛС}}$ – расстояние от центра шва до линии сплавления в относительных единицах.

Для случая «б»:

$$\alpha_K = 0,0131 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}}^2 - 0,4 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}} + 3,71; \quad (95)$$

$$\alpha_K = -0,0004 \cdot x_{\text{ЦШ-ЛС}}^2 + 0,1985 \cdot x_{\text{ЦШ-ЛС}} + 1,528. \quad (96)$$

Для случая «в»:

$$\alpha_K = 0,0245 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}}^2 - 0,514 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}} + 3,656; \quad (97)$$

$$\alpha_K = 0,0022 \cdot x_{\text{ЦШ-ЛС}}^2 + 0,2198 \cdot x_{\text{ЦШ-ЛС}} + 0,534. \quad (98)$$

Для случая «г»:

$$\alpha_K = 0,0302 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}}^2 - 0,507 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}} + 3,05; \quad (99)$$

$$\alpha_K = -0,0223 \cdot x_{\text{ЦШ-ЛС}}^2 + 0,463 \cdot x_{\text{ЦШ-ЛС}} + 0,321. \quad (100)$$

Для случая «д»:

$$\alpha_K = -0,0172 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}}^2 - 0,193 \cdot x_{\text{ЛС-ОМ}} + 4,915; \quad (101)$$

$$\alpha_K = -0,0369 \cdot x_{\text{ЦШ-ЛС}}^2 + 0,8115 \cdot x_{\text{ЦШ-ЛС}} + 0,1758. \quad (102)$$

Полученные расчетным путем зависимости для коэффициентов концентрации позволяют определить конечные значения данных коэффициентов в зависимости от расположения исследуемого нетто-сечения дефекта. Далее уточняется значение общего коэффициента концентрации напряжений в зависимости от имеющихся локальных зон пластических деформаций и вычисляются соответствующие значения напряжений и деформаций в нетто-сечении.

С использованием результатов, полученных аналитически и численно в разделе 4.4, а также экспериментальных значений разрушающих нагрузок, становится возможным выполнить верификацию полученных коэффициентов концентрации.

На примере исследованного сварного соединения, выполненного ручной дуговой сваркой, произведем расчет напряженного состояния двумя методами – через полученные коэффициенты концентрации и посредством линий скольжения (Таблица 10). При этом примем, что трещиноподобный дефект находится на линии сплавления, то есть напряжения предполагаются максимальными.

Таблица 10 – Сравнение значений концентрации напряжений для разных видов расчета

№ п/п	Вид расчета	Коэффициент концентрации	Напряжения в области дефекта
1	По коэффициенту концентрации	4,915	498 МПа
2	По линиям скольжения		485 МПа

4.6 Выводы по главе 4

1. Существующие методики расчета прочности участков трубопроводов с дефектами не учитывают образование локальных пластических зон в сварном соединении, однако существует возможность учета влияния форм и зон механической неоднородности на прочность с помощью коэффициентов концентрации.

2. По результатам проведенной твердометрии сварного соединения, выполненного ручной дуговой сваркой, сформирована картина контактных границ между зонами механической неоднородности. Для данных контактных границ определены условные коэффициенты двухосности.

3. С помощью метода линий скольжения для исследованного сварного соединения построены соответствующие линии характеристик. Смоделированы дефекты в разных зонах механической неоднородности. Определены условия влияния естественных концентраторов напряжений на напряженное состояние в вершине трещиноподобного дефекта.

4. Расположение трещиноподобного дефекта с одинаковыми геометрическими параметрами в разных зонах механической неоднородности приводит к изменению напряженно-деформированного состояния в нетто-сечении дефекта.

5. Для существующей методики расчета прочности и долговечности участков трубопроводов с дефектами предложен механизм практического учета форм и свойств механической неоднородности при расчете участка с дефектом, представляемым как искусственный концентратор напряжений.

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 аналитических и численных 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 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбиндер, А.Б. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б. Айбиндер А.Б. – Москва: Недра, 1982. – 341 с.
2. Айметов, С.Ф. Разработка методов оценки работоспособности сварных соединений при статическом изгибе: дис. ... канд. техн. наук / С.Ф. Айметов. – Челябинск, 2011. – 179 с.
3. Александров, С.Е. Обобщение решения Прандтля и его приложение к оценке несущей способности некоторых сварных и паяных конструкций / С.Е. Александров // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2001. – № 6. – С. 39-43.
4. Анучкин, М.П. Трубы для магистральных трубопроводов / Анучкин М.П., Горицкий В.Н., Мирошниченко Б.И. – Москва : Недра, 1986. – 231 с.
5. Андреев, Л.С. О неустойчивости пластического деформирования при двухосном нагружении / Л.С. Андреев // Машиностроение. – 1965. – № 1. – С 51-57.
6. Анисимов, Ю.И. О напряженном состоянии мягкой прослойки в сварном соединении с учетом деформационного упрочнения (осесимметричная деформация) / Анисимов Ю.И., Бакши О.А., Моношков А.Н. // Сварные конструкции и их производство : сб. науч. тр. ЧПИ. – Челябинск : Изд-во Челяб. политехн. ин-та, 1972. – Вып. 100. – С 21-27.
7. Багрянский, К.В. Теория сварочных процессов / Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов М.К. – Киев : Вища школа, 1976. – 424 с.
8. Бакши, О.А. Прочность механически неоднородных сварных соединений при двухосном растяжении / Бакши О.А., Богомолова А.С. // Сварочное производство. – 1971. – № 5. – С 3-6.
9. Бакши, О.А. Деформационная способность (пластичность) сварных стыковых соединений и пути ее регулирования / Бакши О.А. // Вопросы сварочного производства : сб. науч. тр. ЧПИ. – Челябинск : Изд-во Челяб. политехн. ин-та, 1968. – Вып. 63. – С 3-14.
10. Бакши, О.А. О напряженном состоянии пластической прослойки при осесимметричной деформации / Бакши О.А., Качанов Л.М. // Изв. АН СССР. Механика. – 1965. – № 2. – С. 134-137.

11. Бакши, О.А. Механическая неоднородность сварных соединений : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / О.А. Бакши. – Москва : МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1967.
12. Бакши, О.А. Механическая неоднородность сварных соединений / О.А. Бакши. – Челябинск : Изд-во Челяб. политехн. ин-та, 1981. – Ч. 1. – 57 с.
13. Бакши, О.А. Механическая неоднородность сварных соединений / О.А. Бакши. – Челябинск : Изд-во Челяб. политехн. ин-та, 1981. – Ч. 2. – 56 с.
14. Бакши, О.А. О напряженном состоянии мягких прослоек в сварных соединениях при растяжении (сжатии) / О.А. Бакши // Сб. науч. тр. ЧПИ: Вопросы свароч. пр-ва. – Челябинск : Изд-во Челяб. политехн. ин-та, 1965. – Вып. 33. – С. 5-26.
15. Бакши, О.А. Об учете фактора механической неоднородности сварных соединений при испытании на растяжение / О.А. Бакши // Сварочное производство. – 1985. – № 7. – С. 32-34.
16. Бакши, О.А. Работоспособность сварных цилиндрических труб с поперечной мягкой прослойкой при осевом растяжении / Бакши О.А., Богомолова А.С. // Сварочное производство. – 1969. – № 4. – С. 3-4.
17. Бакши, О.А. О напряженном состоянии и деформации твердого металла в сварных соединениях с твердой и мягкой прослойками / Бакши О.А., Шатов А.А. // Сварочное производство. – 1966. – № 5. – С. 17-20.
18. Бакши, О.А. Влияние внутренних дефектов на статическую прочность механически неоднородных сварных соединений цилиндрических деталей / Бакши О.А., Шахматов М.В., Ерофеев В.В. // Автоматическая сварка. – 1984. – № 11. – С. 7-11.
19. Бакши, О.А. Напряженно-деформированное состояние сварных соединений с дефектом в центре мягкого стыкового шва / Бакши О.А., Шахматов М.В., Ерофеев В.В. // Автоматическая сварка. – 1988. – № 6. – С. 14-17.
20. Бакши, О.А. О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой / Бакши О.А., Шрон Р.З. // Сварочное производство. – 1971. – № 3. – С. 3-5.
21. Бакши, О.А. Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой / Бакши О.А., Шрон Р.З. // Сварочное производство. – 1962. – № 5. – С. 6-10.
22. Белкин, Н.М. Гидроиспытания крутоизогнутых отводов до разрушения / Н.М. Белкин // Строительство трубопроводов. – 1975. – № 8. – С. 13-14.

23. Бибииков, Ю.Н. Общий курс обыкновенных дифференциальных уравнений / Ю.Н. Бибииков. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 232 с.
24. Богомолова, А.С. Исследование влияния механической неоднородности сварных соединений на их работоспособность в условиях двухосного растяжения : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Богомолова. – Челябинск : ЧПИ, 1969. – 24 с.
25. Богомолова, А.С. О напряженном состоянии пластической прослойки с двухсвязным контуром при осесимметрической деформации / А.С. Богомолова // Сварные металлоконструкции и их производство : сб. науч. тр. ЧПИ. – Челябинск : Изд-во Челяб. политехн. ин-та, 1972. – Вып. 100. – С. 271-273.
26. Бородавкин, П.П. Сооружение магистральных трубопроводов / Бородавкин П.П., Берчзин В.Л. – Москва : Недра, 1987. 472 с.
27. Бриджмен, П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва / Бриджмен П. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1955. – 444 с.
28. Бровман, М.Я. Расчет усилий при пластической деформации с учетом неравномерного распределения температуры / Бровман М.Я. // Кузнечно-штамповое пр-во. – 1962. – № 7. – С. 5-8.
29. Бродский, А.Я. Сварка арматуры железобетонных конструкций на строительной площадке / Бродский А.Я., Евстратов Г.И., Фридман А.М. – Москва : Стройиздат, 1978. – 271 с.
30. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушений и критерии работоспособности / Винокуров В.А., Куркин С.А., Николаев Г.А. – Москва : Машиностроение, 1996. – 576 с.
31. Вопросы сварочного производства : сб. науч. тр. ЧПИ. – Челябинск : Изд-во ЧПИ, 1965. – Вып. 33.
32. Вопросы сварочного производства : сб. науч. тр. ЧПИ. – Челябинск : Изд-во ЧПИ, 1968. – Вып. 63.
33. Вопросы сварочного производства : сб. науч. тр. ЧПИ. – Челябинск : Изд-во ЧПИ, 1974. – Вып. 139.
34. Вопросы сварочного производства : сб. науч. тр. ЧПИ. – Челябинск : Изд-во ЧПИ, 1978. – Вып. 203.
35. Воронцов, А.Л. Об аппроксимации кривых упрочнения / Воронцов А.Л. // Вести машиностроения. – 2002. – № 1. – С. 51-54.
36. Гаспярянц, Р.С. Организационно-технологическая система обеспечения эксплуатационной надежности магистральных нефтепроводов : дис. ... д-ра техн.

наук / Р.С. Гаспьянц. – Москва, 2008. – 467 с.

37. Гордиенко, В.Е. Дефекты сварных швов и контроль качества металла / Гордиенко В.Е., Гордиенко Е.Г., Степанов С.А., Кнышев Ю.В. // СПбГАСУ. – Санкт-Петербург, 2009. – Ч. II: Дефекты сварных швов и контроль качества металла. – 46 с.

38. Генки, Г.О. О некоторых статически определимых случаях равновесия в пластических средах // Теория пластичности / Г.О. Генки ; под. ред. Ю.Н. Работнова. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1948. – С. 80-101.

39. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения. – 2008. – 22 с.

40. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Госстандарт СССР. – 1990 (с поправкой ИУС 4-2005 от 2005 г.). – 55 с.

41. ГОСТ 23118-99. Конструкции стальные строительные. Общие технические условия. – Москва : ГУП ЦПП, 2001. – 38 с.

42. ГОСТ 34182-2017. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Эксплуатация и техническое обслуживание. Основные положения. – 2018. – 50 с.

43. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 44 с.

44. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов / Губкин С.И. – Т. 1. Физико-механические основы пластической деформации. – Москва : Черцветметгиз, 1961. – 376 с.

45. Гумеров, А.Г. Дефектность труб трубопровода и методы их ремонта / Гумеров А.Г. – Москва : Недра, 1998. – 252 с.

46. Гумерова, Г.Р. Определение остаточного ресурса конструктивных элементов нефтепроводов с мягкими прослойками : дис. ... канд. техн. наук / Г.Р. Гумерова. – Уфа, 2002. – 112 с.

47. Даунис, М.А. Сопротивление деформированию и разрушению механически неоднородных сварных соединений при однократном нагружении / Даунис М.А., Браженас А.П. // Проблемы прочности. – 1979. – № 12. – С. 53-58.

48. Даффи, А.Р. О поведении дефектов в сосудах давления // Новые методы оценки сопротивления материалов хрупкому разрушению / Даффи А.Р., Эйбер Р.Дж., Мэкси У.А. – Москва : Мир, 1972. – С. 272-300.

49. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы /

Двайт Г.Б. – Москва : Наука, 1973. – 228 с.

50. Девис, Е. Рост напряжений с изменением деформаций и зависимость "напряжения-деформация" в пластической области для меди при сложном напряженном состоянии // Теория пластичности / Е. Девис ; под ред. Ю.Н. Работнова. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1948. – С. 336-363.

51. Девис, Е. Текучесть и разрушение стали со средним содержанием углерода при сложном напряженном состоянии // Теория пластичности / Под ред. Ю.Н. Работнова. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1948. – С. 364-374.

52. Дектярев, В.П. Деформации и разрушения в высоконапряженных конструкциях / Дектярев В.П. – Москва : Машиностроение, 1987. – 105 с.

53. Денис, Р.М. Оценка допустимости коррозионных дефектов / Денис Р.М. // Трубопроводный транспорт нефти. – 1997. – № 4. – С. 28-34.

54. Дильман, В.Л. Математическое моделирование напряженного состояния тонкостенных неоднородных цилиндрических оболочек : дис. ... д-ра физ-мат. наук / В.Л. Дильман. – Челябинск, 2011. – 320 с.

55. Дудко, Б.Н. К расчету на прочность толстостенных литых колен трубопроводов, нагруженных внутренним давлением / Б.Н. Дудко // Проблемы прочности. – 1997. – № 1. – С. 34-37.

56. Ерофеев, В.В. О некоторых особенностях использования метода линий скольжения (применительно к задачам двухосного нагружения) / Ерофеев В.В., Распопов А.А., Шахматов М.В. // Проблемы прочности. – 1990. – № 3. – С. 63-68.

57. Ерофеев, В.П. Исследование влияния геометрии мягких прослоек на их напряженно-деформированное состояние и прочность : дис. ... канд. техн. наук / В.П. Ерофеев. – Челябинск, 1972. – 218 с.

58. Ерошкина, Т.В. Математическое моделирование напряженного состояния поперечного пластического слоя в круглом стержне / Ерошкина Т.В., Дильман В.Л. // Известия ВУЗов. Математика. – 2011. – № 11. – С. 1-11.

59. Ерошкина, Т.В. Напряженное состояние поперечной мягкой прослойки в растягиваемом круглом стержне при гипотезе параболических сечений / Ерошкина Т.В. // Обозрение прикл. и пром. математики. – 2007. – Т. 14, вып. 1. – С. 109-110.

60. Жуков, А.М. О пластических деформациях изотропного металла при сложном нагружении / Жуков А.М. // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. – 1956. – № 8. – С. 81-82.

61. Жуков, А.М. Сложное, нагружение и теория пластичности изотропных

металлов / Жуков А.М. // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. – 1955. – № 8. – С. 81-92.

62. Зайнуллин, Р.С. Безопасное развитие трещин в элементах оболочечных конструкций / Зайнуллин Р.С. – Москва : Недра, 2005. – 426 с.

63. Зорин, Е.Е. Некоторые направления развития методов и средств диагностики конструкций в процессе эксплуатации / Зорин Е.Е. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1995. – № 3. – 27-30 с.

64. Ивлев, Д.Д. Теория идеальной пластичности / Ивлев Д.Д. – Москва : Наука, 1966. – 231 с.

65. Игнатик, А.А. Совершенствование методики оценки работоспособности магистральных нефтепроводов с комбинированными дефектами типа «вмятина с потерей металла» : дис. ... канд. техн. наук / А.А. Игнатик. – Ухта, 2020. – 180 с.

66. Ильюшин, А.А. Пластичность / Ильюшин А.А. – Москва : Изд-во АН СССР, 1963. – 271 с.

67. Ишлинский, А.Ю. Математическая теория пластичности / Ишлинский А.Ю., Ивлев Д.Д. – Москва : Физматлит, 2001. – 702 с.

68. Кантемиров, И.Ф. Научные основы обеспечения повышенной пропускной способности объектов трубопроводного транспорта : дис. ... д-ра техн. наук / И.Ф. Кантемиров. – Уфа, 2012. – 379 с.

69. Качанов, Л.М. Основы механики разрушения / Качанов Л.М. – Москва : Наука, 1974. – 310 с.

70. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности / Качанов Л.М. – Москва : Наука, 1969. – 420 с.

71. Качанов, Л.М. О напряженном состоянии пластической прослойки / Качанов Л.М. // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. Механика и машиностроение. – 1962. – № 5. – С. 63-67.

72. Качанов, Л.М. Об одном способе определения сопротивления отрыву / Качанов Л.М., Немчинский А.Л. // Физика металлов и металловедение. – 1957. – Том 4, вып. 1. – С. 151-160.

73. Клыков, Н.А. Прочность сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью / Клыков Н.А., Решетов А.Л. // Автоматическая сварка. – 1979. – № 12. – С. 29-32.

74. Ключников, В.Д. Математическая теория пластичности / Ключников В.Д. – Москва : Изд-во МГУ, 1979. – 208 с.

75. Ковальчук, Г.И. К вопросу о потере устойчивости пластического деформирования оболочек / Ковальчук Г.И. // Проблемы прочности. – 1983. – № 5. – С. 11-16.

76. Когут, Н.С. Несущая способность сварных соединений / Когут Н.С., Шахматов М.В., Ерофеев В.В. – Львов : Свит, 1991. – 184 с.

77. Кузеев, И.Р. Прогнозирование безопасности эксплуатации сварных конструкций в условиях нефтесодержащих сред / Кузеев И.Р. Диньмухаметова Л.С., Пояркова Е.В. // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 6. – С. 254-262.

78. Кроха, В.А. О зависимости показателя деформационного упрочнения от степени деформации и выполнении степенного закона упрочнения / Кроха В.А. // Проблемы прочности. – 1981. – № 8. – С. 72-77.

79. Красовский, А.Я. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов / Красовский А.Я., Красику В.Н. – Киев : Наукова думка, 1990. – 176 с.

80. Кривошея, В.Н. Свойства металла ЗТВ сварных соединений сталей 17Г1С и 17Г2АФ / Кривошея В.Н., Дубров В.Н. // Автоматическая сварка. – 1989. – № 11. – С. 51-54.

81. Кузнецов, А.И. Задача о неоднородном пластическом слое / Кузнецов А.И. // Archiwum mechaniki stosowanej. – 1960. – Т. 12, № 2. – С. 163-172.

82. Куркин, С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением / Куркин С.А. – Москва : Машиностроение, 1976. – 184 с.

83. Лисин, Ю.В. Разработка инновационных технологий обеспечения надежности магистрального нефтепроводного транспорта : дис. ... д-ра техн. наук / Ю.В. Лисин. – Уфа. 2014. – 369 с.

84. Лисин, Ю.В. и др. Комплексный анализ запасов прочности трубопроводов и базовых механических свойств трубных сталей / Ю. В. Лисин и др. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7. – № 1. – С. 30–38.

85. Лупман, В.А. Критерии пластической устойчивости газопроводов // Проблемы ресурса газопроводных конструкций / Лупман В.А., Пашков Ю.Н., Курганова Н.Н. – Москва : Изд-во ВНИИГАЗ, 1995. – С. 101-108.

86. Макаренко, Л.В. Деформирование и разрушение в зонах неоднородности напряженных состояний и локальных свойств сварных соединений : дис. ... канд. техн. наук / Л.В. Макаренко. – Москва, 2007. – 163 с.

87. Марковец, М.П. Определение механических свойств металлов по

твердости / Марковец М.П. – Москва : Машиностроение, 1979. – 191 с.

88. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. / Н.А. Махутов. – Новосибирск : Наука, 2005. – Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. – 494 с.

89. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н.А. Махутов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 272с.

90. Махутов, Н.А. Повышение конструктивной прочности соединительных деталей трубопроводов / Махутов Н.А., Сериков С.В., Котоусов А.Г. // Проблемы прочности. – 1991. – № 4. – С. 77-80.

91. Малинин, Н.Н. Устойчивость двухосного пластического растяжения анизотропных листов и цилиндрических оболочек / Малинин Н.Н. // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1971. – № 2. – С. 115-118.

92. Методические рекомендации МР-125-02-95. Правила составления расчетных схем и определения параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами // НПО ЦНИИТМАШ. – Москва, 1995. – 53 с.

93. Моношков, А.Н. Пластическая устойчивость и ее роль в оценке прочности труб / Моношков А.Н., Пыхов С.И., Пустин И.А. // Производство труб с покрытиями, отделка и контроль качества труб. – Москва : Металлургия, 1972. – С. 77-81.

94. Мустафин, Ф.М. Сварка трубопроводов : учеб. пособие / Ф.М. Мустафин, Н.Г. Блехерова, О.П. Квятковский и др. – Москва : Недра-Бизнесцентр, 2002. – 350 с.

95. Николаев, Г.А. Механика разрушения и критерии работоспособности / Николаев Г.А. и др. // Машиностроение, 1996. – 576 с. : ил. (Основы проектирования машин).

96. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1954. – 494 с.

97. Найфе, А.Х. Методы возмущений / Найфе А.Х. – Москва : Мир, 1976. – 476 с.

98. Нахалов, В.А. Расчет толщины стенки трубы после гнутья / Нахалов В.А., Брагина В.И. // Энергетическое строительство. – 1979. – № 4. – С. 57-60.

99. Неганов, Д.А. Комплексный анализ прочности магистральных нефтепроводов / Неганов Д.А. // Наука и технологии трубопроводного

транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 9. – № 2. – С. 128-136.

100. Неганов, Д.А. Методология обоснования прочности оболочковых конструкций длительно эксплуатируемого оборудования магистральных нефтепроводов : дис. ... д-ра техн. наук / Д.А. Неганов. – Уфа, 2020. – 417 с.

101. Одквист, Ф. Упрочнение стали и ей подобных материалов // Теория пластичности / Под ред. Ю.Н. Работнова. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1948. – С. 283-290.

102. Окерблом, Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Окерблом Н.О. – Москва : Машиностроение, 1964. – 356 с.

103. Остсемин, А.А. Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами / Остсемин А.А., Заварухин В.Ю. // Проблемы прочности. – 1993. – № 12. – С. 51-59.

104. Остсемин, А.А. Разработка методов оценки локальной прочности и трещиностойкости стальных труб : дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Остсемин. – Красноярск, 1994. – 229 с.

105. Остсемин, А.А. Температурные зависимости механических свойств сварных соединений и основного металла труб большого диаметра при динамическом нагружении / А.А. Остсемин // Заводская лаборатория. – 2002. – № 7. – С. 46-50.

106. Остсемин, А.А. Влияние поверхностных дефектов на статическую прочность сварных швов спиральношовных труб / Остсемин А.А., Дильман В.Л. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 2. – С. 16-19.

107. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Писаренко Г.С., Лебедев А.А. – Киев : Наукова думка, 1976. – 416 с.

108. Полуавтоматическая сварка стыковых соединений титановых сплавов больших толщин без разделки кромок / В.Л. Руссо, Б.В. Кудояров, А.А. Николаев и др. // Сварочное производство. – 1971. – № 10. – С. 20-21.

109. Пояркова, Е.В. Эволюция структурно-механической неоднородности материалов сварных элементов конструкций в рамках концепции иерархического согласования масштабов : дис. ... д-ра техн. наук / Е.В. Пояркова. – Уфа, 2015. – 392 с.

110. Практические примеры на сопротивление хрупкому разрушению трубопроводов под давлением / А.Р. Даффи, Дж. М. Мак-Клур, Р.Дж. Айбер, У.А. Мэкси // Разрушение. Т. 5. – Москва : Машиностроение, 1977. – С. 146-210.

111. Прандтль, Л. Примеры применения теоремы Генки к равновесию пластических тел // Теория пластичности / Под ред. Ю.Н. Работнова. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1948. – С. 103-113.

112. Распопов, А.А. Расчет несущей способности сварных соединений низколегированных сталей с разупрочненными участками / Распопов А.А., Ерофеев В.В., Голиков В.Н. // Автоматическая сварка. – 1989. – № 3. – С. 70-71.

113. Распопов, А.А. Несущая способность механически неоднородных сварных стыковых соединений в условиях двухосного нагружения / Распопов А.А., Ерофеев В.В. // Вопросы сварочного производства : сб. научных трудов. – Челябинск, 1987. – С. 28-35.

114. Распопов, А.А. Разработка методик оценки несущей способности механически неоднородных сварных соединений тонкостенных оболочек давления : дис. ... канд. техн. наук / А.А. Распопов. – Челябинск, 1992. – 144 с.

115. Рекомендации ВНИИСТ по повышению работоспособности сварных соединений магистральных трубопроводов Р 155-74. – 1974. – 22 с.

116. Саржевский, В.А. О разрушении высокопрочных сталей при сварке / А.М. Макара, В.А. Саржевский, Н.Е. Протосей и др. // Сварочное производство. – 1968. – № 8. – С. 1-5.

117. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – 2017 (с изм. 2 от 04.12.2019). – 209 с.

118. СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*. – 2012 (с изм. 3 от 05.02.2021). – 116 с.

119. СП 33.13330.2012 Расчет на прочность стальных трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 2.04.12-86. – 2013 (с изм. 1 от 18.08.2016). – 23 с.

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

121. 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.

122. Троицкий, В.А. Неразрушающий контроль сварных соединений / Троицкий В.А., Валевич М.И. – Москва : Машиностроение, 1988. – 112 с.

123. Шахматов, Д.М. Оценка прочности механически неоднородных

сварных соединений / Шахматов Д.М., Шахматов М.В. // Сварка и диагностика. – 2018. – № 1. – С. 32–36.

124. Шахматов, М.В. Оценка допустимой дефектности нефтепроводов с учетом их реальной нагруженности / Шахматов М.В., Ерофеев В.В., Гумеров К.М. и др. // Строительство трубопроводов. – 1991. – № 12. – С. 37-41.

125. Шахматов, М.В. Методика оценки допустимости дефектов нефтепроводов с учетом их реальной нагруженности / М.В. Шахматов, А.Г. Игнатъев, В.В. Ерофеев и др. – Уфа : ВНИИСПТнефть, 1992. – 142 с.

126. Шахматов, М.В. Технология изготовления и расчет сварных оболочек / Шахматов М.В., Ерофеев В.В., Коваленко В.В. – Уфа : Полиграфкомбинат, 1999. – 272 с.

127. Ямалеев, К.М. Дефектность труб нефтепроводов и методы их ремонта / Ямалеев К.М., Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Азметов Х.А. ; под ред. А.Г. Гумерова. – Москва : Недра-бизнесцентр, 2003. – 310 с.

128. Karuppanan, S. Finite element analysis of residual stress in cold expanded plate with different thickness and expansion ratio/ 257/ 10.1088/1757-899X/257/1/012019.

128. Marciniak, Z. Utrata statecznosci rozciaganych powlok plastycznych // Mech. teoretyczna i stosowana. – 1966. – Vol. 4. – № 3.

129. Pluvinage, G. Improvement of the failure-assessment diagrams used to check the harmfulness of pipe defects // Pipeline. Science and Technology. – 2017. – № 1. – P. 17-23.

130. Swift, H. Plastic instability under plane stress // Journal Mech. and Phys. Solids. – 1952. – № 1. – P. 1-18.

131. Storakers, B. Plastic and visco-plastic under internal pressure, torsion and axial tension // IJMS. – 1968. – V. 10. – № 6. – P. 519-528.

132. Davis, E.A. Combined tension-torsion test with bixed principal directions // Journal of applied mechanics. – 1955. – Vol. 22. – № 3. – P. 411-417.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Механические характеристики трубы, использованной для подготовки образцов

Механические свойства основного металла труб								
№ п/п	Номер плавки	Предел текучести Rp 0,2 Н/мм ² (МПа)	Временное сопротивление, Н/мм ² (МПа)	Относ. удлинен. δ5, % Т	Предел текучести к врем сопротив, Rp 0,2/Rm	Ударная вязкость KCV t=-20°C, ср.зн., Дж/см ²	ИПГ t=-20°C, ср.зн., %	Твердость HV
1	V52242	497.0; 490.0	612.0; 612.0	24.0; 23.0	0.81; 0.80	293.9; 296.4	100; 100	210.00; 212.00
2	Z52868	447.0; 462.0	594.0; 571.0	26.0; 25.0	0.75; 0.81	276.4; 276.5	100; 100	189.00; 197.00
3	Z54025	438.0; 466.0	599.0; 591.0	22.0; 23.5	0.73; 0.79	237.5; 236.3	100; 100	208.00; 214.00
4	Z60785	472.0; 464.0	597.0; 616.0	25.0; 24.0	0.79; 0.75	311.2; 292.6	100; 100	205.00; 208.00

Механические свойства сварного соединения								
№ п/п	Номер партии	Временное сопротивление, Н/мм ² (МПа)	Ударная вязкость KCV при t=-20°C, Дж/см ² , ср.зн., центр шва	Ударная вязкость KCV при t=-20°C по ЗТВ, ср.зн., Дж/см ²	Твердость по Виккерсу	Твердость по Виккерсу, ЗТВ	Угол загиба 180 градусов	
1	Y1676	622.0; 663.0	207.5; 143.6	256.1; 276.3	255.00; 248.00	249; 246	180; 180	

Неметаллические включения труб									
№ п/п	Номер плавки	Величина зерна, балл	Полосчатость структуры, балл	Оксиды строчечные, ср. балл	Оксиды точечные, ср. балл	Сульфиды, ср. балл	Силикаты недеформирующ, ср.балл	Силикаты пластичные, ср. балл	Силикаты хрупкие, ср. балл
1	V52242	11-8	1	0	0	0	1.3	0	0.7
2	Z52868	9-10	0.5	0	0	0	0.9	0	0.9
3	Z54025	8-11	1.5	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0
4	Z60785	8-11	1.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.5

Примечания	
1.	Шифры марок стали: 58 - K56/2
2.	Химсостав каждой плавки определен по сертификату на металл завода поставщика.
3.	Химсостав плавок, помеченных знаками "****", определен в готовом прокате.
4.	Индекс поставщика металла: X - Акционерное общество "Уральская Сталь"
5.	Давление гидроспытаний труб - эквивалентное заводскому без учета осевого подпора-удовлетворительно.
6.	Тех.условия на заготовку:ТС 13657842-455-2014 (плав.V52242; Z52868; Z54025; Z60785).
7.	Результаты 100% неразрушающего контроля сварных швов и основного металла удовлетворительные.
8.	Трубы приняты инспекцией ООО "Транснефть-Надзор".
9.	Тип труб - прямошовные с одним продольным швом, сваренные дуговой сваркой под флюсом.
10.	Трубы изготовлены из листа, прошедшего 100% УЗК на заводе изготовителе листа.

Указанная в сертификате продукция соответствует действующим в России стандартам и техническим условиям.

При переписке по вопросам качества ссылаться на номер сертификата, тел.(351) 255-71-34, факс 255-66-10.

По вопросам подлинности сертификата обращаться на эл. адрес hotmail@chelpipe.ru

Цех технического контроля:

Дата выдачи сертификата: 22.04.2016

Место печати:



Паспорт трубы №

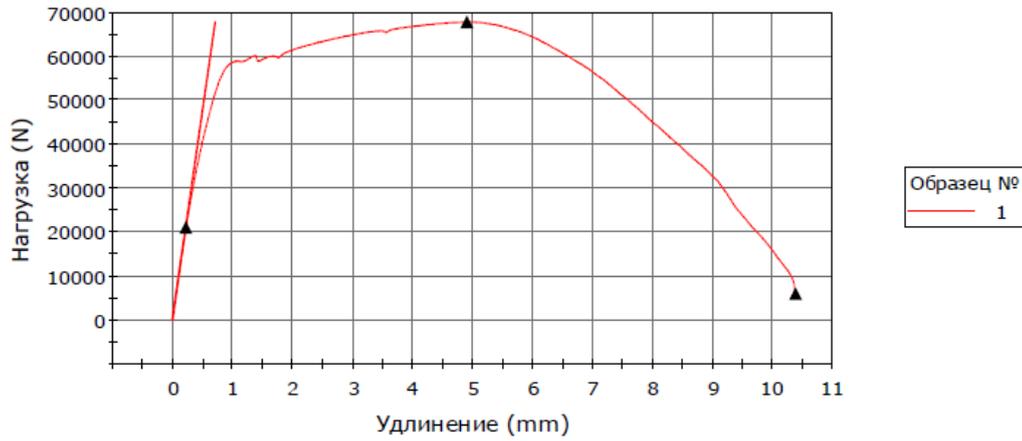
484130-ЧТПЗ 3-16

Завод-изготовитель	ОАО "Челябинский трубопрокатный завод" ТЭЗС "Высота-239"			№ трубы	484130		Дата изг-я	16.04.2016									
Диаметр, мм	Толщ. стенки, мм	Длина, м	Масса, тн	НТД на изготовление трубы		№ сертификата	№ партии										
530	16	11,96	2,45	ТУ 1381-018-00186654-2009		876/3.	Y1676										
Тип трубы	Прямошовная с одним продольным швом		Уровень качества трубы	2		Подводный переход	Нет										
Материал																	
Марка стали	Класс прочности			K56		НТД на штрипс		ТС 13657042-455-2014									
Изготовитель штрипса	X - ОАО "Уральская сталь"			УЗК		Да, на заводе-изготовителе листа		Отбор проб для механических испытаний, да/нет									
Содержание химических элементов в основном металле, %*																	
№ плавки	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N2	Nb	V	Mo	B	C экв	Pcm
Z60785	0,1	1,53	0,39	0,002	0,009	0,07	0,08	0,03	0,038	0,019	0,006	0,06	0	0,01		0,36	0,19
Механические свойства основного металла **																	
№ плавки	Врем. сопротивл., Н/мм ²	Пред. текуч., от Н/мм ²	Отн. удлинение, %	KCV -20 °С, Дж/см ²	KCU °С, Дж/см ²	DWTT при t = -20° С	от/ов	Твердость, HV10									
Z60785	597 616	472 464	25 24	311,2 292,6		100 100	0,79 0,75	205/208									
Механические свойства сварного соединения **																	
№ шва	Временное сопротивление, Н/мм ²	KCV -20 °С, Дж/см ²		KCU °С, Дж/см ²		Статич. изгиб, град.		Твердость, HV10	Твердость ЗТВ, HV10								
		Центр шва	Линия сплавл.	Центр шва	Линия сплавл.	Наруж. шов	Внутр. шов										
1	622 663	207,5 143,6	256,1 276,3			180	180	255/248	249/246								
2																	
* - Приведены данные из сертификата на лист																	
** - Мех. св-ва указаны минимальные, ударная вязкость определена как среднеарифметическое значение по результатам испытаний трёх образцов.																	
Дополнительные технические требования к трубе																	
Физические методы контроля																	
Сварное соединение	АУЗК+РТК*+РУЗК*			РТК - рентгено-телевизионный; * - участки, отмеченные АУЗК;													
Концевые участки трубы	АУЗК+РТК+РУЗК			АУЗК - автоматический ультразвуковой; РУЗК - ручной ультразвуковой;													
Торцы трубы	МЛК			МПК - магнитопорошковый; МЛК - магнитоломинесцентный													
Ремонт трубы					Экспандирование												
Исправление сварного шва	сварка	да/нет	Нет	Гидравлическое	да/нет		Нет										
	зачистка	да/нет	Нет		Механическое		да/нет		Да								
Исправление овальности	да/нет		Нет	Гидроиспытательное давление													
Количество исправлений овальности	1 м*		Нет														
Ремонт концевых участков	да/нет		Нет														
Зачистка поверхности	да/нет		Да														
*со стороны маркировки чёрной трубы																	
Изоляционное покрытие																	
Завод-изготовитель	НТД на изоляцию																
Тип покрытия	№ партии покр.	Наим. комплекса	№ сертиф.														
Контроль качества покрытия																	
Дата изоляции	Толщина покрытия,* мм		Адгезия, Н/см ²		Проч. при ударе, Дж	Визуальный контроль, да/нет	Сведения о ремонте, да/нет										
	общая	над швом	t = °С														
							Нет										
* Значения указаны минимальные																	

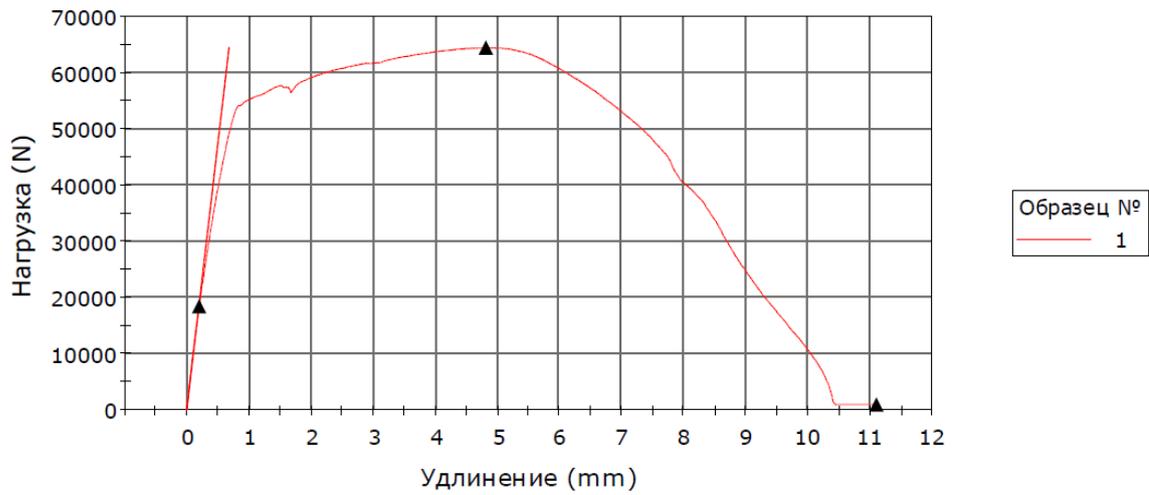
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Диаграммы растяжения образцов

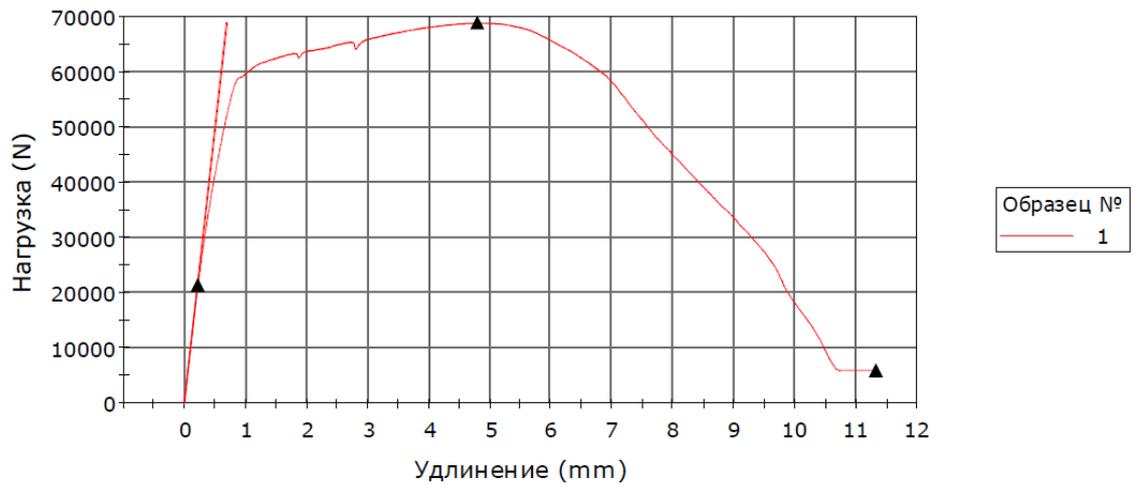
Образцы с 1 по 1



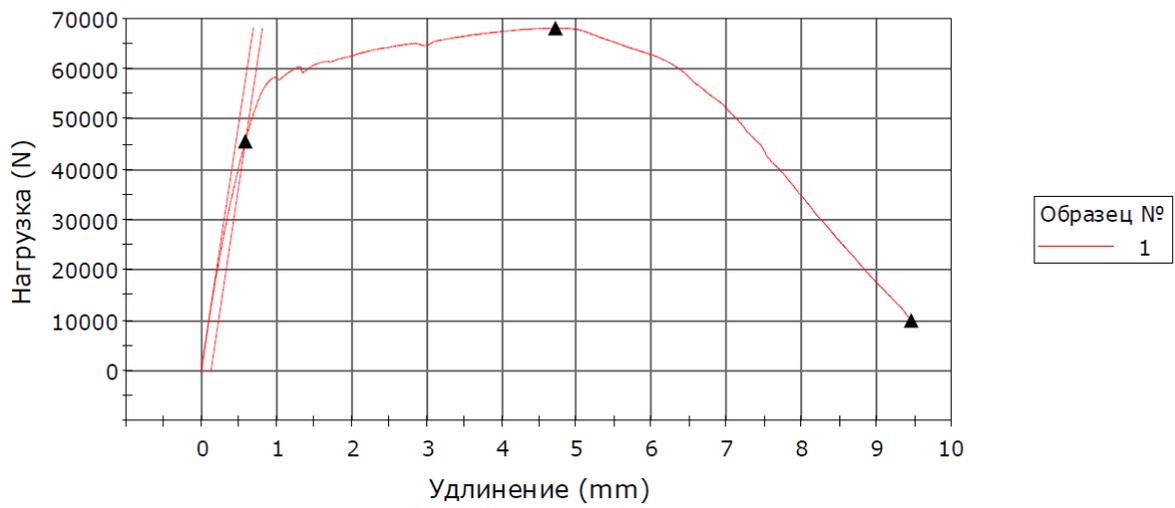
Образцы с 1 по 1



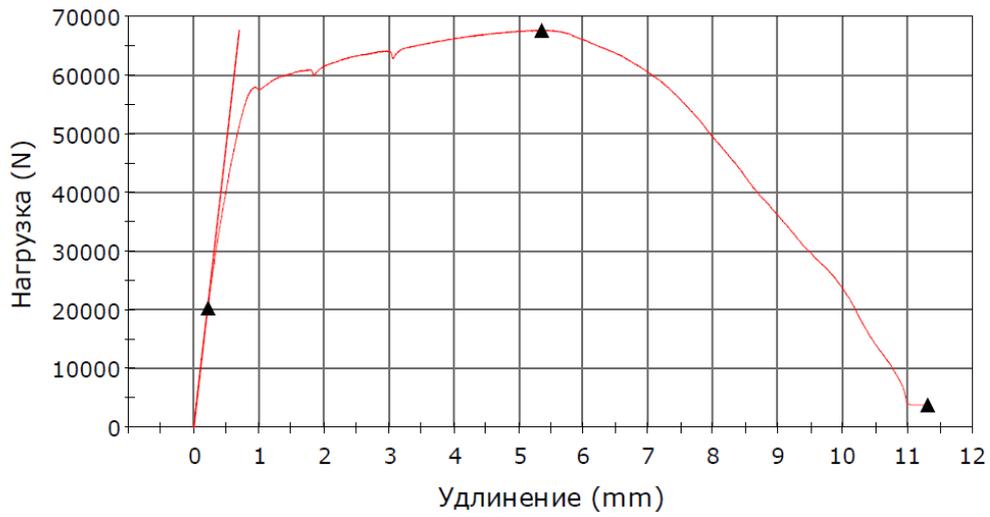
Образцы с 1 по 1



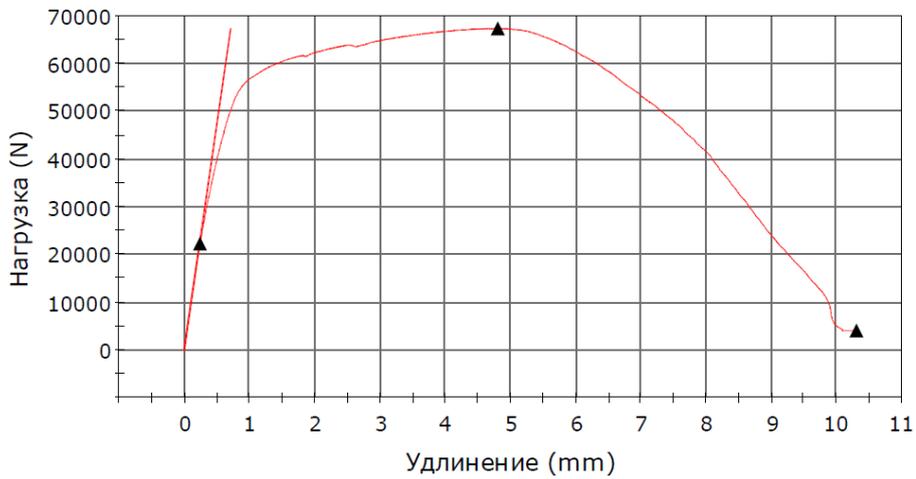
Образцы с 1 по 1



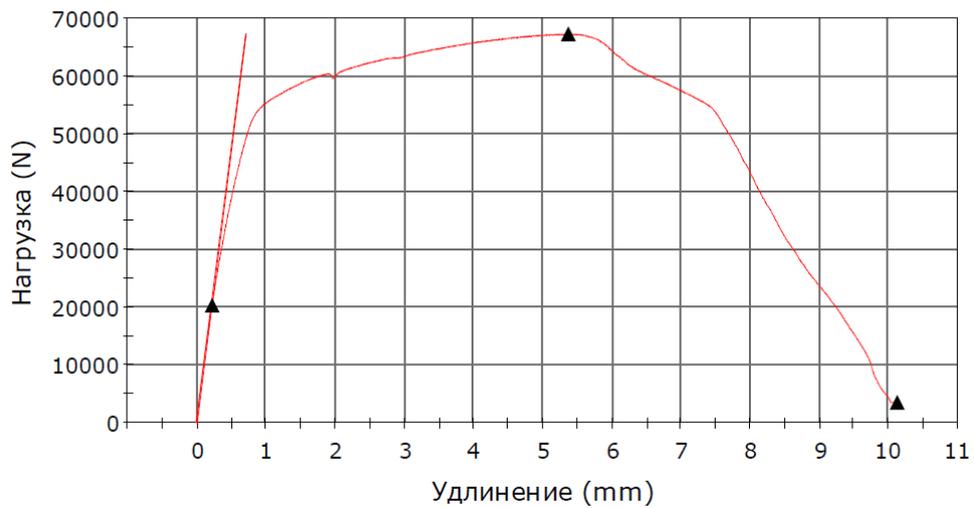
Образцы с 1 по 1

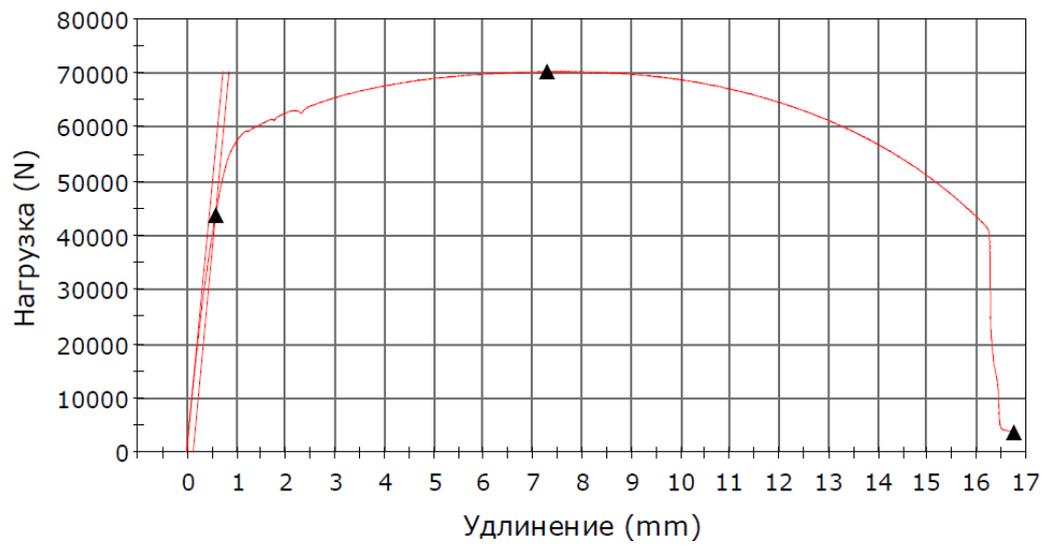
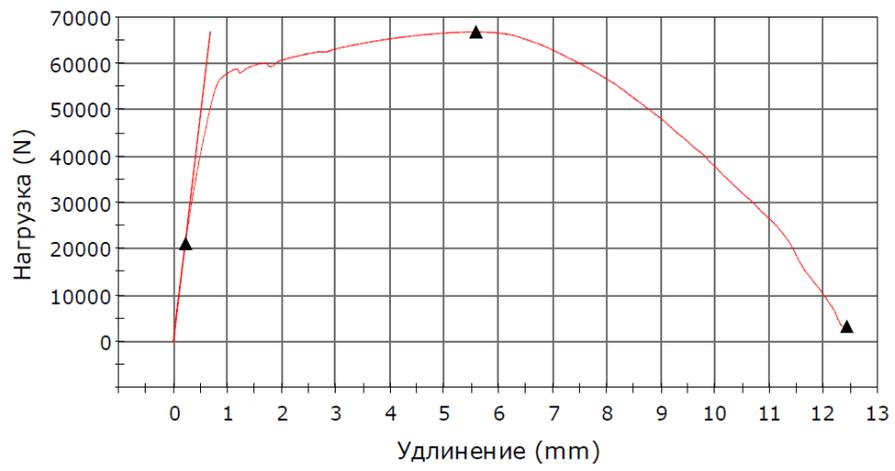


Образцы с 1 по 1



Образцы с 1 по 1





ПРИЛОЖЕНИЕ В

Справки о внедрении



Справка о внедрении результатов диссертационного исследования
Тигулева Егора Александровича
на тему: «Разработка методики оценки прочности сварных соединений
магистральных трубопроводов с учетом влияния форм и свойств механической
неоднородности»
по специальности 2.8.5 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и
хранилищ

ООО «Энергодиагностика» подтверждает использование в работе результатов
диссертационного исследования Е.А. Тигулева

Результаты диссертационного исследования Е.А. Тигулева используются в
части порядка учета форм и свойств зон механической неоднородности сварных
соединений магистральных трубопроводов, выполненных из низколегированных
сталей, при выполнении диагностических работ неразрушающими методами
контроля.

Результаты разработки методики оценки прочности сварных соединений
магистральных трубопроводов с учетом влияния форм и свойств механической
неоднородности, нашедшие отражение в диссертационной работе Тигулева Е.А.,
использованы при анализе опасности выявляемых дефектов диагностируемых
объектов. Использованный подход позволил проводить детализированный анализ
опасности дефектов, выявленных по результатам контроля неразрушающими
методами, в зависимости от их расположения относительно сварных соединений.

Главный инженер



А.А. Хайруллин



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»)ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450064. Тел.: (347) 242-03-70, <http://www.usoil.net>, E-mail: info@usoil.net
ИНН 027706179, ОГРН 1020203079016, ОКЗЮ 02069450, КПП 02770100103.05.2023 № 077-40/33
На № _____ от _____

В диссертационный совет Д 24.2.428.03

СПРАВКА

Разработанная ассистентом кафедры «Проектирование и строительство объектов нефтяной и газовой промышленности» Тигулевым Егором Александровичем методика учета влияния механической неоднородности при расчете участков сварных соединений магистральных трубопроводов на прочность, выводы и рекомендации по диссертационной работе «Разработка методики оценки прочности сварных соединений магистральных трубопроводов с учетом влияния форм и свойств их механической неоднородности», а также учебно-методическое пособие «Расчет допустимости дефектов труб и сварных соединений» используются в учебном процессе УГНТУ при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по дисциплинам «Техническое диагностирование трубопроводов и конструкций», «Ремонт и реконструкция газонефтепроводов», «Организация работ по диагностическому обследованию, техническому обслуживанию и ремонту» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 21.03.01 и 21.04.01 «Нефтегазовое дело».

Проректор

по научной и инновационной работе

 /И.Г. Ибрагимов/