

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»  
(Самарский университет)

*На правах рукописи*



**Жуков Дмитрий Владимирович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ  
НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГАЗОПРОВОДОВ**

Специальность 2.6.17

«Материаловедение»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор  
Коновалов Сергей Валерьевич

Самара 2023

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1 ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ, МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ДЕФЕКТОВ.....	14
1.1 Анализ статистики инцидентов и причин отказов на газопроводах.....	14
1.2 Исследования повреждений макро- и микроструктуры стальных газопроводов.....	18
1.3 Основные современные методы обнаружения дефектов металла .....	24
1.3.1 Внутритрубная дефектоскопия .....	24
1.3.2 Неразрушающий контроль.....	25
1.4 Принятые критерии и нормы оценки дефектных участков .....	26
Выводы по главе 1 и постановка цели исследования .....	27
Глава 2 МАТЕРИАЛЫ, СРЕДСТВА, МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАННОЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....	30
2.1 Объекты и материалы для исследований.....	30
2.1.1 Исследование расслоений, выходящих на внешнюю поверхность.....	30
2.1.2 Исследование поверхности трубы после длительной эксплуатации .....	32
2.1.3 Исследование внутренних, и выходящих на внутреннюю поверхность расслоений.....	33
2.1.4 Исследование влияния внутренних расслоений на сварные соединения труб, выполненных сваркой высокой частоты .....	34
2.1.5 Объект для отработки метода оценки внутренних несплошностей с применением пошаговой толщинометрии .....	36
2.2 Методы исследований и применяемое оборудование .....	37
2.2.1 Металлография. Оптическая и электронная микроскопия.....	37
2.2.2 Методы и оборудование для лабораторного определения характеристик материала.....	38
2.2.3 Методы и оборудование для неразрушающего контроля .....	40
2.3 Расчетно-аналитические методы и программное обеспечение.....	46
2.3.1 Расчетно-аналитические методы .....	46

2.3.2 Средства разработки программного обеспечения.....	46
Глава 3 ПОВЕРХНОСТНЫЕ ОТСЛОЕНИЯ МЕТАЛЛА .....	47
3.1 Исследование производственных причин отслоения металла.....	47
3.1.1 Анализ дефектной зоны и неразрушающий контроль .....	47
3.1.2 Анализ изменений микроструктуры металла в дефектной области.....	51
3.1.3 Химические изменения в дефектной зоне .....	53
3.1.4 Расчет остаточной несущей способности методом конечных элементов.....	56
3.1.5 Выводы по результатам исследований дефектного участка.....	61
3.2 Исследование эксплуатационных причин отслоения металла.....	61
3.2.1 Внешний осмотр и неразрушающий контроль.....	61
3.2.2 Анализ химического состава .....	62
3.2.3 Металлографический анализ .....	62
3.2.4 Электронная микроскопия .....	65
3.2.5 Механические испытания.....	66
3.2.6 Анализ действующих напряжений и их влияния .....	67
Выводы по главе 3.....	68
Глава 4 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ ТРУБ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ.....	70
4.1 Оценка влияния внутренних раскатанных включений в металле труб.....	70
4.1.1 Методы и условия обнаружения дефектов .....	70
4.1.2 Анализ структуры дефектов.....	75
4.1.3 Анализ химического состава с применением оптико-эмиссионного спектрометра.....	82
4.1.4 Измерения микротвердости .....	83
4.1.5 Ультразвуковая толщинометрия образцов с уточненной визуальной толщиной расслоений.....	83
4.1.6 Влияние расслоений на склонность к хрупкому разрушению .....	86
4.1.7 Влияние расслоений на результаты при статическом растяжении .....	90

4.2 Исследование структуры и прочности сварного соединения труб с расслоением стенки.....	94
4.2.1 Особенности дефектной зоны и неразрушающий контроль.....	95
4.2.2 Дефекты микроструктуры шва.....	98
4.2.3 Микрорентгеноспектральный анализ включений.....	101
4.2.4 Микромеханические исследования зоны сплавления .....	102
4.2.5 Испытания на статическое растяжение и фрактографический анализ .....	104
4.3 Проведение численных экспериментов для анализа поведения поврежденных участков газопроводов, имеющих отклонения в механических характеристиках..	107
4.3.1. Описание цели и задачи моделирования.....	107
4.3.2. Описание модели и параметров моделирования .....	109
4.3.3. Проведение численных экспериментов.....	113
4.3.4. Итоги моделирования.....	117
Выводы по главе 4.....	117
 Глава 5 СПОСОБ ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ.....	
5.1 Описание способа .....	120
5.2 Возможности и цели анализа изображений .....	121
5.3 Современный подход к анализу изображений .....	122
5.4 Реализация способа.....	123
5.4.1 Шаг измерений и количество секущих линий .....	123
5.4.2 Методика расчета предлагаемых параметров .....	124
5.4.3 Визуализация результатов .....	125
5.4.4 Сравнительный анализ на стандартных образцах .....	125
5.4.5 Тестирование способа на реальных образцах .....	128
5.4.6 Тестирование и анализ на образцах без травления .....	131
 Глава 6 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.....	
6.1 Экспресс-метод определения конфигурации внутренних дефектов.....	138
6.1.1 Описание метода .....	138

6.1.2 Практическая реализация метода.....	142
6.1.3 Применение при обследовании магистральных газопроводов .....	148
6.2 Применение результатов исследований в обучении и повышении квалификации инженеров по неразрушающему контролю.....	151
6.2.1 Учебно-информационный стенд для изучения особенностей диагностики заводских дефектов труб типа закат .....	151
6.2.2 Набор образцов для изучения особенностей диагностики труб с расслоениями .....	153
6.2.3 Результаты внедрения в производственную деятельность.....	154
Выводы по главе 6.....	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	156
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	158
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО «САМАРАИНЖИНИРИНГ» .....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО «ХИМНЕФТЕАППАРАТУРА».....	177
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО ПФ «ЭДТОН».....	178
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ САМАРА»..	179
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС.....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. КОПИИ СВИДЕТЕЛЬСТВ О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ.....	181
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. КОПИИ ПАТЕНТОВ НА ПОЛЕЗНЫЕ МОДЕЛИ.....	182

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность**

Широкий диапазон механических свойств, хорошая свариваемость и относительная дешевизна делают сталь незаменимым конструкционным материалом, применяемым во всех отраслях промышленности. Стали являются основным материалом для трубопроводов различного назначения, в частности магистральных газопроводов высокого давления.

С учетом высокой зависимости энергетических и химических производств от поставок газа и работы газопроводов в непрерывном производственном цикле, оценка опасности дефектов металла труб является актуальной задачей. Пропущенные при изготовлении и допущенные в эксплуатацию производственные дефекты, выражающиеся в посторонних включениях в структуре материала и образующих трещиноподобные дефекты, приводят к изменению механических и эксплуатационных свойств, что при внешней целостности конструкций может привести к отсроченному во времени разрушению газопроводов.

Получаемые при диагностических работах результаты должны отражать реальную структуру исследуемых материалов для принятия решений по продолжению эксплуатации, замене или ремонту трубопровода. При обнаружении дефектов, сопоставление их характеристик и параметров с ранее исследованными объектами предоставляет научно обоснованную базу для оценки работоспособности материала. Особому вниманию подлежат случаи, когда полученные при неразрушающем контроле данные отличаются от реальных и предоставляют недостаточную или недостоверную информацию. Моделирование объектов с учетом полученных результатов, позволяет с высокой точностью оценить распределение действующих нагрузок и изменение коэффициента запаса. Зависимость производственных предприятий, объектов тепло- и электрогенерации от непрерывного режима работы газопроводов, обуславливают актуальность работ по повышению качества и точности по оценке опасности обнаруженных дефектов

материала труб для определения сроков ремонта, замены или возможности продолжения эксплуатации.

### **Степень разработанности**

С учетом различных параметров объектов, составов сплавов, методов производства, сварки, термообработки, видов и причин образования дефектов, условий эксплуатации и т.д., существуют обоснованные причины отсутствия критериев и алгоритмов оценки надежности и долговечности поврежденных газопроводов, комплексно учитывающих внутренние отклонения и внешние воздействия. В России одними из ведущих организаций по исследованиями повреждений газопроводов являются ООО «Газпром ВНИИГаз» и РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (Б.В. Будзуляк, И.И. Велиюлин, И.В. Ряховских, В.В. Харионовский, и др.). Многие исследования реальных эксплуатируемых объектов имеют выраженные отклонения в теоретическую или практическую стороны, не обеспечивая комплексных исследований и актуального массива информации для анализа. Следует отметить, что наибольшее внимание исследователей посвящено коррозионным процессам и стресс-коррозии, при этом оценка влияния внутренних производственных дефектов металла на эксплуатационные свойства газопроводов и существующие методы оценки их опасности в большой степени консервативны.

**Цель работы** – оценить влияние структуры, фазового состава и особенностей внутренних и выходящих на поверхность дефектов в низкоуглеродистых сталях газопроводов на механические и эксплуатационные свойства для совершенствования методов определения повреждений конструкций и обеспечения условий их безопасной эксплуатации.

### **Основные решаемые задачи:**

1. Анализ структуры внутренних и выходящих на внешнюю поверхность дефектов материала и оценка их влияния на результаты ультразвуковой толщинометрии.

2. Определение характеристик и оценка влияния внутренних раскатанных неметаллических включений в металле и химической неоднородности слоев на изменения механических и эксплуатационных свойств металла.

3. Совершенствование способа количественной оценки неоднородности структуры металлов и сплавов на основе стереологических методов с использованием современных информационных технологий.

4. Разработка метода определения конфигурации и размеров внутренних дефектов металла на основе результатов дискретной ультразвуковой толщинометрии с последующим компьютерным анализом и визуализацией результатов для оценки технического состояния дефектных труб и участков трубопроводов.

### **Научная новизна**

Экспериментально выявлена и описана морфология выходящих на внешнюю поверхность дефектов металла, определены условия внешних воздействий, кооперативное влияние которых оказывает искажающее воздействие на результаты ультразвуковой толщинометрии.

На основе сопоставления результатов неразрушающего контроля и оптической микроскопии, определены параметры и признаки, позволяющие оценить толщину раскатанных включений и степень поврежденности металла. Также показано, что наибольшей опасностью подобных дефектов является возможный пропуск включений с большой толщиной, что приводит к ослаблению несущей способности металла и неравномерному распределению напряжений, влияя на прилегающие бездефектные области.

Разработано дополнение к способу количественной оценки неоднородности структуры металлов и сплавов на основе стереологических методов по радиальным направлениям, использующее современные возможности компьютерного анализа.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Доказано кооперативное влияние особенностей трещиноподобных выходящих на внешнюю поверхность дефектов металла и условия внешних воздействий, оказывающих искажающие влияния на результаты контроля



структуры материала методами ультразвуковой толщинометрии. Разработаны методические рекомендации, применяемые при контроле расслоений, выходящих на внешнюю поверхность изделия.

Определено, что в условиях работы газопроводов без воздействия непроектных нагрузок, с кольцевыми напряжениями не превышающими половину предела текучести, структурных и механических изменений в металле при длительной эксплуатации практически не происходит.

Разработан способ, реализованный в виде компьютерной программы для количественной оценки неоднородности структуры металлов и сплавов на основе стереологических методов, обеспечивающий анализ по радиальным направлениям микроснимков.

Реализован метод определения повреждения макроструктуры металла труб, применяемый при диагностических работах по оценке технического состояния газопроводов, нефтепроводов и других металлических конструкций в ООО «Газпром трансгаз Самара», ООО «Химнефтеаппаратура», ООО «Самараинжиниринг», ООО ПФ «ЭДТОН».

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается актами внедрения, результатами опытно-экспериментального и практического использования, патентами и свидетельствами государственной регистрации.

### **Методология и методы исследования**

При выполнении исследований и решений поставленных задач проводились комплексные механические испытания образцов, оптическая и электронная микроскопия, измерения твердости и микротвердости на современном отечественном и зарубежном оборудовании. Применялся широкий спектр работ по неразрушающему контролю. Моделирование поведения объектов и прочностные расчеты выполнялись в современных программных продуктах и системах моделирования методами конечных элементов. Образцы, использованные для исследований, взяты из реальных эксплуатируемых объектов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Кооперативное влияние выходящих на внешнюю поверхность отслоений металла толщиной до 2-х мм и наличие под ними плотных и увлажненных продуктов коррозии, представленных высокотемпературной окалиной и гидратированным оксидом железа создают условия искажения результатов при проведении ультразвуковой толщинометрии.

2. Наличие в металле труб раскатанных параллельно внешним поверхностям включений толщиной до 50 мкм в большинстве случаев показывает схожие с бездефектными областями результаты при испытаниях на растяжение. С учетом особенностей неразрушающего контроля, наибольшей опасностью подобных дефектов является возможный пропуск включений с большей толщиной, что приводит к ослаблению несущей способности металла. Кроме того, возникающие от внешних воздействий напряжения в стенках труб распределяются неравномерно, влияя на прилегающие бездефектные области.

3. Применение современных информационных технологий позволяет нивелировать воздействие углового расположения снимков при количественной оценке неоднородности структуры металлов и сплавов.

4. Компьютерный анализ массивов данных дискретной толщинометрии при сопоставлении с геометрией обследуемых объектов, позволяет определять параметры дефектов металла и оценивать поврежденность конструкции.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования, научной и практической новизне соответствует областям исследований паспорта научной специальности 2.6.17 – «Материаловедение» по следующим пунктам:

п5. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды.

п6. Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных

свойств металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий.

п13. Разработка и компьютерная реализация математических моделей физикохимических, гидродинамических, тепловых, хемореологических, фазовых и деформационных превращений при производстве, обработке, переработке и эксплуатации различных металлических, неметаллических и композиционных материалов. Создание цифровых двойников технологических процессов, а также разработка специализированного оборудования.

**Личный вклад автора** заключается в выборе и постановке цели и задач исследования, изучении отечественных и зарубежных достижений, концептуальном выборе видов и методов исследований, их проведении, анализе и апробации полученных результатов, идеологической разработке и практической реализации предлагаемых методов и критериев, подготовке публикаций по выполненным работам, создании объектов интеллектуальной собственности, формулировании выводов и положений, выносимых на защиту.

#### **Степень достоверности**

Выдвинутые в работе практические и теоретические выводы базируются на фундаментальных положениях, сопоставлены с общепризнанными отраслевыми знаниями и информацией, полученной другими авторами и исследовательскими группами. В работе использовалось современное оборудование и методы, аттестованные методики и поверенные средства измерений. Полученные данные верифицировались различными аналитическими и практическими процедурами, с достижением высокой повторяемости результатов. Выдвинутые в ходе исследований гипотезы и положения подтверждены натурными и численными экспериментами.

#### **Апробация результатов**

Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах различного уровня: международной научно-практической конференции MRDMS-2020 «Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures» (Екатеринбург, 2020); LXI Международной конференции

«Актуальные проблемы прочности» (Тольятти, 2019); XXI международной конференции «Металлургия 2019» – «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2019); XII всероссийской конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS' 2019» (Новокузнецк, 2019); XVI международной школы-семинара ЭДС-2020 «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» (Барнаул, 2020); XI Международной конференции ФППК-2020 «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (Черноголовка, 2020); 13-том ежегодном заседании Научного Совета РАН «Актуальные проблемы физики конденсированных сред» (Черноголовка, 2020); Международная конференция «Физика и технологии перспективных материалов-2021» (Уфа, 2021); XXII Международной научно-практической конференции «Металлургия – 2021» (Новокузнецк, 2021); XXVI Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Екатеринбург, 2022).

Результаты применяются при диагностических работах при оценке технического состояния металлических конструкций в ООО «Газпром трансгаз Самара», ООО «Химнефтеаппаратура», ООО «Самараинжиниринг», а также при обучении и повышении специалистов по неразрушающему контролю ООО «Газпром трансгаз Самара».

### **Публикации**

Результаты работы представлены в 30 публикациях. Опубликовано 14 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, включая 8 статей в российских и зарубежных изданиях, входящих в перечень Scopus и Web of Science. Из 14 опубликованных статей, 12 входят в категорию K1 по рейтинговым показателям ВАК, 3 в квартиль Q1 рейтинга SCOPUS. Получено 3 патента, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Выпущена глава в коллективной монографии.

### **Объем и структура работы**

Полный объём диссертации составляет 182 страницы, 81 рисунок и 19 таблиц. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего 147 источников.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского Университета им. С.П. Королева: научному руководителю д.т.н., профессору, заведующему кафедрой С.В. Коновалову, к.т.н., доценту Мельникову А.А., сотрудникам ООО «Газпром трансгаз Самара», соавторам публикаций по теме диссертации.

## **Глава 1 ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ, МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ДЕФЕКТОВ**

В данной главе представлена статистическая информация по инцидентам и авариям, произошедшим на газопроводах, рассмотрены существующие исследования произошедших разрушений. Рассмотрены методы контроля и определения дефектов металла. Произведена оценка проблем, существующих при диагностике газопроводов и оценке их технического состояния.

### **1.1 Анализ статистики инцидентов и причин отказов на газопроводах**

На данный момент, в эпоху начала перехода к углеродной нейтральности, нефте- и газопроводы являются главными артериями национальных экономик. Безопасность их эксплуатации тесно связана с жизнью людей, социальным и экономическим развитием. Несмотря на то, что трубопроводный транспорт является наиболее безопасным и надежным средством транспортировки, инциденты происходят каждый год из-за дефектов сварки, коррозии и других повреждений, что приводит к серьезным материальным потерям, травмам или даже гибели людей. Протяженность магистральных газопроводов, эксплуатируемых в мире, превышает миллион километров. Наиболее развитыми территориями являются США (485.6 тыс.км [62]), Россия (175.2 тыс.км [122]), и страны Европы (142.7 тыс.км [1]). Взрыво- и пожароопасность, высокое давление, значительная зависимость электрогенерации и химической промышленности от природного газа, обуславливают высокие требования к надежности газопроводов и сохранению непрерывности поставок.

Одним из наиболее подробных источников, содержащих информацию по статистическим данным отказов и аварий, произошедших на газопроводах, является Отчет «Инциденты на газопроводах» («Gas pipeline incidents») Европейской группы о происшествиях на газопроводах» (European Gas Pipeline Incident Data Group) [1], на данный момент охватывающим уже пятидесятилетний срок эксплуатации. Отчет основывается на информации, собираемой от

семнадцати операторов европейских газотранспортных систем, эксплуатирующих более 142 тысяч км. газопроводов. Подробная история, характеристики и условия возникновения инцидентов, учитываемых с 1970 года, позволяет определить особенно важные направления, вносящие максимальный вклад в причины и частоту отказов. В отчете показано, что ежегодное количество аварий и происшествий уменьшилось с 1970 года по 2019 год более чем в шесть раз. Так же следует отметить, что с 2014 года количество зарегистрированных инцидентов существенно не меняется, и остается в пределах 0.12...0.13 отказов в год на тысячу километров (рисунок 1.1).

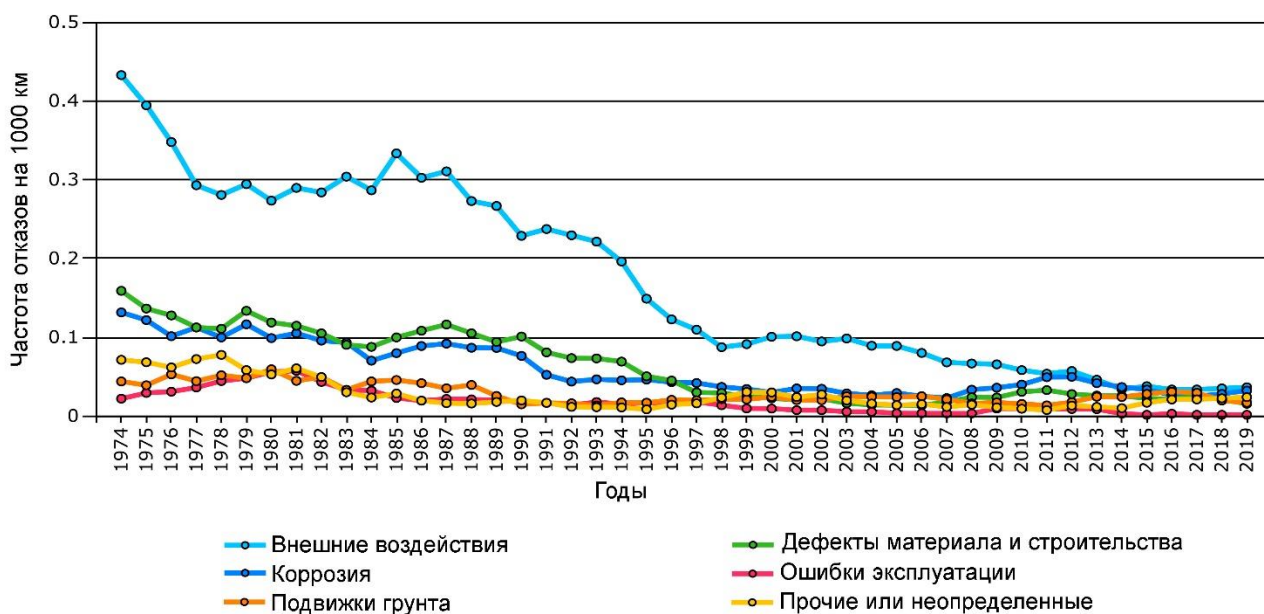


Рисунок 1.1 – Частота основных отказов по различным причинам (скользящее среднее за пять лет)

Основными, вызывающими аварии и отказы факторами являются внешние воздействия, коррозия, дефекты материала и подвижки грунта (рисунок 1.2).

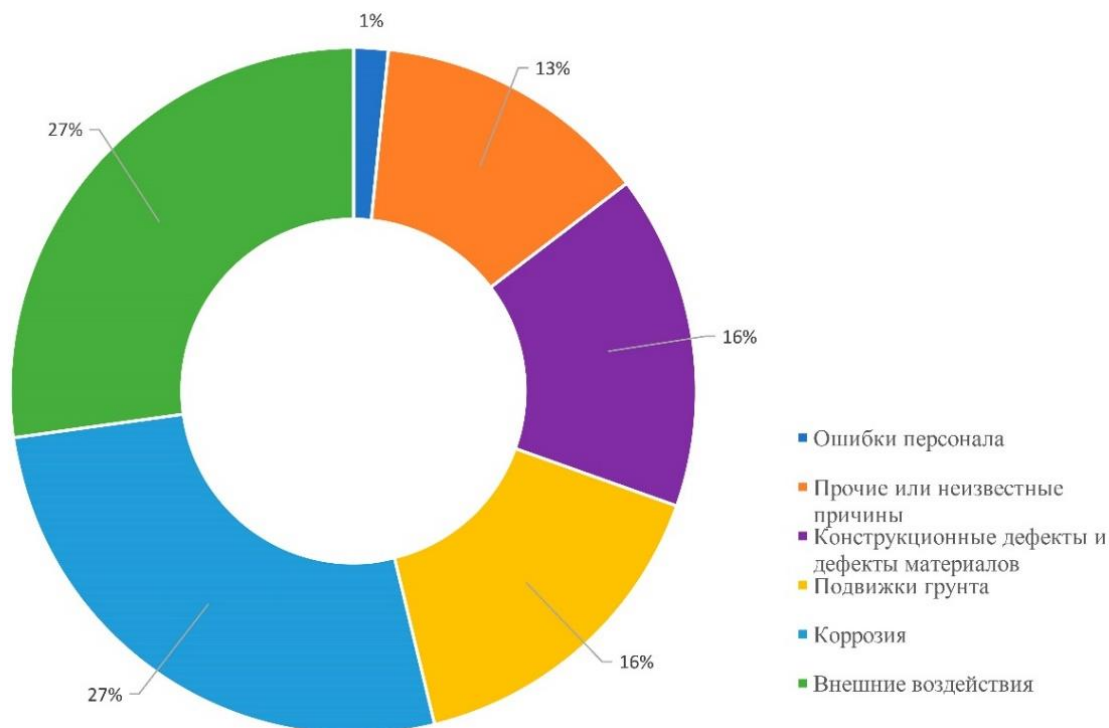


Рисунок 1.2 – Распределение инцидентов на газопроводах по причинам возникновения за период с 2009 по 2019 годы

Деструктивные внешние воздействия [43, 53], так же периодически являющиеся причинами аварий, практически невозможно спрогнозировать, однако можно снизить вероятность их влияния организационными мероприятиями, ограничением доступа в охранные зоны, установкой предупреждающих знаков. Внешние воздействия, это действия третьих лиц, вызывающие нарушения технологического процесса или приводящие к повреждению конструкций. К таким действиям относятся строительные работы, ведение сельского хозяйства и пр. В семидесятых годах аварии по причинам сторонних воздействий значительно преобладали над остальными, с долей более 50%. В настоящее время на них также приходится существенная доля, составляющая 27%.

Влияние коррозионных повреждений и методы защиты металла от коррозии достаточно широко развиты и изучены. Раздел науки, посвященный этой тематике хорошо структурирован и представлен широким спектром исследований, и методами борьбы с ней [3, 15, 30, 31, 47, 50, 72]. Исследования продолжаются и в настоящее время, при этом все чаще применяются системы моделирования,



позволяющие предсказать поведение исследуемых объектов на дальнейший период [5, 7, 19, 23, 28, 48].

Подвижки грунтов, приводящие к разрушениям, зачастую являются непредсказуемыми и сложно прогнозируемыми, в связи с чем ведутся работы по оценке опасности и влиянию характеристик грунтов различных типов на эксплуатацию газопроводов [12, 29, 60, 71, 127, 141].

Дефекты материала, не обнаруженные при производстве и периодической диагностике, могут развиваться со временем и приводить к разрушению объектов или необходимости проведения внеплановых ремонтов в случае их своевременного обнаружения [2, 11, 13, 30]. Состояние и структура материала так же может со временем деградировать и перестать обеспечивать требуемые характеристики [26, 34, 44, 45, 79, 136].

Несмотря на постоянный мониторинг и техническую диагностику, полностью исключить аварии на опасных производственных объектах газового комплекса не удастся. По данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, в разделе «Уроки, извлеченные из аварий» [142] представлены результаты расследований причин возникновения и оценка последствий аварий и инцидентов на газопроводах. Основные причины совпадают с представленными в [1]. Отдельно нужно отметить, что ущерб от аварий может достигать десятки и сотни миллионов рублей, нарушать устоявшиеся производственные циклы, работу социальных инфраструктур и приводить к человеческим жертвам.

Снижение, или удержание на низком уровне количества инцидентов, является одной из приоритетных задач при эксплуатации опасных объектов, распределенных по значительным территориям, к которым относятся магистральные газопроводы.

## 1.2 Исследования повреждений макро- и микроструктуры стальных газопроводов

Структура, физические и химические свойства низкоуглеродистых сталей, являющиеся основным материалом газопроводов, достаточно хорошо изучены. Прогнозируемые характеристики, относительно низкая стоимость, хорошая обрабатываемость, свариваемость, прочность и ремонтпригодность, обуславливают на данный момент незаменимость применения низкоуглеродистых низколегированных сталей в газотранспортных системах.

Стали отличаются друг от друга химическим составом, способами производства, термической обработкой, что определяет получаемые свойства готовой продукции. При наличии дефектов свойства материала изменяются, при этом прочность и несущая способность конструкций изменяются в неопределенных, плохо прогнозируемых пределах, зависящих от величины дефектов, их характеристик, условий нагружения и запасов прочности.

Повреждения материала газопроводов разделяются на производственные и эксплуатационные. Производственные дефекты металлопроката [46, 55, 116, 117, 120] подвергаются изучению, с целью определения путей повышения качества готовой продукции и оценки их влияния на несущую способность. Основными дефектами являются закаты, прокатные плены, раскатанные газовые пузыри и неметаллические включения, пропущенные при производственном контроле.

При эксплуатации основными повреждающими факторами являются коррозия и старение металла. Коррозионные повреждения, в свою очередь, разделяются на «классическую» коррозию: язвенную или равномерную потерю металла в следствии взаимодействия металла с окружающей средой [3, 15, 30, 31, 47, 50, 72], и стресс-коррозию, при которой материал, находящийся в напряженном состоянии под воздействием нагрузок, охрупчивается и растрескивается [22, 24, 36, 39–41, 52, 54, 119]. В настоящее время стресс-коррозия считается наиболее опасным и наименее прогнозируемым типом дефектов. Значительное число аварий по результатам расследований Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [142] произошло именно по причине

развития стресс-коррозии. Результаты исследований стресс-коррозии представляют неоднозначные результаты, однако большинство сходится на том, что для их развития требуется совместное воздействие нескольких факторов. Одним из факторов является загрязненность металла включениями [37, 64, 123, 124, 135].

Различают несколько типов стресс–коррозии:

- происходящую по причине воздействия водорода: НИС (водородное растрескивание), подразделяющееся в более узких случаях на HSC (водородное растрескивание под напряжением) и SOHIC (ориентированное растрескивание под действием водорода);
- сульфидное растрескивание под напряжением (SSC);
- усталостное коррозионное растрескивание под напряжением (SCC).

Исследования показывают, что микроструктура стали играет ключевую роль при восприимчивости к НИС. Сульфидные включения, оксиды, карбонитриды, удлиненные при прокате, вызывают концентрацию напряжений, обусловленные различиями в химических свойствах включений и металлической матрицы. В зонах включений накапливается атомарный водород, что приводит к инициации трещин. Кристаллографическая текстура, размер зерен, и их границы так же играют значительную роль в восприимчивость трубопроводной стали к НИС. Существующие технологии изготовления труб позволяют значительно повысить их прочностные показатели, что снижает металлоемкость при сохранении технических характеристик. Однако трубопроводные стали с мелкими зернами обладают протяженными границами, которые обеспечивают более свободный путь для водородной мобильности, в результате чего атомам водорода проще достигать включений и накапливаться в зонах дислокаций, в результате чего упрочненные трубы более подвергнуты риску возникновения КРН.

Менее выраженным структурным изменением материала является процесс старения, представленный в работах [26, 34, 44, 45, 79, 136]. Актуальность и востребованность исследований обусловлена как экономическими причинами, так и проблемами безопасности. Значительное количество объектов эксплуатируется

длительное время, их востребованность не снижается. Стоимость полной замены трубопроводов требует значительных вложений, включающих материальные и организационные затраты, остановку или изменение технологических процессов. Соответственно, после значительных периодов эксплуатации и изменений свойств материала, требуется переоценка прочностных характеристик для контроля и оценки остаточной несущей способности объектов. Несмотря на то, что временное сопротивление разрыву практически не изменяется, при старении металл охрупчивается, снижается ударная вязкость. При микропластической деформации металла, дислокации взаимодействуют между собой и с вакансиями, увеличивая внутрикристаллитные напряжения. Основным признаком изменений, определяемым при оптической микроскопии, является выделение атомов углерода на границах зерен. Деформационное старение наиболее интенсивно протекает в напряженных участках – сварных соединениях или дефектных областях.

Как видно из выше приведенного анализа, качество и технология производства в значительной степени влияют на сроки службы и безопасность эксплуатации. Кроме микродефектов, в стали, присутствуют также более значительные включения, представленные расслоениями, закатами, прокатными пленами, ликвацией и т.д. Указанные дефекты относятся к производственным, пропущенным в эксплуатацию по причинам недостаточного уровня контроля.

Одним из наиболее распространенных дефектов, неизбежных при металлургическом производстве, является ликвация. Ликвация образуется при неравномерном распределении легирующих элементов, примесей или отдельных фаз в сплавах. Ликвация возникает в результате кристаллизации элементов сплава в интервале температур, при этом химический состав, образующийся в начале затвердевания, может значительно отличаться от раствора, кристаллизующегося последним. Наибольшее влияние оказывают сера, кислород, фосфор, углерод. Подобные химические и структурные неоднородности приводят к неравномерности свойств готовых изделий. Исследование дефектных структур, происходящих с дефектными материалами изменений до сих пор является актуальным и привлекает значительное количество исследователей.

В работах [18, 49, 65, 80, 116, 137] рассматриваются механизмы развития и разрушения материала с внутренними включениями.

В работе [49] показано, что водородно-индуцированное растрескивание (НИС) является основным механизмом разрушения сварных соединений трубопроводов в нефтегазовой отрасли при отсутствии внешних воздействий. Было проведено исследование для различных областей зон термического влияния (HAZ), образовавшихся при сварке трубопроводной стали API X80 на трех различных скоростях охлаждения. Микроструктура и однородность менялись в зависимости от скорости охлаждения (рисунок 1.3). Образцы, содержащие включения и ликвационные полосы, показали пониженное сопротивление НИС, в то время как образцы, содержащие только игольчатый феррит и зернистый бейнит в сочетании с отсутствием ликвационных участков, показали значительное улучшение сопротивлению НИС. Наилучшие результаты устойчивости к НИС получены на образцах, представляющих собой мелкодисперсный игольчатый феррит с расходящимися кристаллографическими ориентациями, предотвращающими образование локализованного распределения деформации внутри зерен и на их границах. Выявлено, что при скорости охлаждения выше 10 °C/с образование ликвационных зон, представленных сегрегацией хрупких твердых фаз, таких как мартенсит и неметаллических включений, значительно сокращается. Трещины НИС распространяются в основном по областям с относительно высокими остаточными напряжениями и высокой плотностью дислокаций, связанной с локализованной разориентацией.

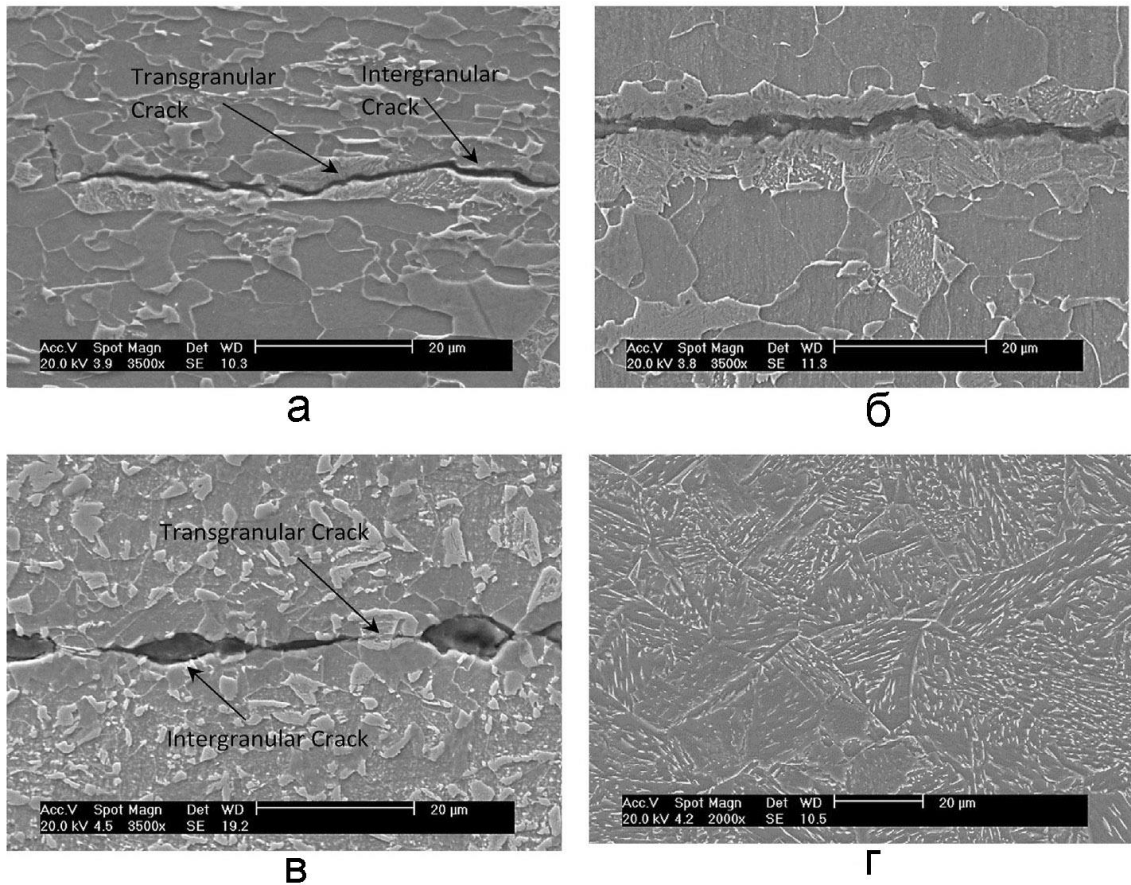


Рисунок 1.3 – СЭМ-изображения образцов (а – в исходном состоянии; при различных скоростях охлаждения и подвергнутые испытанию на водородное растрескивание в течении 96 часов по методике NACE TM0284: б – 0,5°C/c; в – 10,0 °C/c; г – 40 °C/c). (Изображение из [49])

В работе [65] проведено исследование механизма разрушения высокопрочной низколегированной стали с учетом неоднородного распределения элементов сплава во время затвердевания отливки. Рассмотрены характеристики участков с положительной (ПЛ) и отрицательной ликвацией (ОЛ) в слитках. В зоне вязкого разрушения механизм микропустотного разрушения присущ участкам обоих типов, при этом более высокая степень деформации присуща участкам с ПЛ. В зоне хрупкого разрушения вторичные трещины скола на участках с отрицательной ликвацией имеют больший размер и большее количество. Микроструктуры на участках ПЛ демонстрируют более высокую способность сопротивлению распространению трещин. Информация о механизмах разрушения

картирована с помощью анализа SEM и EBSD, которые обеспечивают лучшую визуализацию микроструктурных факторов. Несоответствия концентрации элементов в результате микроликваций вызывают микроструктурные несоответствия и различия в механизмах разрушения в зонах ПЛ и ОЛ.

По результатам полигонных испытаний, представленных в [137], показано, что на развитие размеров расслоений внутри трубопроводов в значительной степени влияют кручения и изгибы. Полученное фактическое давление разрушения оказалось меньше расчетного, и разрушение произошло не по зоне максимальных коррозионных повреждений, а в районе расслоения (рисунок 1.4). При проведенных металлографических исследованиях, дополнительно обнаружено старение материала в прилегающих к дефекту областях, что коррелирует с результатами ранее рассмотренных работ.



Рисунок 1.4 – Разрушения трубной плиты (а – общий вид; б – очаг разрушения).

(Изображение из [137])

В работе [80] проведены натурные испытания дефектов в виде вздутий и расслоений. Оценка несущей способности выполнена на основании гидравлических испытаний и математических расчетов. По результатам выявлено снижение временного сопротивления металла трубы с расслоениями на 18,5%, с внутренними вздутиями на 41,6 %. Исследование труб из аварийного запаса показало наличие ликвационной полосы, предположительно вдоль которой развились исследуемые дефекты.

В работе [18] представлены экспериментальные результаты тензометрических инструментальных гидростатических испытаний бывших в эксплуатации электросварных прямошовных труб нефтепровода диаметром 350 мм и толщиной 6,3 мм. Дефекты расслоения были обнаружены с помощью внутритрубной дефектоскопии. Пять труб разрушились по сварным швам при давлении 50% от расчетного. Оставшиеся две трубы разрушились при давлении 25% от расчетного по телу трубы. Результаты показали, что наиболее важным фактором при определении критичности дефекта является его расположение, а не размер, что связано с плохой пластичностью и вязкостью материала. Часть расслоений при неразрушающем контроле были охарактеризованы наклонные. Этот метод требует прямого доступа к внешней поверхности трубы, поэтому для каждого измерения требуется шурфование. Одним из результатов этого исследования является то, что некоторые расслоения, идентифицированные как криволинейные или наклонные внутренние несплошности, на самом деле имели выход на внутреннюю поверхность. Это показывает, что действующие подходы по идентификации таких дефектов требуют дальнейшей доработки. Кроме того, подтверждена опасность расположения расслоений вблизи сварных швов.

### **1.3 Основные современные методы обнаружения дефектов металла**

#### *1.3.1 Внутритрубная дефектоскопия*

Диагностические компании используют все виды передовых технологий для проверки и выявления дефектов трубопроводов, позволяющие точно определить типы дефектов и количественно оценить их размеры. На основании этих данных проводится оценка безопасности, назначается ремонт или техническое обслуживание трубопроводов. Основным методом, позволяющим провести практически полный контроль протяженных объектов, является внутритрубная дефектоскопия (ВТД).

Основными применяемыми технологическими методами внутритрубного контроля трубопроводов являются ультразвуковой и магнитный. Ультразвуковой



контроль (УЗК) – один из основных направлений традиционных методов неразрушающего контроля. УЗК может легко определить трещины, расслоения, потери металла и другие неоднородности на разной глубине внутри объекта. Однако для обычного ультразвука требуется связующее вещество, чтобы заполнить зазор между датчиком и поверхностью исследуемой детали. Поэтому ультразвуковой метод применяется в трубопроводах, транспортирующих продукты в жидкой фазе, например нефть.

При исследовании газопроводов применяются магнитные дефектоскопы, работа которых основана на регистрации полей рассеяния, образующихся при намагничивании стенки трубы. Сильное магнитное поле действует на ферромагнитный объект, геометрическая или химическая неоднородность в котором приводит к искажению магнитного поля, контролируемого магнитными датчиками для оценки размеров и типов дефектов. Данный метод хорошо изучен и широко применяется при диагностике МГ ПАО «Газпром» [66, 82, 145] и на объектах транспорта газа зарубежных стран [6, 14, 20, 32, 66].

### *1.3.2 Неразрушающий контроль*

В материаловедении при применении терминологии «характеристика материалов» обычно подразумеваются различные формы разрушающего контроля. Однако при исследовании материалов, находящихся в эксплуатации, методы, требующие вырезки участков материалов неприемлемы. Применение визуального, ультразвукового, радиографического, вихретокового, магнитопорошкового и других неразрушающих методов позволяет с высокой степенью оценить характеристику материалов и спрогнозировать дальнейшее поведение конструкций и разрешение их дальнейшей эксплуатации [4, 114].

Неразрушающий контроль предназначен для обнаружения недопустимых дефектов способами и методами, не требующими разрушения материала, но предоставляющих если не исчерпывающие, то достаточные для оценки технического состояния сведения. Анализ допустимости дефектов и прогноз безопасного срока службы зависят от точности оценки параметров материала и

размеров дефектов. Методики прогноза возможных разрушений объектов предполагают деградацию свойств или рост отклонений в материалах с известными пределом прочности, текучести, параметрами вязкости, свойствами усталости, ползучести и т.д. с течением времени. Для определения допустимости дефектов разработаны нормативные документы, сопровождающие объекты на протяжении всего жизненного цикла, к которым относятся государственные (ГОСТ, СП) и отраслевые (СТО, ТУ, РД).

#### **1.4 Принятые критерии и нормы оценки дефектных участков**

На момент начала массового строительства газопроводов были разработаны строительные нормы и правила СНиП II-45-75 «Магистральные трубопроводы» [132] регламентировал полное отсутствие расслоений: «п. 13.14. В металле труб не допускается наличие трещин, плен, расслоений, рванин и закатов». В пришедших ему на замену правилах СНиП 2.05.06-85\* [131], были указаны предельные допустимые размеры и условия расположения расслоений: «п. 13.13. В металле труб не допускается наличие трещин, плен, рванин, закатов, а также расслоений длиной более 80 мм в любом направлении. Расслоения любого размера на торцах труб и в зоне шириной 25 мм от торца труб не допускаются.»

В действующем на данный момент СП 36.13330.2012 [134] пункт требований к расслоениям в теле трубы отсутствует. Такие требования перенесены в государственные стандарты, в частности указаны в ГОСТ ISO 10893-8–2017 [93]. По требованиям данного документа, по уровню приемки U3 (максимальный допустимый размер): максимально допустимая суммарная площадь расслоений на 1 м трубы должна составлять не более 4%, при этом максимальная допустимая протяженность одиночного расслоения не должна превышать 60 мм.

В распространяющемся на газопроводные и нефтепроводные трубы ГОСТ 31447-2012 [88] так же указаны предельно допустимые размеры внутренних расслоений: для одиночных расслоений или их цепочек, максимальная протяженность не должна превышать 80 мм или общую площадь 5000 мм<sup>2</sup>. В зонах до 25 мм от торца трубы не допускаются внутренние расслоения площадью до 100

мм<sup>2</sup> или протяженностью выше 10 мм. Выходящие на поверхность, включая торцы труб, расслоения, закаты, плены и рванины не допускаются.

В отраслевом стандарте ПАО «Газпром» «Инструкция по оценке дефектов труб и соединительных деталей при ремонте и диагностировании магистральных газопроводов» [126] указаны нормы оценки дефектов для труб, находящихся в эксплуатации. Допускаются поверхностные дефекты, после удаления которых труба будет выдерживать создаваемое в трубе при гидравлических испытаниях давление, но не более 50% толщины стенки в основном металле, и не более 20% в околошовной зоне, составляющей 200мм. Браковочные параметры для внутренних расслоений отсутствуют.

Пропуск в эксплуатацию рассматриваемых дефектов свидетельствует о недостаточно развитом контроле качества при производстве труб. При периодических контролях во время эксплуатации рассматриваемые дефекты было достаточно сложно обнаружить, так как это можно было выполнить только при сплошной толщинометрии тела трубы, являющейся затратной для больших объемов контроля и не предусмотренной нормативными документами при выполнении данного вида работ.

Как видно из анализа НД, существует несколько различных нормативных параметров, применяемых для оценки качества внутренних и поверхностных дефектов типа расслоений, закатов, трещин и пр. При неразрушающем контроле объектов газотранспортной системы ПАО «Газпром», принято руководствоваться в первую очередь отраслевыми нормативными документами.

### **Выводы по главе 1 и постановка цели исследования**

По проведенному анализу дефектов очевидно, что наибольшую роль в деградации материала играют образованные еще на этапе производства структурные и химические отклонения и неоднородности. Большое влияние на развитие расслоений играет воздействие водорода, скапливающегося в зонах внутренних дислокаций и включений и приводящего к растрескиванию. Высокие нагрузки, вызывающие микропластические деформации, приводят к процессам

старения материала. Такие процессы, так же, как и водородное охрупчивание, происходят значительно быстрее в зонах со структурными и химическими неоднородностями.

Рассмотренные современные работы по изучения дефектов в металлопрокате показали, что:

- значительная часть исследований сосредоточена на описании механизмов стресс-коррозии и водородного охрупчивания;
- исследуются результаты старения металла и изменения его физических и химических свойств, но при этом не анализируются и не прогнозируются потери несущей способности конструкций;
- анализ металлургических дефектов проводится в целях их снижения при производстве, однако оценка их влияния на эксплуатируемые объекты практически не представлена;
- отсутствуют комплексные исследования, сочетающие неразрушающий контроль и последующие металлографические исследования.

Проведенный анализ современных исследований дефектности материала стальных трубопроводов, позволяет сформулировать цель и задачи исследования.

**Цель работы** – определение влияния дефектов металла трубопроводов, представляющих собой инородные включения, на механические, технологические и эксплуатационные свойства конструкций с совершенствованием технологий определения реальной конфигурации и характеристики дефектов, уточнения условий эксплуатации.

**Основные решенные при достижении цели задачи:**

- изучены структуры и причины возникновения дефектов материала труб с оценкой их влияния на результаты неразрушающего контроля;
- проведен анализа существующих методов контроля поверхностных и внутренних дефектов металла, их особенностей, достоинств и недостатков;
- описаны условия получения ошибочных результатов неразрушающего контроля и предложены методы уточнения контроля;

- разработаны специальные алгоритмы обработки цифровых изображений микроструктуры металлов для улучшения визуализации и измерения их параметров;
- проведены работы по уточнению диагностических признаков производственных дефектов труб при проведении внутритрубного контроля;
- разработана методика экспресс-оценки технического состояния и надежности изделия с дефектами на основании результатов контроля структуры материалов методом ультразвуковой толщинометрии;
- предложен метод расчета несущей способности поврежденных конструкций современным методом конечно-элементного анализа на основе полученной при толщинометрии модели участка.

## Глава 2 МАТЕРИАЛЫ, СРЕДСТВА, МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАННОЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В главе представлена информация об использованных в процессе исследований образцах, их характеристики и условия эксплуатации. Приведен перечень применяемого оборудования определения параметров и характеристик дефектов и для исследований. Рассмотрены основные применяемые методики.

### 2.1 Объекты и материалы для исследований

#### 2.1.1 Исследование расслоений, выходящих на внешнюю поверхность.

Объект исследования: участок одношовной сварной стальной трубы (рисунок 2.1), наружный диаметр 530 мм, номинальная толщина стенки 9,0 мм. Условия работы – внутреннее избыточное давление до 2,5 МПа, расположение трубопровода надземное. Материал объекта – сталь 17Г1С, конструкционная низколегированная кремнемарганцовистая, без ограничений по сварке. Класс прочности К60.

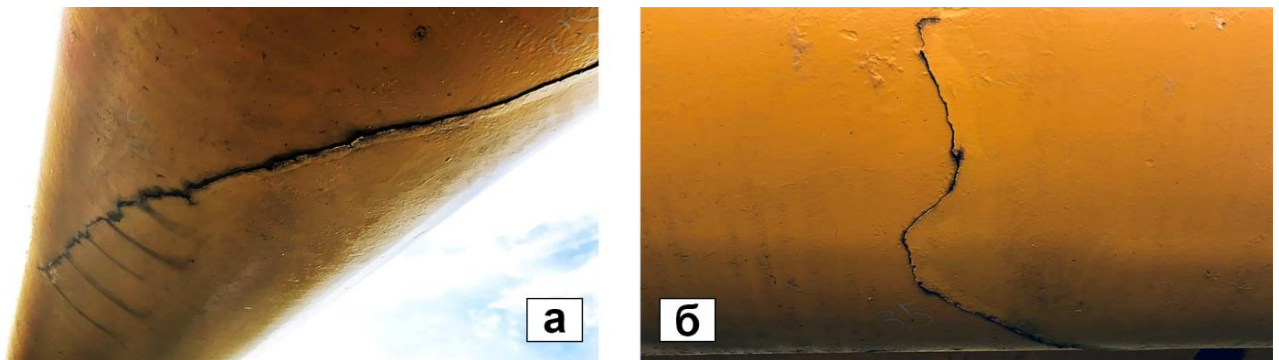


Рисунок 2.1 – Внешний вид дефекта на теле трубы (а – участок с продольно-диагональным направлением; б – Участок с поперечным направлением)

Из участка трубы были вырезаны две секции: секция с радиальным расположением дефекта: 300 x 500 мм, и секция с продольным расположением дефекта 600 x 300 мм. Для лабораторных исследований было вырезано по шесть

образцов из поперечной и продольной части дефектной области. Размеры образцов: 150 x 30 мм (6 шт) – для макро-исследований и неразрушающего контроля, и 30 x 10 мм (6 шт) – для металлографических исследований. Для сравнения структуры металла, из бездефектной области было вырезано по одному дополнительному образцу размерами 30 x 10 мм, с поперечной и продольной направленностью.

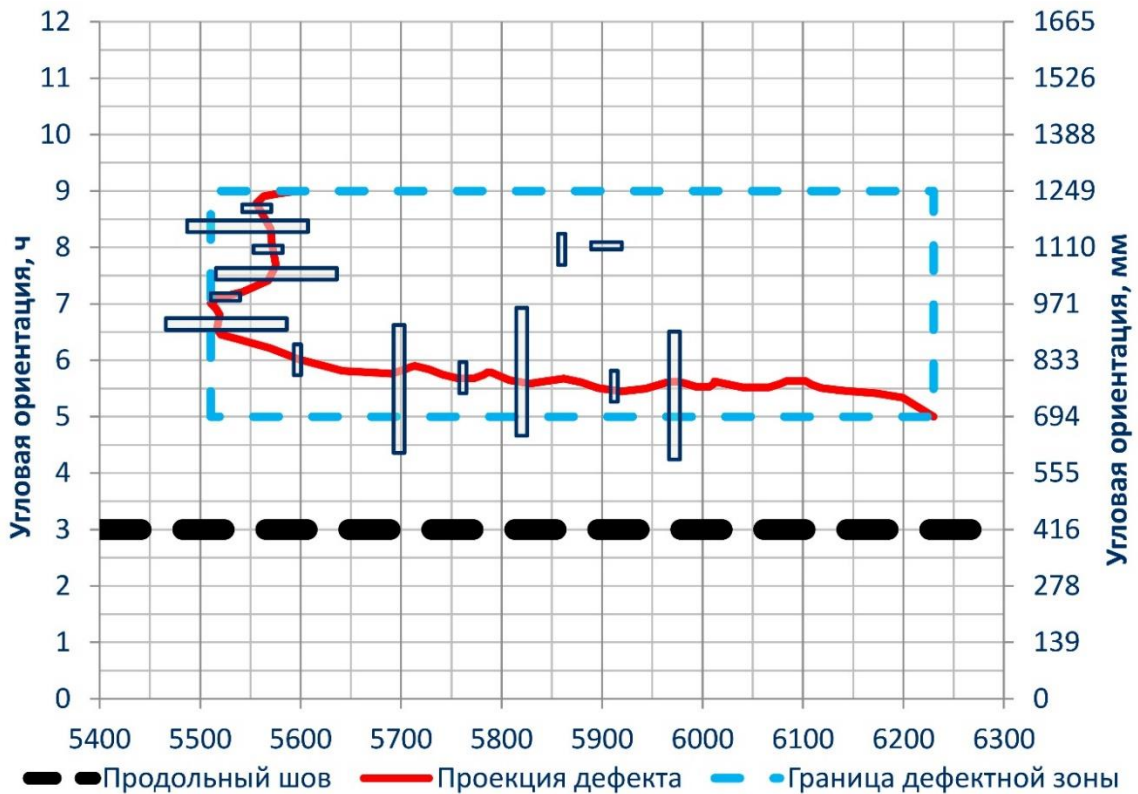


Рисунок 2.2 – Развертка трубы и схема вырезки образцов

Дефект обнаружен на участке магистрального газопровода надземного исполнения, эксплуатируемого более 20 лет при циклическом нагружении внутренним избыточным давлением до 2,5 МПа.

Особенность дефекта проявилась в искажении показаний приборов неразрушающего контроля, что привело к необоснованному выводу участка трубы из эксплуатации и остановке транспорта газа.

### 2.1.2 Исследование поверхности трубы после длительной эксплуатации

Объект исследования: фрагмент электросварной прямошовной стальной трубы (рисунок 2.3), наружный диаметр 530 мм, номинальная толщина стенки 7,5 мм, материал – сталь 17ГС конструкционная низколегированная кремнемарганцовистая, без ограничений по сварке, класс прочности К56. Объект был вырезан из магистрального газопровода, запущенного в эксплуатацию в 1968 г. Период эксплуатации составил более 50-ти лет. Условия работы: внутреннее избыточное давление до 5,5 МПа, расположение трубопровода подземное. В результате исследований на трубе была выявлена подповерхностная коррозия, представляющая собой тонкие отслоения металла со стороны внешней поверхности.



Рисунок 2.3 – Фрагмент исследуемой трубной секции

На трубной секции использовалась битумная изоляция толщиной 6,0–8,0 мм, характерная для трассового нанесения, использовавшегося во время укладки трубы. Следы коррозии обнаружены в незначительном количестве, представлены редкими пятнами рыжего цвета. Состояние металла свидетельствует об отсутствии факторов повреждения изоляционного покрытия и о правильной организации электрохимической защиты на всем протяжении эксплуатации. Объект обследования был проложен на глубине от 0,8 до 1,1 м на прямолинейном участке газопровода с песчаной подушкой и засыпкой. Случаев превышения рабочих параметров за весь период эксплуатации не зафиксировано.



### 2.1.3 Исследование внутренних, и выходящих на внутреннюю поверхность расслоений

Объект исследования: участок одношовной сварной стальной трубы (рисунок 2.4), наружный диаметр 325 мм, номинальная толщина стенки 8,0 мм, материал – сталь 20 нелегированная конструкционная углеродистая. Условия работы: внутреннее избыточное давление до 7,5 МПа, расположение трубопровода подземное.

Обследуемая труба содержит внутренние раскатанные плоскостные включения, протяженные по всей длине, направленные параллельно стенке трубы. Дополнительно, в процессе эксплуатации часть дефектов получила развитие, в результате чего было образовано отслоение участка металла с выходом на внутреннюю поверхность. Дефект был обнаружен по результатам внутритрубной технической диагностики, при этом, в процессе прохождения внутритрубных снарядов, отслоившийся участок был подвержен деформации (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Внешний вид отслоившегося участка на теле трубы

Для обследования был вырезан участок трубы длиной 900 мм, содержащий указанный дефект. Для проведения лабораторных исследований было

подготовлено по 4 образца с дефектами и по два образца из бездефектных областей с продольным и поперечным направлением проката. Для разрушающего контроля на ударный изгиб подготовлено три образца из дефектных участков и три образца из бездефектных участков. Для проведения испытаний на статическое растяжение было изготовлено и испытано три бездефектных образца и восемь образцов, вырезанных из дефектных участков. Для оценки влияния включений на показания приборов неразрушающего контроля было вырезано 30 образцов размерами 180-200 x 14-20 мм из различных дефектных участков.

Особенность дефекта заключалась в неточной оценке его размеров и природы образования, выданных по результатам внутритрубной дефектоскопии.

#### *2.1.4 Исследование влияния внутренних расслоений на сварные соединения труб, выполненных сваркой высокой частоты*

Объект исследования: участок с кольцевым сварным швом одношовных стальных труб (рисунок 2.5), наружный диаметр 325 мм, номинальная толщина стенки 6,0 мм и 7,5 мм, материал – сталь 20 нелегированная, конструкционная углеродистая. Условия работы: внутреннее избыточное давление до 7,5 МПа, расположение трубопровода подземное.

Сварной шов заводского исполнения, выполнен сваркой токами высокой частоты двух листов с последующим экспандированием (рисунок 2.5). Один из листов содержал участок с внутренними раскатанными плоскостными включениями, протяженностью около 400 мм. При шурфовом контроле на шве была обнаружена выходящая на внешнюю поверхность трещина, протяженностью 80 мм и раскрытием до 1 мм.



Рисунок 2.5 – Вырезанный дефектный участок трубы с трещиной

Для обследования был вырезан участок длиной 400 мм, захватывающий по 200 мм от каждой трубы. Для проведения лабораторных исследований подготовлено 3 образца с дефектными участками и два образца из бездефектных участков шва. Для проведения разрушающих испытаний было вырезано по три образца из дефектных и бездефектных областей. Для сравнительного анализа и оценки остаточной прочности шва был вырезан и испытан один образец, содержащий участок с зарождением трещины.

Рассматриваемый образец является уникальным по причине природы своего образования:

- толщина сваренных между собой токами высокой частоты листов металла отличается на 25%;
- один из листов имеет внутренние раскатанные включения различной толщины и состава, расположенных на различных уровнях по толщине стенки;
- шов в процессе производства преобразован в кольцевой при формовке заготовки.

### *2.1.5 Объект для отработки метода оценки внутренних несплошностей с применением пошаговой толщинометрии*

Объект исследования: труба стальная бесшовная горячедеформированная (рисунок 2.5), наружный диаметр 426 мм, номинальная толщина стенки 16,0 мм, материал – сталь 20 нелегированная, конструкционная углеродистая. Условия работы: внутреннее избыточное давление до 7,5 МПа, расположение трубопровода надземное, технологическое назначение: межцеховые технологические коммуникации компрессорного цеха. Участок находился в эксплуатации 37 лет, число циклов нагружения – от двух до шести в год. Дефект на трубе (рисунок 2.6) определен визуально как расслоение на срезе трубы при подготовке участка к установке запорной арматуры.



Рисунок 2.6 – Торец вырезанной трубы с внутренним дефектом

По заключению отдела неразрушающего контроля, габаритные размеры несплошности составили 730x200 мм. Согласно действующим требованиям нормативной документации, сварка труб с выходящими на края расслоениями

запрещена. Для проведения металлографических исследований в лабораторных условиях и уточненного неразрушающего контроля, из дефектного участка был вырезан темплет размером 200x200 мм и участок протяженностью 50 мм для изготовления микрошлифа.

Указанный дефект интересен сложной разветвленной формой внутреннего включения, возможностью провести сравнение реальной конфигурации дефекта и полученной по результатам толщинометрии, а также оценить влияние таких дефектов на несущую способность и результаты диагностики.

## **2.2 Методы исследований и применяемое оборудование**

### *2.2.1 Металлография. Оптическая и электронная микроскопия*

Микроскопия позволяет определять размеры, цвет, форму, строение и другие характеристики микроскопических объектов.

#### 2.2.1.1 Оптическая микроскопия

Оптическая микроскопия выполнена на бинокулярном оптическом металлографическом инвертированном микроскопе МЕТАМ ЛВ-31 (АО «ЛОМО», Россия) (рисунок 2.7а).

#### 2.2.1.2 Электронно-сканирующая микроскопия

Сканирующая электронная микроскопия выполнялась на растровом электронном микроскопе TESCAN (Tescan, a.s., Чехия) (рисунок 2.7б) с программным обеспечением VEGA. Элементный состав участков металла и включений анализировался на энергодисперсионной приставке INCA (Oxford Instruments Analytical, Великобритания).

#### 2.2.1.3 Материалы и оборудование для пробоподготовки

Образцы вырезались на фрезерных станках с обеспечением охлаждения и готовились с применением материалов для пробоподготовки Aka-Clear (Akasel A/S, Дания). Полировка осуществлялась на металлографическом шлифовально-полировальном станке LS2+LSA (Remet, Италия) (рисунок 2.7в). Микрошлифы

осматривались как до травления, так и после травления в четырехпроцентном растворе нитала.



а



б



в

Рисунок 2.7 – Используемое оборудование для проведения лабораторных исследований (а – оптический микроскоп METAM LB-31; б – электронный микроскоп TESCAN с энергодисперсионной приставкой INCA; в – шлифовально-полировальный станок LS2+LSA)

## 2.2.2 Методы и оборудование для лабораторного определения характеристик материала

Разрушающий контроль является противоположностью неразрушающему, и требует выведения объекта из работы. К разрушающим методам контроля относятся различные способы испытания контрольных образцов с целью определения их реальных механических характеристик.

### 2.2.2.1 Исследование микротвердости

Измерение микротвердости позволяет производить измерения свойств материалов по толщине стенки при этом твердость по Виккерсу дает усредненное значение твердости по гораздо меньшей площади, чем по Бринеллю или Роквеллу. Измерения производились по методу восстановленного отпечатка, путем вдавливания алмазных наконечников и последующего измерения размеров

полученных отпечатков в соответствии со стандартом [98]. Измерения проведены на микротвердомере HV-1000 (TIME Group Inc., Китай) (рисунок 2.8а) с применением программного комплекса NEXSYS ImageExpert (НЭКСИС, Россия).

#### 2.2.2.2 Испытания на ударный изгиб

Испытания на ударный изгиб по Шарпи – это один из используемых способов тестирования материалов на прочность. Этот метод дает большое количество информации об изделии и его прочности. Ударные испытания по Шарпи проводятся в условиях различных температур, поскольку значения энергии необходимой для разрушения, могут отличаться. С помощью ударных испытаний материалов специалисты получают представление о прочности изделия, опровергают или подтверждают заявленный уровень. При помощи сильного и резкого механического воздействия на объект, определяется количество энергии, которое материал способен поглощать. Испытания проводились в соответствии с [90, 95] на маятниковом копре ИО 5003-0.3, перед испытаниями образцы охлаждались в криокамере ККМ-1М (ООО “ЗИП”, Россия) (рисунок 2.8б, 2.8в).

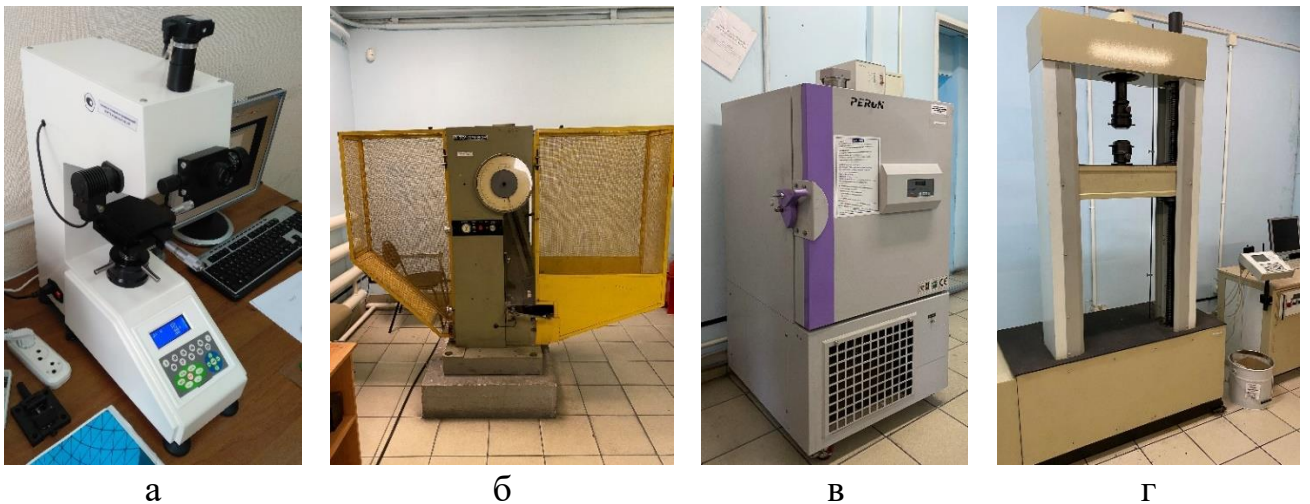


Рисунок 2.8 – Используемое оборудование для проведения разрушающего контроля (а – микротвердомер HV-1000; б – копер ИО 5003-0.3; в – криокамера ККМ-1М; г – разрывная машина ИР5113-100)

### 2.2.2.3 Испытания на статическое растяжение

Испытания на статическое растяжение является основным видом испытаний при оценке свойств конструкционных сталей и позволяют определять ключевые механические характеристики материалов. По результатам испытаний строится диаграмма растяжения и определяются следующие параметры: предел текучести, временное сопротивление разрыву, относительные удлинение и сужение, по временному сопротивлению разрыву определяется класс прочности сталей. Используемая для испытаний на растяжение статической нагрузкой разрывная машина (рисунок 2.8г) ИР5113-100 (ОАО «Точприбор», Россия) снабжена устройством, записывающим зависимость между величиной удлинения образца и нагрузки, вызвавшей это удлинение. Проведение испытаний и подготовка образцов выполнялись по [83, 85].

### *2.2.3 Методы и оборудование для неразрушающего контроля*

Безопасная и надежная эксплуатация МГ является приоритетом газотранспортных обществ. Техническое состояние объектов напрямую зависит от наличия и степени опасности дефектов металла и сварных соединений. Для выявления дефектов используются различные методы и средства неразрушающего контроля (НК), имеющие свои особенности, требования и условия применения. Главной проблемой НК является достоверность результатов, производительность, обеспечение доступа к поверхности контролируемых элементов. Отдельно следует выделить несовершенство существующих критериев оценки дефектов, вытекающее из сложности интерпретации результатов контроля. В диссертационной работе, наряду с лабораторными металлографическими исследованиями и разрушающими испытаниями образцов, так же выполнялись обследования объектов при помощи средств неразрушающего контроля. Комплексный всесторонний анализ результатов позволил составить полную картину, характеризующую объекты контроля, параметры и причины образования дефектов, выявить особенности контролируемых дефектов.



### 2.2.3.1 Визуальный и измерительный контроль

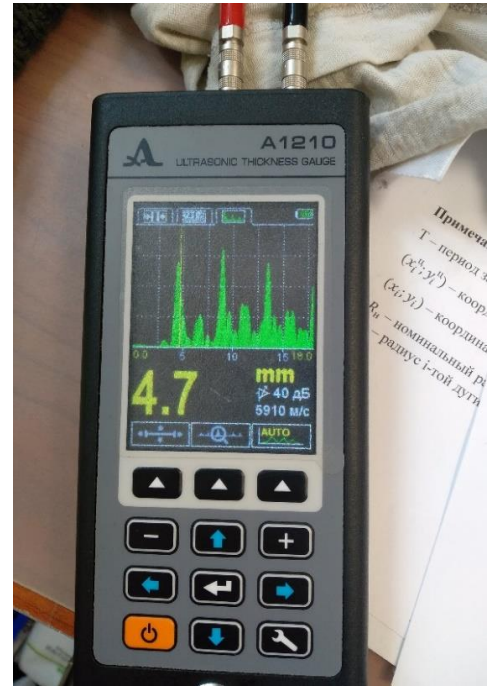
Визуальный и измерительный контроль (ВИК) относится к числу наиболее дешевых, доступных и в тоже время информативных методов НК. Данный метод является базовым и предшествует всем остальным методам дефектоскопии. ВИК выполняется в соответствии с [97, 143, 134] и других нормативных документов.



а



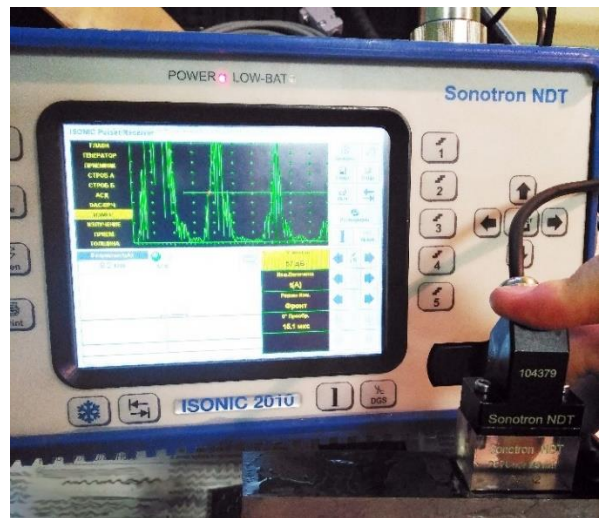
б



в



г



д

Рисунок 2.9 – Используемое оборудование для проведения неразрушающего контроля (а, б – специализированные измерительные устройства [138, 139]; в – толщиномер А1210; г – дефектоскоп «Скаруч»; д – дефектоскоп Isonic 2010)

Визуальным осмотром проверяют качество основного металла и сварных соединений на наличие внешних повреждений или дефектов. ВИК проводится с применением простых измерительных средств (линейки, рулетки, штангенциркули и т.п.), в том числе невооруженным глазом или с помощью визуально-оптических приборов до 20-ти кратного увеличения. Так же применяются специализированные инструменты, в частности [138–140], разработанные автором (рисунок 2.9а, 2.9б), копии патентов представлены в Приложении 7.

### 2.2.3.2 Ультразвуковой контроль (УЗК)

Концепция и методы ультразвукового контроля были разработаны советским физиком С.Я. Соколовым в 1928 году [145] и в настоящее время является одним из основных методов неразрушающего контроля. УЗК позволяет производить контроль основного металла и сварных соединений без остановки технологического процесса.

Основными преимуществами являются высокая чувствительность к наиболее опасным дефектам типа трещин и непроваров, низкая себестоимость и безопасность работ. Выполняется в соответствии с [84, 93, 94, 96] и другой НД. К недостаткам УЗК относятся невозможность оценки реального размера и характера дефекта и повышенные требования к состоянию поверхности объектов.

Ультразвуковой контроль на сплошность материала в диссертационной работе проводился эхо-импульсным методом с использованием толщиномера «Булат 1S» с датчиком П112-10-6/2-А с диапазоном измерений 0,8–10 мм (ООО «КОНСТАНТА», Россия), толщиномера А1210 (рисунок 2.9в) с датчиком D1771 4.0A0D12CL с диапазоном измерений 0,7–300 мм и датчиком S3567 2.5A0D10CL с диапазоном измерений 0,8–300 мм (ООО «АКС», Россия), портативного цифрового дефектоскопа/регистратора на фазированных решетках ISONIC 2010 (рисунок 2.9д) («Sonotron NDT», Израиль) и автоматического дефектоскопа (рисунок 2.9г) УИУ «Скаруч» серии «Сканер» с акустическим блоком для толщинометрии №129 (ООО «Алтес», Россия).

Необходимо отметить, что замеры толщины выполнялись без учета неопределенности измерений. С учетом схемы измерения и остаточной толщины

объектов контроля, время распространения ультразвуковых колебаний от поверхности изделия до донной поверхности и обратно связано с толщиной изделия зависимостью:

$$H = h_0 + \delta h_s + \delta h_{RZ} + \delta h_x \quad (2.1)$$

где:

$H$  - измеренная толщина объекта контроля;

$h_0$  – действительная толщина изделия (показания толщиномера);

$\delta h_s$  – составляющая толщины изделия, обусловленная погрешностью толщиномера, рассчитывается по формуле  $(0,1 + 0,005H)$  мм;

$\delta h_{RZ}$  – составляющая толщины изделия, обусловленная шероховатостью обратной поверхности. В связи с первоначальной неизвестностью качества отражающей поверхности, принимается наихудший вариант, соответствующий 0,2мм;

$\delta h_x$  - составляющая толщины изделия, обусловленная дискретностью измерений, соответствует 0,1мм.

Анализ входных величин представлен в Таблице 3.

Суммарная неопределенность определяется как:

$$u_H = \sqrt{u_{h_0}^2 + u_{h_s}^2 + u_{h_{RZ}}^2 + u_{h_x}^2} \quad (2.2)$$

Для расчета стандартной неопределенности используются следующие зависимости:

$$u_{h_0} = 0 \quad (2.3)$$

$$u_{h_s} = \frac{\delta h_s}{\sqrt{3}} \quad (2.4)$$

$$u_{h_{RZ}} = \frac{\delta h_{RZ}}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

$$u_{h_x} = \frac{\delta h_x}{2\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

Соответственно, при измерении толщины в 0,5 мм (нижний диапазон чувствительности толщиномера) суммарная неопределенность составит:

$$u_{H_1} = \sqrt{0 + 0,06^2 + 0,12^2 + 0,03^2} = 0,137 \text{ мм}$$

при измерении толщины в 10 мм суммарная неопределенность составит:

$$u_{H_{10}} = \sqrt{0 + 0,086^2 + 0,12^2 + 0,03^2} = 0,1509 \text{ мм}$$

при измерении толщины в 16 мм суммарная неопределенность составит:

$$u_{H_{16}} = \sqrt{0 + 0,1039^2 + 0,12^2 + 0,03^2} = 0,162 \text{ мм}$$

Для вероятности  $P=0,95$  с коэффициентом охвата  $k=2$ , расширенная неопределенность рассчитывается по формуле:

$$U_{(H)} = k \cdot u_H \quad (2.7)$$

Соответственно, при измерении толщины в 0,5 мм расширенная неопределенность составит:

$$U_{(H_1)} = 2 \cdot 0,137 = 0,274 \approx 0,3 \text{ мм}$$

При измерении толщины в 10 мм расширенная неопределенность составит:

$$U_{(H_{10})} = 2 \cdot 0,1509 = 0,302 \approx 0,3 \text{ мм}$$

При измерении толщины в 16 мм расширенная неопределенность составит:

$$U_{(H_{16})} = 2 \cdot 0,162 = 0,324 \approx 0,3 \text{ мм}$$

С учетом проведенных расчетов и дискретности прибора, результаты измерений должны соответствовать показаниям толщиномера  $\pm 0,3$  мм во всех используемых диапазонах измерений.

### 2.2.3.3 Магнитно-порошковый контроль

Магнитопорошковый контроль применяется для выявления поверхностных или залегающих на незначительной глубине дефектов ферромагнитных материалов. Позволяет с высокой точностью и наглядностью обнаруживать различные трещины, волосовины, неровности, места выхода закатов и др. В основе метода контроля лежат свойства магнитных частиц, концентрирующихся в местах неоднородности магнитного поля, вызванной дефектами материала [92]. В идеальных условиях метод позволяет регистрировать микротрещины глубиной от 0,01 мм и шириной расхождения стенок от 0,001 мм. Магнитопорошковая дефектоскопия дефектных участков проводилась с использованием материалов фирмы Magnaflux (Германия) и магнита ярмового электрического «Магвел-220М/16МА» (ООО "ЭЛНК ГРУПП", Россия).

#### 2.2.3.4 Контроль методом цветной дефектоскопии

Капиллярный контроль является дальнейшим развитием и совершенствованием визуального контроля поверхности на наличие в ней дефектов. Для выявления и выделения дефектов используются свойства некоторых жидкостей и растворов – при смачивании поверхности предметов они заполняют трещины, сколы, раковины, и другие дефекты исследуемого объекта. По изменению контрастности, либо цвета смачивающей жидкости выявляются дефекты на поверхности детали. Такой контроль является вспомогательным, в диссертации применяется для контрастного выделения выходящих на внешнюю поверхность дефектных участков [91]. Для проведения контроля использовались материалы фирмы Magnaflux (Германия).

#### 2.2.3.5 Анализ химического состава

Для уточнения и подтверждения марок исследуемых сталей и точного определения величин легирующих элементов и примесей проводился анализ химического состава металла труб с применением метода эмиссионного оптического спектрального анализа с возбуждением пробы с помощью искры в среде аргона. Анализ выполнялся с применением оптико-эмиссионного спектрометра PMI-Master UVR-PRO (Was Worldwide Analytical Systems AG, Германия, OXFORD Instruments, Великобритания).

#### 2.2.3.6 Внутритрубная дефектоскопия

Основным достоинством внутритрубного обследования является возможность 100%-го контроля протяженных трубопроводов. Исключение составляют трубопроводы сложной конфигурации (компрессорные и газораспределительные станции). При внутритрубном обследовании газопроводов используются внутритрубные снаряды, основанные на магнитных методах, их чувствительность и точность ниже по сравнению с ультразвуковыми, применяемыми при обследовании нефтепроводов. Для получения правильной оценки параметров дефектов требуется проведение контрольных измерений в шурфах, уточняющих результаты диагностики [146]. Степень опасности выявленных дефектов и их параметры в дальнейшем определяются на основании

интерпретации данных по уточненным параметрам. Тем не менее, следует учитывать, что результаты контроля, например при контроле сварных соединений на подкладных кольцах, или при наличии в составе трубопровода труб из отличающихся по магнитным параметрам материалов, неоднозначны. Кроме того, при определенных условиях, при проведении ВТД могут образовываться дефекты, вызванные загрязнениями газопровода [107].

В диссертации проанализированы результаты ВТД, на основании которых выявлена часть подвергнутых исследованиям образцов. Диагностика проводилась с использованием снарядов с продольным и поперечным намагничиванием МД-300, МПД-300, и профилемера Рельеф-300. Обследование проводилось филиалом АО «Газпром оргэнергогаз» «Саратоворгдиагностика», Россия.

## **2.3 Расчетно-аналитические методы и программное обеспечение**

### *2.3.1 Расчетно-аналитические методы*

Моделирование изменений распределения напряжений в стенках дефектной и бездефектной труб и расчет методом конечных элементов выполнялись на трехмерных моделях в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS (США).

Применялись классические методы подсчета объемных соотношений фаз по линейному методу Розиваля. Используются проверенные и принятые методики расчета [134] допустимых толщин стенок труб, возникающих продольных и кольцевых напряжений от действия внутреннего давления, продольных и поперечных перемещений трубопровода, просадок и пучения грунта.

### *2.3.2 Средства разработки программного обеспечения*

Специальное разработанное программное обеспечение создано в среде IDE Lazarus, которая является открытой средой разработки программного обеспечения на языке Object Pascal и распространяется на условиях GNU General Public License.

### Глава 3 ПОВЕРХНОСТНЫЕ ОТСЛОЕНИЯ МЕТАЛЛА

В главе рассмотрены поверхностные отслоения металла. Первый дефект производственного характера, представляет собой закат металла сложной формы, который получен в процессе проката исходного листа для сварной трубы. Вторым дефектом образован в процессе длительной эксплуатации и представляет собой подповерхностную коррозию. Результаты исследований рассматриваемых дефектов докладывались на конференциях [106, 112, 110], журналах рекомендованных ВАК [101, 108], индексируемых SCOPUS и WoS [76, 78], опубликована глава в монографии [133].

#### 3.1 Исследование производственных причин отслоения металла

##### 3.1.1 Анализ дефектной зоны и неразрушающий контроль

###### 3.1.1.1 Визуальный и измерительный контроль.

Дефект представляет собой отслоение металла от тела трубы, проходящий по сложной траектории (рисунок 2.1). Ширина видимого отслоения металла от тела трубы составляет от 5 до 28 мм (рисунок 3.1.). Максимальная высота раскрытия дефекта составляет 2,5 мм от плоскости поверхности. Размер дефектной зоны в развороте трубы составляет 700x400 мм, при общей линейной протяженности 1100 мм. По внешним характеристикам дефект соответствует закату [81, 74, 144], однако имеет нехарактерную для таких дефектов форму, со значительными отклонениями прикатанной полосы.

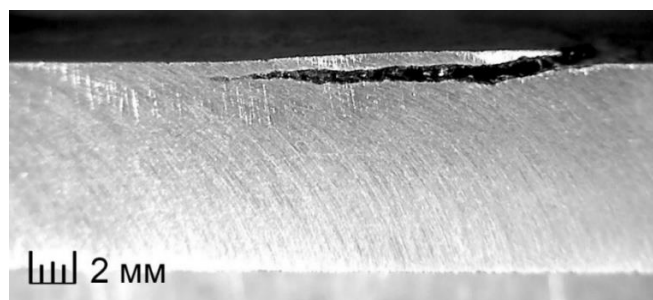


Рисунок 3.1 – Срез образца поперек дефекта

### 3.1.1.2. Анализ химического состава

Результаты контроля металла с применением оптико-эмиссионного спектрометра PMI-Master UVR-PRO в сравнении с прилагаемым сертификатом и требованиями ТУ приведены в таблице 3.1. Сталь соответствует по своему химическому составу широко применяемой в трубной промышленности стали 17Г1С, при этом следует отметить, что содержание марганца находится на нижней границе норматива и ниже заявленного в сертификате.

Таблица 3.1 – Сводные данные по химическому составу.

Измеряемый параметр	Процентный состав в соответствии с		
	Сертификатом	ТУ 14-1-1921-76	Измерения
Углерод, С	0,18	0,15...0,20	0,190
Кремний, Si	0,51	0,40...0,60	0,452
Марганец, Mn	1,46	1,15...1,55	1,192
Хром, Cr	-	<0,30	0,043
Никель, Ni	-	<0,30	0,177
Медь, Cu	-	<0,30	0,039
Алюминий, Al	-	<=0,05	0,010
Ванадий, V	-	<0,10	0,018
Титан, Ti	-	-	0,081
Вольфрам, W	-	-	0,035
Кальций, Ca	-	<0,02	-
Сера, S	0,011	<0,035	0,019
Фосфор, P	0,021	<0,035	0,021

### 3.1.1.3 Ультразвуковая толщинометрия

Ультразвуковая толщинометрия проведена на вырезанных секциях трубы по сетке с шагом 10 мм в бездефектных областях, и с по сетке шагом 10x1 мм в дефектных областях, меньший шаг направлен перпендикулярно направлению дефекта.

Проведенные приборные обследования с наружной стороны непосредственно над зоной дефекта показали разнородные и частично недостоверные результаты при проведении измерений. На крайней части отслоения, выходящего наружу и имеющим видимый воздушный зазор с основным



металлом, показания соответствовали реальной толщине, и лежали в пределах 0,7...1,1 мм. На расстоянии от 10...15 мм от края отслоения, в местах уплотненных продуктов коррозии, показания приборов выдавали толщину отслоения до 6,9 мм, что предположительно вызвано совокупностью факторов: толщиной измеряемого металла, близкого к граничной толщине диапазона измерений, плотностью слоя продуктов коррозии и их влажностью. Дефектоскоп ISONIC 2010 не показал значений толщины отслоения при измерении с внешней стороны непосредственно над отслоившимся участком из-за отсутствия сигнала, вызванного большой опорной плоскостью датчика и кривизной поверхности, с внутренней стороны показания составили 8.2 мм. Измерения с внутренней стороны показали высокую сходимость результатов от всех приборов с расхождениями не более 2,5%. Значения толщины при измерении с внутренней стороны не снижались менее 8,0 мм, что свидетельствует о том, что ликвационные включения в стенке трубы отсутствуют или не значительны и не могли влиять на измерения с наружной поверхности.

Для определения влияния фактора влажности, часть образцов была просушена в сушильном шкафу в течении 24 часов при температуре 50 °С. Проведенная после просушки толщинометрия показала значения толщин, соответствующие реальным, видимым на образцах после вырезки. Измеренная толщина отслоения на дефектной зоне не превышала 1,6 мм. Для подтверждения результатов эксперимента, те же самые образцы были погружены в воду на 24 часа, затем опять подвергнуты толщинометрии. Полученные результаты соответствовали первоначальным измерениям с искаженными данными. Таким образом, подтверждается, что, приборные обследования, проведенные непосредственно над зоной дефекта, при условии плотных и увлажненных продуктов коррозии и их близким расположением к измерительным поверхностям датчиков дают некорректные результаты. Результаты измерений представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты ультразвуковой толщинометрии

Измерительное оборудование	Толщина основного металла, мм, мин...макс		Глубина в дефектной зоне, мм, мин...макс			Глубина в сошлифованной зоне (с внешней стороны), мм, мин
	С внешней стороны	С внутренней стороны	С внешней стороны	С внешней стороны после сушки	С внутренней стороны	
Булат 1S	9,1...9,6	9,2...9,4	0,8...5,5	0,8...1,8	8,0...8,3	7,8
A1210	9,0...9,5	8,9...9,2	0,7...6,9	0,7...1,5	8,0...8,2	7,8
ISONIC 2010	9,2...9,7	9,4...9,6	–	–	8,2...8,5	7,9

По результатам ультразвукового контроля дефектных зон при помощи дефектоскопа ISONIC 2010, оснащенного наклонным преобразователем на фазированных решетках, дефектов, уходящих вглубь толщины стенки тела трубы не зафиксировано. Обнаружены подповерхностные дефекты на глубине 1,0...1,3 мм, что совпадает с данными измерений с внутренней стороны. Определено, что при проведении толщинометрии ультразвуковыми толщиномераами на некорректные показания повлияло совокупное сочетание таких факторов, как:

- толщина измеряемого слоя близкая к граничной толщине диапазона измерений;
- плотный слой коррозии, сформированный в условиях щелевой коррозии;
- влажность продуктов коррозии под дефектами.

#### 3.1.1.4 Удаление дефекта и магнитопорошковый контроль

Поверхностные дефекты газопроводов могут быть удалены контролируемой шлифовкой с контролем остаточной толщины и остаточных следов дефекта. Перед шлифовкой был проведен осмотр поверхности под отслоением (рисунок 3.2а). Осмотр показал наличие продуктов коррозии с различными внешними характеристиками, по внешним признакам под отслоением находится ржавчина, обладающая рыжим цветом, и окалина черного цвета. На одном из образцов было проведено удаление дефекта методом контролируемой шлифовки (рисунок 3.2б), с

последующим проведением магнитопорошкового контроля (рисунок 3.2в) для определения остаточных трещин, уходящих в глубину стенки трубы.

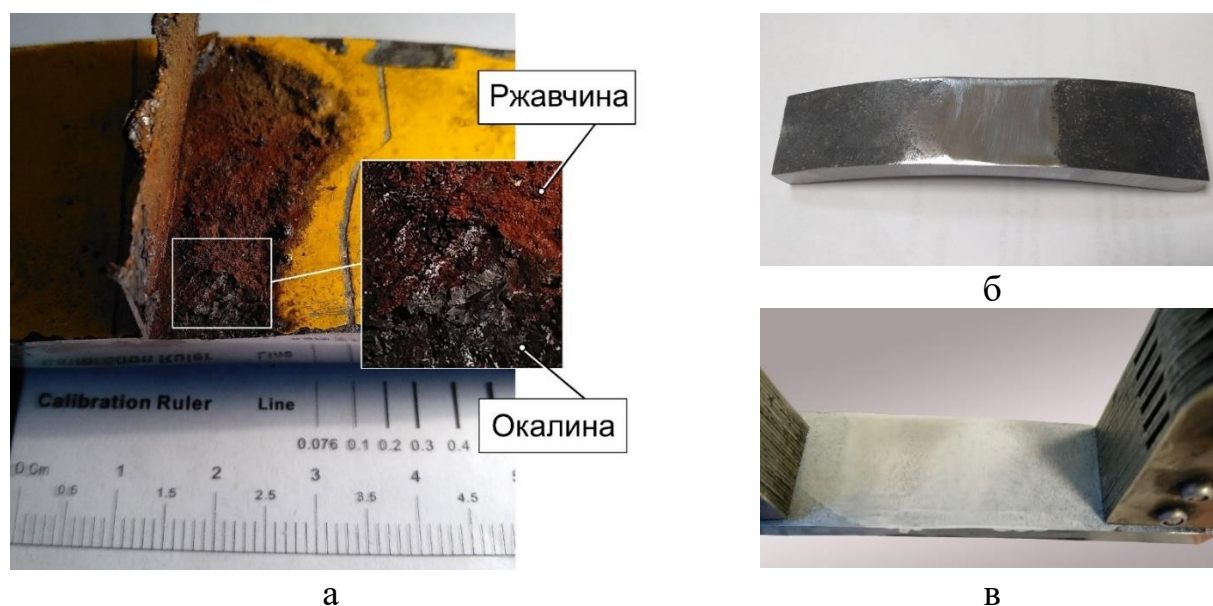


Рисунок 3.2 – Дефектный участок (а – продукты коррозии под отслоением; б – сошлифованный дефект; в – последующий магнитопорошковый контроль)

### 3.1.2 Анализ изменений микроструктуры металла в дефектной области

Анализ микроструктуры проведен в дефектной и бездефектной областях, вырезанных в продольном и поперечном направлениях. Дефект представляет собой протяженную параллельную поверхности несплошность (подповерхностную трещину) переменного раскрытия, заполненную продуктами коррозии и окалиной. К несплошности примыкают обезуглероженные зоны, шириной до 10 мкм со стороны внешней поверхности трубы и до 20 мкм с другой стороны. Наличие обезуглероженной зоны соответствует характеристике производственного дефекта типа закат [81, 86, 144]. По результатам оптической микроскопии установлено, что дефект расположен параллельно плоскости поверхности, и не имеет ответвлений, отходящих вглубь тела трубы (рисунок 3.3).

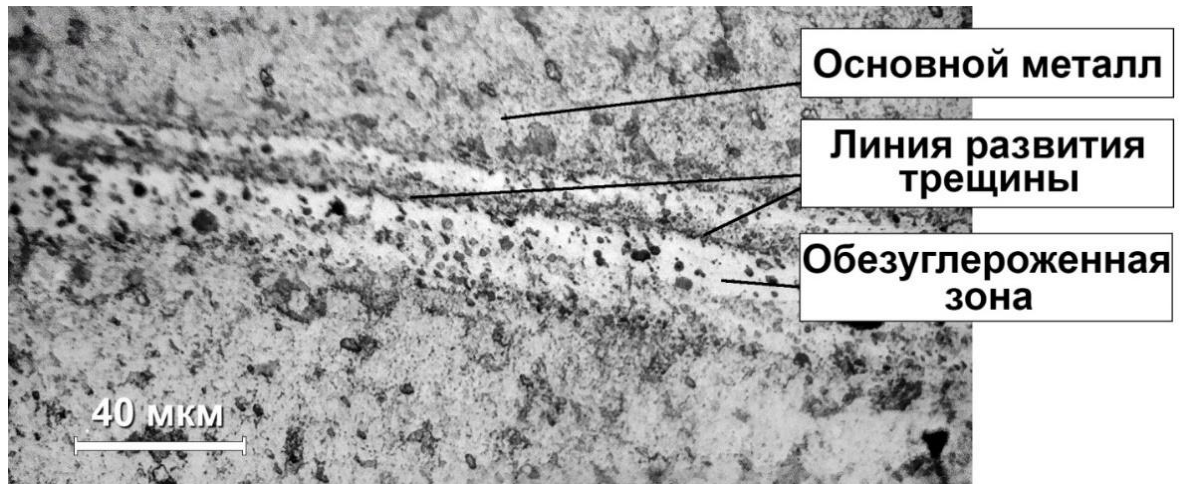


Рисунок 3.3 – Нераскрытая зона трещины, отходящая от раскрытого участка, направленная параллельно поверхности трубы. (Поперечный участок)

Основной металл имеет феррито-перлитную кристаллическую структуру, с выраженной анизотропией прокатки, отмечаемой на образцах с продольным и поперечным направлением. Отмечены раскатанные включения, диаметром сопоставимые с размерами зерен феррита и перлита, вытянутые в сторону проката (рисунок 3.4). Следов структурного старения материала (выделения вторичного цементита по границам зерен), приводящего к снижению механических характеристик, не выявлено.

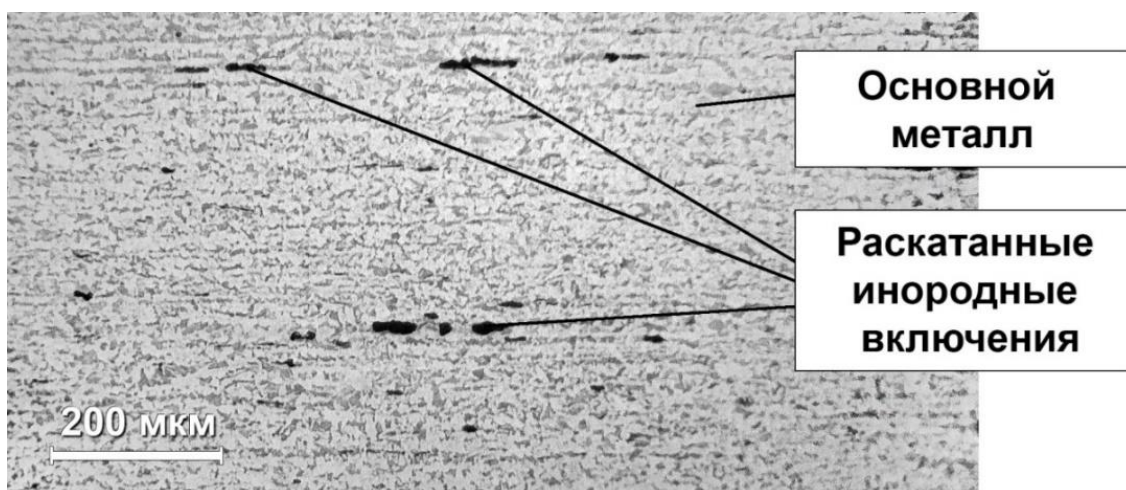


Рисунок 3.4 – Микроструктура бездефектной зоны тела трубы. (Продольный участок)

### 3.1.3 Химические изменения в дефектной зоне

Проведен микрорентгеноспектральный анализ дефектной зоны. Определен химический состав продуктов в зоне отслоения с имеющимся раскрытием, спектры 1 и 2, (рисунок 3.5), в зоне трещины без раскрытия (рисунок 3.6), спектр 4, так же измерен состав раскатанных включений, спектр 3. Химический состав продуктов коррозии в зоне дефекта явно выражен двумя зонами (рисунок 3.5) оксидов железа – состав по спектрам 1 и 4 является окалиной, полученной в процессе высокотемпературного проката, морфология и анализ которой подробно приведен в работе [33]. Состав по спектру 4 обнаружен в нераскрытой зоне дефекта. Состав по спектру 2 относится по объемным долям железа и кислорода к гидратированному оксиду железа, чаще называемому ржавчиной. Результаты сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа

Спектр	O	Al	Si	Mn	Ti	Fe+C (ост.)
Спектр 1	26,11	–	0,92	0,93	–	72,04
Спектр 2	38,35	–	0,56	0,30	–	60,79
Спектр 3	46,25	38,61	1,96	4,08	1,01	8,09
Спектр 4	26,45	–	0,29	1,01	–	72,25

Данный состав обнаружен на всем протяжении раскрытого участка дефекта, и отсутствует в прикатанной, нераскрытой области. Включения, микрорентгеноспектральный анализ которых приведен на спектре 3, представлены раскатанными частицами оксида алюминия, что вызвано процессом производства стали. Общий объемный состав алюминия, по результатам химического анализа, не превышает допустимых по техническим условиям значений. Продукты коррозии внутри дефекта представляют собой смесь окислов, образовавшихся при прокатке и при атмосферной коррозии металла трубной секции. При этом, в приповерхностном слое железа (под окалиной) в отслоившейся части дефекта, видны мелкодисперсные частицы оксида железа, образованные при атмосферной коррозии (ржавчина) [59].

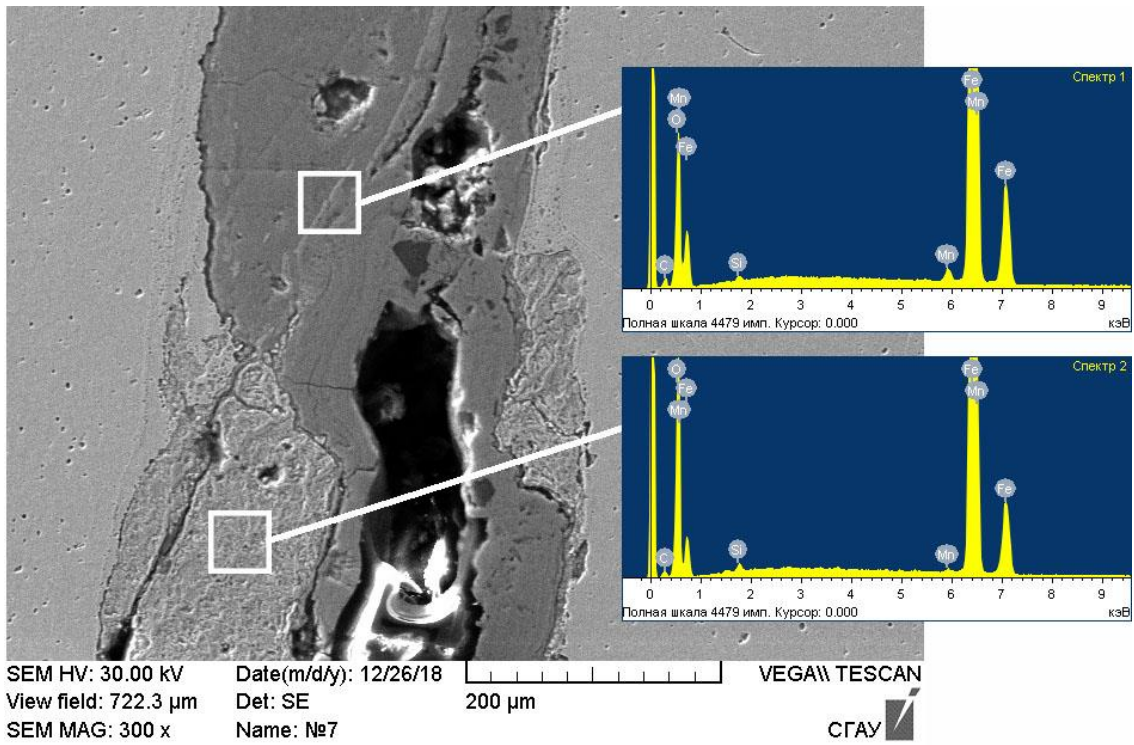


Рисунок 3.5 – Микрорентгеноспектральный анализ дефектной зоны с имеющимся раскрытием

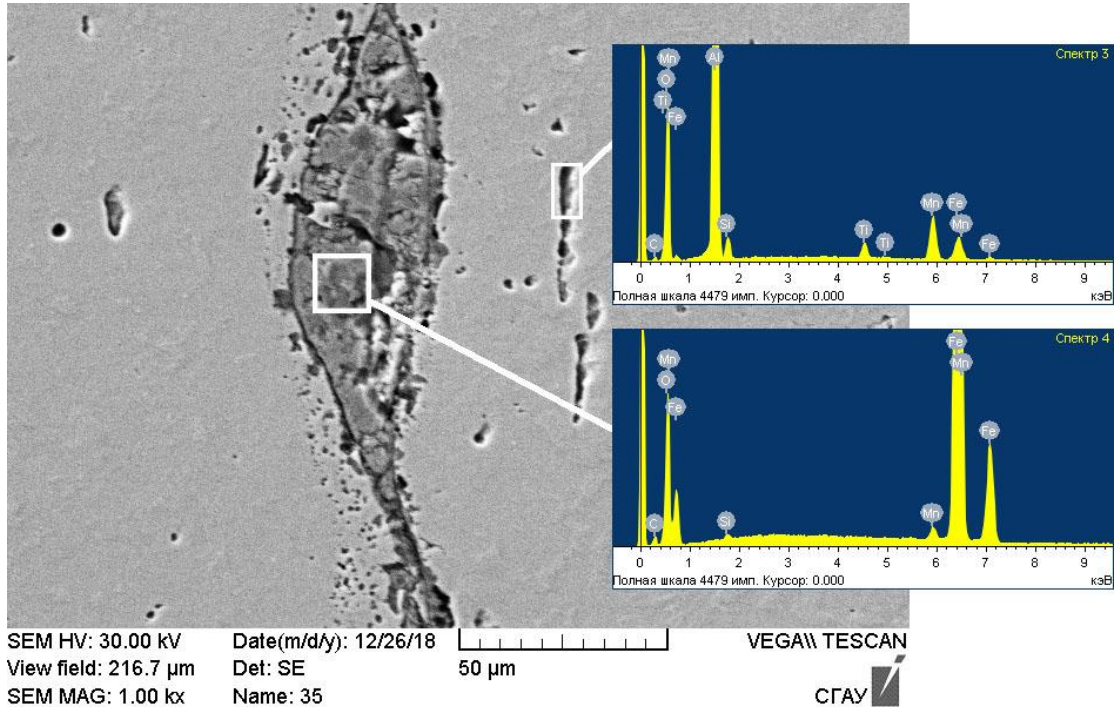


Рисунок 3.6 – Микрорентгеноспектральный анализ дефектной зоны и раскатанных включений

При спектрометрии продуктов коррозии выявлены два типа оксидов железа в зоне дефекта: окалина и ржавчина. Следов развития усталостного разрушения и деградационных процессов на трубе из стали 17Г1С, проработавшей в составе оборудования по транспортировке газа более 20 лет, не выявлено. Можно сделать вывод, что дефект развивался по плоскости, механически образованной при нарушении технологии проката и содержащей тонкий слой окалины.

Данные признаки, определенные при лабораторных исследованиях, при совмещении с результатами визуального осмотра, присущи закату. Такие дефекты характеризуются тонким слоем окалины под прикатанным металлом. Образованный при этом поверхностный слой металла и самой окалины достаточно тонкие, и практически не обнаруживается при контроле, в результате чего дефектное изделие попадает в эксплуатацию. При эксплуатации, под воздействием различных факторов, включающих:

- температурные перепады окружающей среды;
- температурные перепады транспортируемого продукта;
- изменения внутреннего давления в трубе;
- воздействия циклических или знакопеременных нагрузок;

и др., происходят структурные изменения и микропластическая деформация как самого материала, так и защитных покрытий. В рассматриваемом случае атмосферная влага попадает на поверхность основного металла, включая зоны выхода дефекта. При попадании влаги на поверхность металла в месте дефекта, возникает гальванопара из окалины, представленной магнетитом ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), и основного металла ( $\text{Fe}$ ). Металл в этом случае играет роль анода, а окалина – катода. Происходит анодное растворение металла с образованием ржавчины ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), имеющей больший объем, чем замещаемые участки, что приводит к увеличению толщины слоя окалины. При этом, с увеличением зазора по краю отслоения, увеличивается и площадь взаимодействия гальванопары с окружающей средой, что приводит к еще большему росту коррозионных процессов и дальнейшему увеличению раскрытия. Данный механизм объясняет значительную скорость развития дефекта в течении короткого промежутка времени и причину

того, что дефект не был выявлен при проведении предыдущих работ по неразрушающему контролю.

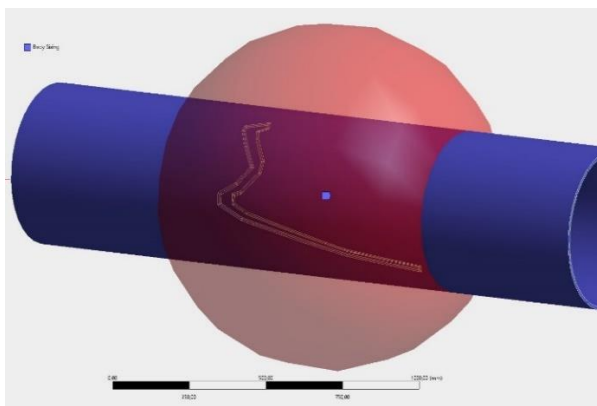
### *3.1.4 Расчет остаточной несущей способности методом конечных элементов*

Несмотря на то, что в условиях эксплуатации допускается проведение ремонта поверхности труб методом контролируемой шлифовки, существующие методы расчета допустимости ремонта, приведенные в [125], консервативны, не позволяют проводить точные расчеты для дефектов сложной геометрии, не отражают распределение и величину возникающих напряжений. Для уточненного расчета допустимости эксплуатации участка трубы на рабочих параметрах после удаления дефекта, была построена расчетная модель с имитацией вышлифовки обнаруженного дефекта, повторяющая его сложную траекторию. Для расчета выбран метод конечных элементов (МКЭ) в системе анализа Ansys [35].

Геометрическая модель участка газопровода приближена к реальной и смоделирована из трех деталей: центральной трубы наружным диаметром 530 мм, толщиной стенки 9 мм, длиной 2,11 м, имеющей утонение по траектории вышлифовки дефекта глубиной 2 мм. Края зоны вышлифовки скруглены радиусом не менее 10 мм, острые углы отсутствуют в соответствии с требованиями норм ремонта методом контролируемой шлифовки ПАО «Газпром». Траектория утонения повторяет сложную траекторию дефекта и имеет ширину от 30 до 50 мм. Вторая и третья детали представлены моделями труб, жестко присоединенных к анализируемой с торцев, наружный диаметр и толщин стенок соответствуют центральной, составляют 530 мм и 9 мм соответственно, протяженность по 1 м (рисунок 3.7а). Механические свойства для стали установлены из сертификата на трубу: предел текучести 460 МПа, временное сопротивление 570 МПа. К внутренней поверхности модели прикладывалась распределенная нагрузка, эмитирующая внутренне максимальное рабочее давление в трубопроводе, составляющее 2,5 МПа.



Учитывая особенности эксплуатации, граничные условия закрепления участка магистрального газопровода были заданы таким образом, что обеспечивалось свободное перемещение трубопровода в радиальном направлении под действием внутреннего давления транспортируемой среды: жесткая заделка на торцах участка. Краевые трубы исключены из расчета, а их протяженность нивелирует воздействие краевого эффекта от мест заделки. Граничные условия и схема нагружения представлены на рисунке 3.7а.



а

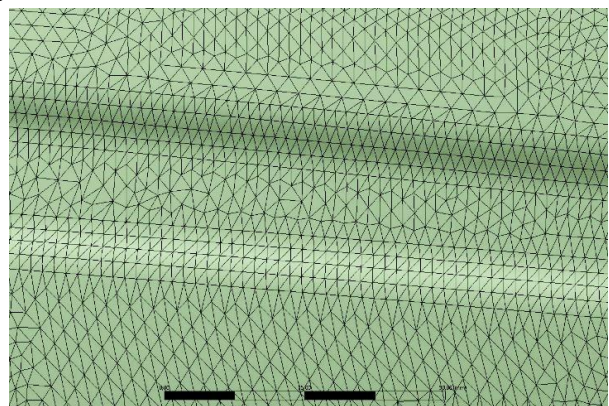


Рисунок 3.7 – Конечно-элементная модель анализируемого участка

(а – граничные условия и приложенные нагрузки; б – модель участка с зоной сгущения элементов; в – приближенный участок модели с распределением сетки элементов в зоне вышлифовки)

Задача решалась в статической трехмерной постановке. Для обеспечения точности расчетов была построена КЭ-модель с нерегулярной сеткой и размерами конечных элементов, принудительно уменьшенных до 3 мм сгущением в зоне дефекта и прилегающей к нему (рисунок 3.7б). С учетом поведения исследуемой конструкции, сложной геометрии дефекта и материала, выбран конечный элемент типа SOLID187, тетраэдрический 10-ти узловой. Элемент имеют квадратичное поведение смещения, подходят для моделирования нерегулярных сеток и применяется для моделирования напряженно-деформированного состояния упругопластических материалов. Количество элементов составило 4340469, количество узлов 6562023, распределение сетки конечных элементов в вышлифованной зоне продемонстрировано на рисунке 3.7в, 3.8б, 3.8в.

По результатам моделирования (рисунок 3.8) в месте дефекта возникают максимальные напряжения, не превышающие 152 МПа, что соответствует 33% от предела текучести (460 МПа), и 27% от временного сопротивления (570 МПа) трубной секции. Максимальные напряжения возникают в области утонения стенки по радиусу сошлифовки в зоне сошлифовки, направленной по направлению оси трубы. Расположение максимума соответствует методике по оценке опасности дефектов [126] принятой в ПОА «Газпром», в которой расчеты ведутся по проекции эффективной части сошлифованной области на продольную ортогональную плоскость.

Распределения эквивалентных напряжений в глубину контролировалось по сечениям сегмента трубы. Значительных скачков напряжений, аномалий в узлах или искажений геометрии не выявлено. Напряжения не превышают допустимых значений.

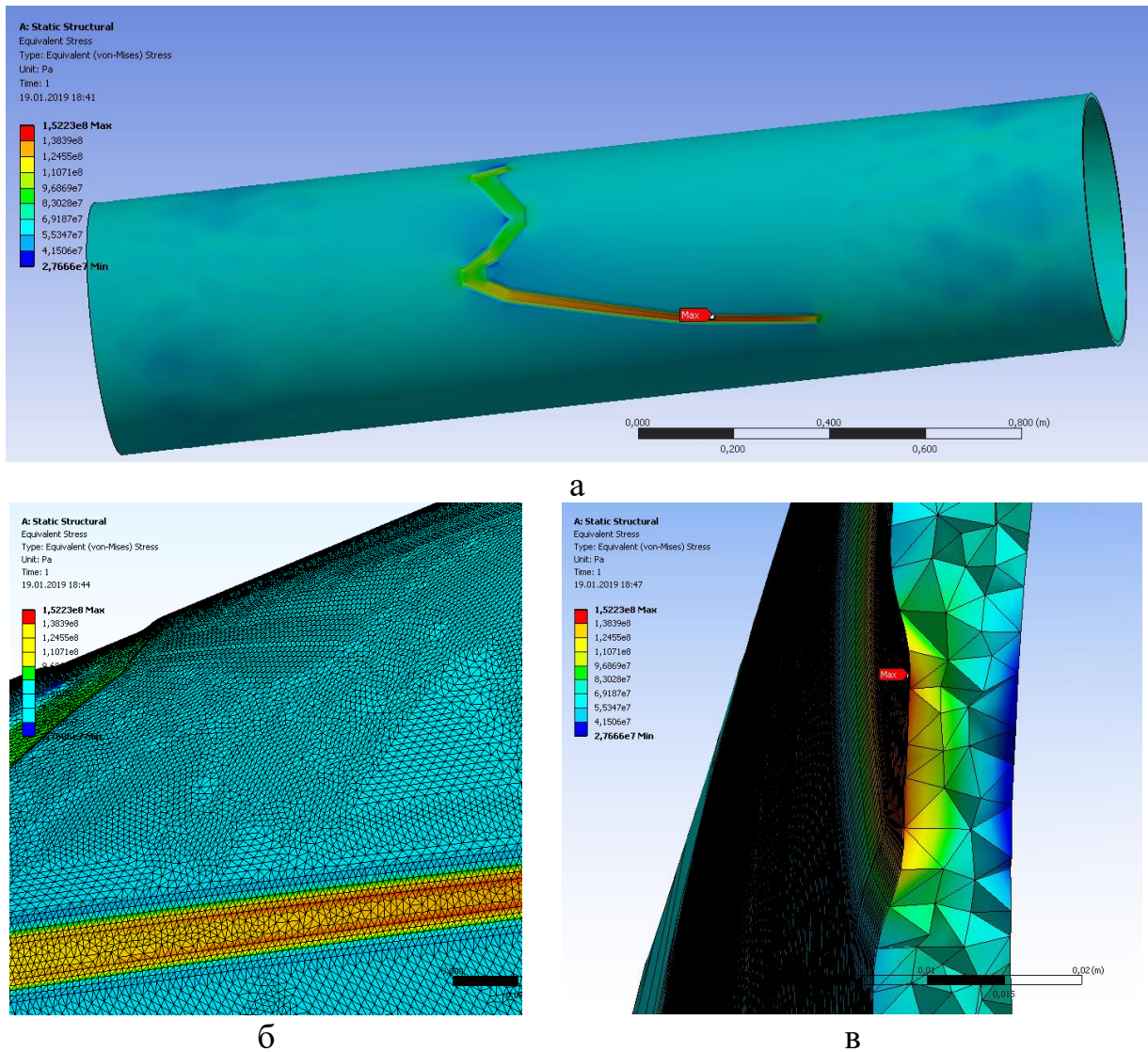


Рисунок 3.8 – Распределение напряжений

(а – общий вид расчетной модели с распределением напряжений;

б – приближенный участок с сеткой конечных элементов; в – сечение участка в зоне максимальных напряжений с отображением радиусов вышлифовки, утонения стенки и объемными конечными элементами)

Для верификации результатов, проверим возникающие напряжения в участках трубы, удаленных от дефекта по принятым в [134] формулам. Эквивалентные напряжения, определяемые при плоском напряженном состоянии материала в стенке трубы, для трубопровода выражаются через кольцевую и продольную составляющие:

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{кц})^2 - \sigma_{пр} \cdot \sigma_{кц} + (\sigma_{пр})^2} \quad (3.1)$$

где:

$\sigma_{кц}$  – кольцевые напряжения, МПа;

$\sigma_{пр}$  – продольные напряжения, МПа.

$$\sigma_{кц} = \frac{p \cdot (D_n - 2 \cdot \delta_t)}{2 \cdot \delta_t} \quad (3.2)$$

где:

$p$  – внутреннее рабочее давление;

$D_n$  – наружный диаметр трубопровода;

$\delta_t$  – толщина стенки.

$$\sigma_{пр} = \mu \cdot \sigma_{кц} - \alpha \cdot E \cdot \Delta t \pm \frac{E \cdot D_n}{2 \cdot \rho} \quad (3.3)$$

где:

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения металла трубы, град<sup>-1</sup>;

$E$  – модуль Юнга, МПа;

$\Delta t$  – расчетный температурный перепад, принимаемый положительным при нагревании, °С;

$\rho$  – минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода, см.

$$\sigma_{кц} = \frac{p \cdot (D_n - 2 \cdot \delta_t)}{2 \cdot \delta_t} = \frac{2.5 \cdot (530 - 2 \cdot 9)}{2 \cdot 9} = 71.11$$

При расчете продольных напряжений, в общих случаях анализа штатного режима работы допускается принимать температурный перепад и минимальный радиус изгиба равными «0». При этом получим:

$$\sigma_{пр} = \mu \cdot \sigma_{кц} = 0.3 \cdot 71.11 = 21.33$$

$$\sigma = \sqrt{(71.11)^2 - 21.33 \cdot 71.11 + (21.33)^2} = 63.2$$

На конечно-элементной модели по оси стенки трубы в бездефектном участке эквивалентные напряжения составляют 64.3 МПа, разница в результатах составляет менее 2%, что является допустимым результатом.

Проведенное моделирование подтверждает возможность использования метода конечных элементов при анализе напряженно деформированного состояния

газопроводов с дефектами сложной геометрией, подвергнутых ремонту методом контролируемой шлифовки.

### *3.1.5 Выводы по результатам исследований дефектного участка*

Внешний вид и характеристики дефекта, такие как обезуглероженная зона и отсутствие разветвлений на конце трещины, соответствуют дефекту типа закат, однако отличаются нехарактерной формой со сложной траекторией и направлением отслоения параллельно поверхности, без ухода внутрь тела трубы. Дефектная зона образовалась при производстве листового материала, и не была выявлена при неразрушающем контроле ни при производстве листового материала, ни при производстве сварной трубы. Длительное время эксплуатации дефект не проявлялся. Затем, в следствии действия атмосферной влаги, началась интенсивная щелевая коррозия по линии дефекта с распространением внутрь по линии заката. Так как удельная плотность продуктов коррозии значительно ниже, чем у металла, то заполнение несплошности окислами способствовало развитию раскрытия дефекта, и он стал идентифицироваться при визуальном контроле трубопровода. С увеличением раскрытия дефектной зоны увеличивалась также дальнейшая площадь распространения дефекта, что в свою очередь, увеличивало дальнейшее раскрытие и облегчало доступ атмосферной влаги и осадкам.

## **3.2 Исследование эксплуатационных причин отслоения металла**

### *3.2.1 Внешний осмотр и неразрушающий контроль*

Замена объекта проведена исходя из длительного срока эксплуатации. Изоляция металла битумная, толщиной 6,0...8,0 мм, адгезия удовлетворительная, сколов и отслоений не зафиксировано. На внешней поверхности изоляции обнаружены сетки растрескиваний, частично сквозных, которые по всей видимости вызваны деградацией во времени. При проведении внешнего осмотра металла, повреждений, препятствующих дальнейшей эксплуатации, не обнаружено.

Для определения наличия и величины структурных изменений металла, проведены углубленные металлографические исследования.

### 3.2.2 Анализ химического состава

Для проверки соответствия химического состава металла требованиям сертификата и действующих нормативных документов проведена оптико-эмиссионная спектрометрия, результаты приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты анализа химического состава

Элемент	Сертификат (ЧМТУ 1025-63)	ГОСТ 19281-2014	СТО Газпром 2-2.3-1178-2019	Образец
C	0,15...0,20	0,14...0,20	0,15...0,20	0,176
Si	0,4...0,6	0,40...0,6	0,4...0,6	0,523
Mn	1,0...1,4	1,00...1,4	1,0...1,4	1,287
Cr	< 0,3	0,035	–	0,067
Ni	< 0,3	< 0,3	< 0,3	0,005
Cu	< 0,3	< 0,3	< 0,3	0,048
V	–	< 0,12	–	–
N	–	< 0,012	–	–
P	< 0,04	< 0,03	< 0,030	0,021
S	< 0,04	< 0,035	< 0,025	0,028

Материал соответствует по своему составу стали марки 17ГС. Состав образца соответствует как техническим условиям изготовителя, так и требованиям действующего ГОСТ, однако имеет незначительно превышение по содержанию серы, не проходящее по требованиям СТО Газпром.

### 3.2.3 Металлографический анализ

Микроструктурные исследования были выполнены на основном металле трубы в продольном и поперечном направлениях, на продольном и кольцевом сварных соединениях (рисунки 3.9, 3.10).

Основной металл имеет характерную для доэвтектоидных сталей феррито-перлитную структуру, без явно выраженной анизотропии проката. Продольный шов (рисунок 3.9) выполнен автоматической дуговой сваркой под флюсом.

Феррито-перлитная структура шва (рисунок 3.9а) свидетельствует о последующей термообработке. Зона сплавления (рисунок 3.9б) отличается от основного металла (рисунок 3.9г) включениями зернистого перлита, при преобладании пластинчатого.

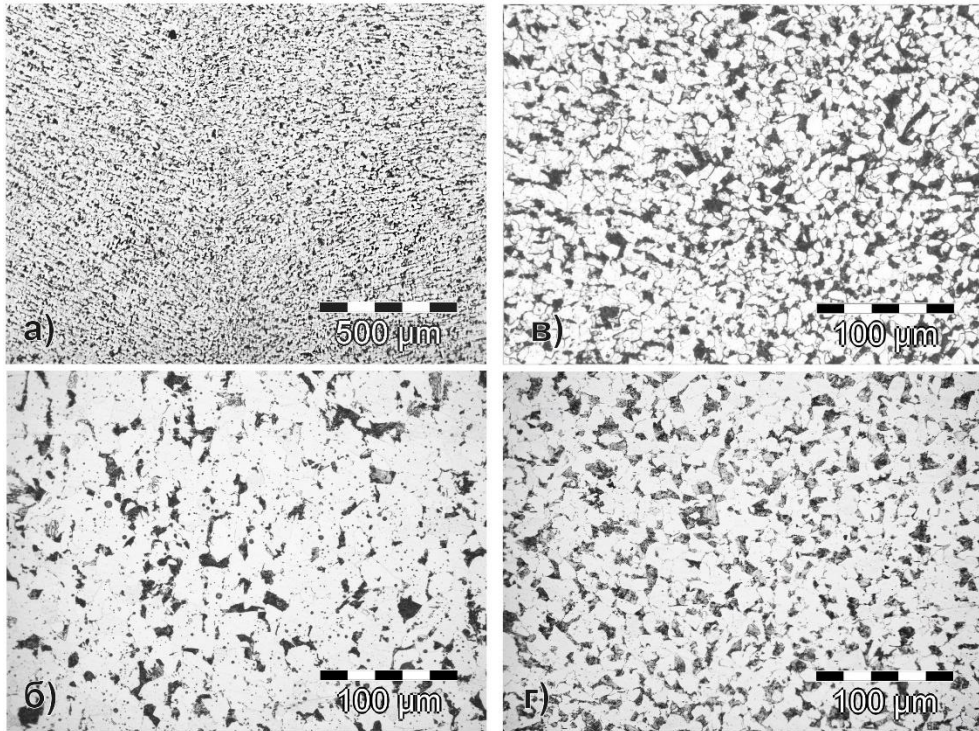


Рисунок 3.9 – Оптическая микроскопия зоны продольного сварного шва (а – зона сплавления, б – центр шва, в – зона термического влияния, г – основной металл)

Кольцевое сварное соединение (рисунок 3.10) выполнено ручной дуговой сваркой. Структура шва (рисунок 3.10а) с явно выраженным зональным разделением. Зона сплавления феррито-перлитная (рисунок 3.10б) с пластинчатым и зернистым перлитом, при этом основная масса зерен перлита более узкая, чем в основном металле (рисунок 3.10г). Зона сплавления (рисунок 3.10в) имеет явно выраженную видманштеттову структуру, характерную для участков перегрева.

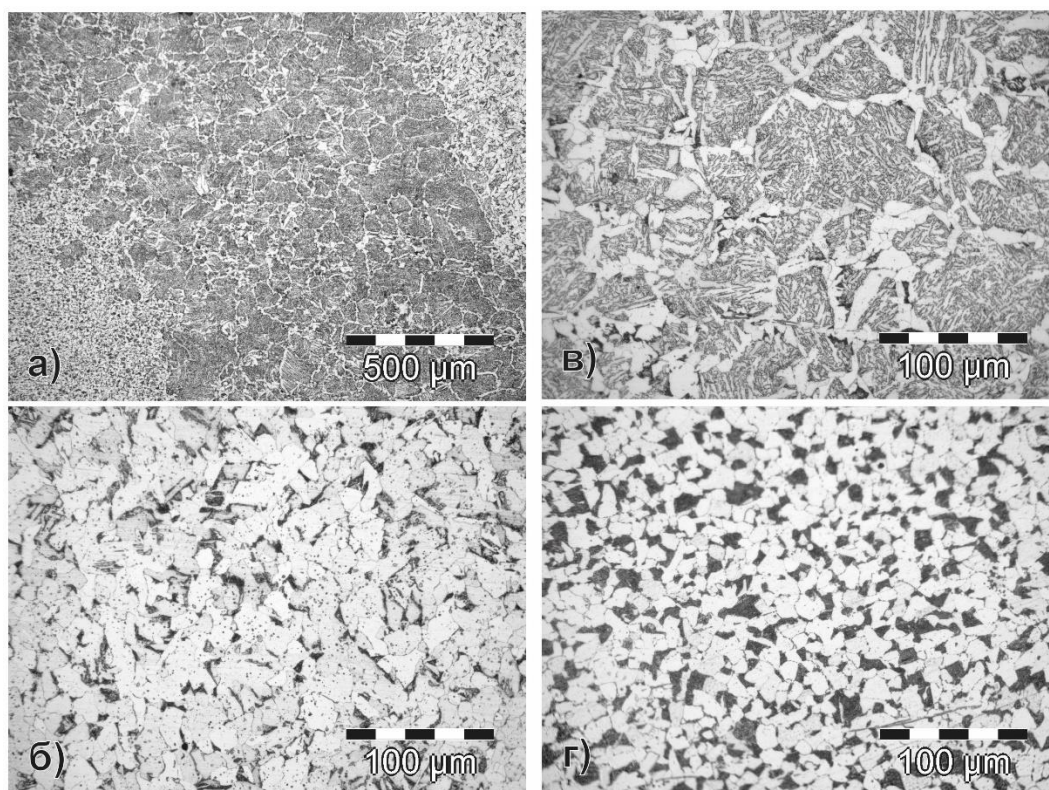


Рисунок 3.10 – Оптическая микроскопия зоны кольцевого сварного шва (а – зона сплавления, б – центр шва, в – зона термического влияния, г – основной металл)

Анализ микроструктуры шлифов не выявил явно выраженных деградиционных процессов в структуре стали, однако осмотр образцов на границе внешней поверхности показал наличие подповерхностной коррозии (рисунок 3.11), толщиной от 20 до 100 мкм.

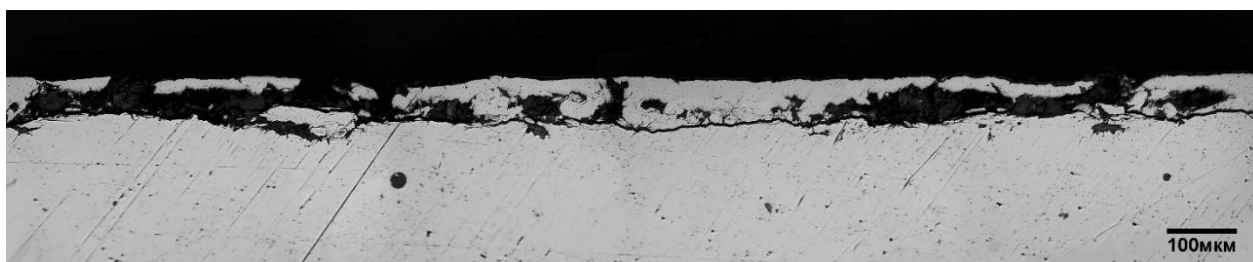


Рисунок 3.11 – Оптическая микроскопия поверхности металла с внешней стороны

При определенных условиях и длительном развитии такие повреждения могут накапливаться и приводить к вспучиванию и расслоению металла. При осмотре внутренней стороны стенки трубы подповерхностной коррозии не



зафиксировано. Отмечены незначительные, глубиной до 80 мкм, не протяженные поверхностные язвы без следов продолжающегося растрескивания. Отсутствие значительных коррозионных повреждений с внутренней стороны обусловлено слабой коррозионной агрессивностью транспортируемого продукта.

### 3.2.4 Электронная микроскопия

При проведении электронно-растровой микроскопии проведен анализ фазового состава подповерхностной коррозии тела трубы, выявленной при оптической микроскопии. Глубина распространения подповерхностной коррозии на рассматриваемом участке (рисунок 3.12) составляет 20-50 мкм.

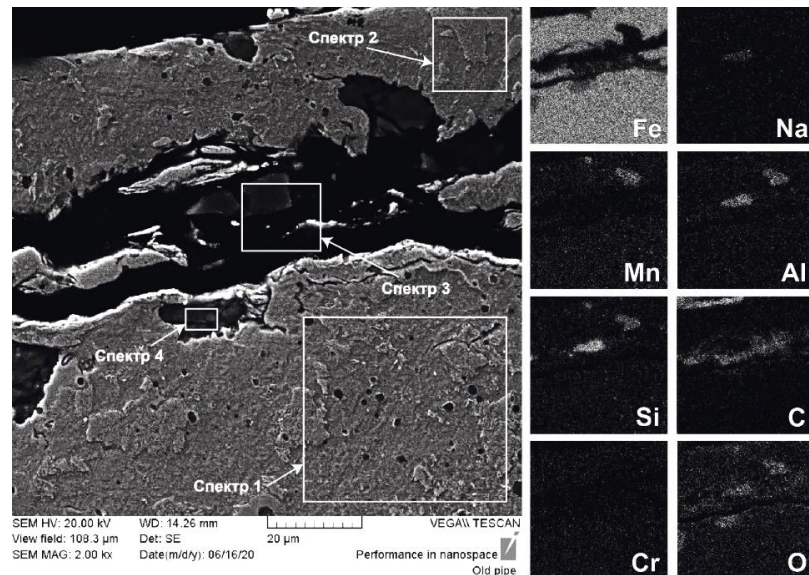


Рисунок 3.12 – Электронно–растровая микроскопия внешней поверхности трубы

Разделяющий слой загрязнен углеродом, попавшим из изоляционных материалов и окружающей органики, также отмечено наличие солей натрия и кальция, являющихся составными частями грунтовых вод. Зафиксировано наличие оксидов железа, кремния и алюминия. Элементный состав анализируемых участков приведен в таблице 3.5. Выполнено картирование исследуемого участка, по результатам которого видно, что во внешнем отслаивающемся слое присутствуют участки с повышенным содержанием марганца и алюминия. Углерод

распространяется по всей протяженности коррозионного отслоения между внешним и основным слоями металла. Также отмечены следы растрескивания и развития коррозии вглубь основного металла, однако повреждения не превышают 100 мкм, в основном лежат в пределах до 50...80 мкм и представлены небольшими разнонаправленными растрескиваниями и коррозионными язвами.

Таблица 3.5 – Элементный состав анализируемых участков

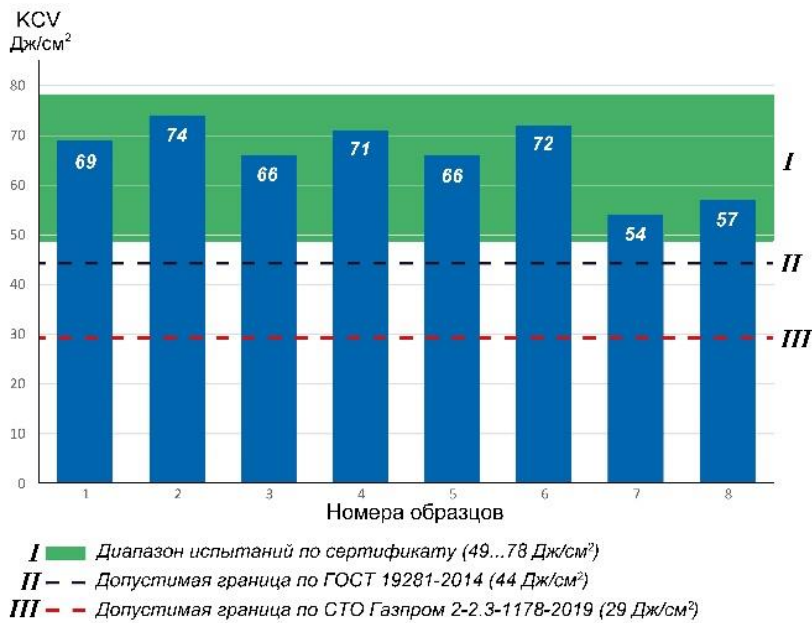
Номер спектра	Элементы									
	C	O	Na	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe (ост)
1	0,17	2,47	–	–	0,85	–	–	–	1,25	95,26
2	0,16	–	–	–	0,84	0,04	–	0,59	1,56	96,81
3	50,78	28,09	1,44	2,32	4,85	–	0,71	–	–	11,81
4	11,32	34,49	–	0,64	0,83	–	–	0,51	0,54	51,67

### 3.2.5 Механические испытания

В работах [42, 44, 45, 115, 147] показано, что основным фактором старения труб является уменьшение ударной вязкости. Ударная вязкость трубы по сертификату указана в пределах 49...78 Дж/см<sup>2</sup>. Для испытаний было вырезано 8 образцов из зон не подверженных термическому влиянию. Образцы с V-образным надрезом изготовлены и испытаны в соответствии с требованиями [90, 95].

При испытаниях ни один из образцов не показал значений меньше нижнего предела сертификата (рисунок 3.13). Также, значения вязкости превышают минимально допустимые по требованиям ГОСТ 19281-2014 и СТО Газпром 2-2,3-1178-2019. Среднее значение ударной вязкости составило 66,1 Дж/см<sup>2</sup>.

При испытаниях на статическое растяжение (таблица 3.6), так же не выявлено отклонений или деградации механических свойств.



а

б

Рисунок 3.13 – Результаты испытаний на ударную вязкость (а – сводные результаты; б – один из образцов после испытаний)

Таблица 3.6 – Результаты испытаний металла на статическое растяжение

Измеряемый параметр	Сертификат (ЧМТУ 1025-63)	ГОСТ 19281-2014	СТО Газпром 2-2.3-1178-2019	Образец (среднее)
временное сопротивление разрыву основного металла, МПа	540 ... 610	450	510	571
Предел текучести основного металла, МПа	390 ... 450	325	350	407
Относительное удлинение ОМ, %	22 ... 27	21	20	25,4

### 3.2.6 Анализ действующих напряжений и их влияния

В работах [58, 63, 121] рассматривается предел макроупругости, соответствующий минимальному напряжению, при котором внутри зерен начинается микропластическая деформация. Для труб в исходном состоянии предел макроупругости составляет 65-75% от предела текучести.

Для трубопроводов, работающих в условиях избыточного внутреннего давления, наиболее значительными являются кольцевые напряжения, рассчитываемые по формуле (3.2).

Для рассматриваемого случая  $\sigma_{\text{кц}} = 188.8$  МПа, предел макроупругости, на основании результатов испытаний составляет 264...305 МПа. Таким образом, максимальные возникающие внутренние кольцевые напряжения в трубопроводе составляют 54% от предела текучести, что существенно меньше предела макроупругости.

Проведенные комплексные исследования металла трубы газопровода из стали 17ГС после 50-ти лет эксплуатации показали, что в условиях правильного технического обслуживания, обеспечении неизменного проектного положения и защиты от коррозии, механические свойства труб практически не изменяются и сохраняются в пределах заводских параметров.

### **Выводы по главе 3**

1. При анализе поверхностных повреждений труб, характеризующихся как расслоения, к которым относятся закаты, поверхностные плены, прикатанные заусенцы, определено, что первоначальные предпосылки их возникновения заложены при производстве. При их пропуске в эксплуатацию они могут быть законсервированы длительный период времени, и получать развитие в течении короткого промежутка времени. Отличительной негативной особенностью прикатанных дефектов, является то, что при неразрушающем контроле возможно возникновение условий, при которых происходят ошибки диагностики.

В результате исследований определено, что ошибочные показания на приборах с датчиками, предназначенными для измерения толщин от 0,5 мм, возникают при следующих условиях:

- толщина поверхностного слоя металла от 1,0 до 2,0 мм, при толщине выше 2-х мм влияние дефектных слоев нивелируется;
- наличие под поверхностным слоем металла плотного и влажного слоя коррозионных продуктов, толщиной до 0,5 мм;

При отсутствии влаги в дефектном корродированном слое измерения толщины поверхностного слоя становятся корректны.

Проблема ошибочных измерений решается применением ультразвуковых дефектоскопов с наклонными преобразователями. С их помощью можно с высокой точностью определить направление несплошности (полости дефекта) и глубину его заложения. Данный тип диагностики на текущий момент является единственным видом неразрушающего контроля, который может определить характер распространения дефекта. Наличие точных данных о его параметрах, позволяет оценить степень опасности и провести оценку работоспособности оборудования на рабочих режимах. В рассмотренном случае результаты уточненного контроля и прочностные расчеты подтверждают допустимость ремонта контролируемой шлифовкой дефекта по его траектории и возможность дальнейшей эксплуатации трубы, в то время как на основе диагностики по традиционным методам, была произведена полная замена участка трубопровода с остановкой транспорта газа, что в свою очередь привело к необоснованным материальным затратам.

2. При длительной эксплуатации газопроводов, возможно их повреждение по схеме подповерхностной коррозии, которая вызывает поверхностные отслоения. В рассмотренном образце, срок эксплуатации которого составил более 50 лет, глубина повреждений оказалась незначительна и составила не более 100 мкм. Дефекты вызваны микроповреждениями изоляции. Так же, на основе результатов исследований, можно сделать вывод, что при эксплуатации трубопроводов с внутренними кольцевыми напряжениями в два раза меньшими предела текучести, структурные и механические изменения, развивающиеся в течении 50 лет, незначительны.

Полученные результаты, обосновывающие продолжение эксплуатации с однозначным подтверждением несущей способности объектов, соответствуют политике газотранспортных компаний в сфере контроля технического состояния и обслуживания опасных производственных объектов. Подобный подход позволяет значительно сократить затраты на проведение ремонтных мероприятий с безусловным сохранением безопасности при транспорте природного газа.

## **Глава 4 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ ТРУБ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ**

### **4.1 Оценка влияния внутренних раскатанных включений в металле труб**

В разделе рассмотрены внутренние включения в сварной трубе в виде трещиноподобных дефектов (образец описан в п.2.1.3). Результаты исследований докладывались на конференциях [74, 109, 111], изложены в российских и иностранных журналах [75, 77] входящих в перечень ВАК, индексируемых SCOPUS и WoS.

#### *4.1.1 Методы и условия обнаружения дефектов*

##### 4.1.1.1 Результаты внутритрубного технического диагностирования

Рассматриваемый дефектный участок электросварной прямошовной трубы газопровода был обнаружен при ВТД – участок был идентифицирован как технологический дефект. Внутритрубная диагностика проводилась впервые с момента эксплуатации. Было осуществлено в общей сложности семь пропусков внутритрубных снарядов: четыре очистных поршня, и три диагностических снаряда. В результате пропуска очистных поршней из газопровода было удалено 176 кг загрязнений, диагностическими снарядами вынесено дополнительно еще около 50 кг загрязнений. Общая протяженность обследуемого участка составила 44,69 км. Нештатных ситуаций, застревания оборудования или разрыва газопровода не происходило.

При прохождении обследуемой трубы все три диагностических снаряда показали аномалии в зоне отслоившегося участка. Сечение по дефектной зоне показано на рисунке 4.1.

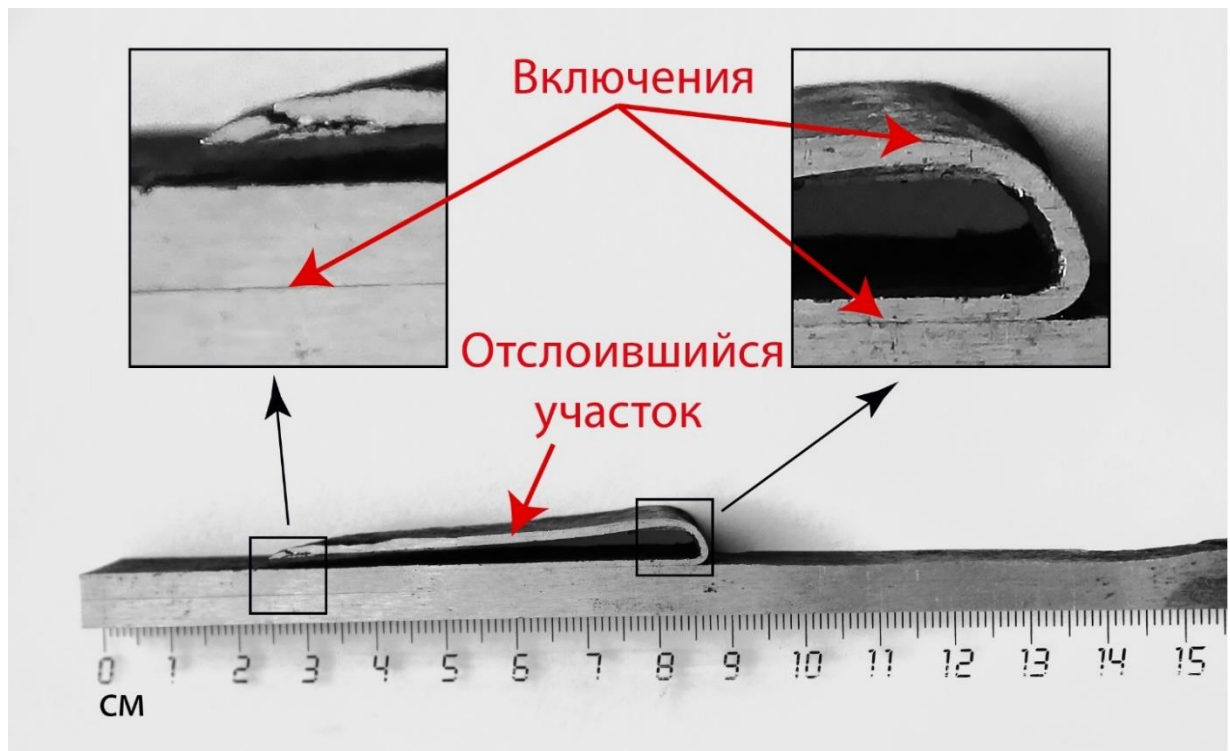


Рисунок 4.1 – Вырезанный дефектный участок трубы с отслоением

Показания от снарядов как продольного, так и поперечного намагничивания были интерпретированы как локальная потеря металла. Показания от профилемера не были сопоставлены с аномалиями, т.к. явных свидетельств изменения геометрии на участке трубы не зафиксировано, а колебания могли быть вызваны рядом других причин. Тем не менее, при сопоставлении фактической конфигурации внутренней поверхности обследуемой трубы после вырезки, магнитограмм от поперечного (рисунок 4.2а) и продольного (рисунок 4.2б) намагничивания и результата визуализации пропуска профилемера (рисунок 4.2в), демонстрирующего колебательные движения при пересечении зоны дефекта, получен явный диагностический признак, позволяющий на основе данных ВТД точно классифицировать дефектный участок как отслоение металла с выходом на внутреннюю поверхность сопровождаемое загибом отслоившейся части.

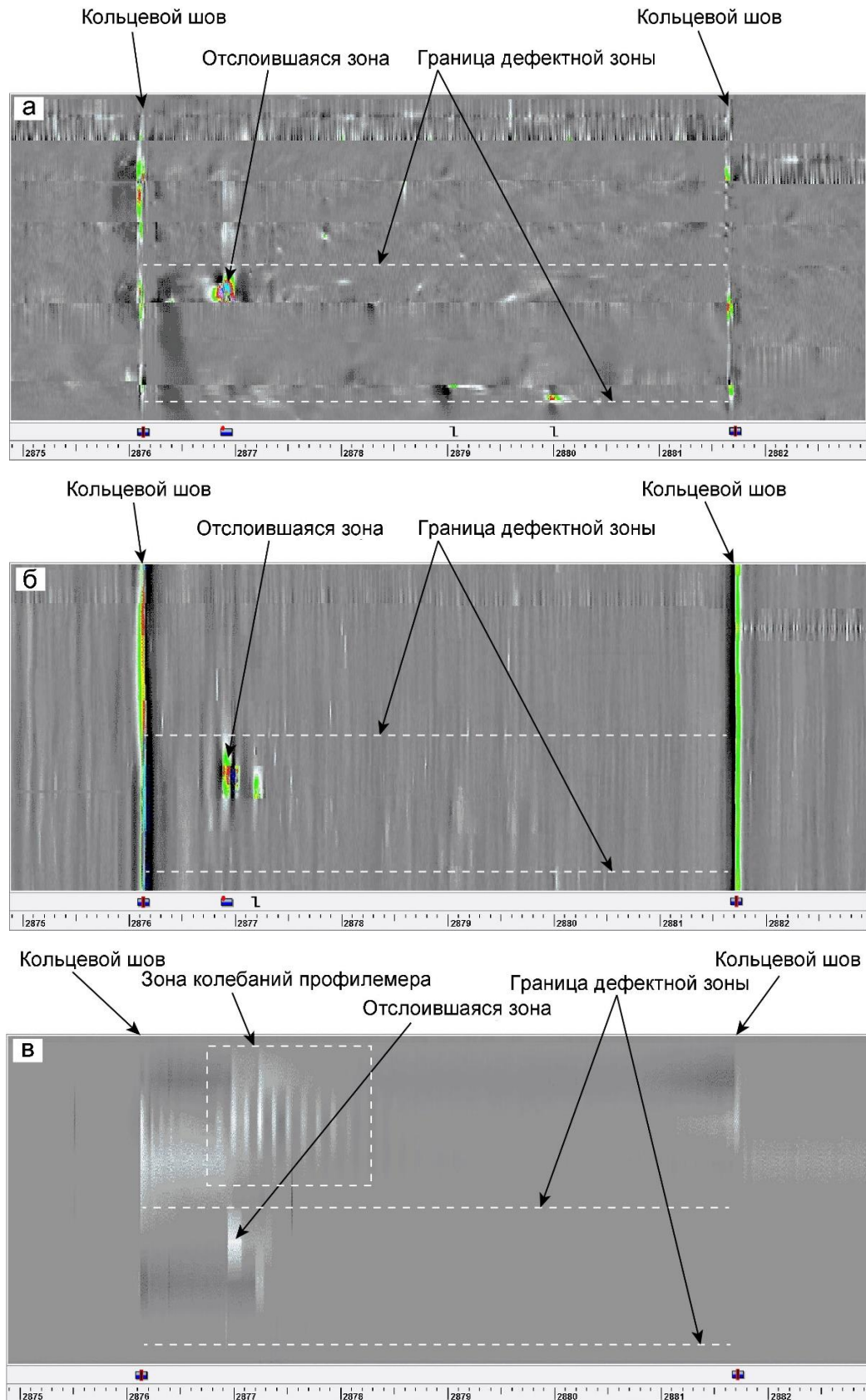


Рисунок 4.2 – Результаты ВТД (а – магнитограмма снаряда поперечного намагничивания, б – магнитограмма снаряда продольного намагничивания, в – визуализация прохождения профилемера)



Дефекты такого рода встречаются крайне редко, поэтому не имели достаточных критериев для идентификации. Ширина загнутой части металла составляет около 40 мм, при толщине от 1,0 до 1,5 мм, изгиб отслоившейся части с высокой вероятностью произошел при пропуске очистного поршня.

При отсутствии данной деформации, дефект трубы в виде внутренних расслоений не был бы обнаружен, так как чувствительности магнитных снарядов не хватает для обнаружения внутренних локальных расслоений, толщиной до 1 мм. По результатам обработки данных ВТД, было принято решение о проведении диагностирования дефектного участка методами неразрушающего контроля в шурфе.

#### 4.1.1.2 Результаты неразрушающего контроля в шурфе

На внешней поверхности трубы дефекты типа отслоений отсутствуют. По результатам визуального осмотра дефектов не обнаружено. При ультразвуковой толщинометрии было выявлено, что труба имеет расслоения по всей длине трубы по окружности до 400 мм, что составляет около 40% периметра. Расслоения расположены на различной глубине от 2,0 мм. Локализацию непосредственно места дефекта размером 104x47 мм, показанного по результатам ВТД, произвести не удалось, тем не менее, обнаруженные дефекты по нормативным требованиям [88, 93] недопустимы. Участок был вырезан и подвергнут более подробным исследованиям в лабораторных условиях.

Проведен осмотр внутренней поверхности трубы (рисунок 2.4), локализован и определен дефект в виде отслоившегося участка металла, который повлиял на показания внутритрубных снарядов. Размеры составили 80x50 мм, что сопоставимо с результатами ВТД.

Проведена пошаговая ультразвуковая толщинометрия с шагом 2 мм по всему периметру трубы над участком с видимым отслоением (рисунок 4.3) и над соседним участком, расположенным на расстоянии 300 мм (рисунок 4.4). Построены толщинограммы, отображающие сечение профиля трубы. По результатам выявлено, что распределение множественных дефектов по высоте

стенки трубы не позволяет напрямую, с высокой степенью достоверности, определить наличие выходящих на внутреннюю поверхность расслоений.

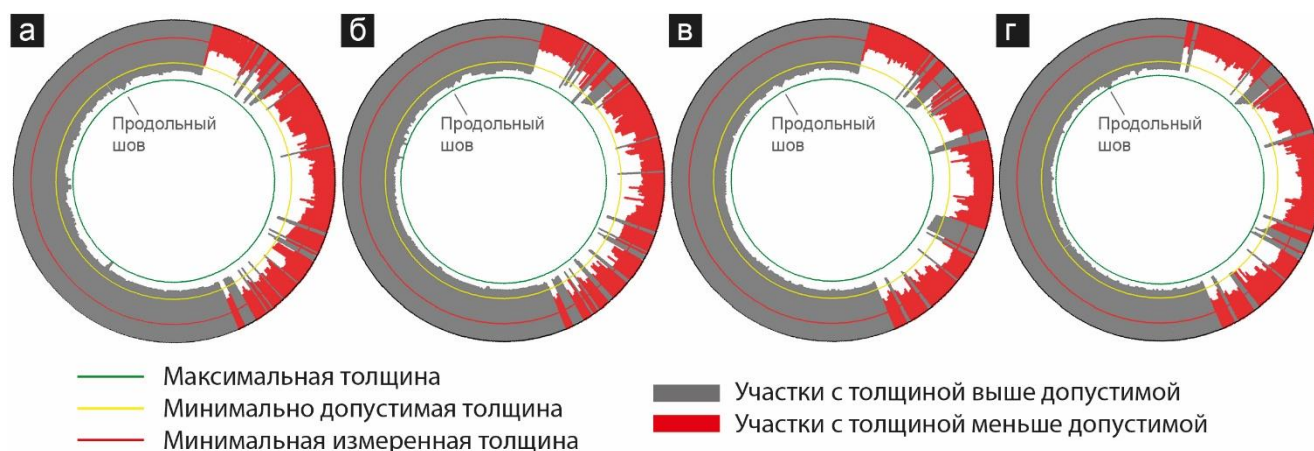


Рисунок 4.3 – Результаты пошаговой толщинометрии над зоной с внешним отслоением (а, б, в, г – толщинограммы от ультразвуковых датчиков 1, 2, 3, 4 соответственно)

Отражение сигналов от вышележащих дефектов не позволяет определить наличие ниженаходящихся дефектов или определить толщину стенки, содержащую включения. В данном случае возможно косвенно определить чуть более повышенную дефектность сектора трубы с выходящими наружу расслоениями. На участке без выходящих наружу расслоений присутствуют точки с замерами, проходящими на полную толщину стенки. (рисунок 4.4) Учитывая, что дефекты расслоений по протяжению толщины стенки не были обнаружены магнитным внутритрубным методом, подтвердить наличие внутреннего отслоения, выходящего наружу, без прямого доступа к внутренней поверхности, возможно только с применением радиографического контроля. Однако и такой контроль отобразит дефекты только при явном изгибе отслоившегося участка. Следует так же отметить, что проведение радиографического контроля на протяженных участках будет экономически затратно и займет продолжительное время. В рассматриваемом случае, участок, отстоящий от зоны с отслоением, показывает несколько меньшую плотность дефектов, что выражено в разбиении протяженного дефектного участка на несколько более мелких. Обнаружение и оценка опасности

участков с расслоениями подобного характера остается актуальной задачей, требующей на данный момент поиска дополнительных решений, что также отмечено в работе [56].

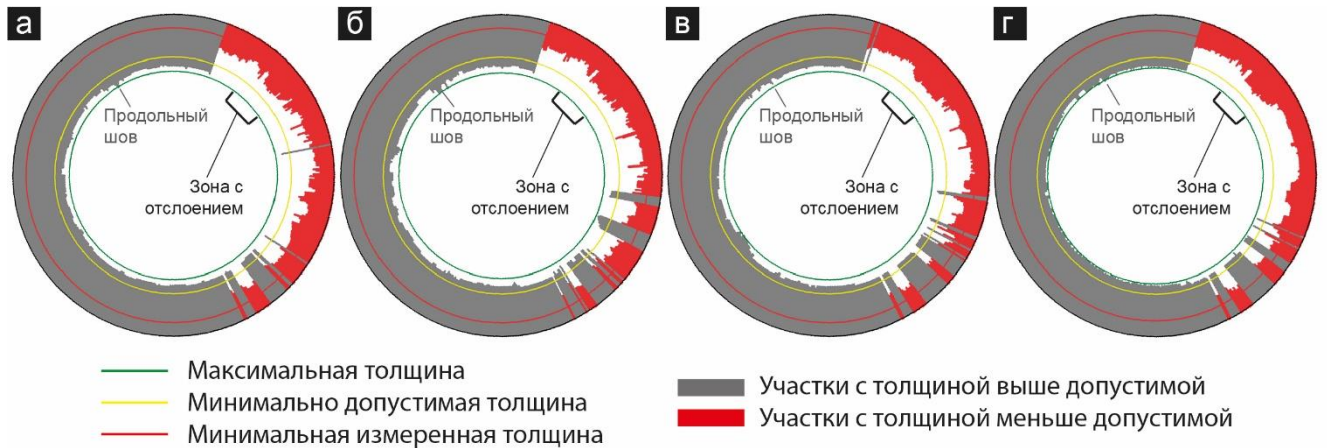


Рисунок 4.4 – Результаты пошаговой толщинометрии над участком без внешнего отслоения (а, б, в, г – толщинограммы от ультразвуковых датчиков 1, 2, 3, 4 соответственно)

#### 4.1.2 Анализ структуры дефектов

##### 4.1.2.1 Макроанализ по боковой поверхности образцов.

Проведен осмотр боковой поверхности вырезанных образцов (рисунок 4.5).

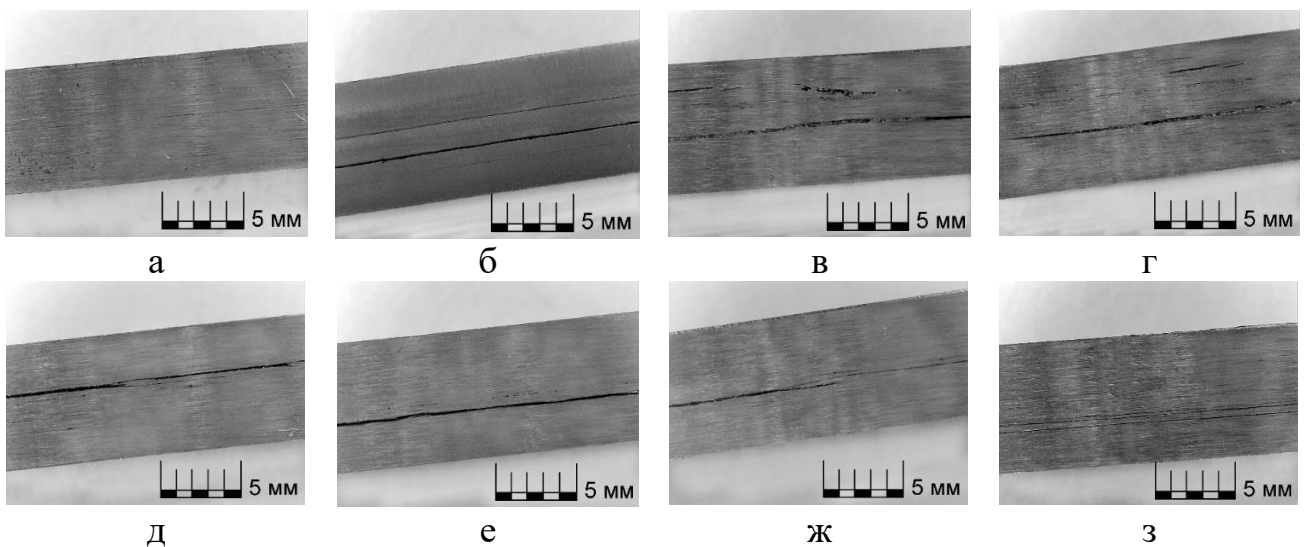


Рисунок 4.5 – Срезы стенки трубы с плоскостными включениями различного количества, расположения и толщины

На образцах зафиксированы видимые глазом или при небольшом увеличении плоскостные включения в стенке трубы. Включения по протяженности и расположению отличаются значительной разнородностью. Часть включений (рисунок 4.5а) расположены примерно по оси стенки, что соответствует наиболее распространенной схеме образования расслоений по причинам дендритной ликвации. Однако в большинстве рассматриваемых образцов включения разделяли стенку трубы на несколько слоев (рисунок 4.5б, 4.5з), содержали дополнительные дефекты объемного и плоскостного характера (рисунок 4.5в, 4.5г), смещались к внешней (рисунок 4.5д) или внутренней (рисунок 4.5е) поверхности трубы. Основная часть включений располагалась со смещением от оси стенки трубы и включала дополнительные параллельные строчные или короткие плоскостные включения (рисунок 4.5в, 4.5г, 4.5е). Так же некоторые включения разветвлялись по ходу распространения переходя на другой слой или образовывали несколько параллельных полос (рисунок 4.5д, 4.5ж). Расстояние между включениями составляло от 0,1...4,0 мм.

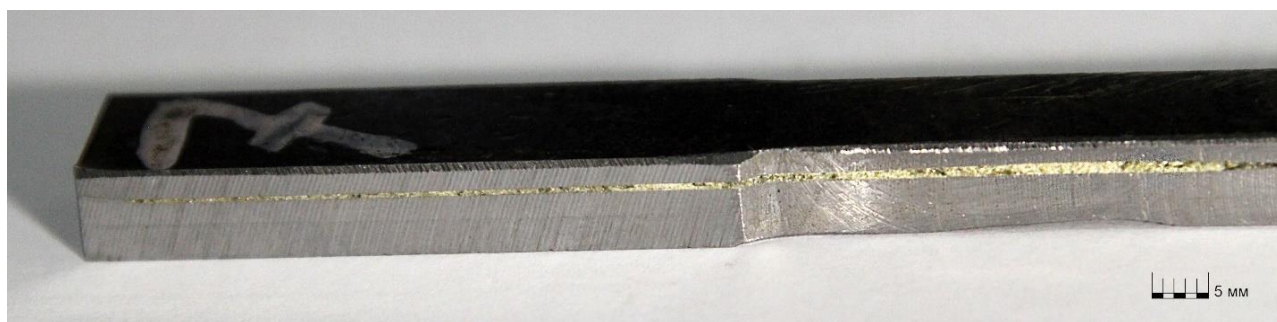


Рисунок 4.6 – Образец трубы с плоскостными включениями с изменением по толщине от 0,1 до 1,0 мм

Следует так же отметить, что включения имеют различную протяженность и толщину (рисунок 4.6), что свидетельствует о наличии в исходной заготовке множественных отдельных дефектов, впоследствии раскатанных при производстве листовой заготовки.

#### 4.1.2.2 Оптическая микроскопия боковой поверхности образцов.

Проведен анализ макроструктуры основного металла образцов. При осмотре микрошлифов без травления обнаружены многоуровневые, протяженные расслоения различной толщины (рисунок 4.7).

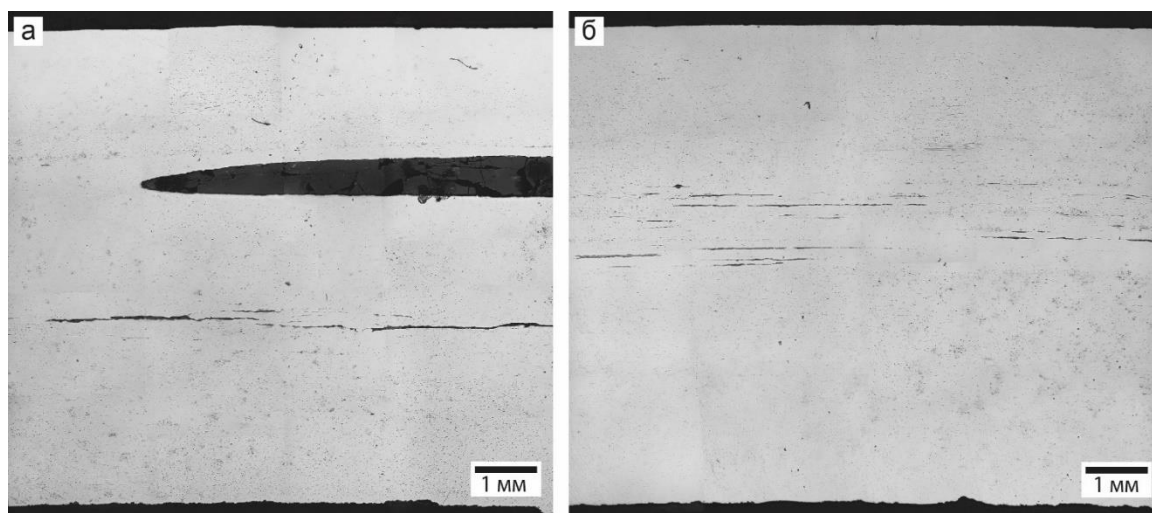


Рисунок 4.7 – Оптическая микроскопия дефектных участков до травления (а – с дефектами значительной толщины, до 1 мм; б – с множественными раскатанными дефектами, толщиной до 5 мкм)

Для подготовки микрошлифов были отобраны различные участки образцов. По результатам осмотра уточнены характеристики дефектных зон. Кроме обнаруженных при макроанализе дефектов, дополнительно были обнаружены более тонкие несплошности в основном металле, имеющие различную протяженность (рисунок 4.8). Основной металл феррито-перлитной структуры, с явно выраженной полосчатостью и анизотропией прокатки. По толщине стенки обнаружены обезуглероженные зоны, как соседствующие с инородными включениями, так и образующие полосчатую структуру в основном металле.

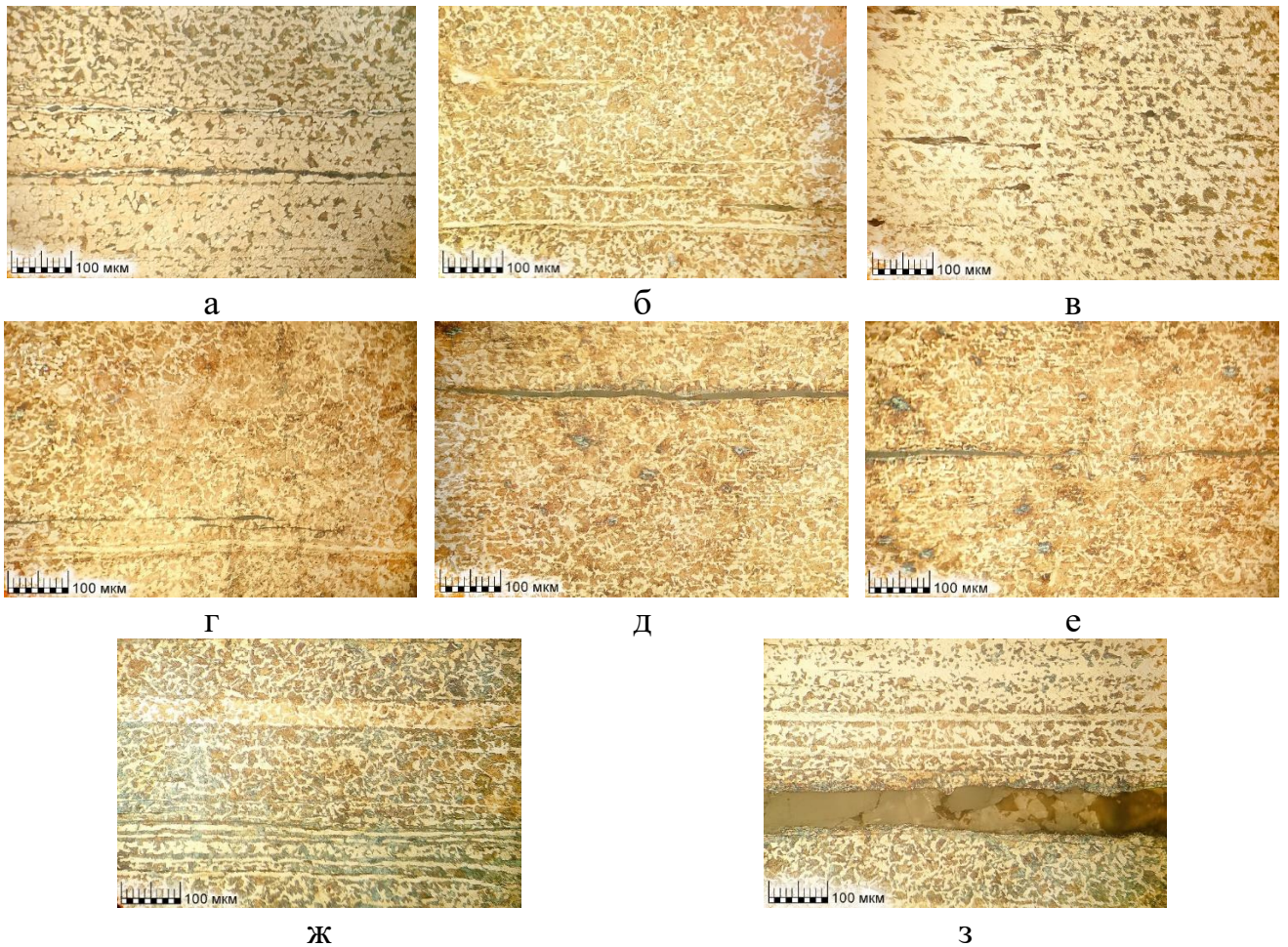


Рисунок 4.8 – Несплошности и особенности строения стенки трубы (а – протяженные параллельные раскатанные включения от 0,1 до 10 мкм; б – вытянутые включения, металл с ферритными прослойками; в – точечные и вытянутые включения; г – протяженные параллельные включения, ферритная прослойка; д – протяженные включения толщиной 10 мкм; е - прерывистые включения толщиной до 5 мкм; ж – полосчатая структура металла, со слоями феррита и перлита; з – протяженные включения шириной до 50 мкм)

По результатам осмотра так же зафиксированы участки с различным соотношением зерен феррита и перлита, что свидетельствует о дополнительной химической неоднородности металла по толщине стенки.

На части образцов вокруг раскатанных включений зафиксированы обезуглероженные зоны (рисунок 4.8а), часть образцов имеет слоистую структуру, с включениями слоев феррита (рисунок 4.8б, 4.8г, 4.8ж, 4.8з). Раскатанные включения имеют не только протяженную, но и точечную (рисунок 4.8в) и

вытянутую структуры (рисунок 4.8б, 4.8в). На некоторых образцах присутствуют отличия в процентном отношении феррита к перлиту и, соответственно, неоднородность по зерновому составу в слоях металла по толщине стенки (рисунок 4.8а, 4.8ж, 4.8з). Обнаружены как протяженные, так и прерывистые включения толщиной до 15 мкм (рисунок 4.8д, 4.8е). Ширина включений меняется в значительном диапазоне от 0,1 мкм до 1 мм. Включения встречаются практически по всей толщине дефектного участка стенки трубы.

#### 4.1.2.3 Фрактография образцов раскрытых по плоскостям проката.

Изображения поверхностей слоев различного типа и уровня очистки приведены на рисунке 4.9.

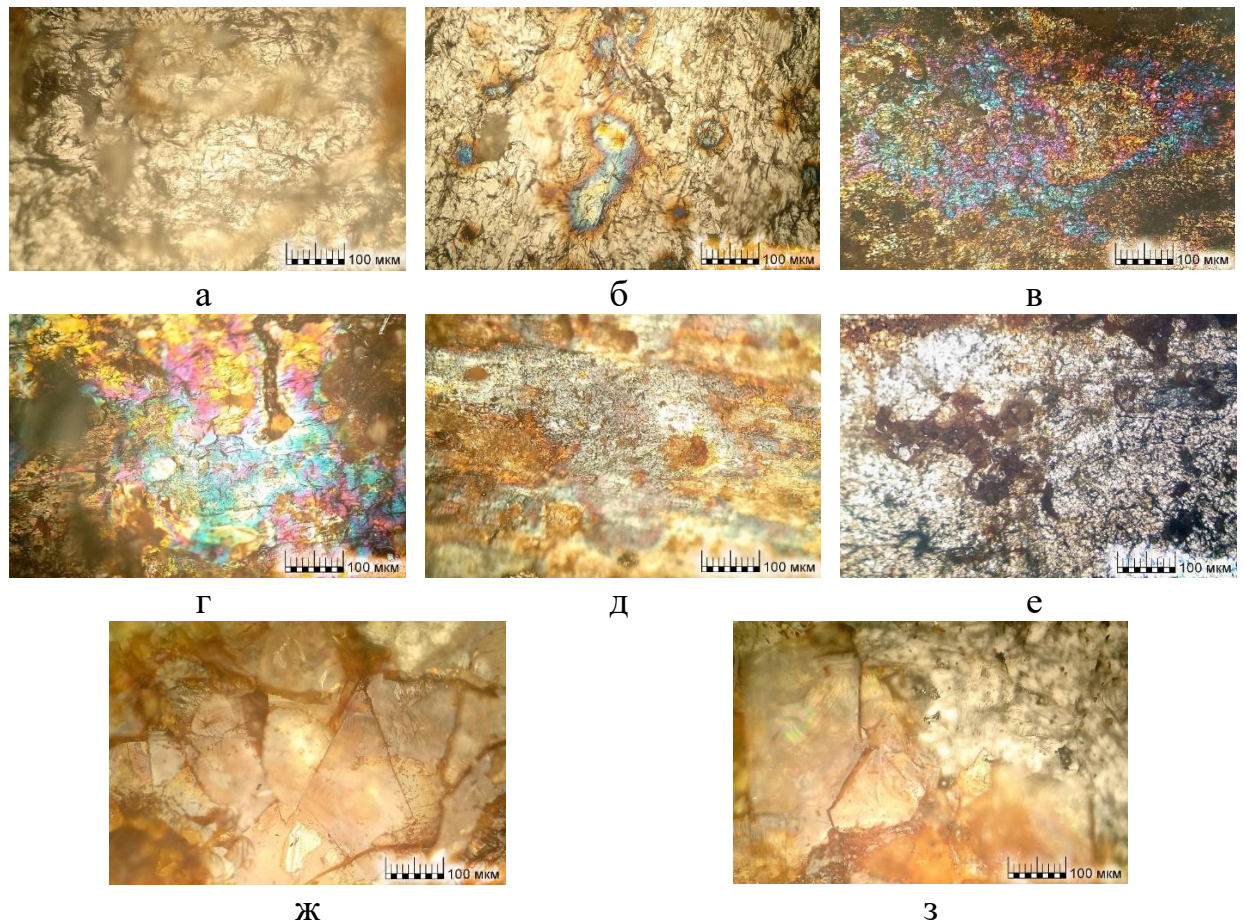


Рисунок 4.9 – Макроструктура поверхности слоев по плоскостям включений (а – не окисленный металл на внутреннем слое; б, в, г – точечное и площадное окисление поверхности; д, е – оксиды; ж, з – силикаты)

Обнаружены участки поверхности с «цветами побежалости», перепад цветов для стали подробно рассмотрен в работе [16], однако участки перегрева в образцах локальны, и образованы в процессе проката.

#### 4.1.2.5 Микрорентгеноспектральный анализ.

Проведен микрорентгеноспектральный анализ дефектных зон. Определен химический состав поверхности стали и продуктов в расслоениях. Рассмотрены структурные различия дефектных зон (рисунок 4.10). Результаты измерений занесены в таблицу 4.1.

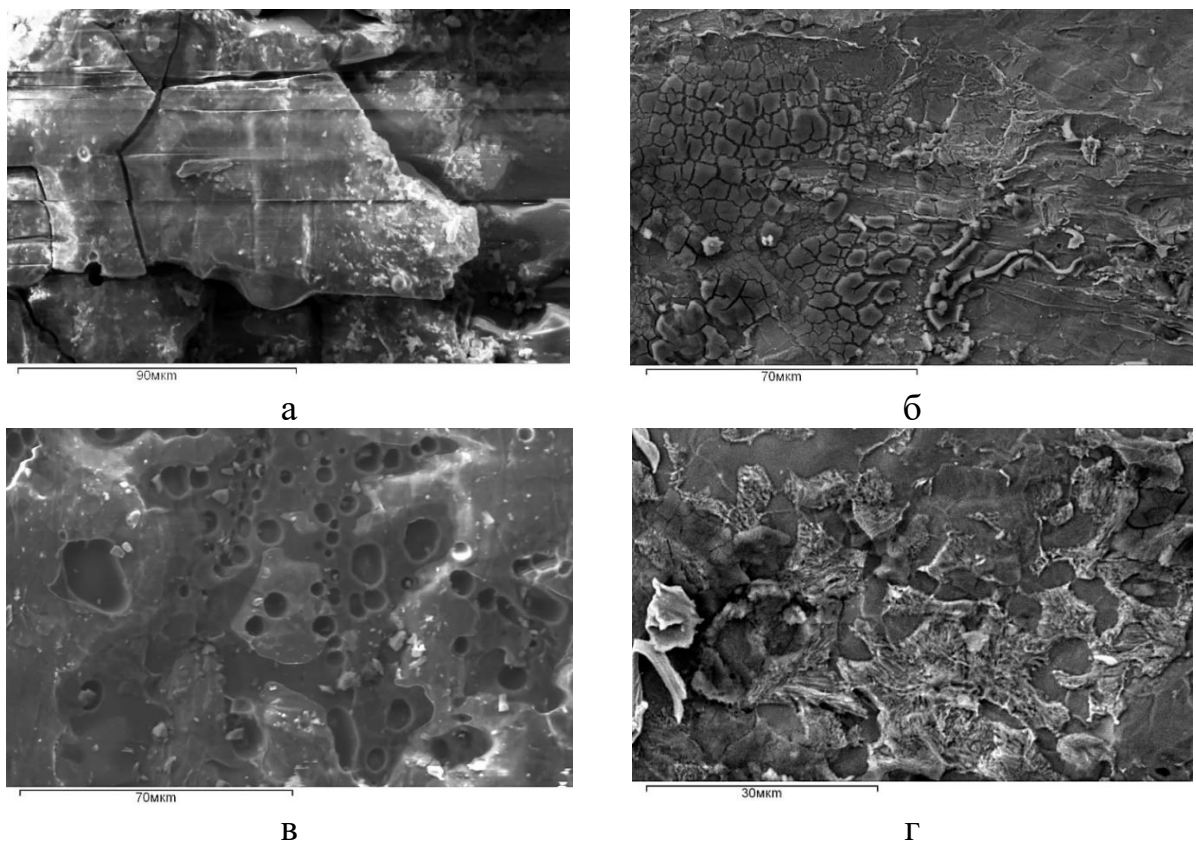


Рисунок 4.10 – Микрорентгеноспектральный анализ дефектной зоны (а – хрупкие стекловидные включения; б – места со следами высокотемпературных воздействий; в – включения без выраженного растрескивания; г – поверхность, частично очищенная от налета)

Состав поверхности образцов в дефектных зонах выражен несколькими основными химическими соединениями. По результатам анализа спектров в расслоениях обнаружены остатки шихтовых материалов. Совместное наличие



фтора и кальция, указывает на остатки не растворенного плавикового шпата (фторида кальция,  $\text{CaF}_2$ ), который используется в качестве флюса в плавильных печах. Оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и кварцевое стекло ( $\text{SiO}_2$ ), основные по количественному составу включения, являются остатками шамотного боя, который используется для частичной замены плавикового шпата. Также в небольшом количестве обнаружены сложные силикаты железа и марганца ( $n\text{FeO}\cdot m\text{MnO}\cdot p\text{SiO}_2$ ). Часть расслоений содержит раскатанную окалину ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), образованную в усадочных раковинах и газовых пузырях. Сера (S), являющаяся наиболее влияющим на дендритную ликвацию элементом, обнаружена в незначительном количестве лишь в одной из дефектных зон образца.

Таблица 4.1 – Содержание химических элементов по различным слоям расслоений.

Элемент	Весовой состав элементов, %				
	Спектр 1 (рисунок 4.10а)	Спектр 2 (рисунок 4.10б)	Спектр 3 (рисунок 4.10в)	Спектр 4 (рисунок 4.10г)	Спектр 5 (рисунок 4.11б)
O	54,06	22,10	44,74	8,96	33,21
F	6,20	0,32	–	–	–
Na	–	1,12	–	–	–
K	0,24	–	0,36	–	–
Mg	1,64	–	1,55	–	–
Ca	7,40	–	11,99	–	–
Al	5,09	–	5,53	–	–
Si	18,57	0,24	19,52	0,42	–
Mn	3,55	0,21	7,93	0,79	0,33
Fe	0,41	65,3	6,27	81,46	62,76
S	–	–	0,27	–	–
C	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.

Несмотря на то, что результаты исследований показывают, что несплошности в стенке трубы получены в результате проката образованных при производстве эндогенных, не выведенных в шлак включений, в пределах этих включений происходили процессы по механизму дендритной кристаллизации, с образованием кристаллов идеальной шарообразной формы. При этом, часть таких

кристаллов, находясь внутри более хрупких включений, сохранились в процессе проката (рисунок 4.11):

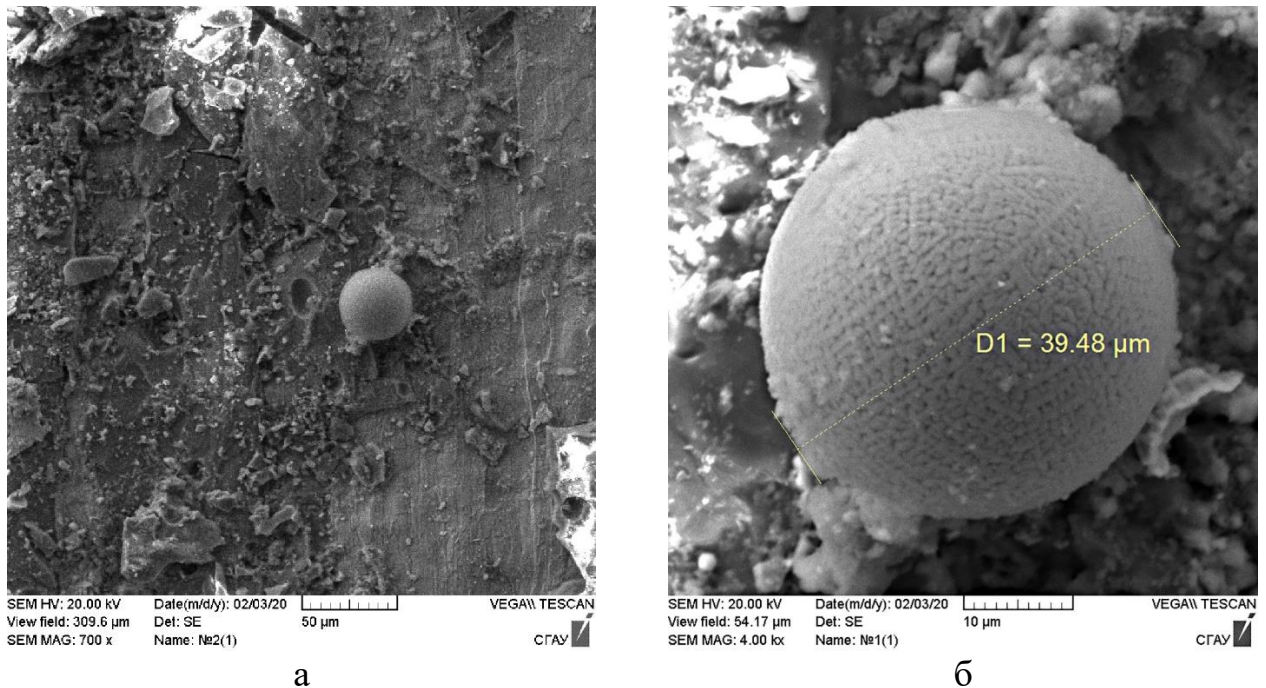


Рисунок 4.11 – Шарообразные кристаллы дендритов в расслоении (а – участок расслоения с кристаллом; б – укрупненный вид кристалла)

По химическому составу обнаруженные кристаллы такой формы состоят из оксида железа (таблица 4.1, спектр 5).

#### 4.1.3 Анализ химического состава с применением оптико-эмиссионного спектрометра

Результаты контроля металла трубы с применением оптико-эмиссионного спектрометра PMI-Master UVR-PRO приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Анализ химического состава материала трубы.

	Химический элемент								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	S	P
Дефектная труба	0,214	0,281	0,534	0,07	-	0,026	0,045	0,01	-
ГОСТ 1050-88	0,17	0,17	0,35	<0,25	<0,3	<0,3	-	0,035	0,03
	...	...	...						
	0,24	0,37	0,65						

При проведении контроля отклонений предельных значений компонентов сплава не выявлено, по своему составу материал полностью соответствует стали марки 20 по ГОСТ 1050-88, что указано в сертификате на трубу. Однако, как видно из вышеприведенных исследований, возможны изменения химического состава по глубине объекта, которые невозможно проанализировать таким способом.

#### *4.1.4 Измерения микротвердости*

При измерениях микротвердости выявлена значительная разнородность показаний на дефектных участках, связанная с химической неоднородностью металла около включений и самими включениями. На бездефектных образцах значения микротвердости лежали в пределах от 159 до 172 HV<sub>0.3/10</sub>. На дефектных образцах минимальная измеренная микротвердость составляла от 152 HV<sub>0.3/10</sub>, максимальная достигала 238 HV<sub>0.3/10</sub>. Аномальные показания располагаются ближе к середине стенки, на участках, представляющих собой ферритные прослойки с меньшей твердостью, и локальных участках с повышенной концентрацией углерода и зернами перлита, имеющими более высокую твердость. Также определено, что отклонения занимают не более трети толщины стенки. Такое отклонение физических характеристик, в наибольшей степени должно отразиться на характеристике относительного удлинения образцов при испытаниях на разрыв, однако наличие включений, расположенных на разных уровнях по толщине стенки не позволяет однозначно спрогнозировать результаты механических испытаний.

#### *4.1.5 Ультразвуковая толщинометрия образцов с уточненной визуальной толщиной расслоений*

Ультразвуковая толщинометрия проведена на вырезанных образцах, над дефектными областями с уточненными при оптической микроскопии параметрами. Для контроля использовался толщиномер А1210 с двумя преобразователями с частотами 4,0 и 2,5 МГц. Толщиномер переключен в режим индикации амплитуды исследуемого сигнала в режим А-Scan. Значительных расхождений в показаниях

не выявлено, однако контроль совмещенным преобразователем S3567 оказался более предпочтительным, за счет меньшего влияния ориентации установки датчика на изделия, чем контроль раздельно-совмещенным преобразователем.

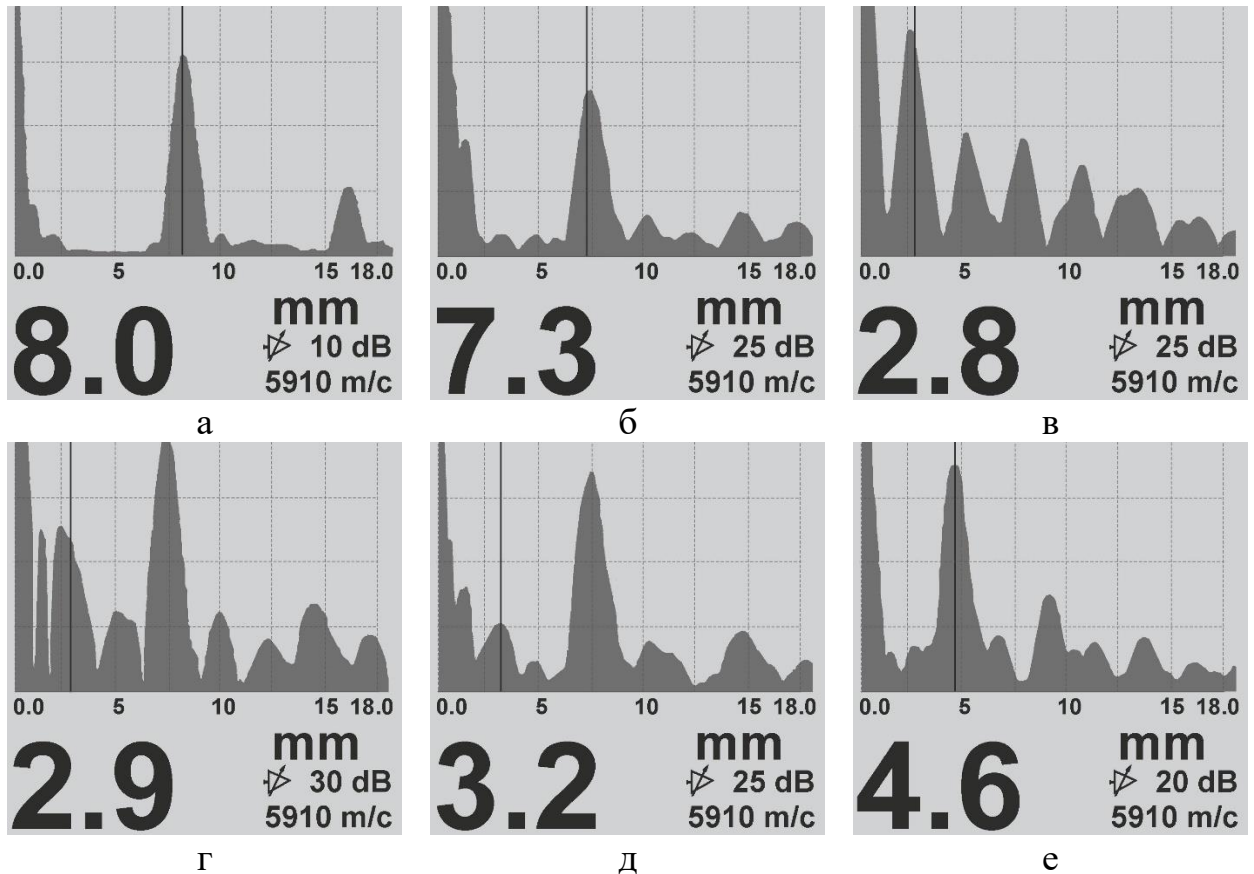


Рисунок 4.12 – Развертка эхосигналов ультразвуковых измерений (а – показания на бездефектном образце толщиной 8 мм; б – показания на стенке трубы в месте отсутствия дефектов с незначительной внутренней коррозией; в – показания над дефектным участком с толщиной включений более 200 мкм; г – показания над дефектным участком с многослойными включениями до 20 мкм; д – показания над дефектным участком с включениями толщиной до 20 мкм; е – показания над дефектным участком с включениями толщиной более 100 мкм)

Ультразвуковые измерения над дефектными участками показали относительную зависимость измерений от толщины включений. В силу кривизны поверхностей, различного состава и плотности включений, точный размер их толщины на основе ультразвукового контроля сделать не представляется

возможным. Однако, проведенные на вырезанных образцах замеры показали, что в подавляющем большинстве случаев одиночные точечные и не протяженные включения, толщиной до 5 мкм, раскатанные ферритные полосы и отличающиеся по феррито-перлитной структуре участки практически не оказывают влияния на показания. Включения до 15-20 мкм создают полупрозрачную для ультразвуковой волны среду, ослабляющую энергию донного сигнала (рисунок 4.12г, 4.12д), при этом, на экране приборов можно увидеть сигналы от нескольких слоев отражателей: от дефектного участка и от нижней стенки изделия. В большинстве случаев, такие сигналы соответствуют ликвационным зонам и зонам с частичной заваркой расслоений. Протяженные включения толщиной более 20 мкм, чаще всего создают для ультразвуковой волны непрозрачное препятствие (рисунки 4.12в, 4.12е), истинную толщину изделия при этом определить практически невозможно. По результатам проведенных замеров составлена таблица влияния толщины и формы включений на показания толщиномера (рисунок 4.13). По приведенным признакам имеется возможность косвенно оценить толщину включений и степень поврежденности металла.

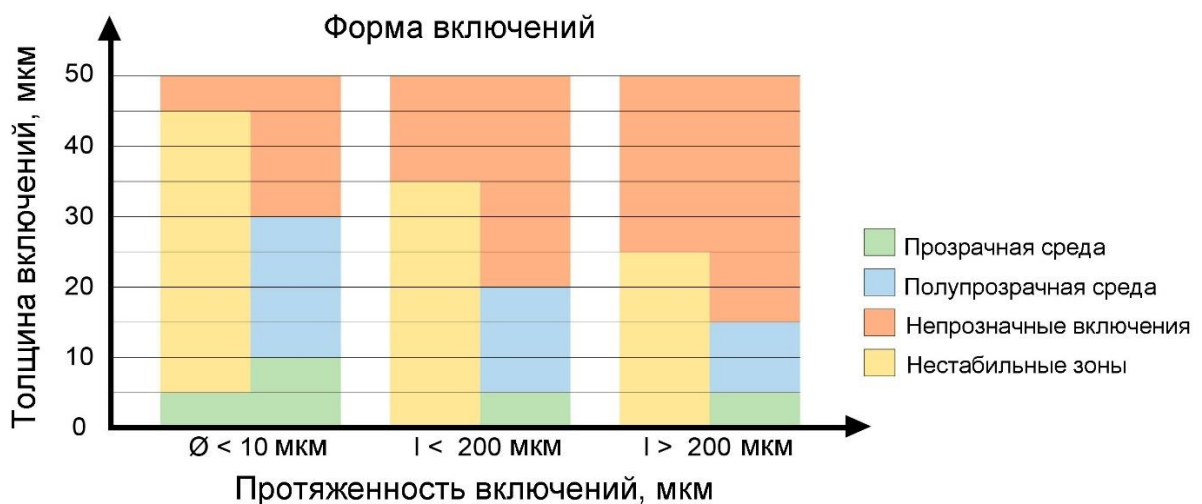


Рисунок 4.13 – Влияние толщины и характера включений на результаты  
ультразвукового контроля

В переходных зонах показания приборов не стабильны и изменяются при незначительных сдвигах датчика, что наиболее выражено контроле многослойных точечных и вытянутых включений.

#### 4.1.6 Влияние расслоений на склонность к хрупкому разрушению

Динамические испытания на изгиб с надрезом используют для выявления склонности металлов к хрупкому разрушению. Ударная вязкость является комплексной характеристикой, отражающей совокупность прочностных и пластических свойств материала. В основном такие испытания проводят для оценки старения материала труб [42, 44, 45], однако этот показатель так же важен для определения характеристик эксплуатирующихся материалов, в том числе для определения влияния структурных отклонений.

##### 4.1.6.1 Подготовка образцов

Для испытаний подготовлено шесть образцов: три образца вырезанные из бездефектных зон, и три образца из участков с дефектами (рисунок 4.14).

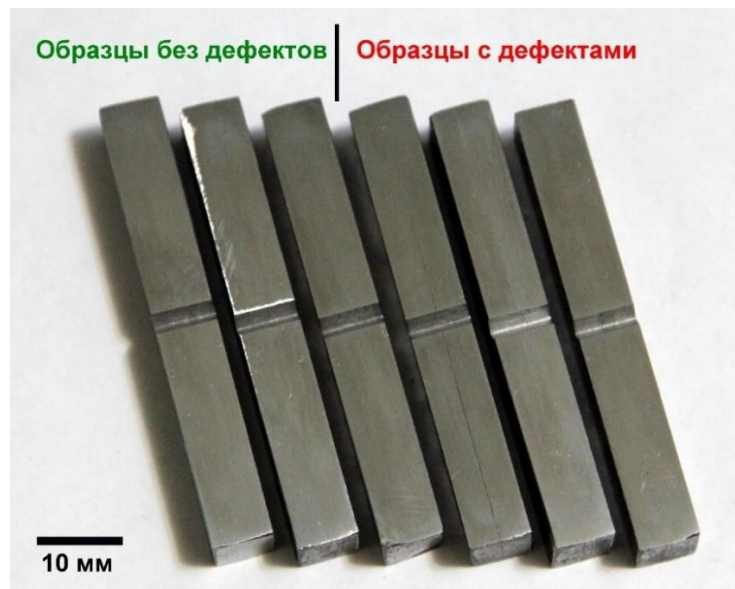


Рисунок 4.14 – Образцы, подготовленные для испытаний на ударную вязкость

При подготовке образцов было забраковано несколько заготовок, распавшихся на части. Испытанию подвергались образцы, в которых дефектные участки не распространялись на полную длину и ширину образцов. V-образные

концентраторы напряжений глубиной 2 мм наносились механическим способом перпендикулярно плоскости проката, чтобы исключить участие слоев без концентраторов напряжений.

#### 4.1.6.2 Фрактографический анализ

Как было выявлено при металлографических исследованиях, материал в дефектных зонах имеет различную структуру, количество слоев, толщину, протяженность и характер включений. В исследуемом объекте все включения параллельны плоскости проката. Кроме того, в дефектных образцах присутствуют зоны химической неоднородности, имеющие отличающуюся от боковых поверхностей твердость.

Исследователями проводились испытания искусственно созданных многослойных образцов [17, 38, 68], которые показывали увеличение значений ударной вязкости независимо от направления изготовления концентратора напряжений. Наибольшее увеличение ударной вязкости ожидаемо происходило при испытаниях с надрезом, выполненным в плоскости, параллельной слоям. Такое увеличение достигалось за счет барьеров распространения трещины, которыми выступали поверхности раздела слоев без инициированного концентратора напряжений. В случаях разрушения образцов со слоями перпендикулярными концентраторам напряжений, ударная вязкость так же увеличивалась, но по другим причинам: за счет дополнительной работы, затрачиваемой на раскрытие межслойных границ. Исследование ударной вязкости образцов с локальными плоскостными дефектами производственной, а не искусственной природы, дополнительно имеющими разнородность химического состава, слабо изучено, однако проведенные испытания показали хорошую сходимость с результатами испытаний искусственно созданных слоистых образцов.

При фрактографическом анализе изломов, бездефектные образцы показали характерную для низкоуглеродистых сталей структуру излома (рисунок 4.15а). Поверхность имеет характерное расположение вязкой волокнистой и хрупкой зон, зону долома с противоположной от примыкающей к надрезу зоне и губы среза по бокам образцов.

Образцы с дефектами отличаются от бездефектных разнородностью поверхностей и уменьшенной или практически отсутствующей зоной хрупкого излома. Дефектные зоны, выраженные тонкими продольными включениями, существенно повысили показатель ударной вязкости. На образцах, содержащих включения наблюдается существенно уменьшенная (рисунок 4.15в, 4.15г) или отсутствующая (рисунок 4.15б) зона хрупкого излома.

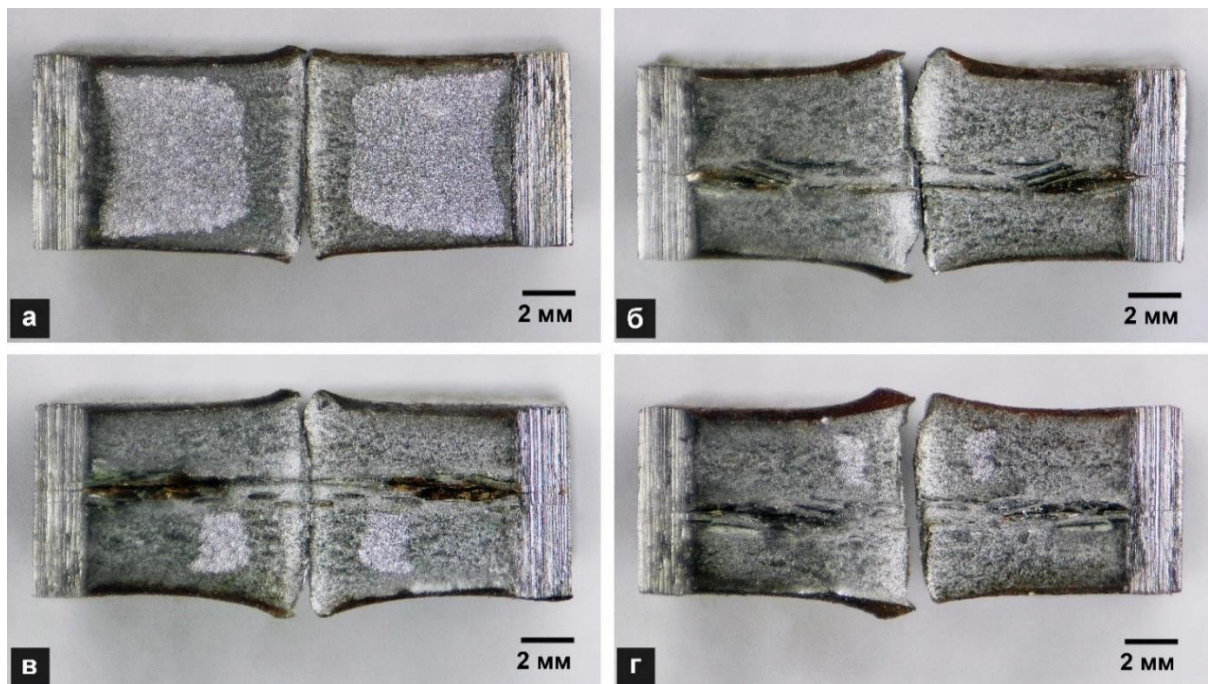


Рисунок 4.15 – Макросъемка излома образцов (а – бездефектный образец, б, в, г – образцы с внутренними дефектами)

#### 4.1.6.3 Уточнение характера изломов по результатам электронной микроскопии

Проведена электронно-сканирующая микроскопия поверхности одного из дефектных образцов после испытаний на ударную вязкость. Рассмотрен образец (рисунок 4.16), макрофото которого представлено на рисунке 4.15г. Незначительный участок имеет хрупкую, транскристаллитную структуру излома (рисунок 4.16б), окружен поверхностью с изломом волокнистой структуры (рисунок 4.16г) с явно выделенной границей перехода (рисунок 4.16в). В образцах не зафиксировано участков с межкристаллитными изломами, что свидетельствует



об отсутствии межзеренной сегрегации вредных частиц или старения стали с выделениями карбидов по границам зерен.

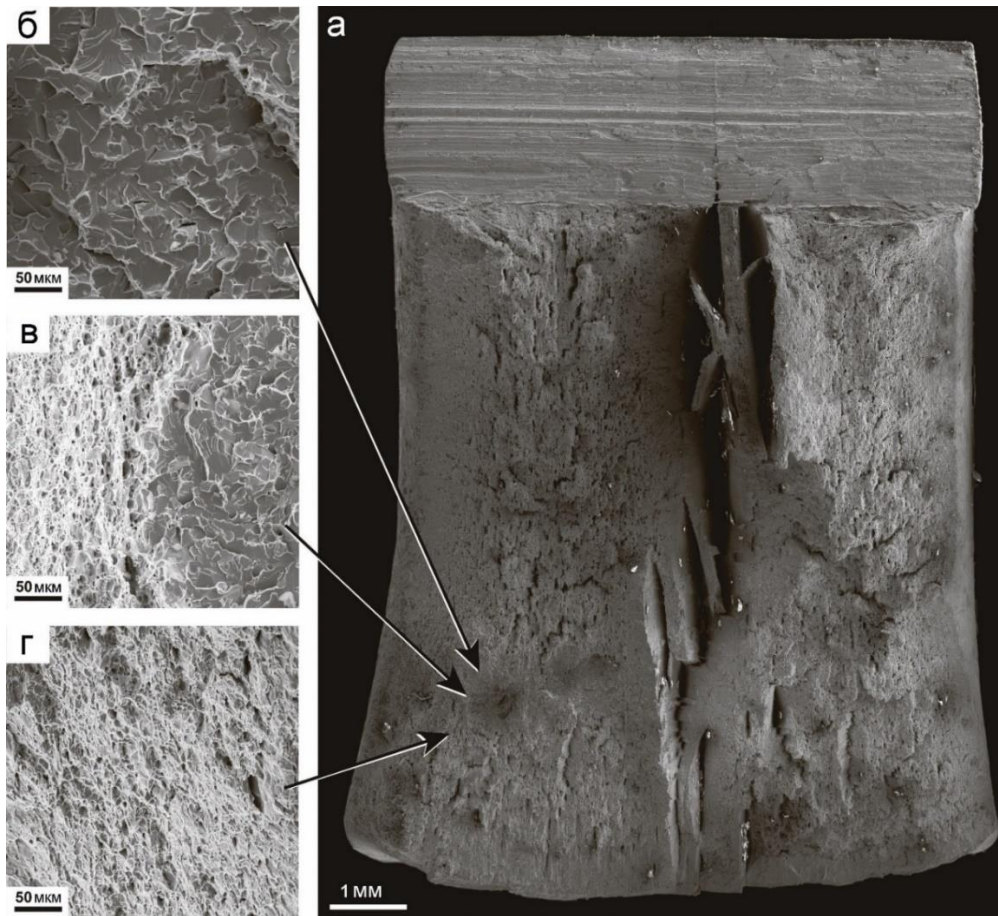


Рисунок 4.16 – Поверхность образца с дефектом после испытаний на ударную вязкость (а – внешний вид поверхности; б – участок хрупкого излома; в – участок с границей хрупкого и вязкого излома; г – участок вязкого излома)

#### 4.1.6.4 Сравнение результатов испытаний

Наличие несвязанных между собой внутренних несплошностей, с максимальной толщиной до 50 мкм, привело к значительному увеличению вязкой составляющей. Среднее значение ударной вязкости образцов с дефектами оказалось более чем в два раза выше, чем у бездефектных (рисунок 4.17).

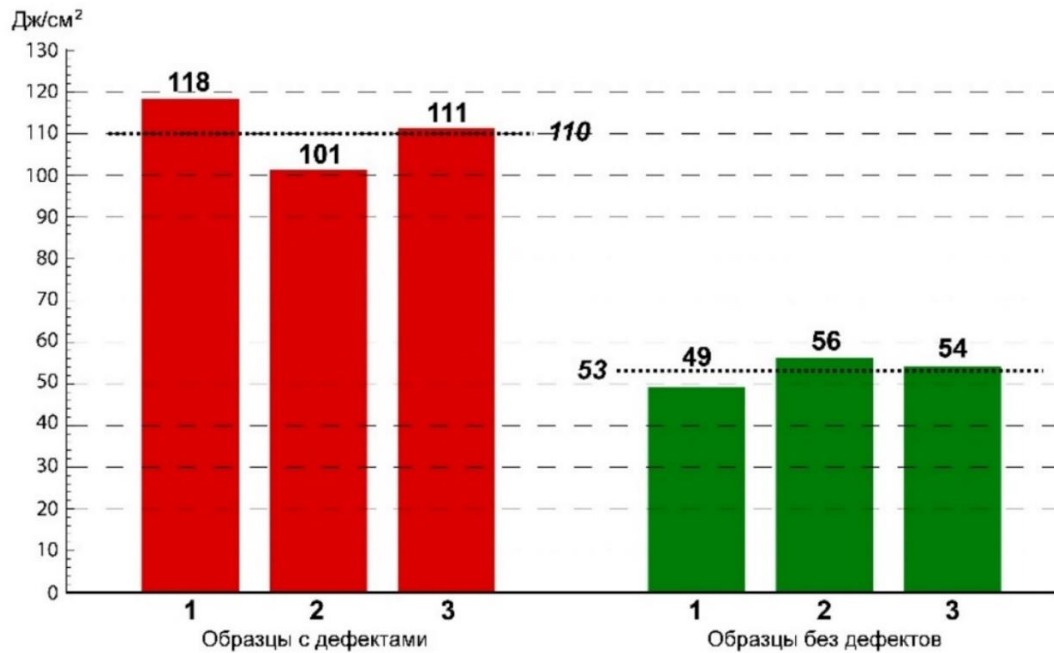


Рисунок 4.17 – Результаты испытаний образцов

#### 4.1.7 Влияние расслоений на результаты при статическом растяжении

Было изготовлено и испытано три бездефектных образца и восемь образцов, вырезанных из дефектных участков. Образцы готовились по типу II в соответствии с [85]. Испытания проводились при температуре окружающей среды 19°C.

##### 4.1.7.1 Диаграммы растяжений

Результаты испытаний бездефектных образцов показали характерные для малоуглеродистых трубных сталей параметры и отличались друг от друга незначительно, отклонения лежали в пределах статистической погрешности и не превышали 1,5%. В качестве базового бездефектного образца принят усредненный полученный результат.

Диаграммы растяжений, построенные по результатам испытаний приведены на рисунке 4.18. Сводные данные по пределу прочности, пределу текучести и относительному удлинению приведены на рисунке 4.19.

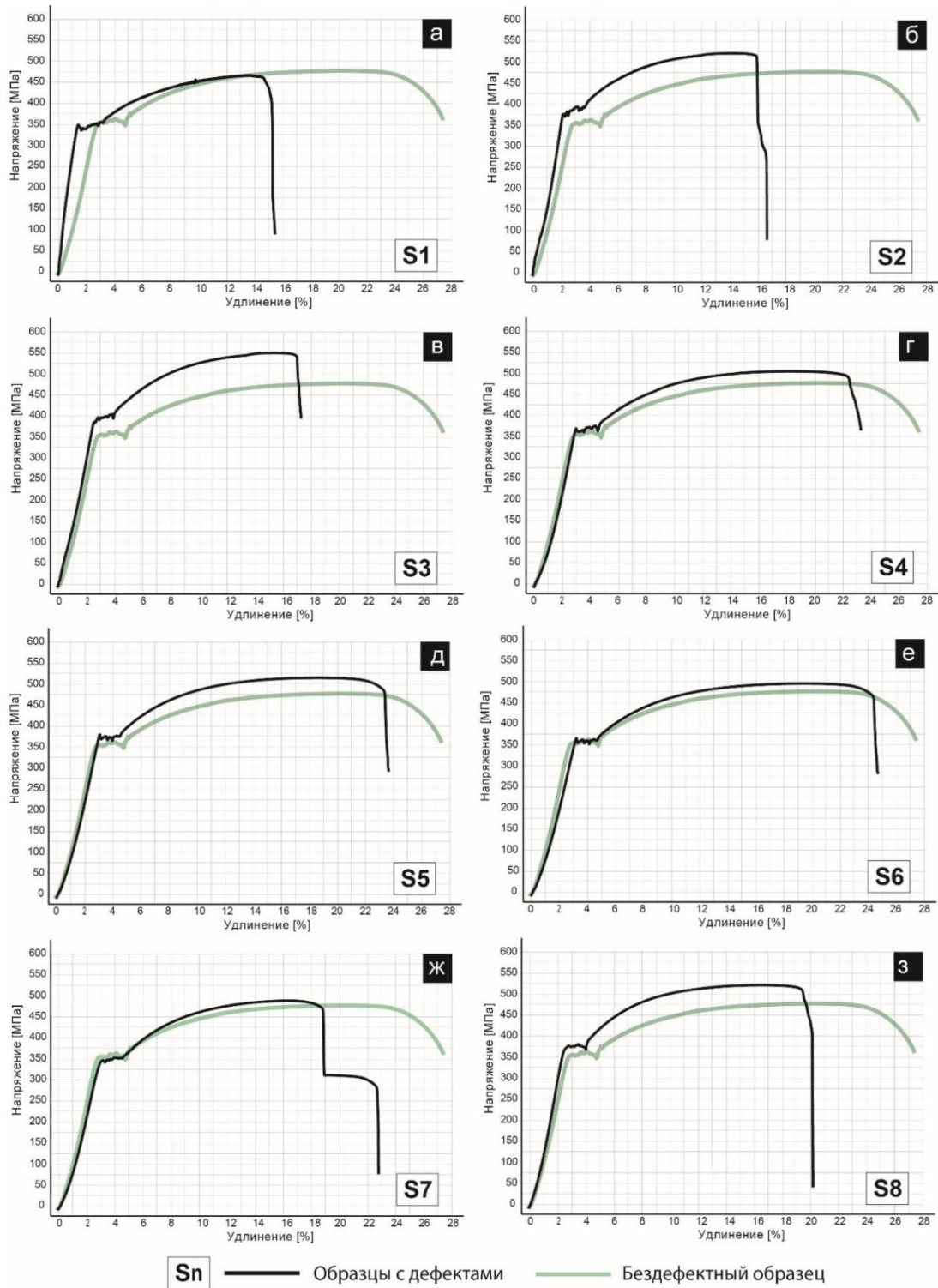


Рисунок 4.18 – Диаграммы растяжений по результатам испытаний (а...з – результаты испытаний образцов с дефектами по сравнению с бездефектным)

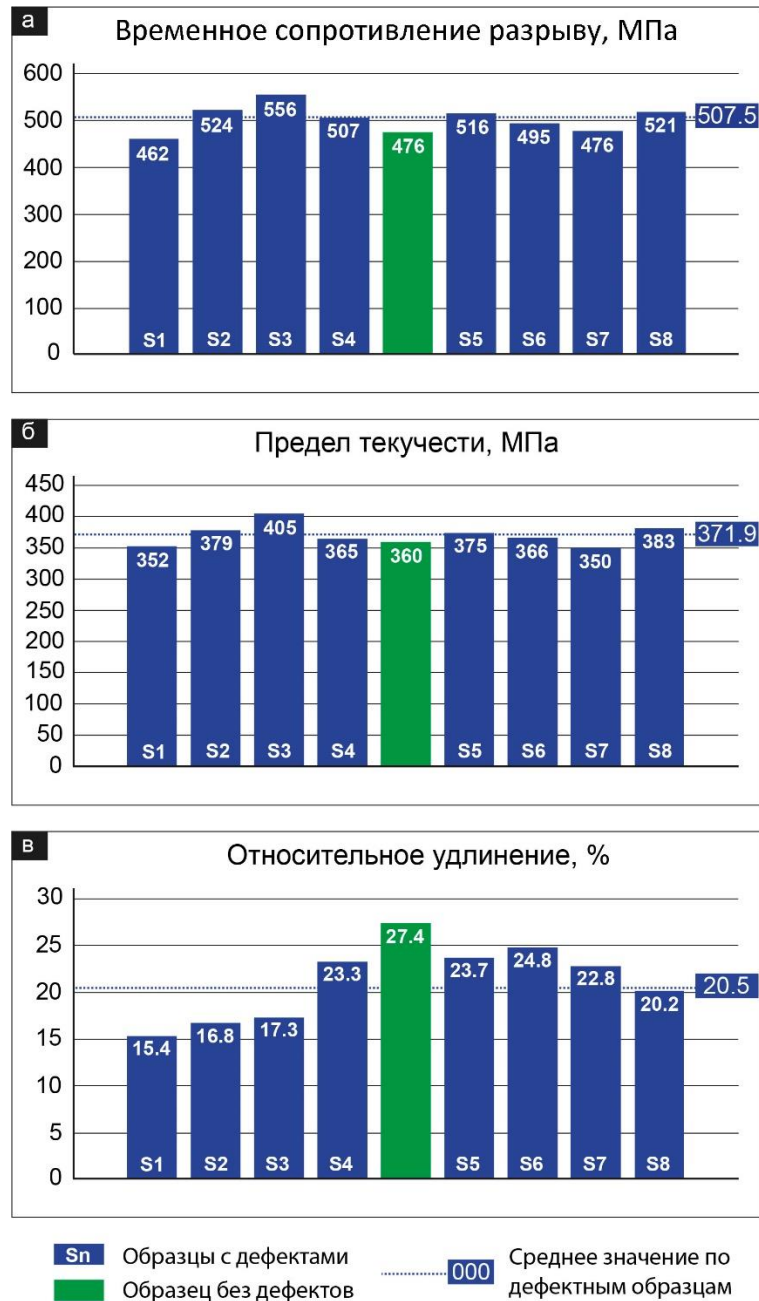


Рисунок 4.19 – Сводные результаты испытаний

(а – временное сопротивление разрыву; б – предел текучести; в – относительное удлинение)

Разрушение образцов с дефектами показало, что химическая неоднородность, в совокупности с наличием внутренних поверхностей раздела, привели к заметному изменению свойств материала. временное сопротивление разрыву и предел текучести незначительно повысились: на 6,6% и 3,3%

соответственно. Наибольшее влияние дефекты оказали на характеристику относительного удлинения, которое сократилось в среднем на 25,2%.

#### 4.1.7.2 Анализ динамики разрушений

Влияние дефектов наиболее ярко проявилось на образце S7 (рисунок 4.20), где материал при испытаниях разделился на две зоны, со значительно различающимися характеристиками и отдаленными друг от друга местами разрыва. На образце также хорошо заметна дополнительная область утонения разорвавшегося первым слоем, лежащая в нижней части образца.

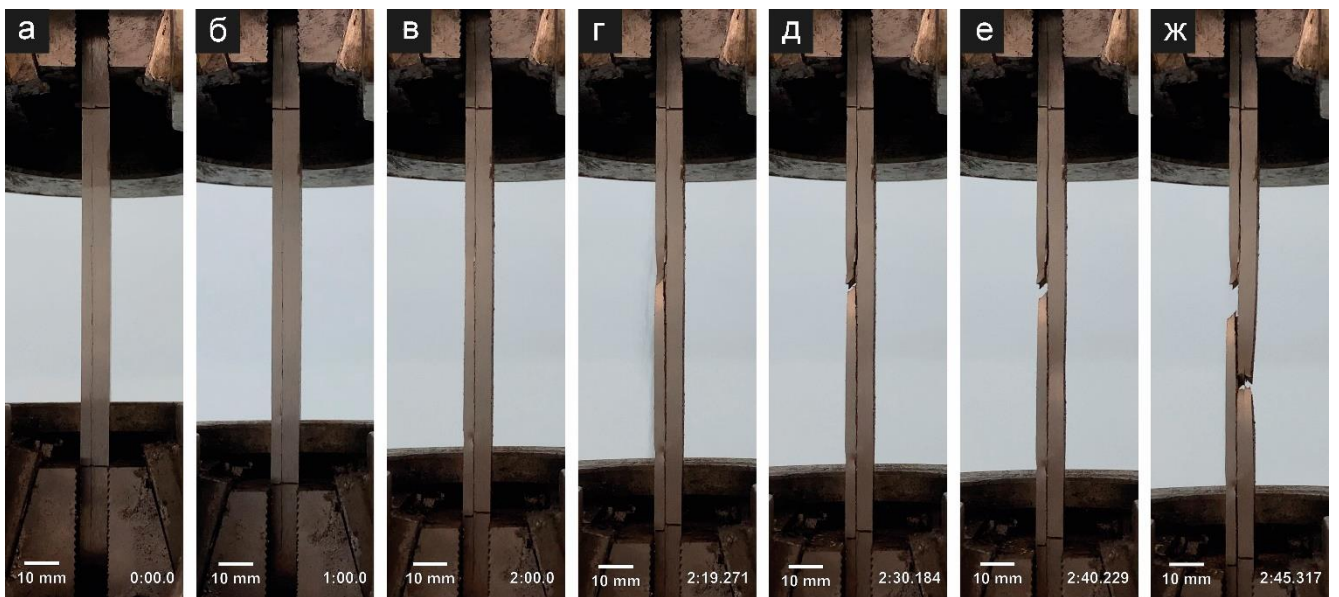


Рисунок 4.20 – Динамика разрушения образца S7, содержащего слой с отличающимися характеристиками

Остальные образцы показали примерно похожую динамику разрушений: разделение на слои и их практически одновременное разрушение. Типовая модель динамики разрушения представлена на примере образца S8 (рисунок 4.21). Внешне образец имеет один, видимый протяженный слой. Однако при растяжении, дефекты, расположенные по одной оси, сливаются и выявляются дополнительные дефектные линии. На рисунке 4.21г средняя часть образца разрушилась, при этом внешние части некоторое время несут нагрузку и сопротивляются разрушению.

Зона окончательного разрушения слоев в итоге образовалась примерно на одном уровне (рисунок 4.21ж).

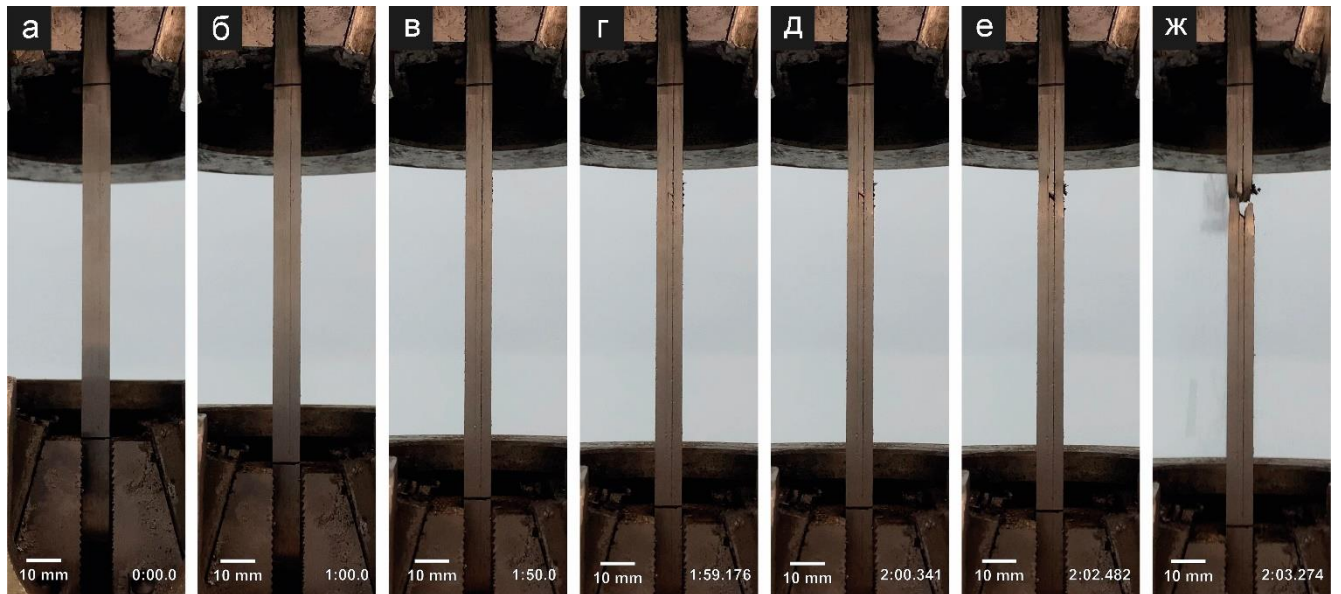


Рисунок 4.21 – Динамика разрушения образца S8 с внутренними расслоениями

Образцы показали се образцы, кроме S1, показали хоть и незначительно, но увеличенное временное сопротивление разрыву, по сравнению с бездефектными. Образец S1, показал пониженное временное сопротивление разрыву за счет содержания наиболее глубоких (до 0,5 мм) по толщине стенки включений, что снизило фактическую площадь сечения испытываемого материала.

#### 4.2 Исследование структуры и прочности сварного соединения труб с расслоением стенки

Результаты исследований рассматриваемого дефекта докладывались на XI Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов (Черноголовка, 2020) [103], изложены в российском из перечня ВАК [104] и в зарубежном журнале, входящим в первый квартиль SCOPUS и WoS [73].

#### *4.2.1 Особенности дефектной зоны и неразрушающий контроль*

##### 4.2.1.1 Визуальный и измерительный контроль

Обследуемый кольцевой сварной шов находился в эксплуатации более 25 лет в составе участка магистрального газопровода. За время эксплуатации аварий с разрывом труб и выходом природного газа во внешнюю среду не зафиксировано. Сварной шов изготовлен из электросварных прямошовных труб диаметром 325 мм. Номинальная толщина стенки бездефектной трубы 6,0 мм, дефектной трубы 7,5 мм. Наружный валик усиления сварного шва механически снят. При шурфовом контроле на шве была обнаружена трещина протяженностью 80 мм, глубиной до 3 мм, шириной раскрытия 1 мм.

Шов образован сваркой токами высокой частоты, отличающийся тем, что свариваемые детали соприкасаются в зоне сварки, где металл интенсивно нагревается до расплавления, сдавливается обжимными роликами и осаживается, образуя прочное сварное соединение. Таким образом, сварной шов образуется без электродов или сварочной проволоки, и имеет такой же химический состав, как и свариваемые детали.

Трубные секции, протяженностью 6,02 м и 5,58 м, объединены в одну трубу на заводе-изготовителе, о чем свидетельствует форма места пересечения продольного и кольцевого сварных соединений – сварка и механическая обработка общего для секций продольного сварного шва происходила после образования и обработки кольцевого шва (рисунок 4.22). С внешней стороны снятие грата произведено на обоих швах. С внутренней стороны грат снят только с кольцевого шва. В соответствии с требованиями действующих ГОСТ 20295-85 и ГОСТ 31447-2012, распространяющихся на трубы для газонефтепроводов, такое исполнение допускается: разрешено изготовление и выпуск труб с завода с одним кольцевым швом, с обязательным последующим проведением неразрушающего контроля.

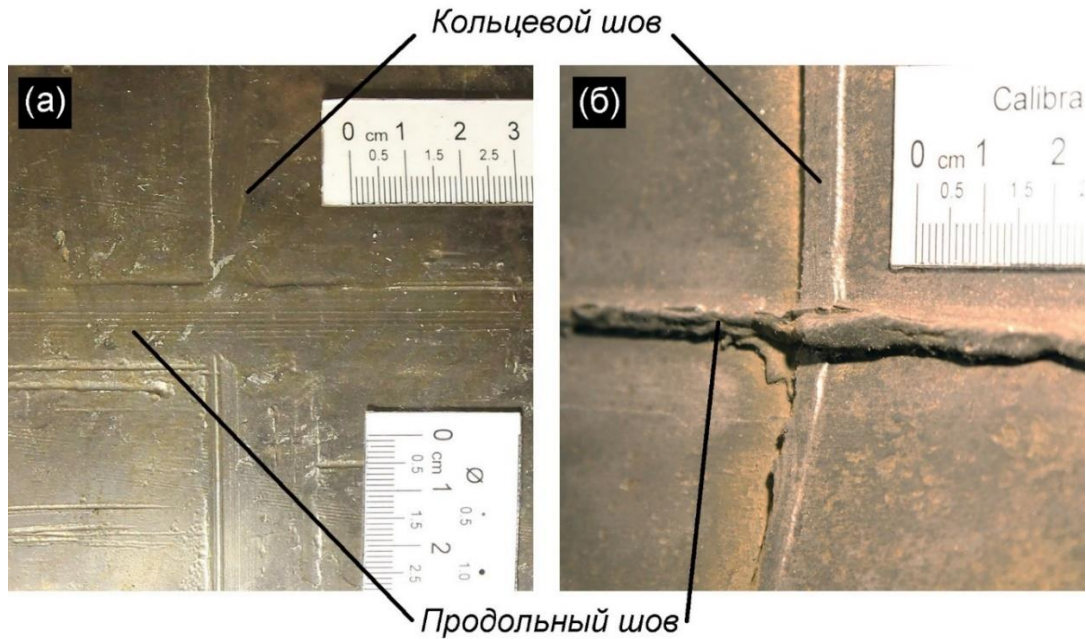


Рисунок 4.22 – Пересечение сварных швов  
(а – с наружной стороны; б – с внутренней стороны)

#### 4.2.1.2 Анализ химического состава

Результаты контроля металла труб и зоны сплавления с применением оптико-эмиссионного спектрометра PMI-Master UVR-PRO приведены в таблице 4.3. Материал обеих труб и зоны сплавления, измеренный с наружной стороны, соответствует по своему составу стали марки 20, по ГОСТ 1050-2013. Отклонений в составе сплава не выявлено.

Таблица 4.3 – Сводные данные по химическому составу, %

Химический элемент	Дефектная труба	Зона сплавления	Бездефектная труба	ГОСТ 1050
C	0,214	0,212	0,191	0,17...0,24
Si	0,281	0,261	0,287	0,17...0,37
Mn	0,534	0,448	0,415	0,35...0,65
Cr	0,07	0,076	0,053	< 0,25
Ni	-	-	-	< 0,3
Cu	0,026	0,032	0,035	< 0,3
Al	0,045	0,024	0,05	-
S	0,01	-	-	0,035
P	-	-	-	0,03



Следует учесть, что такой анализ, несмотря на высокую точность, проводится по внешней поверхности, и не может свидетельствовать о наличии или отсутствии внутренних неоднородностей или отклонений в химическом составе по глубине стенки.

#### 4.2.1.3 Ультразвуковая толщинометрия

Проведен ультразвуковой контроль околошовных зон по всему периметру труб по обе стороны от сварного шва на расстоянии 15 мм с использованием сканера дефектоскопа УИУ «Скаруч» с блоком акустических преобразователей №129, оснащенный четырьмя прямыми раздельно-совмещёнными пьезоэлектрическими преобразователями и датчиком пути. Данные по толщинометрии записаны с шагом в 2 мм. Совмещенные результаты визуального осмотра и ультразвуковой толщинометрии приведены на рисунке 4.23.

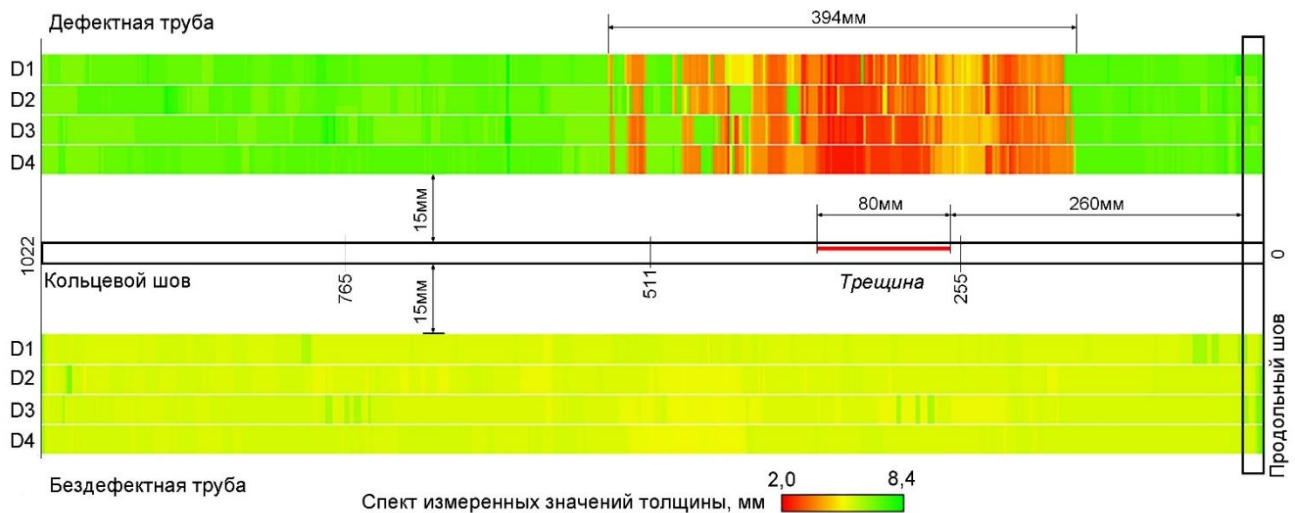


Рисунок 4.23 – Схема объекта с результатами ультразвуковой толщинометрии и визуального контроля

Как видно по результатам контроля, трещина в сварном шве развилась в месте наименьших показаний толщины, в участке максимального приближения расслоения к поверхности. Глубина трещины составляла от 2,0 до 3,0 мм, что соответствует показаниям толщиномера и свидетельствует о наличии второго слоя металла, непосредственно под расслоением. Зона явных расслоений составляет 394

мм, что соответствует 39% периметра трубы. Разнотолщинность труб составляет 1,5...2,0 мм, а в зоне кольцевого шва достигает 2,5 мм за счет скоса на внутренней кромке бездефектной трубы.

По требованиям ГОСТ 31447-2012, трубы допускается контролировать магнитным или ультразвуковым методами, стандарт ГОСТ 20295-85 обязывает проводить неразрушающий контроль, не регламентируя используемые методы. ВТИ, проводившаяся на объекте, использовала магнитный метод контроля, при этом расслоение не было обнаружено, а сигнал от трещины не превысил допустимых параметров. Учитывая изложенное, можно сделать вывод, что при первичном контроле при производстве трубы, при отсутствии развитой трещины, использовался или магнитный, или радиографический контроль. Относительно тонкие расслоения, как в рассматриваемом дефекте, данными видами контроля обнаружить практически невозможно. Наиболее эффективным методом обнаружения подобных дефектов является ультразвуковой контроль. Наиболее эффективной в данном случае является толщинометрия околошовной зоны, которую необходимо проводить по всему периметру труб.

#### *4.2.2 Дефекты микроструктуры шва*

Проведен анализ микроструктуры основного металла труб и зоны сварного шва. Обнаружены протяженные расслоения различной толщины, проходящие параллельно поверхности. В зоне сварного шва, со стороны дефектной трубы видна деформация структур, образующая утолщение несплошностей и значительные искривления внутренних слоев металла, вызванные технологическими процессами при сварке.

При осмотре микрошлифов до травления, в сварном шве с дефектной трубой обнаружена явно выраженная линия сплавления с микронесплошностями: поры, шириной до 0,5 мм, а также строчечная несплошность шириной до нескольких микрон (рисунок 4.24а). При сварке бездефектных участков линия сплавления локально не определяется, а зона сплавления характеризуется практически полным отсутствием несплошностей (рисунок 4.25б).

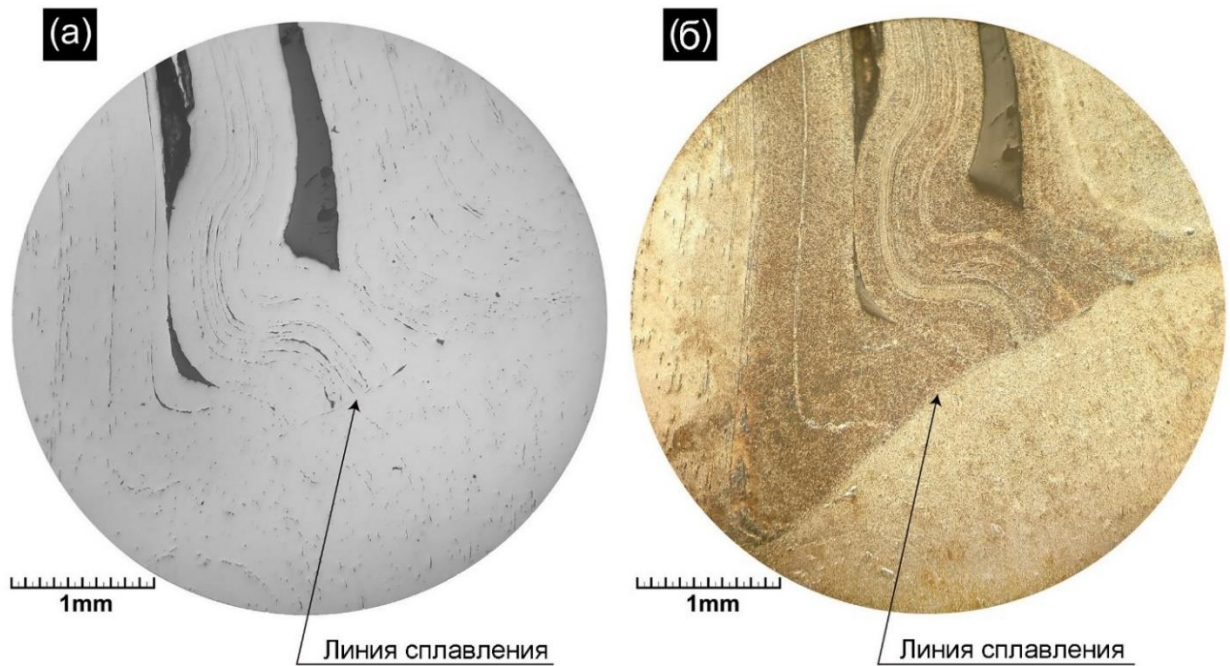


Рисунок 4.24 – Оптическая микроскопия участка сварного шва  
(а – до травления; б – после травления)

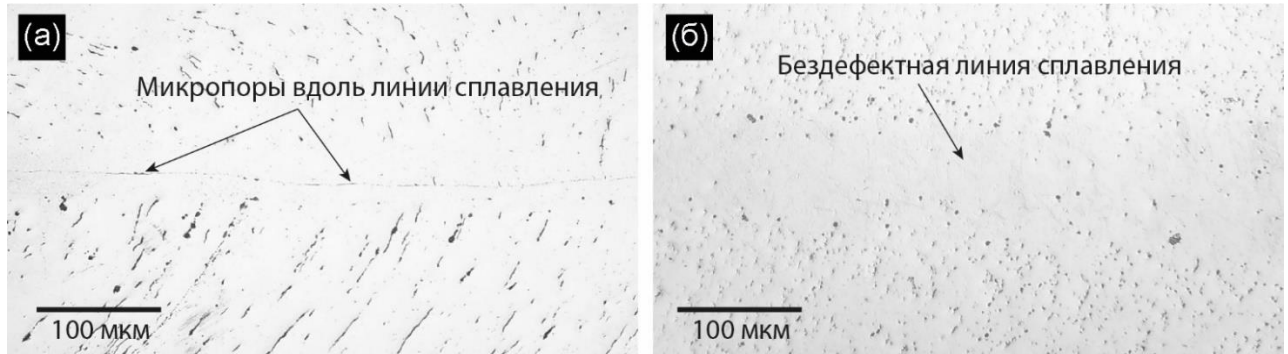


Рисунок 4.25 – Оптическая микроскопия участка сварных швов до травления  
(а – шов на дефектном участке; б – шов на бездефектном участке)

Микроструктура металла в зоне сварного шва (рисунок 4.24б, 4.26) со стороны бездефектной трубы представлена характерной структурой из кристаллитов феррита и перлита, такая же структура зафиксирована по краям стенок дефектной трубы. Ближе к оси стенки дефектной трубы, обнаружена выраженная квазиэвтектоидная структура с крупными темными зернами перлита и тонкими пластинками феррита по границам зерен.

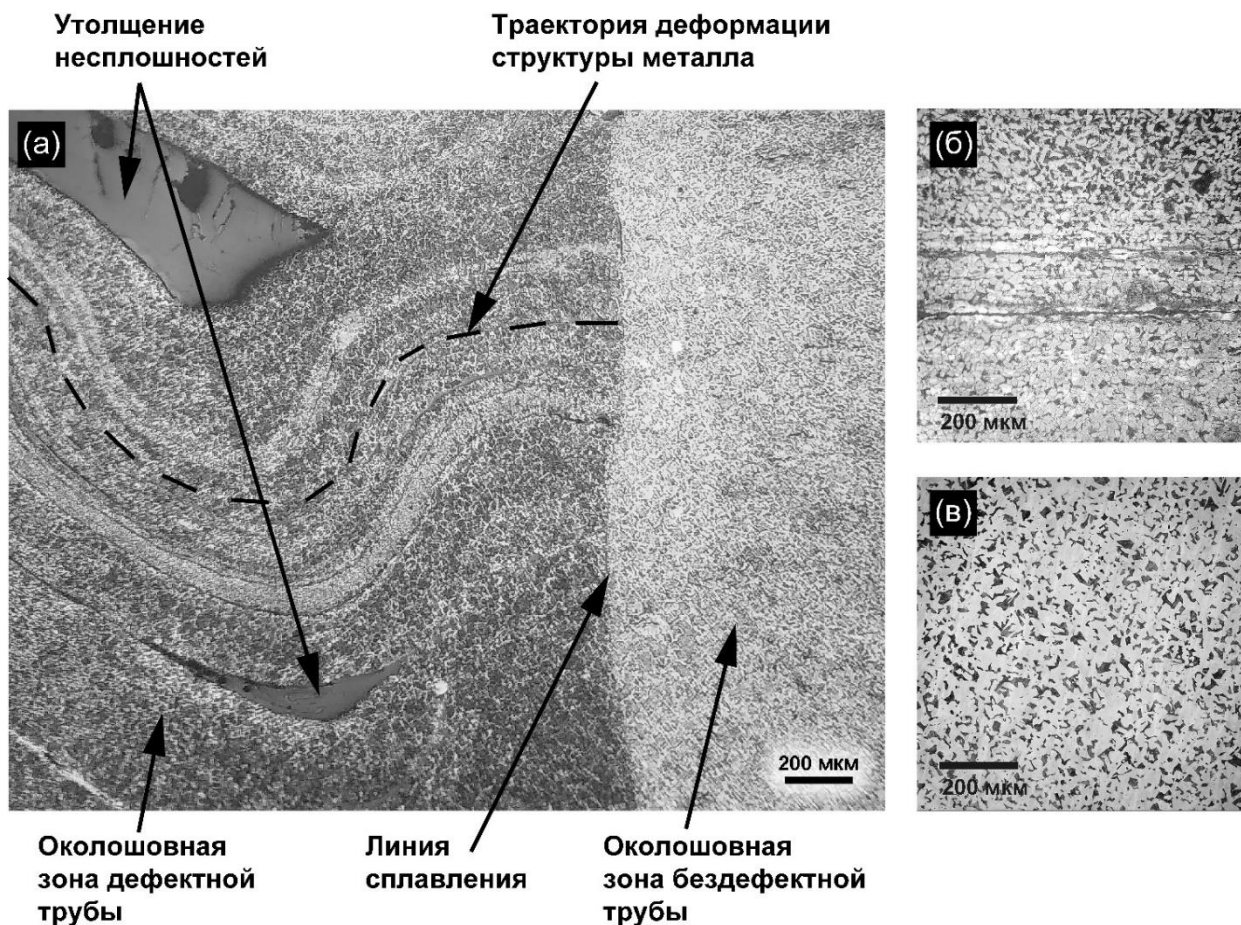


Рисунок 4.26 – Оптическая микроскопия участка дефектного сварного шва и основного металла (а – сварной шов; б – основной металл дефектной трубы; в – основной металл бездефектной трубы)

Дефектная труба имеет неоднородную по слоям феррито-перлитную структуру, кроме того, в теле трубы имеются расслоения, с включениями толщиной до 3 мм в зоне сварного шва и до 10...50 мкм в основном металле. Это свидетельствует о значительной неравномерности так же и механических свойств материала дефектной трубы. Структура бездефектной трубы имеет характерную для низколегированных доэвтектоидных сталей феррито-перлитную структуру однородную по толщине стенки.

#### *4.2.3 Микрорентгеноспектральный анализ включений*

Проведена электронная микроскопия и микрорентгеноспектральный анализ зоны сварного шва. Определен химический состав слоев металла дефектной трубы (спектры 1...4), включений в теле трубы (спектры 5, 6) и металла бездефектной трубы (спектр 7), результаты занесены в таблицу 4.4. Проведено картирование участка по основным элементам: железу, марганцу, кремнию и алюминию. Карты распределения измеряемых элементов и участки мест измерений спектров указаны на рисунке 4.27.

Состав стали по слоям практически не отличается, отмечено незначительное увеличение марганца во внешнем и внутреннем слоях дефектной трубы. Анализ состава включений показал разнородность их природы. Более крупное расслоение (спектр 5) практически не содержит железа, образовано преимущественно алюмосиликатами, дополнительно содержит такие элементы, как кальций, калий и фтор, что указывает на остатки плавикового шпата и флюса, используемых в плавильном производстве. Другое расслоение (спектр 6), содержит в основном оксиды железа. Данная несплошность образовалась, скорее всего, при раскате газовых пузырей. По наблюдаемой структуре участка сварного шва, можно сделать вывод, что включения, распределенные в основном металле, при сварке создают предпосылки для возникновения как мелких пор по линии сплавления, так и участков с увеличенной толщиной включений. В соответствии со стандартом ГОСТ 31447-2012 в основном металле труб допускаются расслоения протяженностью не более 80 мм в любом направлении и площадью не более 5000 мм<sup>2</sup>. На краях труб расслоения не допускаются. Как видно из приведенных исследований, подобные дефекты металла приводят к нарушениям структуры сварных швов.

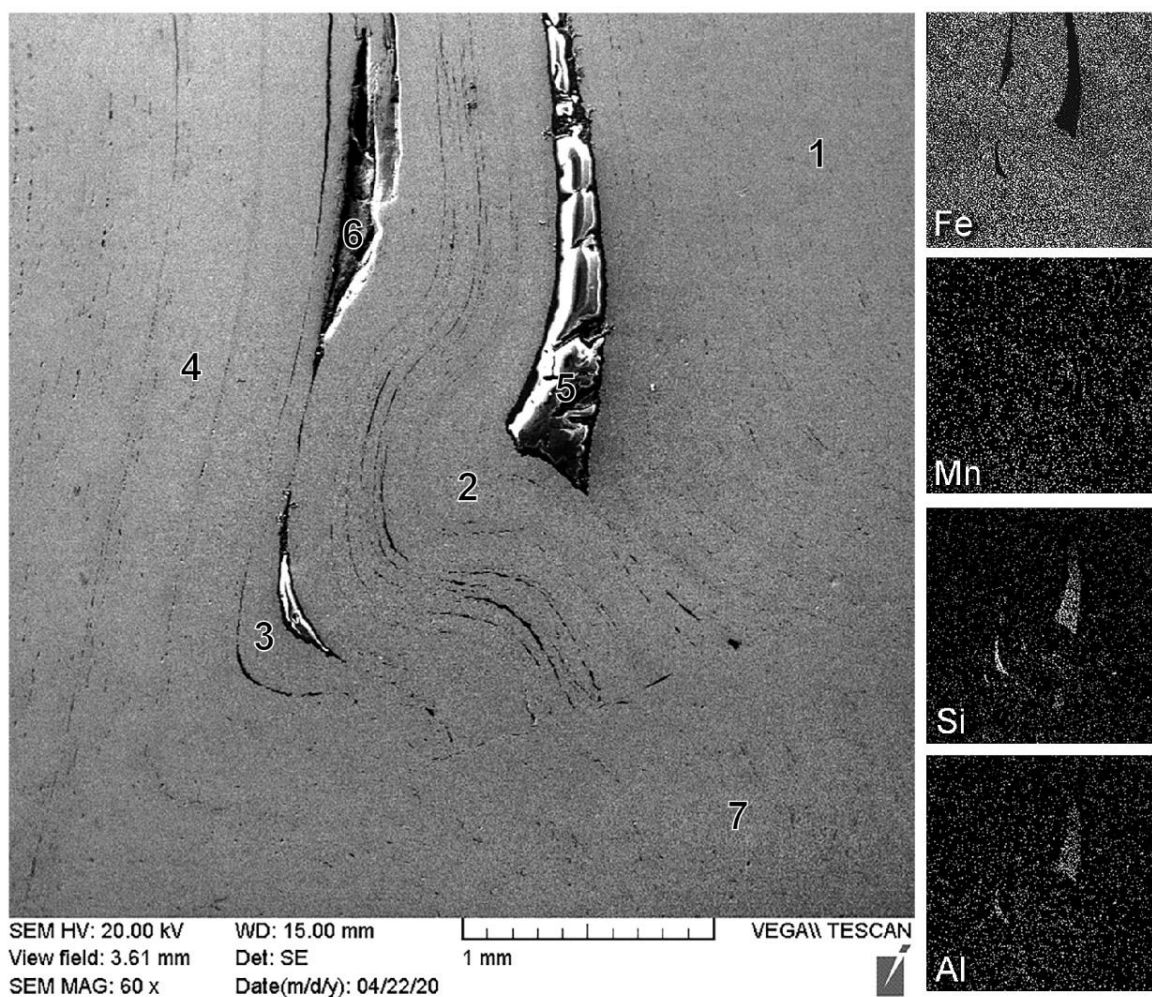


Рисунок 4.27 – Электронно-сканирующая микроскопия  
(1...7 – места замера химического состава)

Таблица 4.4 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа, %

Спектр	O	Mg	Al	Si	S	Ca	F	K	Mn	Fe+C (осм.)
Спектр 1	–	–	0,16	0,24	0,12	–	–	–	0,71	98,77
Спектр 2	–	–	0,21	0,23	–	–	–	–	0,57	98,99
Спектр 3	–	–	0,18	0,25	–	–	–	–	0,54	99,03
Спектр 4	–	–	0,25	0,25	–	–	–	–	0,71	98,79
Спектр 5	50,06	1,72	7,26	17,19	0,49	10,87	4,38	0,33	4,99	2,71
Спектр 6	22,39	0,39	0,90	0,99	0,21	–	–	–	0,43	74,69
Спектр 7	–	–	0,16	0,24	–	–	–	–	0,39	99,21

#### 4.2.4 Микромеханические исследования зоны сплавления

На рисунке 4.28 представлены карты измерения микротвердости на дефектном и бездефектном сварных швах.

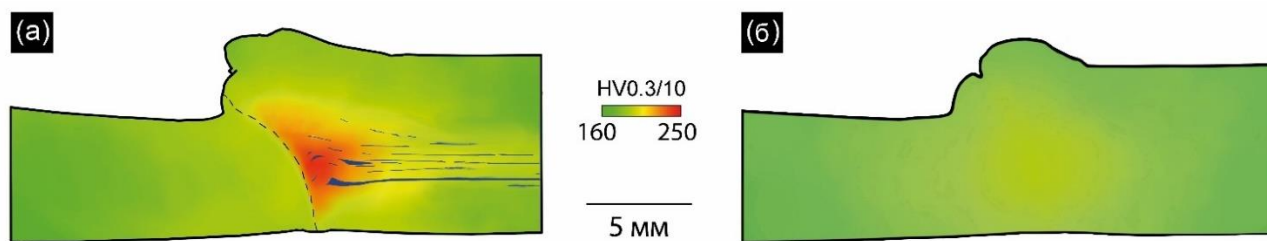


Рисунок 4.28 – Градиенты распределения микротвердости (а – распределение в дефектном сварном шве; б – распределение в бездефектном шве)

Микротвердость металла около линии сплавления со стороны дефектной трубы имеет твердость до 35% выше, чем на стороне бездефектной трубы. По мере приближения к внутренней и внешней поверхности разница в микротвердости нивелируется. Пиковые значения микротвердости сварного шва со стороны дефектной стенки достигают 240 HV0.3/10, микротвердость околошовной зоны (участка с переходной структурой металла) снижается при удалении от линии сплавления до показаний основного металла.

При сварке бездефектных труб твердость металла в зоне сплавления, с учетом погрешности измерений, незначительно выше твердости основного металла. Средние значения микротвердости металла шва, ЗТВ и основного металла бездефектных участков составляют 174, 167 и 162 HV0.3/10 соответственно. Схожие значения получены при измерениях со стороны бездефектной трубы при контроле образца с дефектом. Относительная погрешность измерений для данного диапазона составляет  $\pm 6\%$ .

В соответствии с «Hardness conversion table according to DIN 50150», измеренные значения твердости при переводе в единицы НВ будут соответствовать 228НВ для пикового значения в дефектном месте сварного шва. 165, 159, 154 НВ для металла шва, ЗТВ и основного металла бездефектных участков соответственно. По стандарту ГОСТ 1050-2013, твердость на исследуемую сталь в состоянии поставки не должна превышать 163 НВ. По требованиям отраслевого стандарта СТО Газпром РД 1.10-098-2004, твердость основного металла трубы марки 20 допускается в пределах 120...200 НВ, а твердость металла шва и зоны термического влияния не должна превышать 225 НВ. Таким образом,

бездефектные участки полностью соответствуют требованиям стандартов. Зона с дефектом имеет твердость, превышающую максимально допустимую по требованиям стандарта.

Полученные результаты значений микротвердости коррелируют с полученными в работах [27, 67] данными для сварных соединений без дефектных участков. При этом твердость в дефектной зоне выше нормализованной, но ниже полученной после закалки.

#### 4.2.5 Испытания на статическое растяжение и фрактографический анализ

Выполнены испытания подготовленных образцов на статический разрыв. Три образца вырезаны из зоны с расслоениями из участков без раскрытия и, для анализа остаточной прочности дефектного участка с раскрытой трещиной, из зоны раскрытия трещины. Результаты сравнивались с образцами, вырезанными из бездефектных зон. Усредненные результаты приведены на диаграмме растяжения (рисунок 4.29) и на сравнительных графиках результатов проведения испытаний (рисунок 4.30).

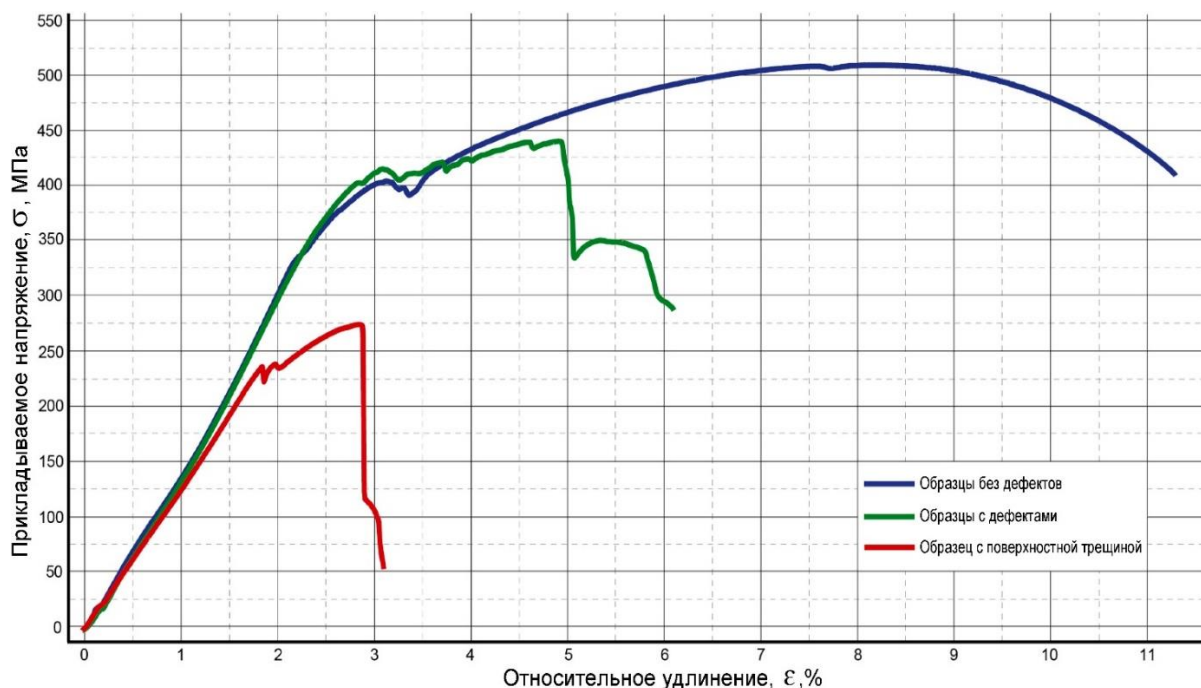


Рисунок 4.29 – Диаграмма растяжений исследуемых образцов





Рисунок 4.30 – Сводные результаты испытаний (а – временное сопротивление разрыву; б – предел текучести; в – относительное удлинение)

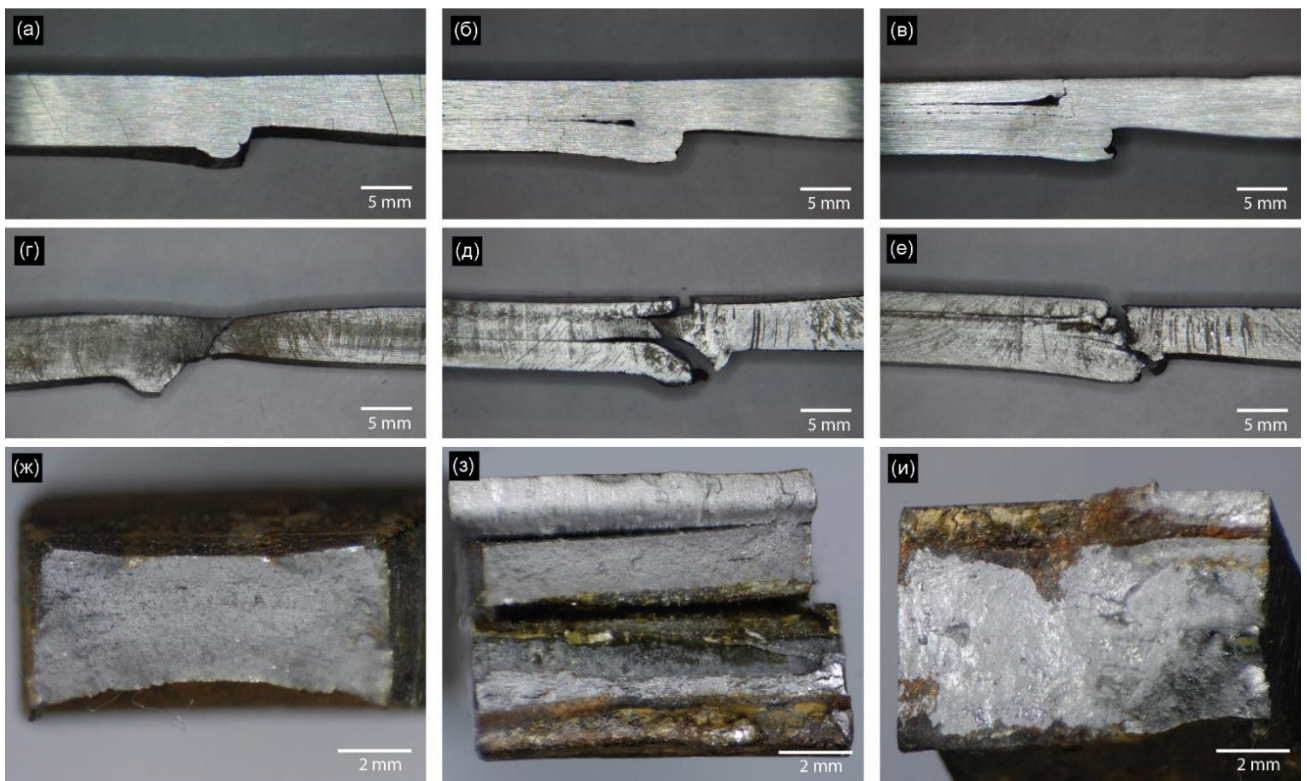


Рисунок 4.31 – Характерные профили образцов до и после испытаний (а – бездефектный образец до испытаний; б – образец с дефектом; в – образец с дефектом, выходящим наружу; г – разрушение бездефектного образца; д – разрушение образца с дефектом; е – разрушение образца с выходящим наружу дефектом; ж – излом бездефектного образца; з – излом образца с дефектами; и – излом образца с дефектом, выходящим наружу)

Результаты испытаний (рисунок 4.31а, 4.31г, 4.31ж) бездефектного участка показывают характерную картину, получаемую при испытаниях качественных

сварных швов низколегированных малоуглеродистых трубных сталей с разрушением по околошовной зоне. Разрушение образцов с дефектами произошло по зоне сплавления, при этом слои металла имеют разную степень остаточной деформации и отличающийся характер излома.

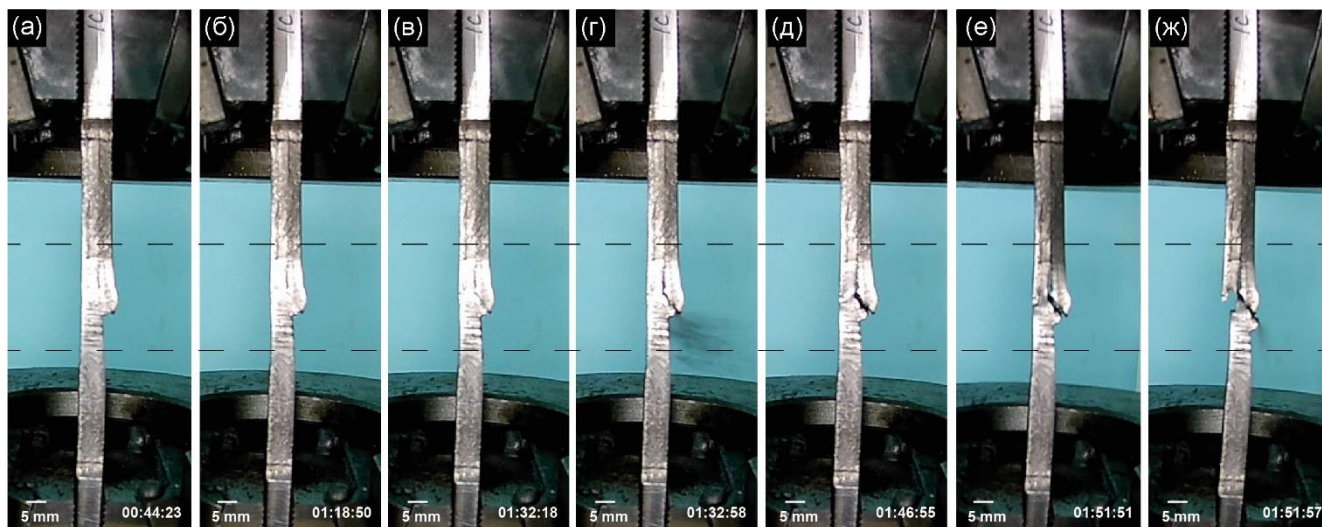


Рисунок 4.32 – Динамика разрушения образца с дефектами (а – без видимых разрушений; б – зарождение трещины со стороны валика шва; в – развитие трещины; г – разрыв по сварному шву напротив одного из слоев; д – зарождение трещины с противоположной стороны образца; е – отрыв по внешнему слою и зарождение трещины по центральному слою; ж – разрушение образца)

При испытаниях дефектных участков, выявлено, что временное сопротивление разрыву на них составляет 441 МПа, что меньше временного сопротивления бездефектных участков на 14%, а относительное удлинение составляет всего 6,1%, что почти в два раза меньше, чем на бездефектных образцах. Однако, измеренный предел текучести практически соответствует бездефектному участку, превышая его на 4%. Это связано с распределением очередности включения в работу слоев дефектных участков и неравномерным перераспределением нагрузки, на что указывает участок упрочнения, имеющий значительные перепады и более пологий наклон, по сравнению с бездефектным участком. Такие перепады свидетельствуют о переходе части слоев на участок

упрочнения, в то время как остальные находятся в пределах площадки текучести. Данный вывод подтверждается анализом видеофиксации испытаний, в ходе которых видно, что образец разрушается послойно: при уже разрушенной части слоев, остальные находятся в процессе растяжения под нагрузкой (рисунок 4.32г, 4.32д, 4.32е.).

Разрушение дефектных образцов произошло по зоне сплавления сварных швов, на которой при оптической микроскопии обнаружены микронесплошности, что также коррелирует с результатами работы [70].

Испытания образца с началом трещины по внешнему слою дефектной трубы ожидаемо показали его низкие механические характеристики. Это обусловлено получившимся нарушением общей конфигурации сварного шва, которое де-факто стало представлять собой соединение со смещением кромок, дополнительно ослабленное микронесплошностями в зоне сплавления. При фрактографическом исследовании излома видно, что поверхность краев ранее раскрытой трещины покрыта слоем коррозии (рисунок 4.31и). Коррозия распространяется как под расслоение, так и вглубь сварного шва по зоне сплавления, что свидетельствует о протяженном периоде развитии дефекта во время эксплуатации.

### **4.3 Проведение численных экспериментов для анализа поведения поврежденных участков газопроводов, имеющих отклонения в механических характеристиках**

#### *4.3.1. Описание цели и задачи моделирования*

Выполненные натурные испытания металла газопровода показали, что характеристики материала при наличии в нем плоскостных дефектов отличаются по своим механическим характеристикам в значительных пределах. При работе газопроводов при штатных нагрузках, считается [134], что наибольшими являются кольцевые напряжения, возникающие от внутреннего избыточного давления. Однако, работающие в реальных условиях трубопроводы могут подвергаться значительным непроектным нагрузкам, в том числе продольным, что вызывает

разрывы трубопроводов по поперечному сечению как в сварных соединениях (рисунок 4.33а), так и по основному металлу (рисунок 4.33б), что демонстрирует в том числе исследованный выше дефект сварного соединения (рисунок 2.5).

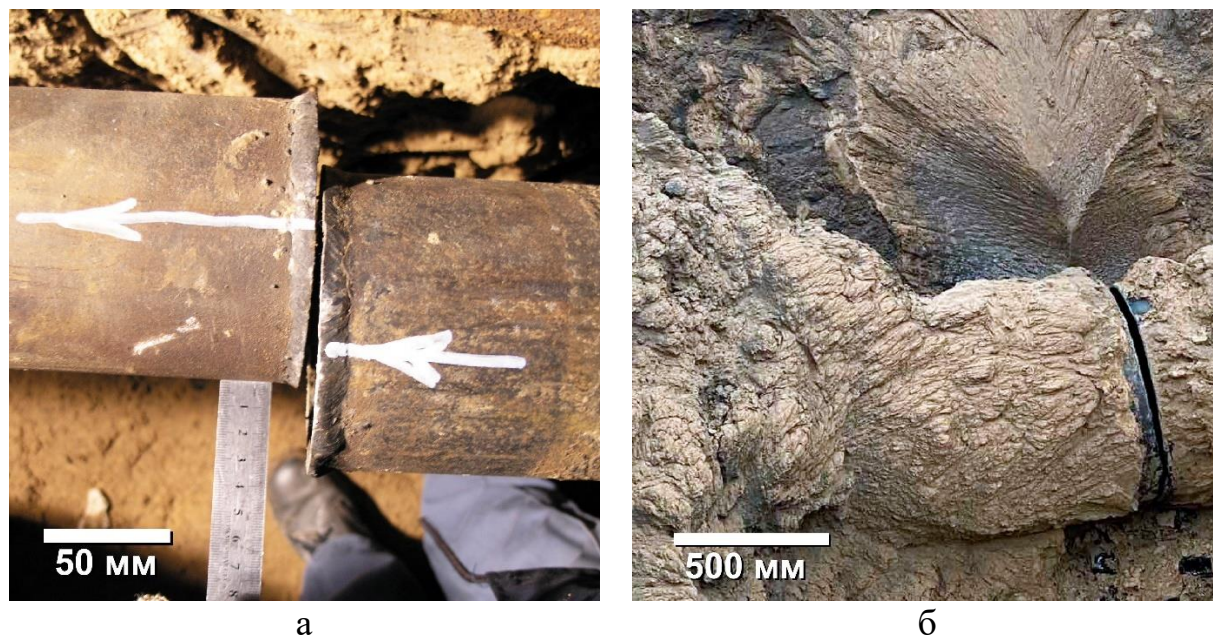


Рисунок 4.33 – Примеры разрушения трубопроводов при воздействии растягивающих нагрузок (а – разрыв шириной 5мм трубы DN100 по сварному соединению со смещением; б – разрыв шириной 30мм трубы DN700 по основному металлу)

Основной проблемой при анализе возникающих продольных нагрузок газопроводов является сложность их прогнозирования и оценки. На данный момент основным способом сохранения работоспособности газопроводов от воздействия продольных перемещений является обеспечение проектного запаса прочности. В данном разделе проведены численные эксперименты, целью которых является оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) участков газопровода от совместного действия внутреннего давления и продольного растяжения с учетом разных прочностных свойств (предел текучести, временное сопротивление и деформация при растяжении) металла трубопроводов. Задачей выполняемого моделирования является анализ НДС участков трубопроводов, имеющих зоны с

отличающимися характеристиками в пределах одной трубной секции и участков трубопроводов с равномерными штатными характеристиками трубных секций.

#### 4.3.2. Описание модели и параметров моделирования

Для проведения численных экспериментов выбран метод конечных элементов (МКЭ) в системе анализа Ansys [35]. Анализировалась интенсивность напряжений (далее называемые эквивалентными напряжениями в соответствии с принятыми в Ansys определениями) и пластические деформации. Моделирование напряженного-деформированного состояния участка трубы выполнено с учетом упругопластических свойств материала. При моделировании пластического поведения материала выбран вариант билинейного изотропного упрочнения, представляющий собой линейную аппроксимацию упругой и пластической ветвей кривой функции  $\sigma(\varepsilon)$ :

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & \text{при } \varepsilon < \varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E} \\ \sigma_T + E_p \cdot \varepsilon, & \text{при } \varepsilon \geq \varepsilon_T, \text{ где } E_p = \frac{\sigma_B - \sigma_T}{\varepsilon_B - \varepsilon_T} \end{cases} \quad (4.1)$$

Данной модели пластичности отдано предпочтение, так как она позволяет учитывать большие перемещения при минимальном количестве известных параметров материала ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\varepsilon_B$ ,  $\varepsilon_T$ ,  $E$ ). С учетом прикладной специфики, в большинстве задач достаточно установить значения внешних нагрузок, которые приводят к возникновению необратимых пластических деформаций в материале при достижении предела пластичности или к его разрушению при достижении временного сопротивления.

Разработана модель участка газопровода комбинированного типа, позволяющая настраивать свойства материала составляющих его участков.

Геометрическая модель участка газопровода выполнена из четырнадцати деталей (рисунок 4.34)



Рисунок 4.34 – геометрическая модель участка

Суммарная протяженность модели 5200 мм, наружный диаметр 325мм, толщина стенок 8мм. Состоит из семи кольцевых секторов, каждый из которых симметрично разделен на половины равного размера. Центральная зона предназначена для моделирования участков с отклонениями, по краям в виде полусекторов смоделированы сварные соединения. Один из граничных участков предназначен для жесткого закрепления по торцу трубы, второй для задания продольных осевых перемещений, граничные участки исключены из результатов расчета. Краевые участки предназначены для имитации работы основного газопровода.

Численный расчет проводился в трехмерной постановке (рисунок 4.35). К внутренней поверхности модели приложено внутреннее избыточное давление.

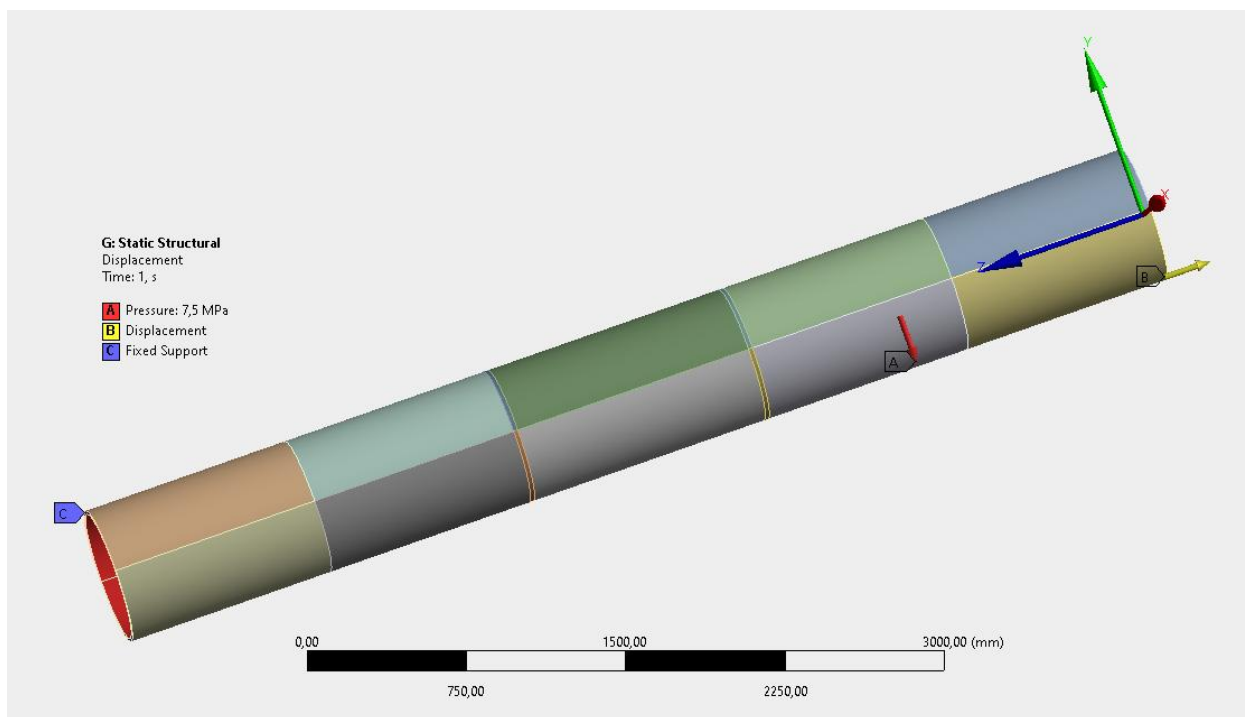


Рисунок 4.35 – Модель участка, граничные условия

Модель построена с упорядоченной сеткой конечных элементов, при выборе сетки анализировались модели с её размерами от 10мм до 30 мм с различными конфигурациями (таб.4.5).

Таблица 4.5 – Результаты моделирования для выбора параметров сетки конечных элементов, внутреннее давление 7,5 МПа, без осевых перемещений.

Установленные размеры сетки: основные элементы; сварные швы (слоев)	$\sigma_{\text{Экв макс, МПа}}$
10x10мм; 10x10мм (1 слой)	138,40
15x15мм; 15x10мм (1 слой)	138,47
15x15мм; 15x5мм (1 слой)	138,47
20x20мм; 20x5мм (1 слой)	138,40
25x25мм; 25x5мм (1 слой)	138,50
25x5мм; 5x5мм (1 слой)	138,39
30x5мм; 5x5мм (1 слой)	138,39
4x4мм; 4x4мм (2 слоя)	138,34

Разница в рассчитанных эквивалентных напряжениях не превышала 0,08%. Оптимальными размерами сетки были признан размер 20мм на основных

элементах и сгущенная до 5 мм в осевом направлении на элементах сварных швов (рисунок 4.36). Используются трехмерные твердотельные элементы SOLID186 (268666 элементов, 188567 узлов), определяющиеся 20 узлами, имеющими три степени свободы каждый. Элемент поддерживает пластичность, сверхэластичность, ползучесть, жесткость при напряжении, большой прогиб и большую деформационную способность, применяется для моделирования деформаций упругопластических материалов. Связь компонентов модели реализована при помощи элементов CONTA174 (26866 элементов). Элемент применим к трехмерному структурному анализу, располагается на поверхностях трехмерных твердотельных элементов со средними узлами (в нашем случае SOLID186). Элемент имеет те же геометрические характеристики, что и грань твердотельного элемента, с которой он соединен.

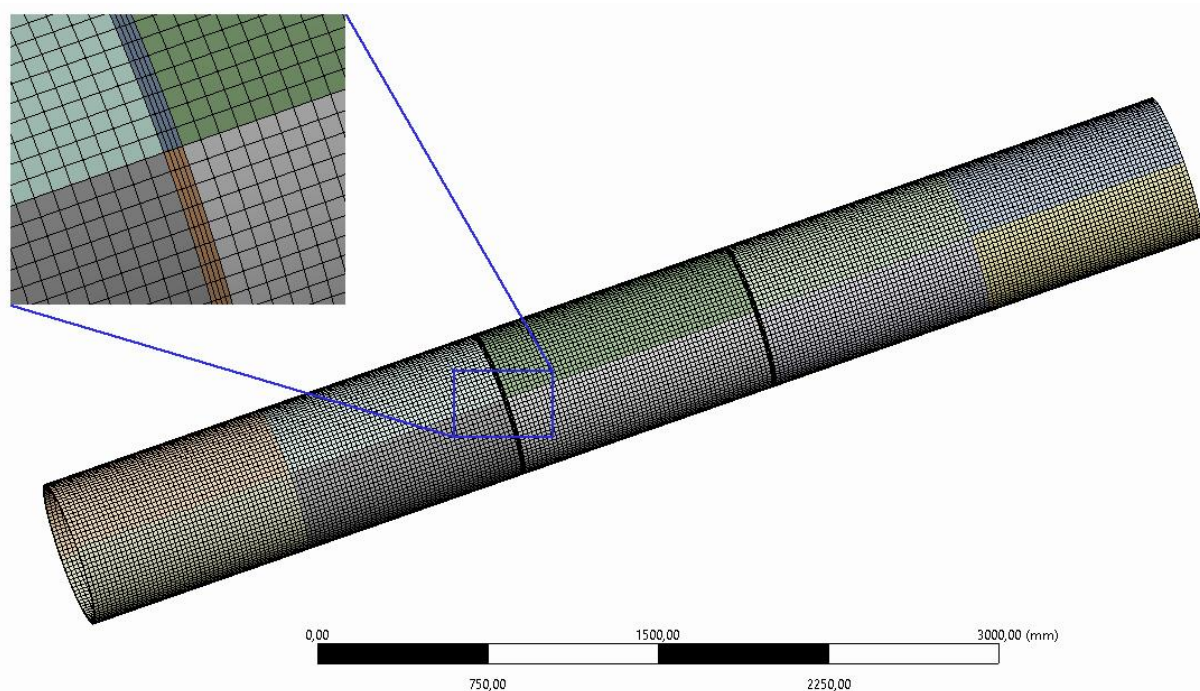


Рисунок 4.36 – Модель с наложенной сеткой конечных элементов

Исходя из полученных максимальных (138,40МПа) и минимальных (128,48 МПа) эквивалентных напряжений модели, для оси стенки труб получим



131,94МПа. При расчетах по классическим формулам из [134] и формуле 3.1 для среднего диаметра модели получим 131,66МПа, сходимость около 0,2 %,

Механические свойства материала для использования в моделировании взяты из проведенных выше экспериментов, приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Принятые для моделирования характеристики материала.

Участок материала	Обозначение	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\epsilon_B$	$\epsilon_T$	$E_p$ , МПа
Металл трубы бездефектной зоны	БМ	476,0	360,0	0,274	0,002	426,470
Сварной шов бездефектной зоны	ШБМ	515,0	389,0	0,113	0,002	1135,135
Металл трубы дефектной зоны	ДМ	462,0	352,0	0,154	0,002	723,684
Сварной шов дефектной зоны	ШДМ	273,0	236,0	0,031	0,002	1275,862

#### 4.3.3. Проведение численных экспериментов

Одному из торцев модели принудительно задавалось осевое перемещение, имитирующее продольные нагрузки.

##### 4.3.3.1 Осевое перемещение на бездефектной модели

Материалу присвоены свойства из таблицы 4.6: основной металл – БМ, сварные швы ШБМ. Для бездефектной модели превышающие предел текучести основного металла эквивалентные напряжения достигаются начиная с перемещения в 9,5 мм (рисунок 4.37). Результаты моделирования соответствуют реальным моделям: наибольшие напряжения и деформации возникают в районе околошовной зоны, где при достижении разрушающих нагрузок и происходит разрыв металла.

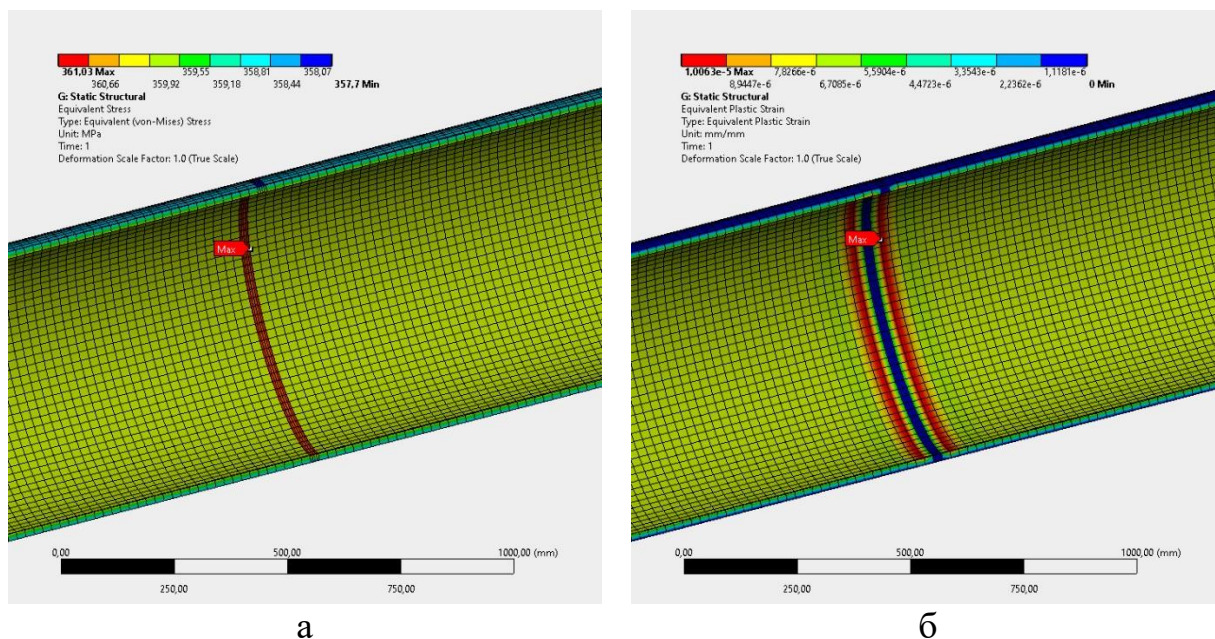


Рисунок 4.37 – Влияние на напряженно-деформированное состояние участка газопровода совместного действия внутреннего давления и продольной нагрузки. Бездефектная модель, осевое перемещение 9,5 мм (а – эквивалентные напряжения; б – пластические деформации)

4.3.3.2 Осевое перемещение на модели с дефектными сварными соединениями и дефектным участком трубы.

Материалу присвоены свойства из таблицы 4.6: основной металл граничных, краевых участков и нижней части центральной зоны – БМ, верхняя часть центральной зоны – ДМ, верхняя часть сварных соединений – ШДМ, нижняя часть сварных соединений – ШБМ. Для выстроенной модели превышающие предел текучести ослабленных сварных соединений эквивалентные напряжения достигаются начиная с осевого перемещения в 5,8 мм и составляют 236,99 МПа. На рисунке 4.38 приведены результаты для перемещения 5,9 мм, для более явного отображения действующих распределений напряжений и пластической деформации. Результаты моделирования достаточно адекватно описывают реальное разрушение участка трубопровода, где наибольшие напряжения и перемещения возникают в районе сварного шва, где был обнаружен разрыв металла.

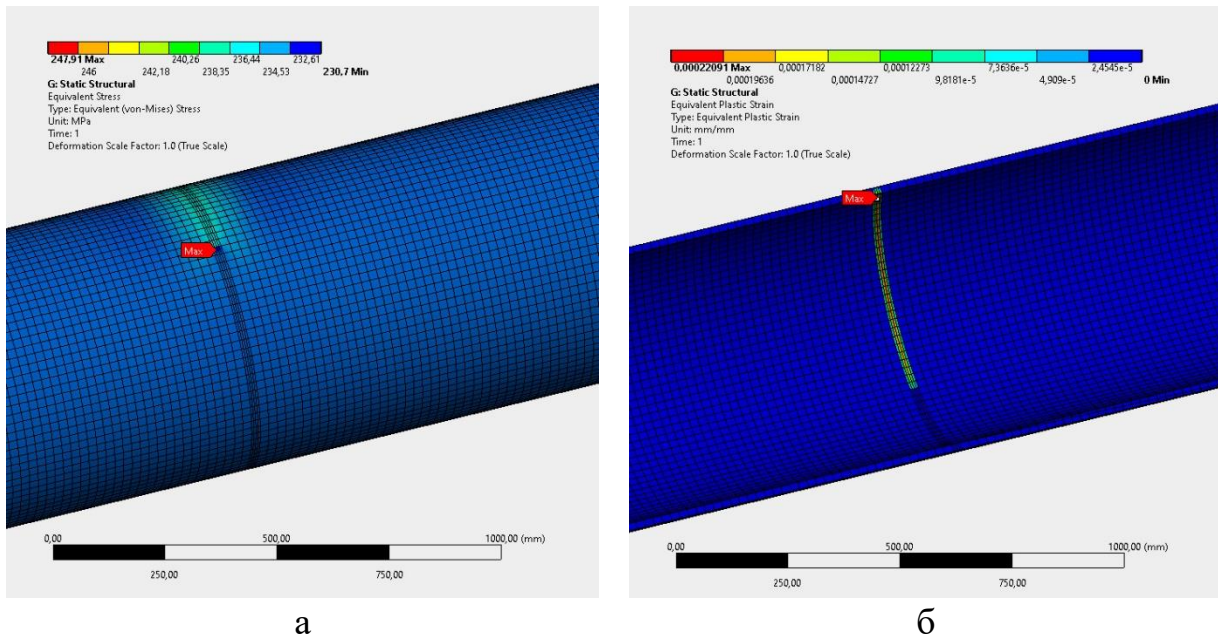
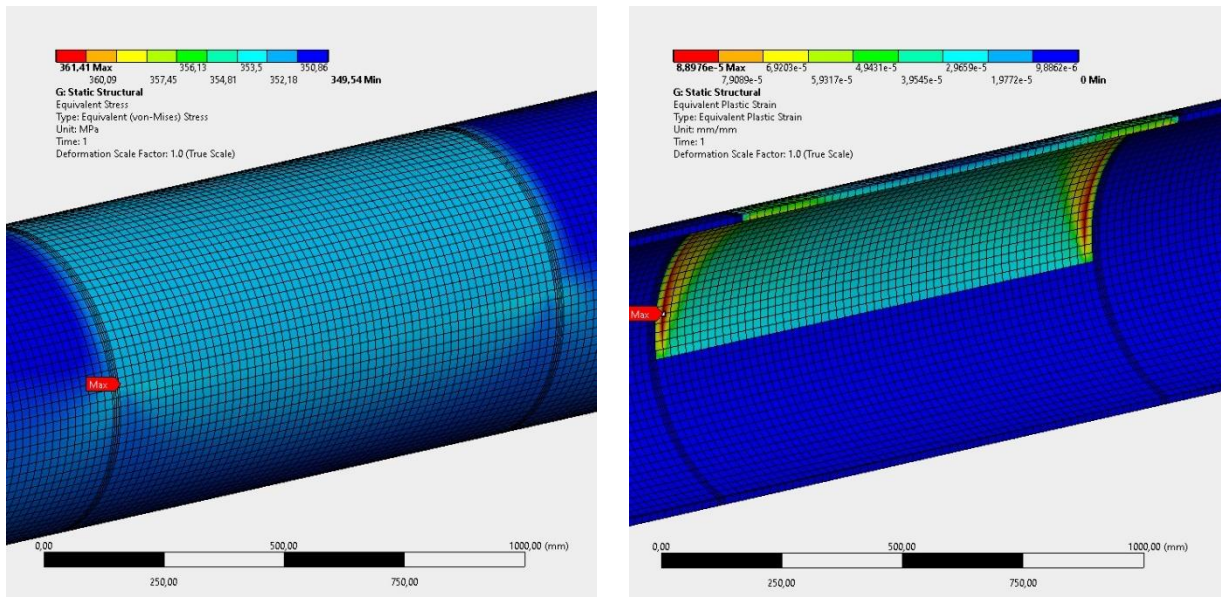


Рисунок 4.38 – Влияние на напряженно-деформированное состояние участка газопровода совместного действия внутреннего давления и продольной нагрузки, осевое перемещение 5,9мм (а – эквивалентные напряжения; б – пластические деформации)

4.3.3.3 Осевое перемещение на модели с бездефектными сварными соединениями и дефектным участком трубы.

Материалу присвоены свойства из таблицы 4.6: основной металл граничных, краевых участков и нижней части центральной зоны – БМ, верхняя часть центральной зоны – ДМ, сварные соединения – ШБМ. Для выстроенной модели превышающие предел текучести основного металла эквивалентные напряжения достигаются начиная с осевого перемещения в 9,3 мм (рисунок 4.39). По результатам моделирования получено, что наибольшие пластические деформации возникают в районе околошовной зоны ослабленного участка, а напряжения в районе сопряжения материалов с разными свойствами. Кроме того, распределение напряжений по поверхности происходит неравномерно и находится в диапазоне 3 МПа (рисунок 4.40).



а

б

Рисунок 4.39 – Влияние на напряженно-деформированное состояние участка газопровода совместного действия внутреннего давления и продольной нагрузки. Модель с бездефектными сварными швами и дефектным участком трубы, осевое перемещение 9,3мм (а – эквивалентные напряжения; б – пластические деформации)

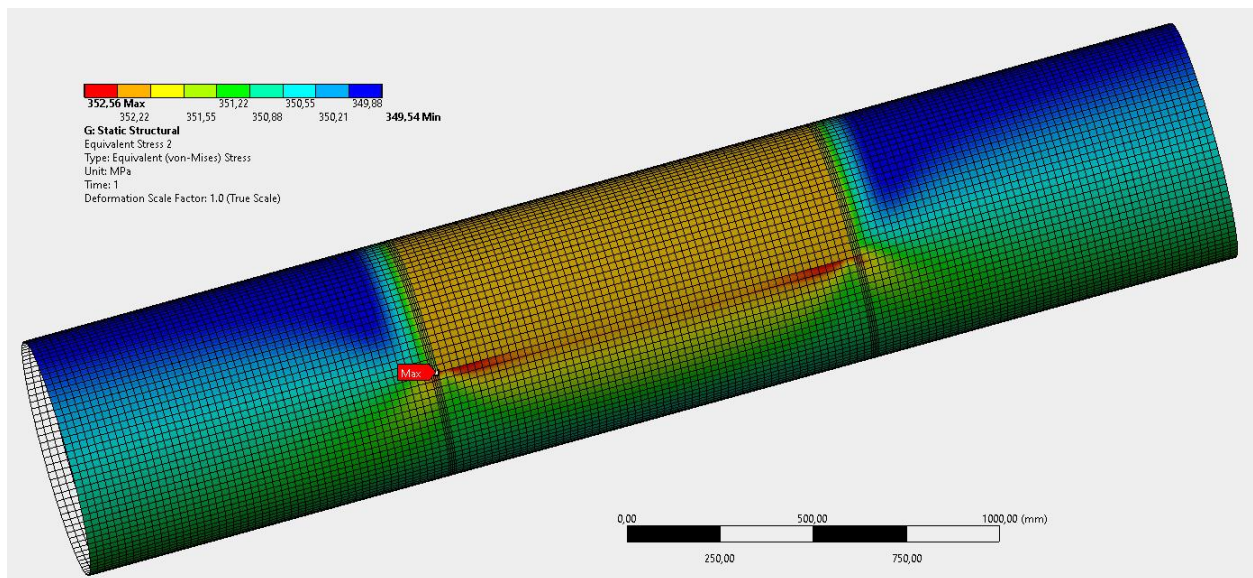


Рисунок 4.40 – Распределение эквивалентных напряжений по внешней поверхности модели с бездефектными сварными швами и дефектным участком трубы, осевое перемещение 9,3мм.

#### 4.3.4. Итоги моделирования

Сводные результаты моделирования приведены в табл.4.7.

Таблица 4.7 – Заданные осевые перемещения модели газопровода, приводящие к началу пластической деформации.

Тип участка	Полученные результаты при моделировании рабочего давления 7,5МПа, и с учетом параметров модели	
	Осевое перемещение до начала пластической деформации, мм	Уменьшение выдерживаемых осевых перемещений, %
Бездефектный	9,5	–
С отклонениями металла центральной части	9,3	2,1
С отклонениями металла центральной части и ослаблением сварных швов	5,8	38,9

По результатам моделирования показано, что локальные различия в механических свойствах труб приводят к значительному снижению способности газопроводов выдерживать продольные нагрузки. Проведенное моделирование, приближенное к реальному объекту, показало концентрацию напряжений в местах фактического возникновения дефектов на трубопроводе.

При разнородных свойствах металла в пределах одной трубы, распределение перемещений и напряжений происходит неравномерно и захватывает соседние области бездефектных труб. На основе полученных данных следует корректировать карты контроля объектов, уделять особое внимание на концентраторы напряжений в зонах с повышенными значениями напряжений и перемещений для снижения вероятности развития разрушений дислокационного характера.

#### Выводы по главе 4

1. Результаты исследований показали неудовлетворительное качество изготовления трубы и наличие в пределах дефектной зоны дефектов производства различной природы: раскатанную пористость, газовые пузыри, шлаковые

включения. Действующие нормативы на производство и контроль трубной продукции, как и действовавшие на момент производства, подразумевают 100% ультразвуковой контроль с определенной дискретностью. Таким образом, можно сделать вывод, что наличие участков без дефектов, соседствующих с дефектными, и их относительно короткая протяженность в радиальном и поперечном направлениях, повлияли на пропуск трубы с завода. Для исключения труб с такими дефектами, для особо ответственных производств, следует проводить ультразвуковую толщиномирию готовых изделий с более мелким шагом.

2. Наличие в трубах плоскостных дефектов привело к изменению физических и механических свойств металла, которые значительно зависят от конфигурации дефектов, количества и толщины включений. Наличие плоскостных дефектов значительно изменяет диапазон механических свойств металла в пределах одной трубной секции. Наибольшее влияние оказывается на относительное удлинение – сокращение до 25%, и на ударную вязкость, которая увеличилась на дефектных участках в 2 раза при измерениях в поперечных сечениях. Образцы с увеличенной толщиной включений показали падение всех механических свойств.

3. Проведенный осмотр внутренней поверхности трубы с отслоившимся участком дефекта, при сопоставлении результатов трех диагностических приборов, позволил выявить диагностические признаки для классификации дефекта как выходящего на внутреннюю поверхность расслоения с загибом участка отслоившегося металла. Этим признаком является совпадение аномальных зон от магнитных приборов разной направленности намагничивания и фиксация колебаний профилемера, начинающаяся в зоне их окончания.

5. Опасностью локальных изменений механических свойств материала, является изменение однородности распределения действующих напряжений в конструкциях, и снижение способности выдерживать непроектные продольные нагрузки.

6. В результате исследований подтверждено, что расслоения металла при сварке токами высокой частоты, оказывают значительное влияние на качество сварных швов, существенно снижая их прочность. Наиболее подверженной

влиянию такого рода расслоений является способность материалов к растяжению, которая снижается до двух и более раз. При этом, следует учитывать, что в процессе эксплуатации на таких сварных соединениях создаются условия неравномерного нагружения, что приводит к послойному разрушению дефектных участков. В условиях переменных нагрузок это приводит к сокращению срока службы объектов и повышению вероятности разрушения при штатных нагрузках.

7. Средства проведения внутритрубной диагностики, использующие магнитный метод контроля, в условиях дополнительной разнотолщинности труб до 25%, на данный момент неэффективны для обнаружения как сварных соединений с микродефектами, так и труб со структурными дефектами стенок трубопроводов, параллельных поверхности, таких как раскатанные включения. В настоящее время основным обнаруживающим и подтверждающим подобные дефекты методом, остается ультразвуковой контроль, однако он не подходит для массового применения на протяженных газопроводах и возможен для проведения только в условиях прямого контроля в шурфах.

## Глава 5 СПОСОБ ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

В главе приведен разработанный способ количественной оценки неоднородности микроструктуры металлов и сплавов на основе стереологических методов. Описание способа представлено в российском переводном журнале [113], входящим в перечень ВАК, индексируемом в базах SCOPUS и WoS, разработано реализующее предложенный способ программное обеспечение.

### 5.1 Описание способа

Цель разработанного способа заключается в расширении возможностей при анализе дефектности микроструктуры материалов за счет использования параметров выборочного размаха, единичной сплошной протяженности второй фазы, анализа изменения последовательного объема второй фазы, а также представлении способа визуализации результатов измерений в виде полярных диаграмм.

Основная масса эксплуатируемых сталей и сплавов имеет поликристаллическое строение. Отдельные кристаллиты обладают случайной ориентацией кристаллографических направлений и плоскостей в объеме металла, что в итоге обеспечивает квазиизотропность свойств реального материала в любом направлении. Если в процессе производства или обработки сталей и сплавов происходит увеличение числа зерен с однонаправленной ориентацией кристаллографических направлений, то такие материалы будут иметь выраженную анизотропию свойств [9, 51, 99, 100], которая существенно влияет на физико-механические характеристики материалов.

В условиях массового производства металлопроката, в частности сварных или цельнотянутых стальных труб, основным фактором, влияющим на неравномерность свойств материала, являются дефекты микроструктуры. К ним в основном относятся раскатанные неметаллические включения и газовые поры, имеющие сопоставимые с зёрнами металла размеры, так как объекты с явными



значительными дефектами большой площади и объема, как правило, обнаруживаются на этапе производства и в эксплуатацию не допускаются. Выявляемые и оцениваемые отклонения в микроструктуре металлов позволяют определить технологические факторы производства, включая скорость кристаллизации, степень и направление деформационных воздействий, этапы и режимы термообработки. Исследования микроструктуры проводятся для подтверждения соответствия материала нормам качества и являются одним из обязательных видов работ при определении причин аварийных разрушений объектов.

В настоящее время непрерывно продолжаются работы по совершенствованию и автоматизации систем контроля качества для уменьшения влияния человеческого фактора. В действующих отечественных и зарубежных стандартах [8, 89] регламентируется горизонтальное позиционирование направления проката при снимках микрошлифов, однако в современных условиях для полноценного анализа микроструктур, следует отходить от таких ограничений и условий. Кроме того, снижение влияния человеческого фактора при оценках параметров микроструктур за счет применения информационных технологий, позволит обеспечить воспроизводимость результатов, увеличить скорость обработки образцов.

## **5.2 Возможности и цели анализа изображений**

Анализ изображений применяется в широком спектре научных, исследовательских, производственных и контролирующих задач. Все больше используются методы контроля продукции на основе машинного зрения [21, 69, 118, 130]. В частности, это позволяет автоматизировать производственные процессы технического контроля качества поверхности выпускаемых изделий без использования более дорогостоящих методов контроля, например, ультразвуковых, радиографических или механических.

При контроле микрошлифов определяются такие характеристики материала как размер зерен и включений, полосчатость, коэффициент анизотропии и прочие

параметры. Сконцентрированная в небольшом объеме доля второй фазы, под которой в данной работе понимаются также неметаллические включения, с отличающимися физико-механическими свойствами способна внести существенное изменение в виде локальных концентраций механических напряжений и деформаций при численном моделировании поведения конструкции с учетом реальной структуры материала [61].

### **5.3 Современный подход к анализу изображений**

Стереометрическая металлография построена на математических статистических методах обработки массивов информации [128], которые содержатся в изображениях микроструктур. В настоящее время уже практически не используется аналоговая фотография и накладываемые измерительные шкалы и сетки. Цифровые изображения микроструктуры позволяют существенно автоматизировать аналитические процедуры, улучшить качество снимков, провести количественный подсчет фаз, включений и границ зерен. Доступные на данный момент вычислительные мощности позволяют выполнять широкий спектр работ по обработке изображений. Разработано большое количество специализированного программного обеспечения (ПО) для металлографии, например, российские Image Pro, Thixomet, NEXSYS ImageExpert Pro 3, SIAMS или зарубежные Mirar, JMicroVision, а также свободно распространяемое ПО, например, ImageJ, Fiji, Icy и т.д. Однако непосредственно используемые алгоритмы при получении результатов зачастую являются «ноу-хау» разработчиков программного обеспечения, за счет чего результаты, получаемые в одном программном продукте, могут отличаться от результатов обработки в другой программе даже в случае применения одних и тех же базовых формул. Следует отметить, что при повышении возможностей программного обеспечения пропорционально увеличивается его стоимость и сложность освоения.

Необходимо учитывать, что на результаты обработки значительное влияние оказывает качество изображений. Цветовая дифференциация пикселей, отражающая фазы, включения или границы зерен в изображениях микрошлифов,

является главным фактором, обеспечивающим валидность результатов автоматических измерений. Несмотря на то, что наиболее простыми в обработке и максимально обеспечивающими воспроизводимость результатов, считаются бинарные изображения, в программе реализованы алгоритмы, позволяющие обрабатывать цветные изображения с применением баланса яркости. Кроме того, в работе [105] автором приведены способы повышения контрастности изображений и метод бинаризации, нивелирующий неравномерность полей яркости изображений за счет секторальной обработки.

## **5.4 Реализация способа**

### *5.4.1 Шаг измерений и количество секущих линий*

Методики оценки и описания внешнего вида микроструктур сталей и сплавов стереографическими методами заключаются в определении количества и протяженности пересечений элементов второй фазы, включений или границ зерен условными измерительными линиями (секущими), направленными параллельно и перпендикулярно направлению проката. Регламентируется, что изображение микрошлифа при анализе должно располагаться вдоль направления проката. Стоит отметить, что количество секущих в направлении параллельном и перпендикулярном направлению прокатки будет оказывать влияние на полученные результаты. Очевидно, что чем больше количество секущих, тем более подробно учитываются структурные особенности исследуемого шлифа и более точно вычисляются коэффициенты анизотропии и полосчатости. С учетом того, что цифровые изображения являются точечными, был реализован алгоритм, при котором анализ изображения исследуемого шлифа проводился максимально подробно с шагом в 1 пиксель как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. При наличии наложенных на изображения линеек, после сопоставления длина отрезков может измеряться как в пикселях, так и в сопоставленных с ними линейных единицах измерения.

#### 5.4.2 Методика расчета предлагаемых параметров

Расчетные количественные параметры микроструктур, приведенные в стандарте [8] дополнены числовыми характеристиками, описывающими рассеивание параметров без усреднения и достаточно «чувствительных» к изменению линейной доли второй фазы. Наиболее оптимальной для таких случаев альтернативной характеристикой рассеивания будет выборочный размах:

$$R_s = L_{s \max} - L_{s \min}, \quad (5.1)$$

где:

$L_{s \max}, L_{s \min}$  – максимальная и минимальная суммарная доля второй фазы на тестовой линии.

$$L_{s \min} = \text{MIN}(l_{s1}; l_{s2}; \dots; l_{sm-1}; l_{sm}). \quad (5.2)$$

$$L_{s \max} = \text{MAX}(l_{s1}; l_{s2}; \dots; l_{sm-1}; l_{sm}). \quad (5.3)$$

Важным в рассмотрении является показатель единичной сплошной протяженности второй фазы для каждого углового направления (диаметр Фере):

$$L_u = \text{MAX}(l_{u1}; l_{u2}; \dots; l_{um-1}; l_{um}), \quad (5.4)$$

где:

$m$  – количество тестовых линий (высота или ширина изображения в пикселях).

Для графического отображения и анализа объема второй фазы, строится гистограмма, отражающая последовательные измерения ее линейной доли ( $L_{s i}$ ). Кроме того, учитывая попиксельное сканирование изображений, суммарная протяженность линейной доли второй фазы будет соответствовать ее объему в обследуемой плоскости микрошлифа:

$$V_{dp} = \sum_{i=1}^m (l_{s i}), \quad (5.5)$$

что позволит точно определить объем второй фазы, в данном случае включений.

Кроме предлагаемых параметров выборочного размаха ( $R_s$ ), единичной сплошной протяженности второй фазы ( $L_u$ ) и последовательного объема второй фазы ( $L_{s i}$ ) для получения более полной картины были проведены расчеты общепринятых стереометрических параметров сплавов: пересечений ( $N$ ),

анизотропии ( $AI$ ), среднеквадратичных отклонения ( $\sigma$ ), и отношений взаимно перпендикулярных среднеквадратичных отклонений ( $BR$ ) по принятым формулам расчета, подробно описанным в стандарте [8].

#### *5.4.3 Визуализация результатов*

Для решения проблемы позиционирования микрошлифов, предлагается выполнять измерения на изображениях с поворотом секущих измерительных линий в 1 градус. Измерения проводятся по 180 градусам исследуемого участка, результаты рассчитываются для каждого углового направления. Таким образом, по результатам измерений определяются радиальные направления максимальных и минимальных значений пересечений и протяженности второй фазы и рассчитанные на их основе показатели микроструктур. При анализе изображений по всем угловым направлениям появляется возможность отображения результатов в виде графиков в полярных координатах, визуализирующие направление и величину неоднородности материала независимо от расположения изображения микрошлифа материала. Такой подход позволяет автоматически определять максимальные и минимальные направления неравномерностей распределения сторонних включений и фаз.

#### *5.4.4 Сравнительный анализ на стандартных образцах*

Для анализа и тестирования работоспособности предлагаемых алгоритмов были обработаны образцы типовых микроструктур из стандарта [8], выборочные результаты и сравнение расчетных показателей которых приведены в таблице 5.1. и из стандарта [89], выборочные результаты и сравнение расчетных показателей которых приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.1. Результаты способа оценки неоднородности микроструктуры в сравнении с данными стандарта [8]

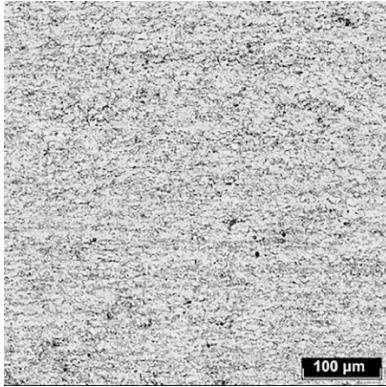
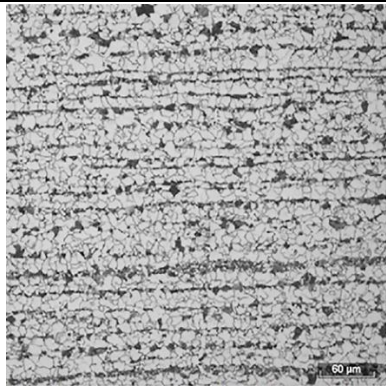
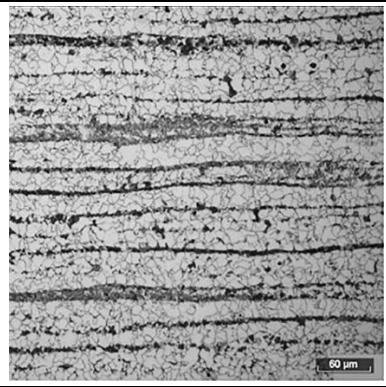
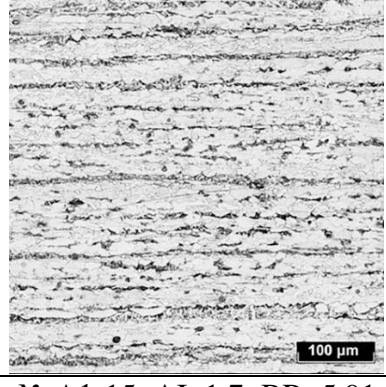
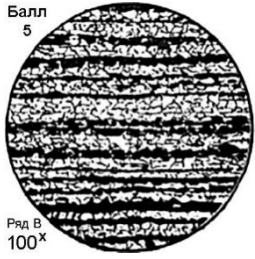
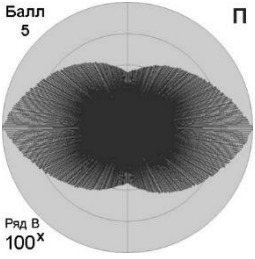
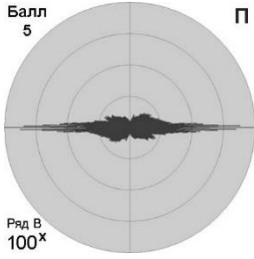
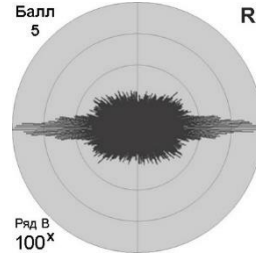
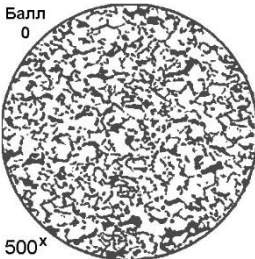
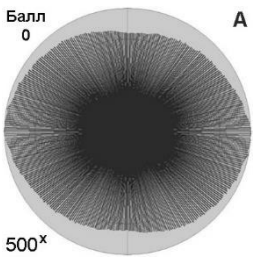
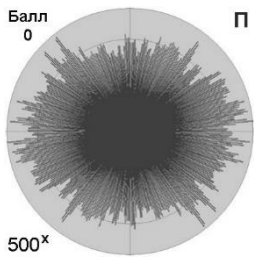
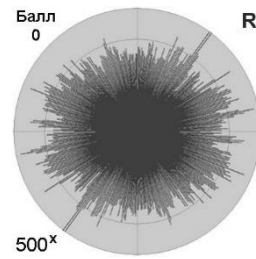
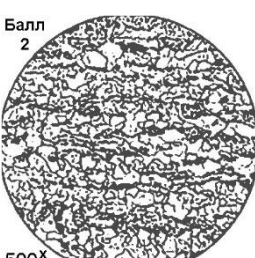
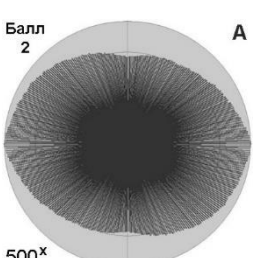
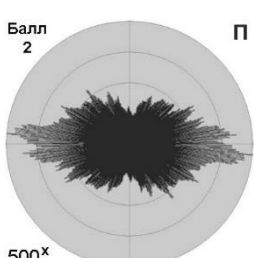
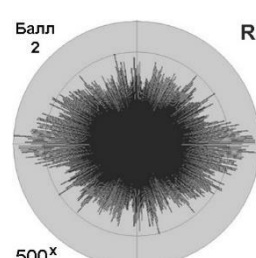
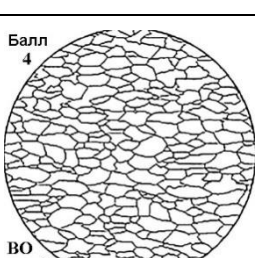
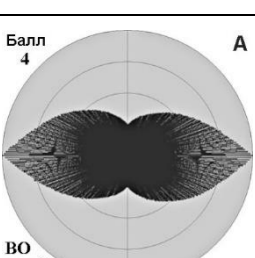
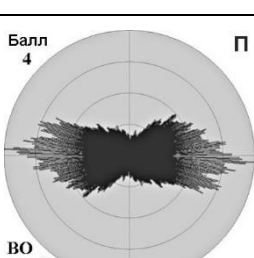
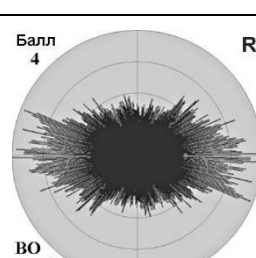
№ образца по ASTM E1268-19 [8]	Полученные после обработки результаты	
	Анизотропия, AI	Полосчатость, BR
	<p>AI</p> <p>Min: 0,87 [82°] Max: 1,15 [172°]</p>	<p>BR</p> <p>Min: 0,61 [94°] Max: 1,64 [4°]</p>
№ A1-2; AI: 1.17; BR: 1.71	AI: 0.87...1.15	BR: 0.61...1.64
	<p>AI</p> <p>Min: 0,85 [92°] Max: 1,18 [2°]</p>	<p>BR</p> <p>Min: 0,26 [92°] Max: 3,88 [2°]</p>
№ A1-5; AI: 1.21; BR: 3.15	AI: 0.85...1.18	BR: 0.26...3.88
	<p>AI</p> <p>Min: 0,80 [84°] Max: 1,25 [174°]</p>	<p>BR</p> <p>Min: 0,19 [94°] Max: 5,39 [4°]</p>
№ A1-11; AI: 1.25; BR: 4.01	AI: 0.80...1.25	BR: 0.19...5.39
	<p>AI</p> <p>Min: 0,61 [76°] Max: 1,64 [166°]</p>	<p>BR</p> <p>Min: 0,22 [94°] Max: 4,46 [4°]</p>
№ A1-15; AI: 1.7; BR: 5.91	AI: 0.61...1.64	BR: 0.22...4.46

Таблица 5.2. Результаты способа оценки неоднородности микроструктуры в сравнении с данными стандарта [89]

Образец по [89]	Вид микроструктуры	Анизотропия (А)	Коэффициент неоднородности слоя (полосчатость, П)	Выборочный размах (R)
Таблица В.3. Балл 5, увеличение 100х (ряд В)	<p>Балл 5</p>  <p>Ряд В 100<sup>х</sup></p>	<p>Балл 5 П</p>  <p>Ряд В 100<sup>х</sup></p>	<p>Балл 5 П</p>  <p>Ряд В 100<sup>х</sup></p>	<p>Балл 5 R</p>  <p>Ряд В 100<sup>х</sup></p>
Таблица В.5. Балл 0, увеличение 500х (автоматический анализатор)	<p>Балл 0</p>  <p>500<sup>х</sup></p>	<p>Балл 0 А</p>  <p>500<sup>х</sup></p>	<p>Балл 0 П</p>  <p>500<sup>х</sup></p>	<p>Балл 0 R</p>  <p>500<sup>х</sup></p>
Таблица В.5. Балл 2, увеличение 500х (автоматический анализатор)	<p>Балл 2</p>  <p>500<sup>х</sup></p>	<p>Балл 2 А</p>  <p>500<sup>х</sup></p>	<p>Балл 2 П</p>  <p>500<sup>х</sup></p>	<p>Балл 2 R</p>  <p>500<sup>х</sup></p>
Таблица В.5. Балл 4, увеличение 500х (визуальная оценка)	<p>Балл 4</p>  <p>ВО 500<sup>х</sup></p>	<p>Балл 4 А</p>  <p>ВО 500<sup>х</sup></p>	<p>Балл 4 П</p>  <p>ВО 500<sup>х</sup></p>	<p>Балл 4 R</p>  <p>ВО 500<sup>х</sup></p>

Численные результаты обработки типовых микроструктур приведены в таблице 5.3

Таблица 5.3. Результаты измерений типовых микроструктур по [89].

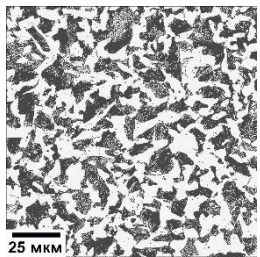
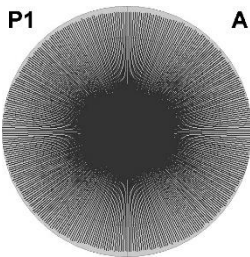
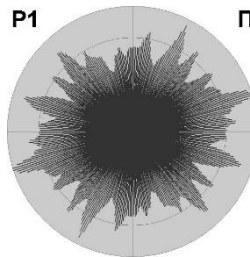
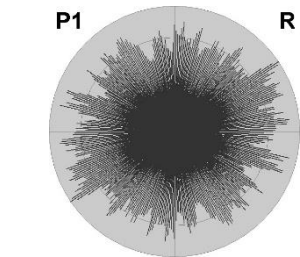
Образец по [ГОСТ5640]	Анизотропия (А)			Полосчатость (П)			Выборочный размах (R), %		
	Макс (угол)	Сред	Мин (угол)	Макс (угол)	Сред	Мин (угол)	Макс (угол)	Сред	Мин (угол)
Таблица В.3. Балл 5, увеличение 100х (ряд В)	1.51 (0)	1.03	0.66 (90)	7.53 (0)	1.29	0.13 (90)	86.88 (1)	32.00	17.73 (89)
Таблица В.5. Балл 0, увеличение 500х	1.12 (176)	1.00	0.89 (86)	1.29 (5)	1.00	0.77 (95)	46.45 (54)	21.02	20.92 (47)
Таблица В.5. Балл 2, увеличение 500х	1.19 (0)	1.01	0.84 (90)	2.12 (175)	1.06	0.47 (85)	49.65 (176)	21.99	32.05 (85)
Таблица В.5. Балл 4, увеличение 500х	2.02 (0)	1.08	0.05 (90)	2.83 (3)	1.16	0.35 (93)	38.65 (1)	21.04	12.41 (80)

По результатам сравнительного анализа определено, что результаты обработки по разработанной программе и алгоритмам хорошо коррелируют с результатами, представленными в стандартах: в численных значениях параметров по [8] и по балльной оценке в соответствии с [89]. За счет отображения результатов в графическом виде, в форме графиков в полярных координатах, достигается большая наглядность.

#### 5.4.5 Тестирование способа на реальных образцах

Результаты тестирования представлены в таблице 5.4. Численные результаты обработки микроструктур приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.4. Графические результаты обработки реальных образцов.

№ образца	Вид микроструктуры	Анизотропия (А)	Полосчатость (П)	Выборочный размах (R), %
P1				



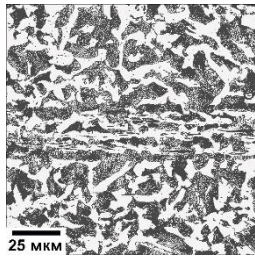
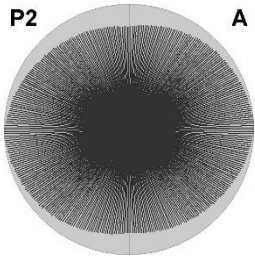
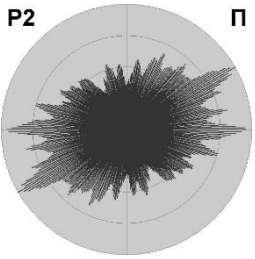
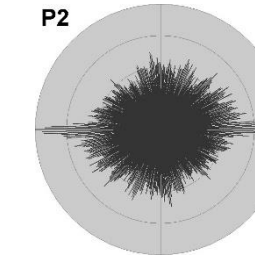
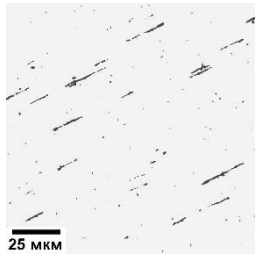
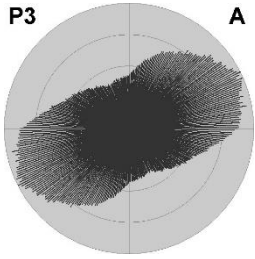
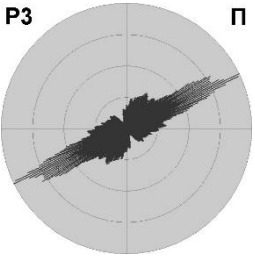
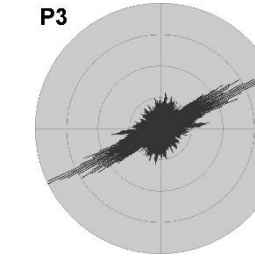
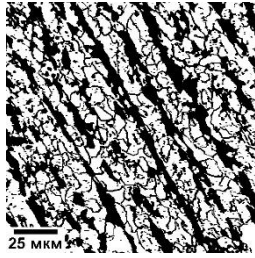
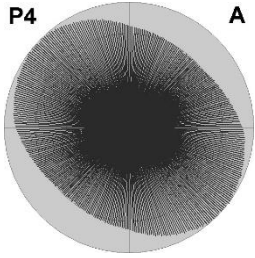
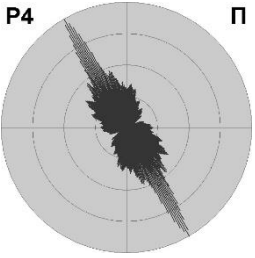
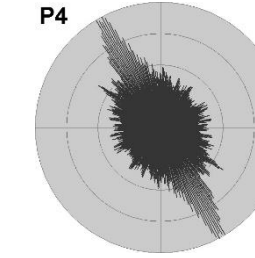
№ образца	Вид микроструктуры	Анизотропия (А)	Полосчатость (П)	Выборочный размах (R), %
P2				
P3				
P4				

Таблица 5.5. Результаты измерений реальных образцов.

№ и тип образца	Анизотропия (А)			Полосчатость (П)			Выборочный размах (R), %		
	Макс (угол)	Сред	Мин (угол)	Макс (угол)	Сред	Мин (угол)	Макс (угол)	Сред	Мин (угол)
P1. Низкоуглеродистая сталь (Сталь 40). Травление в 4% нитале	1.03 (7)	1.00	0.97 (97)	1.42 (17)	1.01	0.71 (107)	52.13 (34)	39.90	30.33 (153)
P2. Низкоуглеродистая сталь (Сталь 40) с плоскостными дефектами. Травление в 4% нитале	1.11 (0)	1.00	0.91 (90)	1.72 (30)	1.03	0.58 (120)	66.11 (0)	35.12	24.64 (118)
P3. Низкоуглеродистая сталь (Сталь 20) с плоскостными дефектами. Без травления.	1.65 (27)	1.05	0.61 (117)	4.64 (26)	1.24	0.22 (116)	29.62 (26)	7.70	3.55 (119)
P4. Низколегированная сталь 09Г2ФБ с выраженной анизотропией проката. Травление в 4% нитале	1.17 (143)	1.01	0.86 (53)	3.96 (120)	1.17	0.25 (30)	81.75 (152)	36.33	23.22 (55)

При анализе микроструктур трубных сталей (образцы P1...P4, таблицы 5.4, 5.5) получено, что максимальные показатели полученных параметров ожидаемо

соответствуют направлению проката, однако могут выдавать локальные всплески на микрошлифах малого размера.

В образце P1 рассмотрен микрошлиф без признаков явно выраженной деформации микроструктуры, точное позиционирование таких образцов по направлению проката затруднено. Выборочный размах, коэффициенты анизотропии и полосчатости слоев, не имеют явно выраженных совпадающих направлений.

При анализе образца P2, отличающегося от образца P1 наличием раскатанных плоскостных дефектов, определено, что наиболее ярким показателем является выборочный размах. Увеличение выборочного размаха на дефектном образце, по отношению к бездефектному составило более 21%, полосчатости на 17%, а анизотропии на 7%. Дефекты оказали влияние на величины анизотропии и полосчатости, при этом значительное влияние на последний оказало случайное расположение зерен перлита, образовавшее на графике второй пик, превышающий по значению полученный при измерениях по направлению проката. Показатель полосчатости в наибольшей степени подвержен расположению группировок зерен перлита, для улучшения качества анализа требуется увеличение поля зрения и размеров снимков.

При анализе снимков микрошлифов выявлено, что максимальные и минимальные направления анизотропии и полосчатости не всегда совпадают. При этом на слабдеформированных структурах коэффициент анизотропии является более четким индикатором направления деформации.

Для определения направлений и размеров включений в сплавах, подобный анализ микрошлифов можно проводить без травления и ориентирования микрошлифов (образец P3). Такой анализ автоматически выявит направление прокатки и относительную степень загрязненности материала. При анализе микроструктур без травления, любой из показателей отражает направление проката за счет вытянутости плоскостных дефектов, что может быть применено при автоматическом анализе с применением машинного зрения.

При явно выраженных направлениях деформации (образец Р4) и полосчатости, максимальные и минимальные показатели направления коэффициентов анизотропии и полосчатости могут отличаться на несколько градусов. Наиболее точно направление проката наиболее отражает показатель полосчатости. Примененный анализ по всем направлениям позволяет достаточно точно определять направление прокатки при произвольном угловом снимке микрошлифа.

#### *5.4.6 Тестирование и анализ на образцах без травления*

Использованы микрошлифы без травления из углеродистой стали 40, вырезанные вдоль направления прокатки. Для представления результатов отобрано два микрошлифа: образец 1, содержащий равномерно распределенные точечные неметаллические включения (рисунок 5.1), и образец 2, дополнительно имеющий плоскостные раскатанные включения (рисунок 5.2). Термин «вторая фаза» по отношению к нетравленным образцам, в дальнейшем будет применяться к включениям, выглядящих на изображениях более темными относительно яркости основной матрицы.

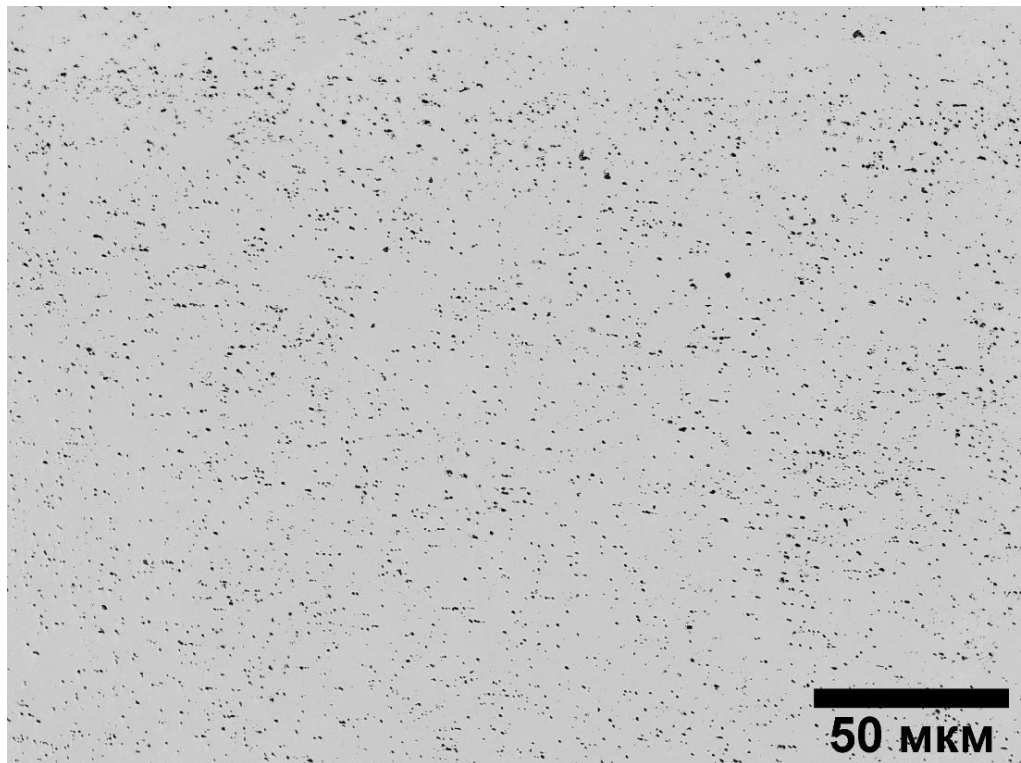


Рисунок 5.1 – Микрошлиф образца 1 из стали 40 с равномерно распределенными точечными неметаллическими включениями (образец 1)

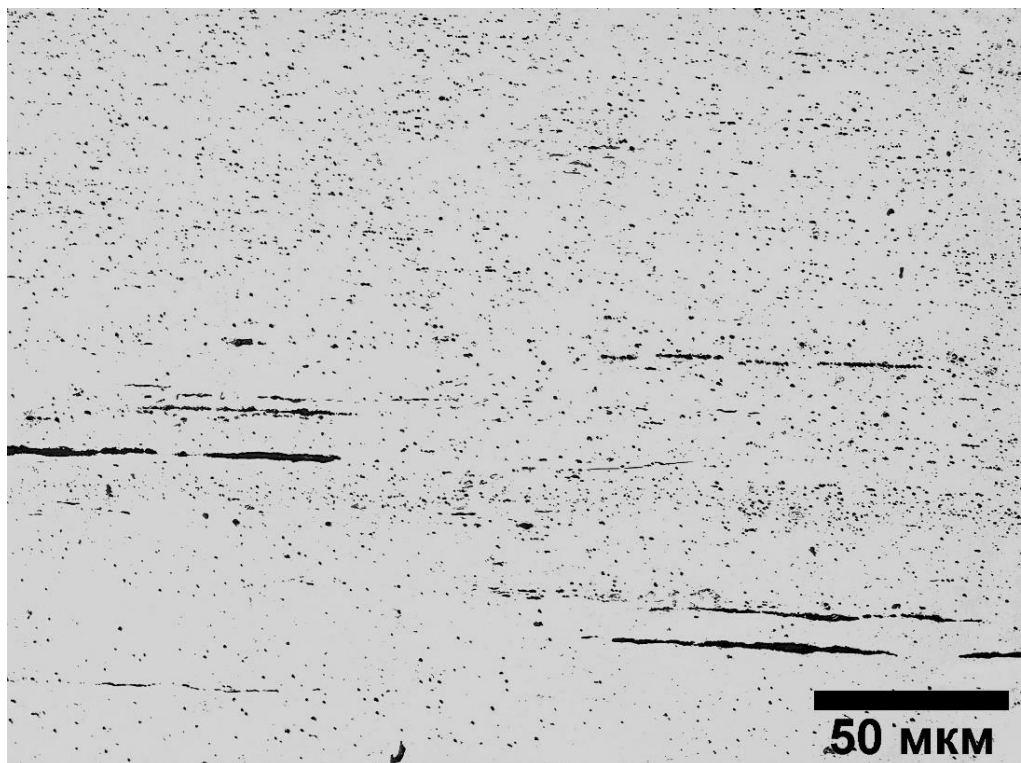
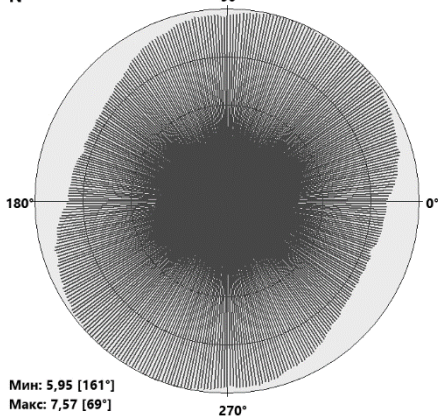
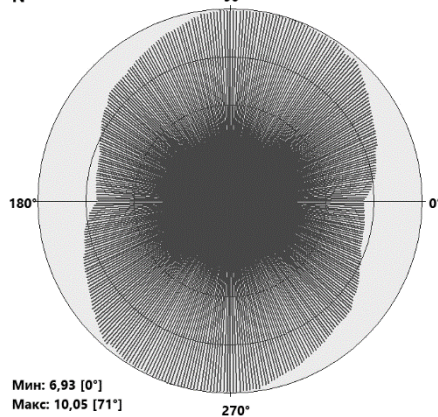
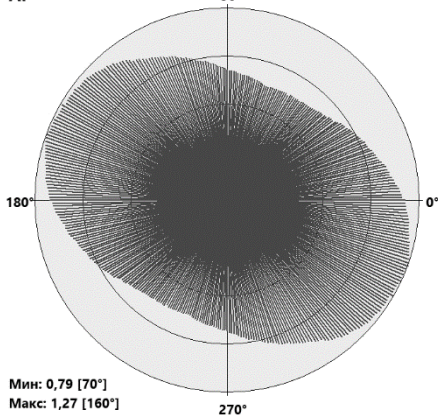
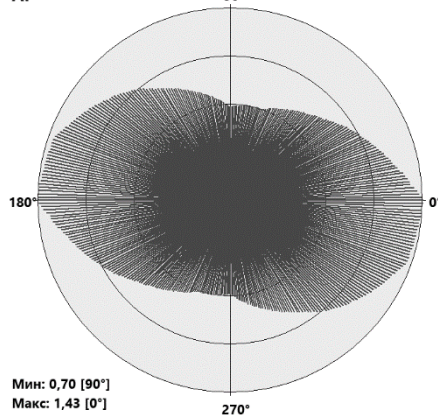
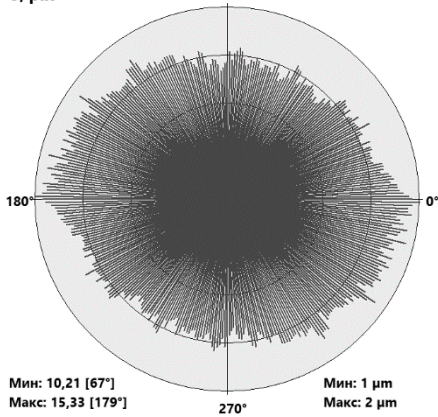
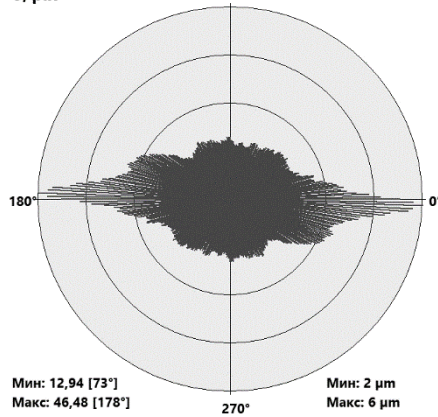
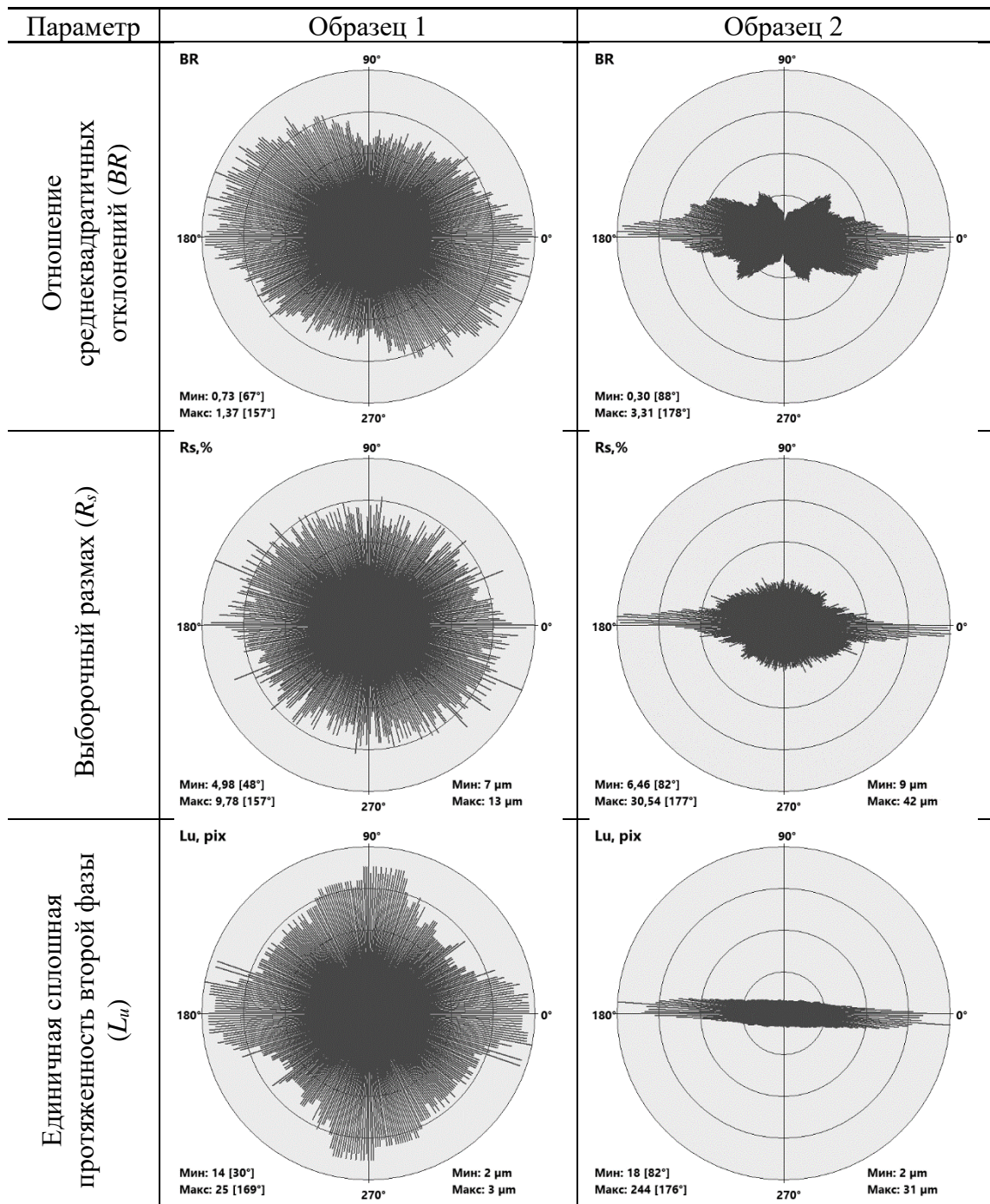


Рисунок 5.2 – Микрошлиф образца 2 из стали 40 с точечными и строчечными неметаллическими включениями (образец 2)

Полученные результаты обработки микрошлифов образца 1 (рисунок 5.1) и образца 2 (рисунок 5.2) приведены ниже в таблице 5.6.

Таблица 5.6. Графические и численные значения результатов обработки.

Параметр	Образец 1	Образец 2
Количество пересечений ( $N$ )	 <p>Мин: 5,95 [161°] Макс: 7,57 [69°]</p>	 <p>Мин: 6,93 [0°] Макс: 10,05 [71°]</p>
	 <p>Мин: 0,79 [70°] Макс: 1,27 [160°]</p>	 <p>Мин: 0,70 [90°] Макс: 1,43 [0°]</p>
	 <p>Мин: 10,21 [67°] Макс: 15,33 [179°]</p> <p>Мин: 1 <math>\mu\text{m}</math> Макс: 2 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>Мин: 12,94 [73°] Макс: 46,48 [178°]</p> <p>Мин: 2 <math>\mu\text{m}</math> Макс: 6 <math>\mu\text{m}</math></p>



Радиальный анализ микрошлифов позволяет более точно определить направление деформационных воздействий, особенно при неявном их выражении, что позволяет нивелировать человеческий фактор и недочеты при расположении образцов.

Результаты выборочного размаха по относительному восприятию в графическом представлении достаточно схожи с результатами отображения среднеквадратичных отклонений и их отношений в перпендикулярных

направлениях, однако этот параметр более информативен при определении физических различий в количестве второй фазы по выбранным угловым направлениям, так как более точно отражает различия в физической протяженности второй фазы.

Единичная сплошная протяженность второй фазы при анализе микрошлифов с раскатанными включениями может считаться показателем максимальных размеров (длины и ширины) локальных включений. По результатам анализа получено, что на образце 1 (рисунок 5.1) включения имеют глобулярную структуру с максимальными размерами  $2 \times 3$  мкм, а на образце 2 (рисунок 5.2) присутствуют протяженные включения протяженностью до 31 мкм, толщиной до 2 мкм. Объем второй фазы в образце 1 составил 2,8%, в образце 2 – 4,2%.

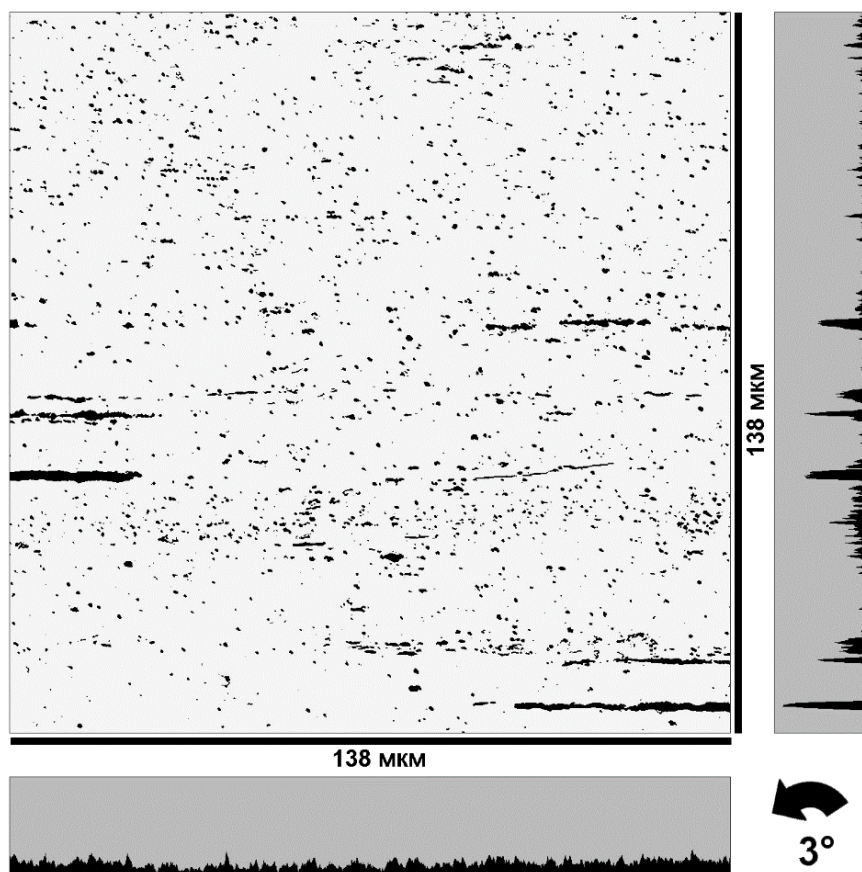


Рисунок 5.3 – Участок микрошлифа (образец 2) с глобулярными и плоскостными включениями, с диаграммами, отражающими последовательный объем второй фазы по направлению максимального выборочного размаха ( $177^\circ$ ) и перпендикулярному к нему направлениям.

На рисунке 5.3 приведен участок микрошлифа из образца 2 (рисунок 5.2), с поворотом 3 градуса относительно начального положения, в котором по горизонтали определено максимальное значение выборочного размаха.

Построение линейных диаграмм изменения последовательного объема второй фазы позволяет определить физическое количество отдельно выделяющихся дефектных линий (строчечных дефектов) за счет видимых пиков. При этом существует возможность определения точного расстояния между ними при сопоставлении расстояний в пикселях к физическим величинам. Точное определение объема второй фазы дает возможность сопоставить дефектность исследуемого микрошлифа с граничным допустимым объемом.

### **Выводы по главе 5**

1. Предложенный способ количественной оценки неоднородности металлов и сплавов на основе стереологических методов позволяет анализировать микрошлифы с шагом в 1 пиксель с поворотом изображения от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  и шагом в  $1^\circ$ . Минимально возможный шаг позволяет обеспечить максимальное качество и точность, а радиальный анализ нивелирует влияние ориентации микрошлифа на результаты исследований. Применение автоматизированного контроля исключает влияние человеческого фактора и обеспечивает воспроизведение результатов.

2. Выявлено, что при анализе дефектов микроструктуры без травления показатель выборочного размаха схож с результатами отображения среднеквадратичных отклонений и их отношений в перпендикулярных направлениях, однако более информативен при определении физических различий в количестве второй фазы. По величине выборочного размаха можно определить угловое направление дефектов микроструктуры.

3. Оценка сопоставления объемов второй фазы и анализ равномерности ее распределения по всем направлениям позволяет проводить автоматическую оценку дефектности микроструктур не только непосредственным сравнением, но и при помощи машинного зрения.



4. Дефекты существенно влияют на изменение стереометрических показателей, при этом выборочный размах является наиболее ярким показателем дефектности структуры. При анализе микроструктур без травления, наличие протяженных дефектов значительно влияет на все показатели с совпадающими направлениями максимумов и минимумов.

## Глава 6 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

### 6.1 Экспресс-метод определения конфигурации внутренних дефектов

#### 6.1.1 Описание метода

Предлагаемый метод предназначен для обеспечения возможности проведения экспресс-оценки дефектности структуры материала совместным анализом результатов толщинометрии изделия с помощью автоматических расчетов и визуальной оценки (рисунок 6.1).

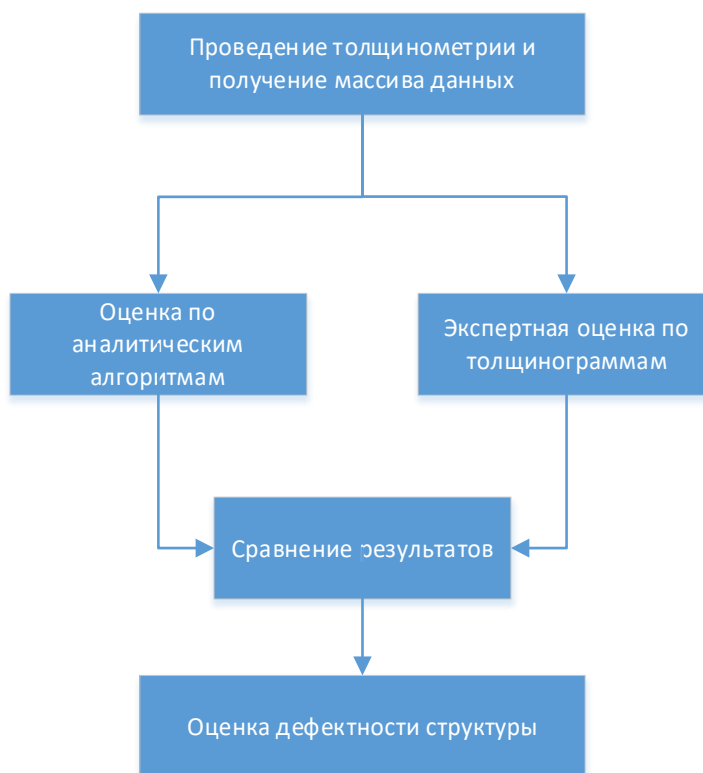


Рисунок 6.1 – Укрупненный алгоритм использования метода

Кроме непосредственно определения и вывода граничных значений измеренных толщин, проводятся автоматический анализ последовательности измерений и строится графический профиль (толщинограмма) контролируемого изделия, соответствующий его конструктивным особенностям и обеспечивающий возможность экспертной оценки качества материала по результатам контроля

сплошности. Уровень качества контроля и пороги обнаружения несплошностей регулируются настройкой приборов контроля и применением датчиков необходимой чувствительности.

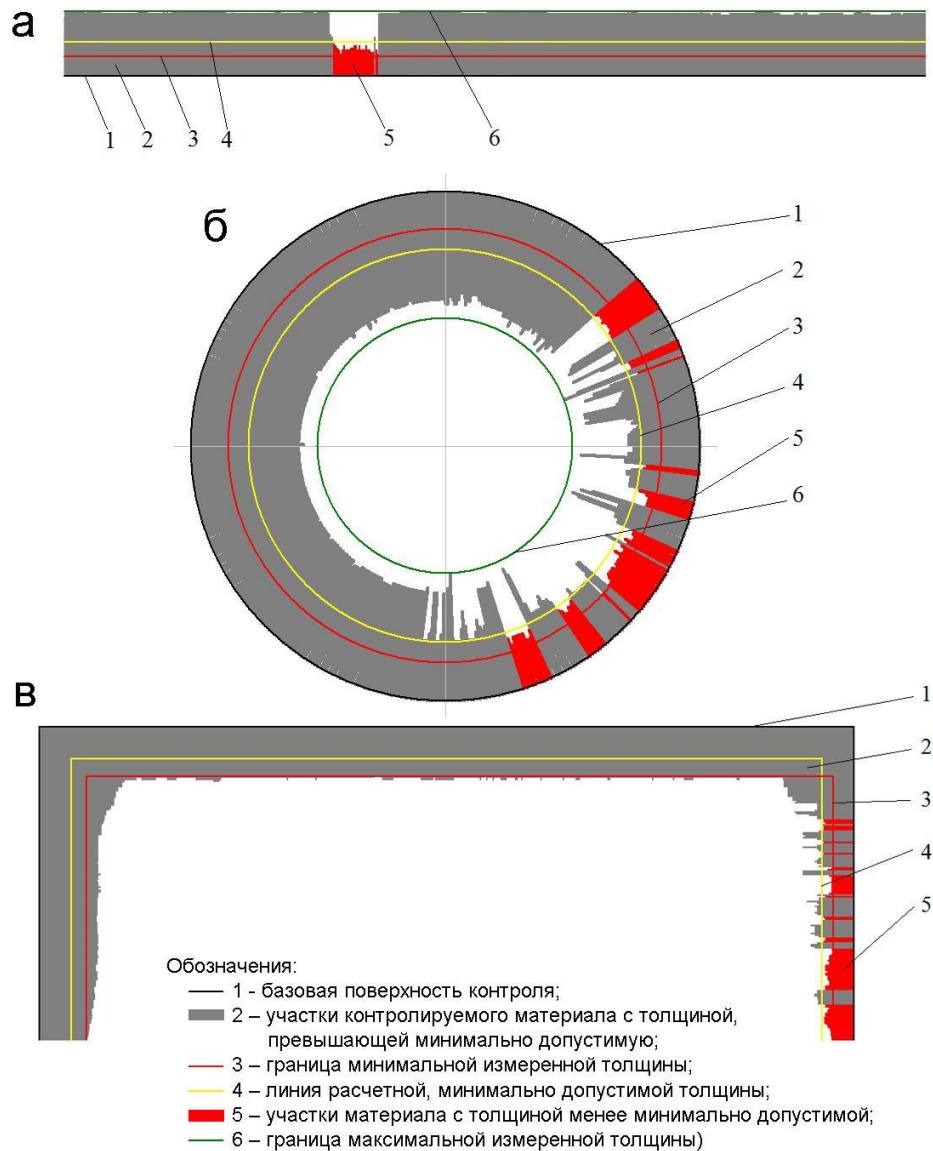


Рисунок 6.2 – Примеры толщинограмм (а – плоского листового проката, б – кольцевого сечения при контроле с внешней стороны, в – швеллер или деталь с П-образным сечением)

Аналитический расчет представляет собой сравнение толщины изделия в дискретных последовательных измеренных точках, вычисления динамики

изменения толщины и определении наличия в контролируемом изделии характерных признаков дефектов структуры материала.

Толщинограммы представляют собой геометрические фигуры, приближенные по контуру к контролируемому объекту (рисунок 6.2). Для плоских изделий, типа листового проката, толщинограммы строятся в виде столбчатого графика (рисунок 6.2а), на котором по одной оси откладывается проконтролированная длина, а по другой измеренная толщина. Для труб и изделий с кольцевым сечением, при контроле с внешней стороны, толщинограммы строятся от окружности, обозначающей внешнюю поверхность, внутрь, вычерчиванием отрезков к её центру (рисунок 6.2б).

При контроле изделий сложной геометрии, производят разбивку на участки, или задают контур измеряемого профиля и накладывают на него результаты замеров (рисунок 6.2в). Масштаб подбирается таким образом, чтобы обеспечить наибольшую наглядность результатов. Наличие в контролируемом изделии признаков дефектов структуры материала определяется визуально, по характерным отклонениям протяженности линий толщины от ожидаемых. Кроме того, на толщинограммах могут отображаться дополнительные параметры изделий, например, нормативная толщина, минимально допустимая толщина, границы минимальных и/или максимальных измеренных толщин, может проводиться цветовая дифференциация показаний для выделения дефектных мест, указываться параметры контролируемого изделия, материал, габаритные размеры, место установки, дата и время контроля и т.д.

Метод работает следующим образом: проводится дискретная пошаговая толщинометрия изделия по выбранному сечению. Записываются измеренные значения толщины и расстояние между точками контроля, при этом предпочтительно использовать толщиномеры оборудованные датчиками пути и блоками автоматической фиксации измерений. Оборудование, имеющее функции записи измерений в файлы данных, позволяет исключить человеческий фактор и сократить время обработки полученных результатов с получением выходных протоколов, по сравнению с ручным анализом.

После проведения замеров следует камеральная обработка результатов, при этом выделяют следующие значения:

$$\Delta S_i = |S_i - S_{i+1}| \quad (6.1)$$

$$\Delta S_{max} = |\max(S_i - S_{i+1})| = |\max(\Delta S_i)| \quad (6.2)$$

$$L_i^{def} = L_{dsk} \cdot n, \quad \begin{cases} S_i < S_{com} \rightarrow n = n + 1 \\ S_i \geq S_{com} \rightarrow n = 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

$$L_{max} = \max(L_i^{def}) \quad (6.4)$$

$$N_{Ldef} = \sum X, \quad \begin{cases} L_i^{def} \geq L_{adm} \rightarrow X = 1 \\ L_i^{def} < L_{adm} \rightarrow X = 0 \end{cases} \quad (6.5)$$

$N$  – общее количество точек контроля (измерения);

$n$  – количество последовательных точек контроля (измерения);

$i$  – произвольная точка контроля;

$S_{nom}$  – номинальная толщина стенки контролируемого изделия;

$\Delta S_{adm}$  – максимальный допустимый перепад толщины между двумя соседними точками замера, регламентируется стандартами на качество изготовления с учетом погрешности измерений;

$S_i$  – толщина стенки изделия в  $i$ -той точке контроля;

$\Delta S_i$  – перепад толщины между двумя соседними точками замера;

$S_{max}$  – максимальная толщина стенки контролируемого изделия;

$S_{min}$  – минимальная толщина стенки контролируемого изделия;

$S_{com}$  – расчетная толщина стенки контролируемого изделия;

$\Delta S_{max}$  – максимальный перепад толщины между двумя соседними точками замера;

$L_{adm}$  – максимальная допустимая протяженность участка с отклонением толщины стенки от номинальной больше порогового уровня, регламентируется стандартами на качество изготовления с учетом погрешности измерений;

$L_{dsk}$  – дискретность линейных измерений, расстояние между двумя соседними точками замера толщины;

$L_i$  – расстояние от начала замера до  $i$ -той точки контроля;

$L_i^{def}$  – протяженность зоны изделия с отклонениями толщины стенки от номинальной больше порогового уровня;

$L_{max}$  – максимальная протяженность зоны изделия с толщиной стенки отличающейся от номинальной;

$N_{Ldef}$  – количество дефектных зон с отклонениями толщины стенки от номинальной больше порогового уровня.

После математической обработки результатов контроля строят толщинограмму изделия.

Двойной анализ различными средствами значительно снижает вероятность пропуска дефектных показаний, обеспечивает максимально правильную трактовку результатов ультразвуковой толщинометрии, позволяет сделать выводы о наличии и типах дефектов структуры материала с учетом конструктивных особенностей изделия.

### *6.1.2 Практическая реализация метода*

Для реализации предложенного метода разработано специальное программное обеспечение, на которое получено государственное свидетельство о регистрации программы [129]. В качестве входных данных используется информационный массив, полученный с приборов контроля. Основными необходимыми исходными данными являются: измеренная толщина, сопоставленная с местом контроля по протяженности объекта и его диаметр. Внешний вид программы представлен на рисунках 6.3, 6.4, 6.5.

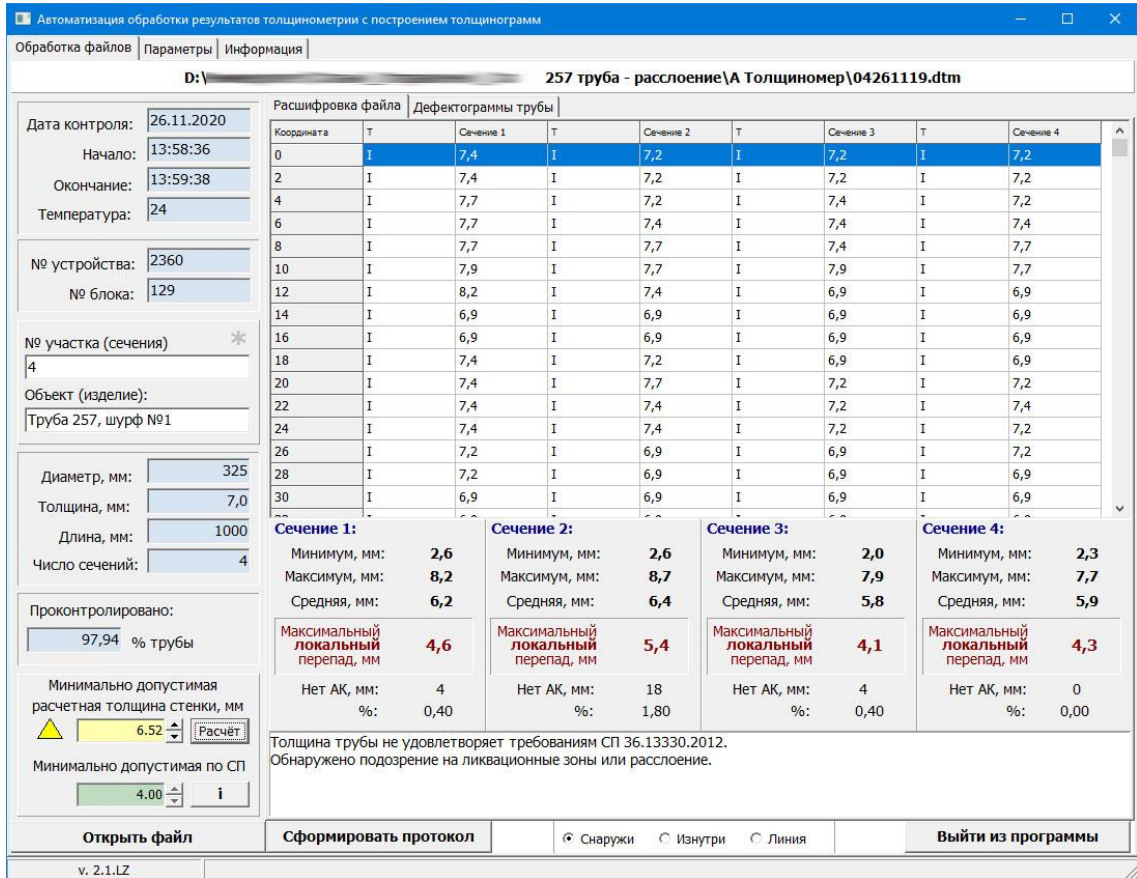


Рисунок 6.3 – Внешний вид разработанной программы (данные)

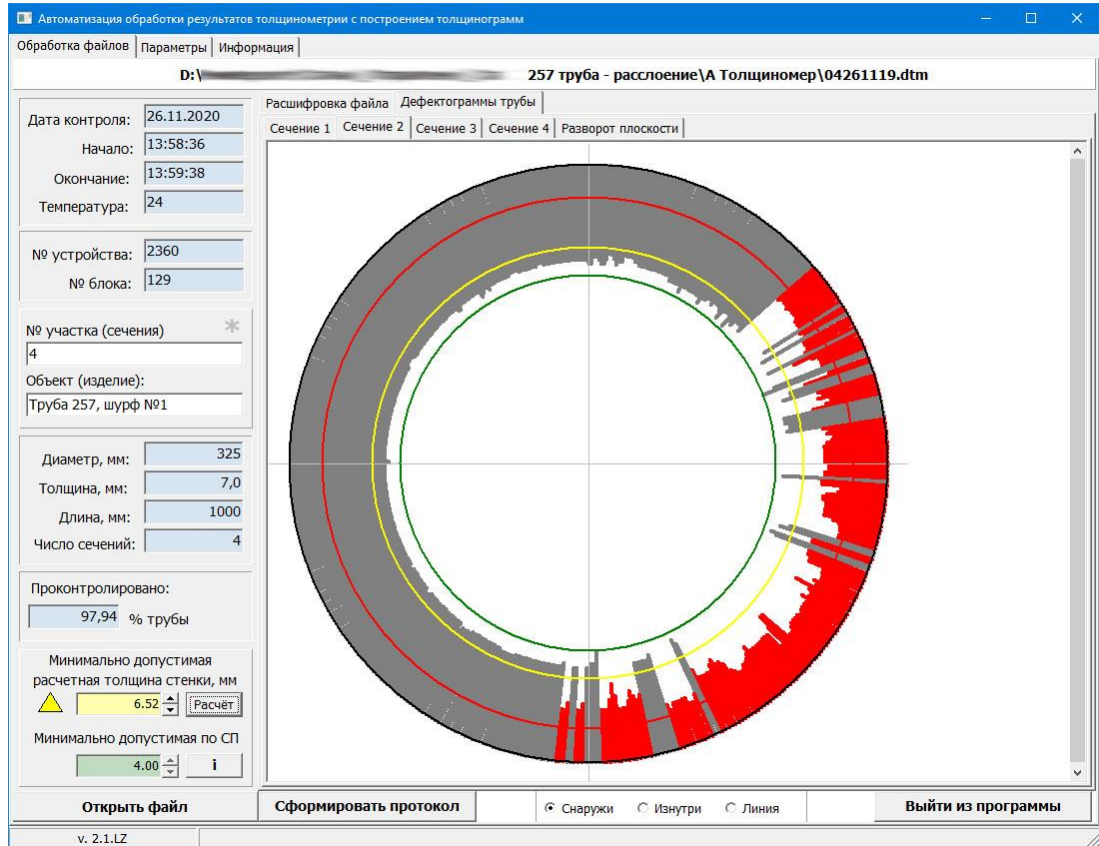


Рисунок 6.4 – Внешний вид разработанной программы (сечение)

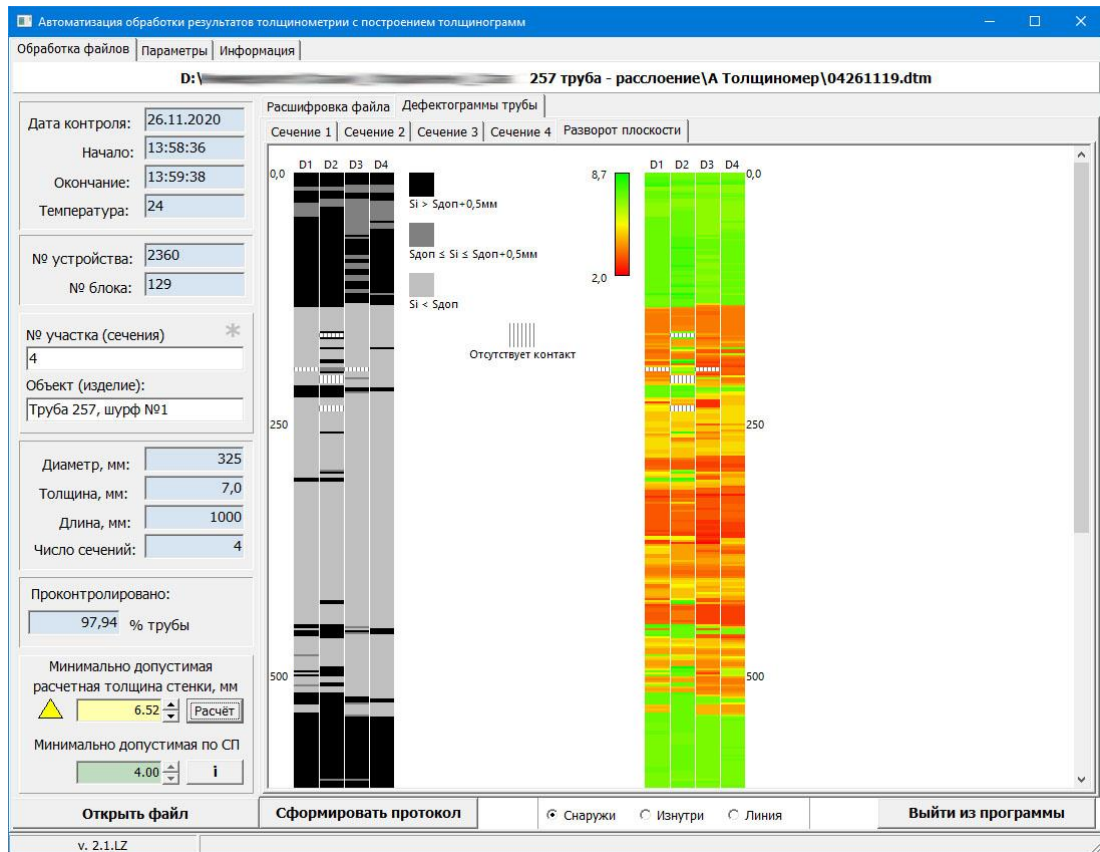


Рисунок 6.5 – Внешний вид разработанной программы (разворот)

Работа программы максимально автоматизирована, внедрены формулы 6.1...6.4, обрабатывающие при импорте данных. Также производится отрисовка профилей контролируемого объекта (рисунок 6.4) отдельно по каждому сечению, и реализована процедура построения спектрального анализа профилей по развороту плоскости (рисунок 6.5). Все внутренние вычисления и предварительная оценка контролируемого объекта производятся автоматически сразу после импорта данных, затем можно вывести результаты в виде протокола на печать.

Непосредственно отрисовка и формирование профильных толщинограмм происходит по алгоритму, часть кода которого приведена ниже:

```
function ShowDefectogramm(Datchik: Integer; ZonelImage: TImage) : Integer;
var _ii, _x1, _y1, _x2, _y2 : integer;
    _l, _s, _kr : real;
    _MaxS, _MinS : Real;
    _ik : Integer;
    _km : real;
begin
```



```

if Gl_form.SE_See.Value=1 then _km:=150/StrToFloat(Gl_form.Me_strub.Text)
else if Gl_form.SE_See.Value=2 then _km:=150/StrToFloat(Gl_form.Me_strub.Text)*0.9
else if Gl_form.SE_See.Value=3 then _km:=150/StrToFloat(Gl_form.Me_strub.Text)*0.8
else if Gl_form.SE_See.Value=4 then _km:=150/StrToFloat(Gl_form.Me_strub.Text)*0.7
else if Gl_form.SE_See.Value=5 then _km:=150/StrToFloat(Gl_form.Me_strub.Text)*0.6
else if Gl_form.SE_See.Value=6 then _km:=150/StrToFloat(Gl_form.Me_strub.Text)*0.5
else if Gl_form.SE_See.Value=7 then _km:=150/StrToFloat(Gl_form.Me_strub.Text)*0.4
else if Gl_form.SE_See.Value=8 then _km:=150/StrToFloat(Gl_form.Me_strub.Text)*0.3
else if Gl_form.SE_See.Value=9 then _km:=150/StrToFloat(Gl_form.Me_strub.Text)*0.2;

_MaxS:=0;
_MinS:=0;
_kr:=1;
if (Gl_form.Raspr.Checked=True) and
  (abs((2*3.141593*(StrToInt(Gl_form.Me_Diam.Text)/2)) -StrToFloat(Gl_form.ME_Line.text)) <
(2*3.141593*(StrToInt(Gl_form.Me_Diam.Text)/2)/10)) then
  _kr:=(2*3.141593*(StrToInt(Gl_form.Me_Diam.Text)/2))/(StrToInt(Gl_form.Me_Line.Text));

with ZonelImage.Canvas do begin
ZonelImage.Width:=640; // размеры изображения
ZonelImage.Height:=640;
ZonelImage.Picture.Bitmap.Width := 640;
ZonelImage.Picture.Bitmap.Height := 640;
Brush.Color := clWhite;
FillRect(Rect(0,0,ZonelImage.Width,ZonelImage.Height));
Pen.Color:=clGray;
Pen.Width:=Gl_form.SpinEdit1.Value;

For _ii:=1 to Gl_form.Grid_def.RowCount-1 do begin // цикл
  _x1:=0; _x2:=0; _y1:=0; _y2:=0;
  _ik:=_ii*2;
  _l:=(2*3.141593*(StrToInt(Gl_form.Me_Diam.Text)/2))/4;
  _x1:=320+FloatToInt(300*COS((_ik*_kr-_l)/(StrToInt(Gl_form.Me_Diam.Text)/2)));
  _y1:=320+FloatToInt(300*SIN((_ik*_kr-_l)/(StrToInt(Gl_form.Me_Diam.Text)/2)));
  _s:=StrToFloat(Gl_form.Grid_def.Cells[Datchik+1,_ii])*_km;
  _x2:=320+FloatToInt((300-_s)*COS((_ik*_kr-_l)/(StrToInt(Gl_form.Me_Diam.Text)/2)));
  _y2:=320+FloatToInt((300-_s)*SIN((_ik*_kr-_l)/(StrToInt(Gl_form.Me_Diam.Text)/2)));

  if Gl_form.Grid_def.Cells[Datchik,_ii]='R' then
    Pen.Color:=Gl_form.CB_RP.Color
  else
    Pen.Color:=Gl_form.CB_IP.Color;

  if (Gl_form.Edit1.Value>0) and (StrToFloat(Gl_form.Grid_def.Cells[Datchik+1,_ii])<Gl_form.Edit1.Value) then
    Pen.Color:=Gl_form.CB_MP.Color;

  MoveTo(_x1,_y1); LineTo(_x2,_y2);
  if _MinS=0 then _MinS:=StrToFloat(Gl_form.Grid_def.Cells[Datchik+1,_ii])*_km;
  if _MaxS<StrToFloat(Gl_form.Grid_def.Cells[Datchik+1,_ii])*_km then
    _MaxS:=StrToFloat(Gl_form.Grid_def.Cells[Datchik+1,_ii])*_km;
  if _MinS>StrToFloat(Gl_form.Grid_def.Cells[Datchik+1,_ii])*_km then
    _MinS:=StrToFloat(Gl_form.Grid_def.Cells[Datchik+1,_ii])*_km;
end;

Pen.Width:=1;
Pen.Color:=clSilver;
MoveTo(0,320); LineTo(640,320);

```

```

MoveTo(320,0); LineTo(320,640);

Pen.Width:=GL_form.SE_Kol.Value; // толщина линии
Pen.Color:=clBlack; // отрисовка внешнего профиля
Arc(20, 20, 620, 620, 0, 0, 0, 0);

Pen.Color:=clRed; // отрисовка профиля минимальной толщины
Arc(FloatToInt(_MinS)+20, FloatToInt(_MinS)+20, FloatToInt(620-_MinS), FloatToInt(620-_MinS), 0, 0, 0, 0);
Pen.Color:=clGreen; // отрисовка профиля максимальной толщины
Arc(FloatToInt(_MaxS)+20, FloatToInt(_MaxS)+20, FloatToInt(620-_MaxS), FloatToInt(620-_MaxS), 0, 0, 0, 0);

if GL_form.Edit1.Value>0 then begin
  Pen.Color:=clYellow; // отрисовка расчетной толщины
  Arc(FloatToInt(GL_form.Edit1.Value*_km)+20, FloatToInt(GL_form.Edit1.Value*_km)+20, FloatToInt(620-
GL_form.Edit1.Value*_km), FloatToInt(620-GL_form.Edit1.Value*_km), 0, 0, 0, 0);
end;
end;
end;

```

---

Для проведения полноценной оценки требуется также известная допустимая толщина объекта. В программе, кроме непосредственно построения толщинограмм и автоанализа последовательности измерений, интегрирован расчет допустимой толщины стенки труб (рисунок 6.6) в соответствии с требованиями [134] по формуле:

$$\delta = \frac{n \cdot p \cdot D_n}{2 \cdot (R_1 + n \cdot p)} \quad (6.5)$$

где:

$n$  – коэффициент надежности по нагрузке принимаемый в соответствии с таб. 14 [134];

$p$  – рабочее (нормативное) давление, МПа;

$D_n$  – наружный диаметр трубы, мм;

$R_1$  – расчетное сопротивление растяжению, рассчитываемое по формуле:

$$R_1 = \frac{R_n^1 \cdot m}{k_1 \cdot k_n} \quad (6.6)$$

где:

$m$  – коэффициент условий работы трубопровода принимаемый в соответствии с таб. 1 [134];

$R_n^I$  – нормативное сопротивление растяжению, равное минимальному значению временного сопротивления на трубы;

$k_l$  – нормативное коэффициент надежности по материалу принимаемый в соответствии с таб. 10 [134];

$k_n$  – коэффициент надежности по ответственности трубопровода принимаемый в соответствии с таб. 12 [134]).

При этом толщину стенки труб, следует принимать не менее:

- 1/100 номинального наружного диаметра;
- 3 мм для труб номинальным диаметром 200;
- 4 мм для труб номинальным диаметром от 200 до 1000 мм;
- 12 мм для труб номинальным диаметром от 1000 мм.

Расчет толщины

Расчитываемый элемент

Труба (катушка)  Отвод

Параметры расчитываемого элемента

Диаметр трубы, D, мм: 325

Рабочее (расчетное) давление в трубопроводе, Pp, МПа: 7,50

Коэффициент надежности по ответственности, K<sub>n</sub>: 1,100

Коэффициент надежности по нагрузке, n: 1,10

Категория участка трубопровода: B

Коэффициент условий работы трубопровода, m: 0,660

Параметры материала

Значение временного сопротивления разрыву, M: 510

Коэффициент надежности по материалу, K<sub>l</sub>: 1,55

Результаты расчета

Минимально допустимая толщина стенки по расчету, 6,52

Занести результат в протокол

$$\delta = \frac{n \cdot p \cdot D_n}{2 \cdot (R_1 + n \cdot p)}$$

$$R_1 = \frac{R_n^I \cdot m}{k_1 \cdot k_n}$$

n – коэффициент надежности по нагрузке  
 p – рабочее (расчетное) давление в трубопроводе, МПа  
 D<sub>n</sub> – наружный диаметр трубы, мм  
 R<sub>1</sub> – нормативное сопротивление растяжению (сжатию)  
 R<sub>n</sub><sup>I</sup> – нормативное сопротивление растяжению (сжатию)  
 m – коэффициент условий работы трубопровода  
 k<sub>1</sub> – коэффициент надежности по материалу  
 k<sub>n</sub> – коэффициент надежности по ответственности трубопровода

Рисунок 6.6 – Внешний вид модуля для расчета минимальной допустимой  
ТОЛЩИНЫ

### 6.1.3 Применение при обследовании магистральных газопроводов

Обследованию подвергались как бездефектные трубные секции, так и трубы, содержащие металлургические или производственные (образованные в процессе проката) дефекты различного типа. Контролировались трубы различного диаметра: от 219 мм до 1420 мм, и с различной толщиной стенки: от 6,0 мм до 22,0 мм. Основные рассматриваемые дефекты в трубах: участки с ликвационными включениями, эндогенные включения, расслоения металла. Анализировались как внутренние, так и выходящие наружу расслоения. Ультразвуковой пошаговый контроль с фиксацией результатов проводился по внешней поверхности труб. При обнаружении объектов с недопустимыми дефектами проводилась их вырезка, подготовка образцов и оптическая микроскопия дефектных зон.

#### 6.1.3.1 Контроль объектов без дефектных структур

При анализе результатов контроля труб без внутренних дефектов, получены толщинограммы, представленные на рисунках 6.7а и 6.7б. При контроле бездефектных труб, отсутствуют резкие перепады толщины в соседних точках измерения. При этом достаточно точно определяются особенности труб, такие как продольные сварные соединения.

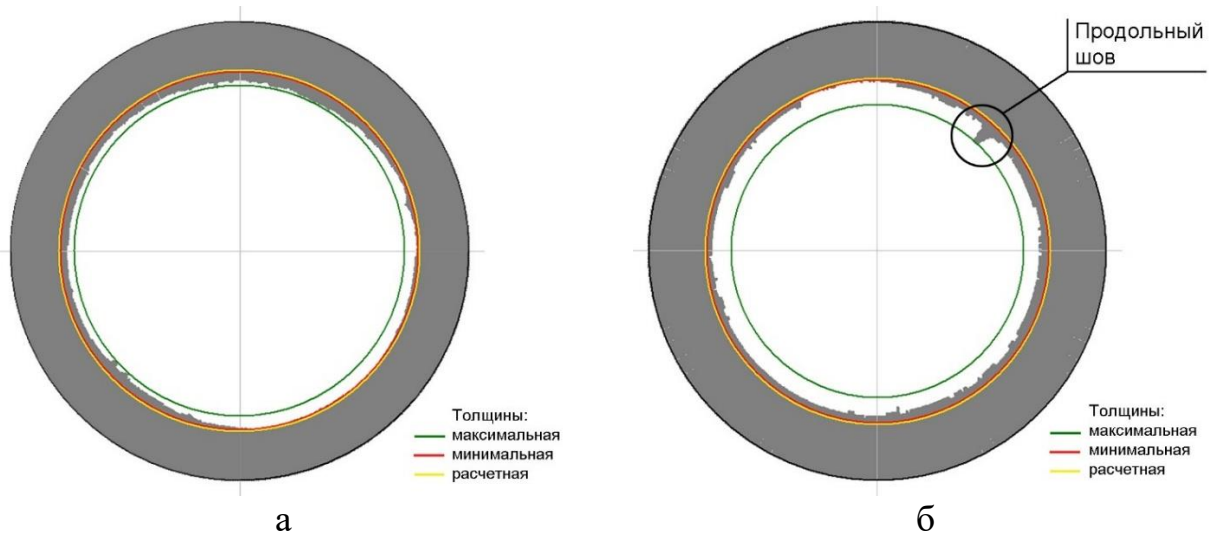


Рисунок 6.7 – Толщинограммы труб без дефектов.

(а – бесшовная труба; б – труба с продольным швом)

### 6.1.3.2 Контроль объектов с ликвационными включениями

При наличии «полупрозрачных» включений, к которым относятся ликвационные включения малой толщины, показания приборов могут изменяться, с разной вероятностью показывая как полную толщину стенки, так и толщину до дефекта. Изменение показаний происходит при небольших сдвигах датчиков по контролируемой поверхности. Достаточно точное определение таких включений определяется на дефектоскопах с возможностью индикации амплитуды исследуемого сигнала в режим A-Scan. Однако такой режим работы более трудоемок. В большинстве случаев ликвационные включения располагаются в середине стенки трубы, что связано с технологией их производства, причем данный дефект встречается как на сварных трубах, так и на цельнотянутых.

При последовательном дискретном ультразвуковом контроле таких труб, показания приборов изменяются, отображая значения от полной толщины стенки до ликвационного слоя. После обработки данных, получаются характерные графики, представленные на рисунках 6.8а и 6.8б. В зависимости от количества ликвационных включений в стенке трубы, изменяется «ступенчатость» толщинограмм.

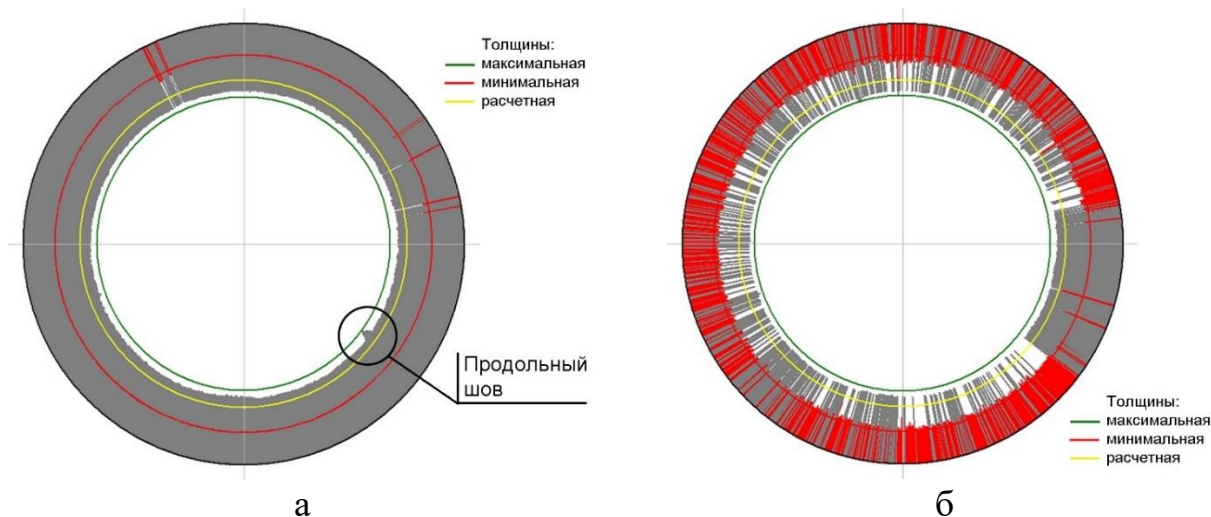


Рисунок 6.8 – Толщинограммы труб с ликвациями.

(а – редкие ликвационные включения; б – ликвационная полоса)

Внутренняя структура таких труб (рисунок 6.9а) имеет скопления посторонних включений в виде сульфидов, оксидов алюминия, кремния или других соединений, при этом толщина и протяженность таких включений относительно не велики, по сравнению со структурой расслоений (рисунок 6.9б).

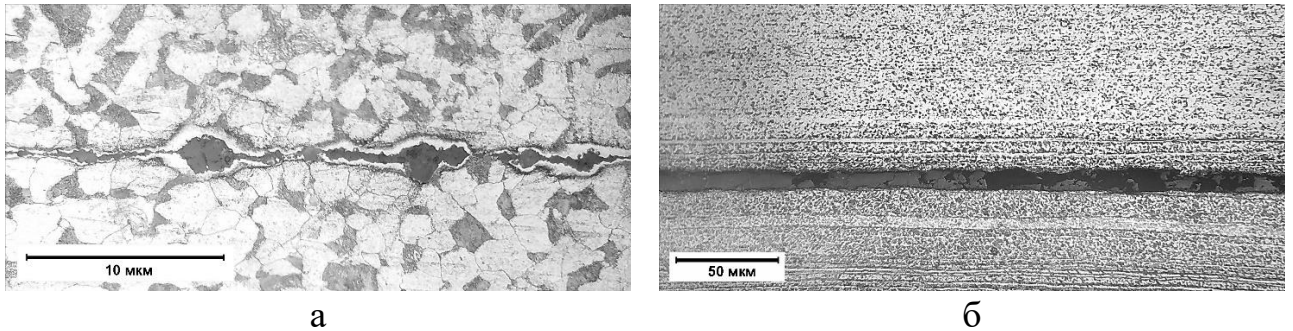


Рисунок 6.9 – Структура металла (а – ликвационные включения, б – расслоение)

### 6.1.3.3 Контроль объектов с расслоениями

Контроль объектов со значительными внутренними включениями, в том числе выходящими на поверхность изделий, при точечном контроле толщины не дает полных данных о состоянии контролируемого объекта. Построение толщинограмм позволяет получить схему объекта, приближенную к его реальному физическому состоянию (рисунок 6.10).

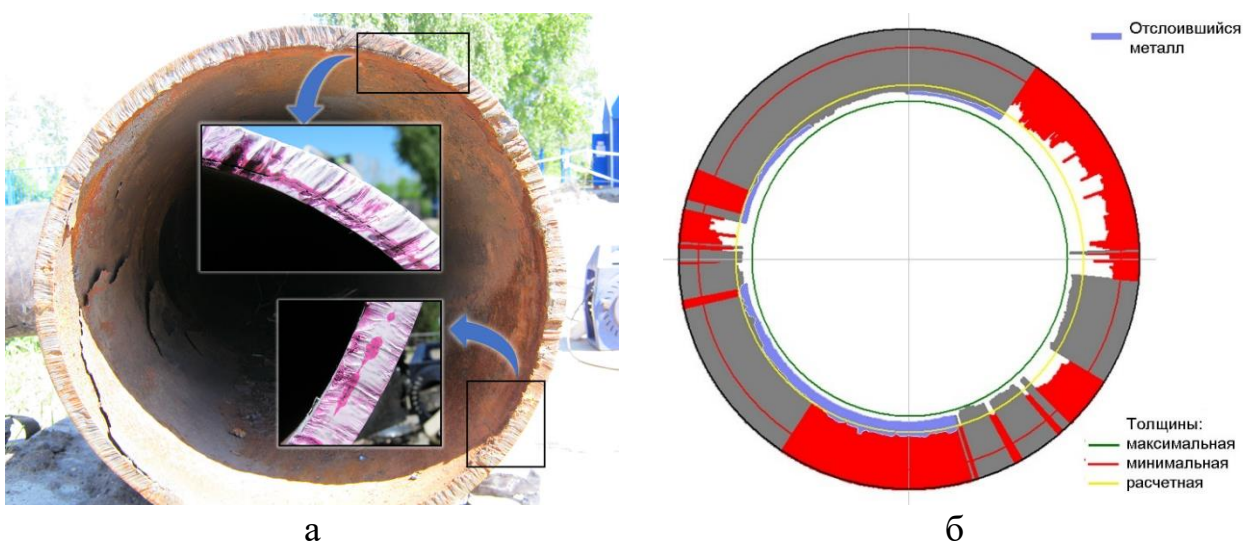


Рисунок 6.10 – Объект с расслоениями (а – внешний вид; б – толщинограмма)

На основе полученных толщинограмм можно определить не только наличие на объекте внутренних дефектов и определять их характер, но и выявлять выходящие наружу участки дефектов. Результаты верифицированы многократно повторенными ультразвуковым контролем с последующей вырезкой труб и металлографическими исследованиями, что свидетельствует о практической применимости и высокой эффективности метода.

Разработка была представлена на XXI конкурсе ПАО «Газпром» по компьютерному проектированию и информационным технологиям, проводимого в рамках Фестиваля труда (профессионально мастерства) ПАО «Газпром» в сентябре 2022 года в Санкт-Петербурге, по итогам конкурса заняла первое место.

## **6.2 Применение результатов исследований в обучении и повышении квалификации инженеров по неразрушающему контролю**

По результатам исследований разработаны учебные стенды и наборы образцов, с точными и подтвержденными параметрами дефектов, полученные из реальных объектов эксплуатации. Учебные материалы применяются в производстве, в процессе обучения и повышения квалификации инженеров по неразрушающему контролю. На материалы оформлены рационализаторские предложения.

### *6.2.1 Учебно-информационный стенд для изучения особенностей диагностики заводских дефектов труб типа закат*

По результатам исследований, изложенных в главе 3, был разработан и внедрен в производственный процесс учебно-информационный стенд, в котором представлены физические образцы, предназначенные для повторения результатов исследований и получения практических навыков контроля подобных дефектов. Для стенда разработаны материалы, в которых приведен всесторонний анализ металлургического дефекта, идентифицированного при проведении полевого неразрушающего контроля как выходящее наружу расслоение с измеренной глубиной более половины толщины стенки трубы.

Целью разработки данного учебно-информационного стенда является:

- анализ причин получения некорректных показаний приборов при проведении полевых измерений дефектного участка трубы;
- получение навыков определения фактических параметров и характеристик дефекта методами неразрушающего контроля;
- ознакомление, и при необходимости повторение результатов металлографических исследований;

Стенд оформлен в виде рационализаторского предложения, включающего натурные образцы с оформленными паспортами и методику контроля (рисунок 6.11).



Рисунок 6.11 – Стенд с образцами и методикой

Использование данного предложения позволяет быстро и детально изучить особенности диагностики дефектов типа закат, привить практические навыки



молодым сотрудникам, повышает наглядность при обучении персонала. В методике сделаны выводы и даны рекомендации по корректировке технологии неразрушающего контроля заводских дефектов труб типа закат, находящихся в эксплуатации.

### 6.2.2 Набор образцов для изучения особенностей диагностики труб с расслоениями

По результатам исследований, изложенных в главах 4 и 5, был разработан и внедрен в производственный процесс набор тестовых образцов (рисунок 6.12), с подробным описанием их металлографических характеристик, влияния на результаты ультразвукового контроля.

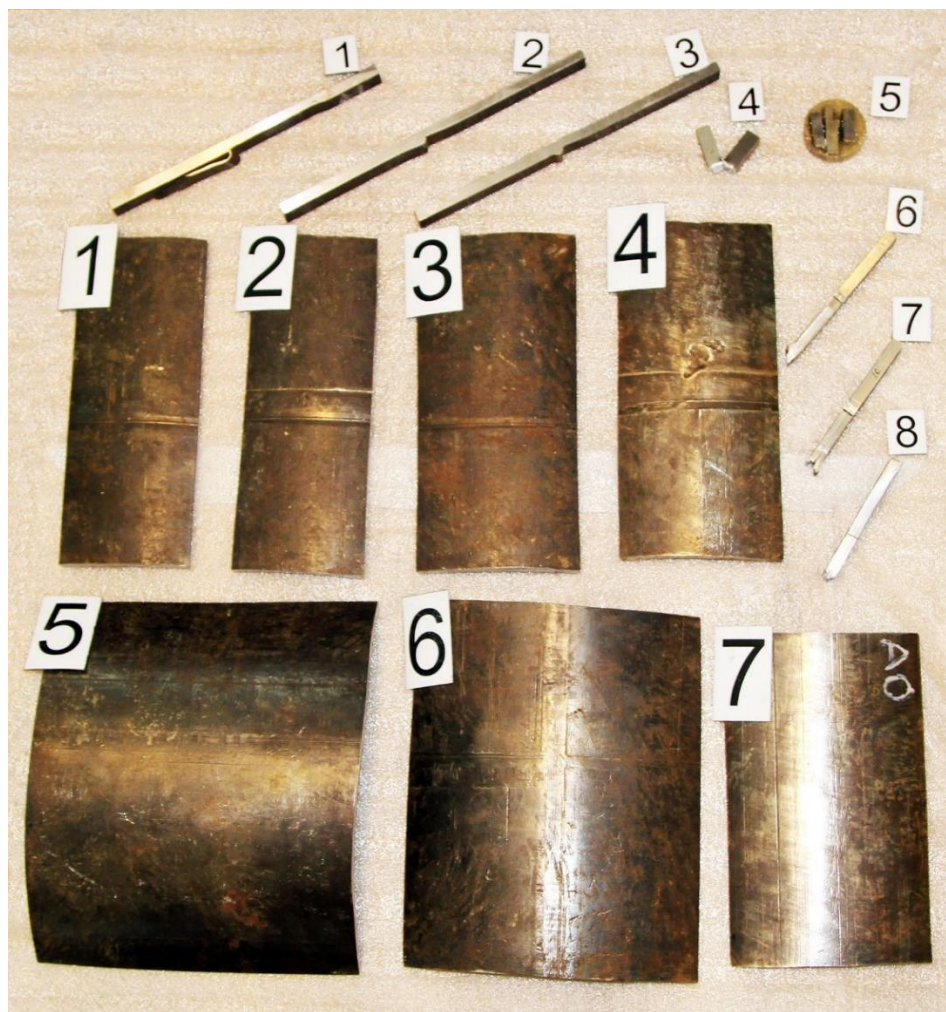


Рисунок 6.12 – Комплект образцов

Образцы предназначены как для повторения результатов исследований и получения практических навыков контроля подобных дефектов, так и теоретической подготовки по основам материаловедения и дефектности структур. На набор образцов разработано рационализаторское предложение с экономическим эффектом в размере 320 т.р.

Целью создания набора является:

- получение практических навыков при определении фактических параметров и характеристик дефектов методами неразрушающего контроля;
- ознакомление с результатами металлографии и изменениях механических характеристик металла с наличием дефектных зон.

### *6.2.3 Результаты внедрения в производственную деятельность*

Разработанное вспомогательное диагностическое оборудование, копии патентов на которые приведены в приложении 7, используется при проведении оценки поврежденности объектов.

Разработано программное обеспечение, применяемое для оценки трубопроводов, поврежденных стресс-коррозией: «Расчет допустимого внутреннего давления для трубопровода, поврежденного стресс-коррозией» и «Оценка работоспособности участка трубопровода с дефектами КРН». Копии свидетельств о регистрации приведены в приложении 6.

Результаты исследований, подтвержденные актами внедрения, используются в Инженерно-техническом центре ООО «Газпром трансгаз Самара» и нескольких других диагностических организаций, проводящих обследования магистральных газопроводов.

### **Выводы по главе 6**

1. Предлагаемый метод обработки результатов толщинометрии снижает трудоемкость определения характеристик внутренних дефектов с одновременной визуализацией их типологии. Визуализация осуществляется за счет построения

графиков толщины в виде диаграмм, соответствующих по профилю контролируемому объекту, в частном случае трубам. Использование и анализ предлагаемых графиков толщины, кроме непосредственно толщинометрии, позволяет:

- проводить экспресс-анализ качества структуры металла, определять наличие расслоений, ликвационных зон, их параметры и расположение;
- оценивать степень опасности с высокой точностью и меньшей трудоемкостью, по сравнению с обычными методами.

2. Реальные образцы, полученные из действующих объектов, обследованные в лабораторных условиях, положены в основу учебных материалов, позволяющих на практике изучить представленные дефекты и их особенности и получить навыки контроля различных дефектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определена морфология дефектных структур, причины образования и характеристики выходящих на внешнюю поверхность отслоений металла, создающих условия, искажающие показания ультразвуковых толщиномеров. Такие условия создаются за счет кооперативного влияния толщины отслоений металла, близкого к нижнему пределу чувствительности датчиков приборов, наличия плотных и увлажненных включений гидратированных оксидов  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и магнетита (окалины)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  под отслоениями.

2. Исследования дефектных участков с плоскостными включениями толщиной до 50 мкм и слоями с химической неоднородностью показали значительное влияние на пластические и прочностные свойства объектов и воздействие на прилегающие бездефектные участки. Локальные прочностные характеристики основного металла изменяются в широком диапазоне, основное влияние оказывается на относительное удлинение – сокращается до 50%, и ударную вязкость, увеличивается до двух раз. Разнородность свойств материала приводит к изменению распределения действующих напряжений в конструкциях и к снижению запаса прочности.

3. Наличие дефектов в стыкуемых трубах, при их сварке токами высокой частоты приводит к значительному снижению несущей способности швов за счет образования строчки микронесплошностей по линии сплавления. Наибольшее влияние оказывается на пластические свойства объектов: относительное удлинение на дефектных участках, по отношению к бездефектным, снижается почти в четыре раза.

4. Разработано дополнение к способу количественной оценки неоднородности структуры металлов и сплавов на основе стереологических методов, использующее современные возможности цифровизации измерений. Применение способа возможно в автоматическом режиме с использованием машинного зрения.

5. Разработан метод определения конфигурации и размеров внутренних дефектов металла на основе обработки результатов дискретной ультразвуковой толщинометрии. Для реализации метода разработано специальное программное обеспечение, применяемое при контроле объектов ПАО «Газпром» и других организаций.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки**

Перспективой исследований является выработка рекомендаций, методик контроля и анализа результатов диагностики газопроводов, позволяющих учитывать разнообразие конфигураций дефектов, изменение свойств материалов, условия эксплуатации, воздействие нагрузок и прочие факторы. В основе выработки таких рекомендаций и методик должны лежать подробные исследования, включающие как можно более широкий спектр проводимых работ, включая междисциплинарные исследования. На полученной базе следует разработать менее консервативные и более точные методики оценки опасности дефектов и поведения содержащих их объектов с учетом безусловного сохранения безопасности при эксплуатации.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- $\sigma_B$  – временное сопротивление разрыву материала при одноосном растяжении
- $\sigma_T$  – предел текучести
- $\delta$  – относительное удлинение материала при растяжении до разрыва
- $H_\mu$  – микротвердость
- $\varepsilon$  – относительная деформация
- $\varepsilon_B$  – деформация при растяжении;
- $\varepsilon_T$  – деформация при текучести;
- $E$  – модуль Юнга
- $E_p$  – тангенциальный модуль
- ННС – водородное растрескивание
- НСС – водородное растрескивание под напряжением
- SOHIC – ориентированное растрескивание под действием водорода
- SSC – сульфидное растрескивание под напряжением
- SCC – усталостное коррозионное растрескивание под напряжением
- ДОЭ (EBSD) – дифракция отраженных электронов (Electron Backscatter Diffraction)
- СЭМ (SEM) – сканирующий электронный микроскоп (scanning electron microscope)
- АУЗК – автоматизированный ультразвуковой контроль
- ВИК – визуальный и измерительный контроль
- ВК – вихретоковый контроль
- ВТД – внутритрубное техническое диагностирование
- ВТИ – внутритрубная техническая инспекция
- ЗТВ – зона термического влияния
- ЛПУМГ – линейное производственное управление магистральных газопроводов
- МГ – магистральный газопровод
- МКЭ – метод конечных элементов
- МПД – магнитопорошковая дефектоскопия
- НД – нормативная документация

НК – неразрушающий контроль

ОПО – опасный производственный объект

ПО – программное обеспечение

РСМА – рентгеноспектральный микроанализ

РЭМ – растровый электронный микроскоп

СДТ – соединительная деталь

ТД – техническое диагностирование

УЗК – ультразвуковой контроль

УЗТ – ультразвуковая толщинометрия

ЦД – цветная дефектоскопия

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 11<sup>th</sup> Report of the European gas pipeline incident data group (period 1970 – 2019). 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.egig.eu> (дата обращения 14.03.2021).
2. Abedi, S.S. Failure investigation of a defective weldment of an oil product transmission pipeline / S.S. Abedi // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. – 2017. – vol.17. – p.30-37.
3. Ahmed, S. Designing in-house cathodic protection system to assess the long-term integrity of natural gas pipelines / S. Ahmed, V. Orth, M. Foley et al. // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2021. – vol.94. – 104116.
4. Alavijeh, S. NDE 4.0 compatible ultrasound inspection of butt-fused joints of medium-density polyethylene gas pipes, using chord-type transducers supported by customized deep learning models / Maryam S. Alavijeh, R. Scott, F. Seviaryn et al. // Research in Nondestructive Evaluation. – 2020. – vol.31. – p.290-305.
5. Amaya-Gomez, R. A condition-based dynamic segmentation of large systems using a changepoints algorithm: A corroding pipeline case / R. Amaya-Gomez, E. Bastidas-Arteaga, F. Schoefs et al. // Structural Safety. – 2020. – vol.84. – 101912.
6. Amaya-Gomez, R. Modeling of pipeline corrosion degradation mechanism with a Levy Process based on ILI (In-Line) inspections / R. Amaya-Gomez, J. Riascos-Ochoa, F. Mucoz // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2019. – vol.172 – p.261-271.
7. Askari, A. Film former corrosion inhibitors for oil and gas pipelines - A technical review / M. Askari, M. Aliofkhazraei, S. Ghaffari et al. // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – vol.58. – p.92-114.
8. ASTM E1268-19, Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
9. Barnwal V.K., Raghavan R., Tewariac A., Narasimhan. K., Mishra S.K. Effect of microstructure and texture on forming behaviour of AA-6061 aluminium alloy sheet // Materials Science and Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing. – 2017. – Vol.679. – P. 56–65.



10. Cameron B.C. Towards physical insights on microstructural damage nucleation from data analytics / B.C. Cameron, C.C. Tasan // *Computational Materials Science*. – 2022. – vol.202. – 110627.
11. Challa, V.S.A. Failure investigation of hydrotest rupture on a natural gas pipeline / V.S.A. Challa, I.V.S. Yashwanth, K.L. Mendoza et al. // *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. – 2016. – vol.16. – p.858-863.
12. Chirkov, Yu.A. Analysis of the causes of failure of a pipeline welded joint / Yu.A. Chirkov, V.M. Kushnarenko, V.S. Repyakh и др. // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2018. – vol.59(9-10). – p.669-672.
13. Cirimello, P.G. Explosion in gas pipeline: Witnesses' perceptions and expert analyses results / P.G. Cirimello, J.L. Otegui, L.M. Buisel // *Engineering Failure Analysis*. – 2019. – vol.106. – 104142.
14. Dai, L.S. Application of MFL on girth-weld defect detection of oil and gas pipelines / L.S. Dai, Q.S. Feng, J. Sutherland et al. // *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. – 2020. – vol.11(4) – 04020047.
15. Du, X. Corrosion analysis and anti-corrosion measures of oil casing of sulfur content gas wells: A case study of Daniudi gas field in the Ordos Basin / X. Du, X. Dai, Z. Li et al. // *Energy Reports*. – 2021. – vol.7. – p.1280-1292.
16. Failure analysis of heat treated steel components / ASM International, 2008. – 640 pp.
17. Farber, V.M. Diagnosis of the Fracture and Fracture Energy of High-Ductility Steels in Instrumented Impact-Bending Tests / V.M. Farber, V.A. Khotinov, A.N. Morozova et al. // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2015. – vol.57. – p.329-333.
18. Fazzini, P.G. Experimental validation of the influence of lamination defects in electrical resistance seam welded pipelines / P.G. Fazzini, A.P. Cisilino, J.L. Otegui // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2005. – vol.82. – p.896-904.
19. Feng, Q. Failure analysis and simulation model of pinhole corrosion of the refined oil pipeline / Q. Feng, B. Yan, P. Chen et al. // *Engineering Failure Analysis*. – 2019. – vol.106. – 104177.

20. Feng, Q., Literature review: theory and application of in-line inspection technologies for oil and gas pipeline girth weld defection/ Q. Feng, R. Li, B. Nie, et al. // *Sensors*. – 2017. – vol.17 – 50.
21. Jinyang Liu, Qingyun Dai The two-dimensional microstructure characterization of cemented carbides with an automatic image analysis process // *Ceramics International*. – 2017. – 43 – P.14865-14872.
22. Griggs, J. Modelling 3D interaction limits of inclined stress corrosion cracking in pressurised gas pipelines / J. Griggs, O. Lavigne, E. Gamboa // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2018. – vol.168. – p.110-116.
23. Heidary, R. A hybrid population-based degradation model for pipeline pitting corrosion / R. Heidary, K.M. Groth // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2021. – vol.214. – 107740.
24. Hredil, M. Fractographic features of long term operated gas pipeline steels fracture under impact loading / M. Hredil, H. Krechkovska, O. Student et al. // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – vol.21. – p.166-172.
25. Hurt, G.L.W. Machine learning for alloys / G.L.W. Hart, T. Mueller, C. Toher et al. // *Nature Reviews Materials*. – 2021. – vol.6. – p.730-755.
26. Hutsaylyuk, V. Mechanical properties of gas main steels after long-term operation and peculiarities of their fracture surface morphology / V. Hutsaylyuk, P. Maruschak, I. Konovalenko et al. // *Materials*. – 2019. – vol.12. – 491.
27. Khalaj G. Microalloyed steel welds by HF-ERW technique: novel PWHT cycles, microstructure evolution and mechanical properties enhancement / G. Khalaj, H. Pouraliakbar, M.R. Jandaghi et al. // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2017. – vol.152. – p. 15-26.
28. Kumar, S.D.V. Failure pressure prediction of high toughness pipeline with a single corrosion defect subjected to combined loadings using artificial neural network (ANN) / S.D.V. Kumar, S. Karuppanan, M. Ovinis // *Metals*. – 2021. – vol.11. – 373.
29. Li, H. Review of the state of the art: interactions between a buried pipeline and frozen soil / H. Li, Y. Lai, L. Wang et al. // *Cold Regions Science and Technology*. – 2019. – vol.157. – p.171-186.

30. Luder, D. Investigation of failure of steel steam generating evaporator tube involving delamination defects and corrosion / D. Luder, B. Erenburg, E. Iskevitch et al. // *Engineering Failure Analysis*. – 2018. – vol.84. – p.196-204.
31. Ma, B. Assessment on failure pressure of high strength pipeline with corrosion defects / B. Ma, J. Shuai, D. Liu et al. // *Engineering Failure Analysis*. – 2013. – vol.32. – p.209-219.
32. Ma, Q. Pipeline in-line inspection method, instrumentation and data management / Q. Ma, G. Tian, Y. Zeng // *Sensors*. – 2021. – vol.21 – 3862.
33. Martin, M.I., Production of sponge iron powder by reduction of rolling mill scale/ M.I. Martin, F.A. Lopez, J.M. Torralba. // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2012. – №3. – p. 155-162.
34. Maruschak, P. Peculiarities of the static and dynamic failure mechanism of long-term exploited gas pipeline steel / P. Maruschak, R. Bishchak, O. Prentkovskis et al. // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2016. – vol.8(4). – p.1-8.
35. Moaveni, S. *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS* / Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2007; ISBN 978-0131890800.
36. Mohtadi-Bonab, M.A. Hydrogen-Induced cracking assessment in pipeline steels through permeation and crystallographic texture measurements / M.A. Mohtadi-Bonab, R. Karimdadashi, M. Eskandari et al. // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2016. – vol.25(5). – 1781.
37. Mohtadi-Bonab, M.A. Important Factors on the Failure of Pipeline Steels with Focus on Hydrogen Induced Cracks and Improvement of Their Resistance: Review Paper / M.A. Mohtadi-Bonab, H. Ghesmati-Kucheki // *Metals and Materials International*. – 2019. – vol.25. – p.1109-1134.
38. Morozova, A.N. Influence of the Direction of Propagation of the Main Crack on the Fracture Mechanism upon Impact Bending of Samples of High-Viscous Steel with a Filamentary Structure. Compression Region / A.N. Morozova, G.V. Schapov, V.A. Khotinov et al. // *Physics of Metals and Metallography*. – 2019. – vol.120. – p.907-913.

39. Nakamura, N. Inspection of stress corrosion cracking in welded stainless steel pipe using point-focusing electromagnetic-acoustic transducer / N. Nakamura, K. Ashida, T. Takishita et al. // *NDT&E International*. – 2016. – vol.183. – p.88-93.
40. Niazi, H. High pH stress corrosion cracking initiation and crack evolution in buried steel pipelines: A review / H. Niazi, R. Eadie, W. Chen et al. // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – vol.120. – 105013.
41. Nykyforchyn, H. Assessment of Operational Degradation of Pipeline Steels / H. Nykyforchyn, O. Zvirko, I. Dzioba et al. // *Materials*. – 2021. – vol.14. – 3247.
42. Nykyforchyn, H. Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite–pearlite steel / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyurulnyk et al. // *Materials and Corrosion*. – 2009. – vol.60. – p.716-725.
43. Ogwus, C. Exploring the Gains of Artificial Intelligence for Addressing the Menace of Pipeline Vandalization in Nigeria: A Review / C. Ogwus // *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Lagos, Nigeria. – 2021.
44. Panin, S.V. Effect of Operating Degradation in Arctic Conditions on Physical and Mechanical Properties of 09Mn2Si Pipeline Steel / S.V. Panin, P.O. Maruschak, I.V. Vlasov et al. // *Procedia Engineering*. – 2017. – vol.178. – p.597-603.
45. Panin, S.V. Influence of long-term cold climate operation on structure, fatigue durability and impact toughness of 09Mn2Si pipe steel / S.V. Panin, I.V. Vlasov, P.O. Maruschak et al. // *Engineering Failure Analysis*. – 2019. – vol.102. – p.87-101.
46. Papaefthymiou, S. Typical defects in plate and long steel products / S. Papaefthymiou, T. Tzeveleku, A. Antonopoulos // *International Journal of Structural Integrity*. – 2016. – vol.7, №5. – p.645-655.
47. Qin, G. Modeling of mechano-electrochemical interaction at a corrosion defect on a suspended gas pipeline and the failure pressure prediction / G. Qin, Y.F. Cheng // *Thin-Walled Structures*. – 2021. – vol.160. – 107404.
48. Rahmawati, S.D. Integrated CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S corrosion-erosion modeling in gas production tubing and pipeline by considering passive layer activity / S.D. Rahmawati, R.K. Santoso, F. Tanjungsari // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2021. – vol.11. – p.3129-3143.

49. Ramirez, M.F.G. Effects of different cooling rates on the microstructure, crystallographic features, and hydrogen induced cracking of API X80 pipeline steel / M.F.G. Ramirez, J.W.C. Hernandez, D.H. Ladino et al. // *Journal of materials research and technology*. – 2021. – vol.14. – p.1848-1861.

50. Rbaa, M. Synthesis and investigation of quinazoline derivatives based on 8-hydroxyquinoline as corrosion inhibitors for mild steel in acidic environment: experimental and theoretical studies / M. Rbaa, M. Galai, F. Benhiba et al. // *Ionics*. – 2019. – vol.25. – p.3473-3491.

51. Ren P., Chen X.P., Wang C.Y., Zhou Y.X., Cao W.Q., Liu Q. Evolution of microstructure, texture and mechanical properties of Fe–30Mn–11Al–1.2C low-density steel during cold rolling. *Mater. Charact.* – 2021. – 111013.

52. Ronevich, J.A. Fatigue crack growth rates of X100 steel welds in high pressure hydrogen gas considering residual stress effects / J.A. Ronevich, C.R. D'Elia, M.R. Hill // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2018. – vol.194. – p.42-51.

53. Rusin, A. Analysis of the effects of failure of a gas pipeline caused by a mechanical damage / A. Rusin, K. Stolecka-Antczak, K. Kapusta et al. // *Energies*. – 2021. – vol.14. – 7686.

54. Ryakhovskikh, I.V. Model of stress corrosion cracking and practical guidelines for pipelines operation / I.V. Ryakhovskikh, R.I. Bogdanov // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – vol.121. – 105134.

55. Sarkar, P.P. Analysis of the Surface Defects in a Hot-Rolled Low-Carbon C–Mn Steel Plate / P.P. Sarkar, S.K. Dhua, S.K. Thakur et al. // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2017. – vol.17(3). – p.545-553.

56. Stojmanovski, V. Examination of Laminations in the Base Material on a Section of High Pressure Gas Supply Pipeline. / V. Stojmanovski, Vl. Stojmanovski, B. Stavrov // *Experimental and Computational Investigations in Engineering. CNNTech 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*. – Springer, Cham. 2021. – vol.153.

57. Taherimakhsousi N. A machine vision tool for facilitating the optimization of large-area perovskite photovoltaics/ N. Taherimakhsousi, M. Fievez, B.P. MacLeod et al. // *npj Computational Materials*. – 2021. – vol.7. – 190.

58. Tian, Q. Study of micro-plastic deformation in pure iron before macro-yielding using acoustic emission, electron backscattered diffraction and transmission electron microscopy / Q. Tian, H. Luo, R. Yi et al. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – vol.771. – 138645.
59. Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission. / ed. A.M. El-Sherik. – Woodhead Publishing, 2017. – 926 p.
60. Vasseghi, A. Failure analysis of a natural gas pipeline subjected to landslide / A. Vasseghi, E. Haghshenas, A. Soroushian et al. // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – vol.119. – 105009.
61. Voronin S., Ledyayev M., Loboda P., Konovalov S. Finite-Element Model for an Al + 2.38% Cu + 0.06% SiC Composite with Regard to Its Structural Components. *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol.1909. – article number 020228.
62. U.S. Natural Gas. Pipelines [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.eia.gov/naturalgas> (дата обращения 14.03.2021).
63. Ustrzycka, A. Analysis of fatigue crack initiation in cyclic microplasticity regime / A. Ustrzycka, Z. Mroz, Z.L. Kowalewski et al. // *International Journal of Fatigue*. – 2020. – vol.131. – 105342.
64. Wang, L. Influence of inclusions on initiation of pitting corrosion and stress corrosion cracking of X70 steel in near-neutral pH environment / L. Wang, J. Xin, L. Cheng et al. // *Corrosion Science*. – 2019. – vol.147. – p.108-127.
65. Wang, S. Visualization of microstructural factors resisting the crack propagation in mesosegregated high-strength low-alloy steel / S. Wang, C. Li, L. Han et al. // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2020. – vol.42. – p.75-84.
66. Witek, M. Validation of in-line inspection data quality and impact on steel pipeline diagnostic intervals / M.Witek // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2018. – vol.56 – p.121-133.
67. Xu, S Toughness of EW Pipe Seam Welds of Contemporary Steels. / S. Xu, A. Laver, J. Liang et al. // *Proceedings of the 2018 12th International Pipeline Conference. Volume 3: Operations, Monitoring, and Maintenance; Materials and Joining*. Calgary, Alberta, Canada. September 24–28, 2018. V003T05A033. ASME.

68. Yakovleva, I.L. Impact toughness and plastic properties of composite layered samples as compared to monolithic ones / I.L. Yakovleva, N.A. Tereshchenko, D.A. Mirzaev et al. // *Physics of Metals and Metallography*. – 2007. – vol.104. – p.203-211.
69. Zhang, K., Huang, T., Su, Z., Guan, T., Design of Solder Quality Inspection System Based on Machine Vision. IAEAC 2021 - IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. – 2021. – 9390646. – P. 2413-2418.
70. Zheng, B. Influence of morphological characteristics on the mechanical properties and failure mechanisms of legacy butt welds / B. Zheng, M. Dawood, Y. Zhou // *Construction and Building Materials*. – 2019. – vol.198. – p. 158-171.
71. Zheng, J.Y. Failure analysis and safety evaluation of buried pipeline due to deflection of landslide process / J.Y. Zheng, B.J. Zhang, P.F. Liu et al. // *Engineering Failure Analysis*. – 2012. – vol.25. – p.156-168.
72. Zheng, T. Safety assessment of buried natural gas pipelines with corrosion defects under the ground settlement / T. Zheng, Z. Liang, L. Zhang et al. // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – vol.129. – 105663.
73. Zhukov, D. Evaluation of strength and microstructure of welded pipes with wall lamination / D. Zhukov, S. Konovalov, A. Melnikov, D. Chen // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – vol.122. – 105235.
74. Zhukov, D.V. Express quality analysis of metal structure based on thickness data / D.V. Zhukov, S.V. Konovalov // *AIP Conference Proceedings* 2315. – 2020. – 040051.
75. Zhukov, D.V. Metallography of non-metallic inclusions in pipe metal and impact assessment of defect structures on non-destructive testing outcomes / D.V. Zhukov, S.V. Konovalov, A.A. Melnikov et al. // *CIS Iron and Steel Review*. – 2021. – vol.1. – p.58-63.
76. Zhukov, D. Morphology and development dynamics of rolled steel products manufacturing defects during long-term operation in main gas pipelines / D. Zhukov, S. Konovalov, A. Afanasyev // *Engineering Failure Analysis*. – 2020. – vol.109. – 104359.

77. Zhukov, D. Specifics of diagnostics and investigation of material properties in pipes with planar defects / D. Zhukov, S. Konovalov, D. Chen, A. Melnikov, I. Panchenko // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2022. – vol.199. – 104765.

78. Zhukov, D.V. Subsurface Corrosion as the Main Degradation Process of 17GS Pipeline Steel after 50 Years of Operation / D.V. Zhukov, K.K. Chaplygin, S.V. Konovalov et al. // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2021. – vol.15. – p.872-876.

79. Zvirko, O.I. Influence of textures of pipeline steels after operation on their brittle fracture resistance / O.I. Zvirko, N.V. Kret, O.T. Tsyurulnyk et al. // *Materials Science*. – 2018. – vol.54(3). – p.400-405.

80. Алиев, М.М. Определение несущей способности магистрального газопровода с расслоениями и внутренними вздутиями / М.М. Алиев, С.П. Зайцев, Р.Х. Султангареев и др. // *Вести газовой науки*. – 2020. – №2(44). – с.51-57.

81. Бернштейн, М.Л. Атлас дефектов стали. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.

82. Велиюлин, И.И. Аналитические и технические аспекты диагностики линейной части газопроводов / И.И. Велиюлин, В.И. Городниченко, В.А. Александров и др. // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. – 2021. – №7-8. – с.44-55.

83. ГОСТ 10006-80 Трубы металлические. Метод испытания на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2010. – 12 с.

84. ГОСТ 12503–75 Сталь. Методы ультразвукового контроля. Общие требования. – М. : Издательство стандартов, 1999. – 4 с.

85. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2008. – 26 с.

86. ГОСТ 21014-88 Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. – М.: Издательство стандартов, 1995. – 62 с.

87. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.



88. ГОСТ 31447-2012 Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2013. – 36 с.

89. ГОСТ 5640–2020. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского. – Введ. 01-10-2021. – М: Стандартиформ, 2021.

90. ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 12 с.

91. ГОСТ ISO 10893-4-2017. Трубы стальные бесшовные и сварные. Часть 4. Контроль методом проникающих веществ для обнаружения поверхностных дефектов. – М.: Стандартиформ, 2017. – 14 с.

92. ГОСТ ISO 10893-5-2016 Трубы стальные бесшовные и сварные. Часть 5. Магнитопорошковый контроль труб из ферромагнитной стали для обнаружения поверхностных дефектов. – М.: Стандартиформ, 2016. – 12 с.

93. ГОСТ ISO 10893-8–2017 Трубы стальные бесшовные и сварные. Часть 8. Ультразвуковой метод автоматизированного контроля для обнаружения расслоений. – М.: Стандартиформ, 2017. – 16 с.

94. ГОСТ ISO 10893-9–2016 Трубы стальные бесшовные и сварные. Часть 9. Ультразвуковой метод автоматизированного контроля расслоений в рулонах/листах для производства сварных труб. – М.: Стандартиформ, 2016. – 15 с.

95. ГОСТ Р ИСО 148-1-2013 Материалы металлические. Испытание на ударный изгиб на маятниковом копре по Шарпи. Часть 1. Метод испытания. – М.: Стандартиформ, 2014. – 28 с.

96. ГОСТ Р ИСО 16809–2015 Контроль неразрушающий. Контроль ультразвуковой. Измерение толщины. – М.: Стандартиформ, 2015. – 36 с.

97. ГОСТ Р ИСО 17637–2014 Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением. – М.: Стандартиформ, 2020. – 16 с.

98. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения. – М.: Стандартиформ, 2008. – 19 с.

99. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Тихонова А.А. и др. Влияние анизотропии заготовок на разнотолщинность стенки изделия при вытяжке // Известия Самарского научного центра РАН. — 2017. — Т. 19. № 1(3). — С. 581-586.

100. Данилов, С.В. Влияние горячей прокатки на анизотропию механических свойств алюминиевого сплава 6061 / С. В. Данилов, П. Л. Резник, М. Л. Лобанов, М. А. Головнин, Ю. Н. Логинов // Вестник Южно-уральского государственного университета. – 2017. – Т.17, №1. – С. 73-80.

101. Жуков, Д.В. Анализ морфологии производственного дефекта металла магистральных газопроводов / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов, А.В. Афанасьев и др. // Производство проката. – 2019. – №9. – с. 33-38

102. Жуков, Д.В. Анализ производственных дефектов стенки труб с моделированием напряжений от внутреннего давления / Д.В. Жуков, А.А. Мельников, С.В. Коновалов и др. // Черные металлы. – 2021. – №10. – с.49-55.

103. Жуков, Д.В. Изменение физических свойств сварных швов при сварке труб с протяженными плоскостными дефектами стенки / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов, К.А. Осинцев // Фазовые превращения и прочность кристаллов: сб. тезисов XI Международной конференции (26 – 30 октября 2020 года, Черногловка) под ред. Б.Б. Страумала. – Черногловка. 2020. – 210 с. – с.114.

104. Жуков, Д.В. Исследование структуры и прочности сварного соединения труб с расслоением стенки / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов, А.А. Мельников и др. // Ползуновский вестник. – 2020. – №3. – с. 66-70.

105. Жуков, Д.В. Компьютерная обработка изображений микроструктуры сплавов / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов // Сборник тезисов докладов XXVI Уральской школы металловедов-термистов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 286 с.: ил. – С.262-267.

106. Жуков, Д.В. Морфология и диагностика производственных дефектов труб, развивающихся при эксплуатации / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов, Е.Д. Крюкова // IX Международная школа с элементами научной школы для молодежи

"Физическое материаловедение", LXI Международная конференция, посвященная 90-летию профессора М.А. Криштала "Актуальные проблемы прочности". – Тольятти: издательство ТГУ. 2019. – 255с. – с.128.

107. Жуков, Д.В. Нехарактерные дефекты газопроводов, образовавшиеся при проведении внутритрубного технического диагностирования / Д.В. Жуков, Д.В. Комаров, Д.В. Савин и др. // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2021. – №3-4. – с.24-32.

108. Жуков, Д.В. Особенности диагностики заводских дефектов труб, развивающихся при эксплуатации / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов, А.В. Афанасьев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2019. – Т.20.№6(227). – с. 258-261.

109. Жуков, Д.В. Особенности испытаний на ударную вязкость труб с внутренними дефектами // Международная конференция «Физика и технологии перспективных материалов-2021» (5-8 октября 2021 года) под ред.А.А. Назарова. – Уфа: РИЦ БашГУ. 2021. – 233 с. – с.68.

110. Жуков, Д.В. Подповерхностная коррозия как основной деградиционный процесс трубопроводной стали 17ГС после 50 лет эксплуатации / Д.В. Жуков, К.К. Чаплыгин, С.В. Коновалов и др. // Научно-практический семинар «Актуальные проблемы физики конденсированных сред» (23 – 26 ноября 2020 года, Черноголовка). – Черноголовка. 2020. – 126 с. – с.65.

111. Жуков, Д.В. Преобразование неметаллических включений в металлах в процессе производства / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов, К.К. Чаплыгин // Эволюция дефектных структур в конденсированных средах. Сборник тезисов XVI Международной школы-семинара ЭДС–2020 (7 – 12 сентября 2020 года) под ред. М.Д. Старостенкова. – Барнаул. 2020. – 210 с. – с.64-65.

112. Жуков, Д.В. Развитие производственных дефектов металла при эксплуатации и их влияние на результаты неразрушающего контроля / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов // XXI Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия–2019». – Новокузнецк: издательство СибГИУ. 2019. – ч.2. – 463с. – с.29-33.

113. Жуков, Д.В. Способ оценки и визуализации неоднородности микроструктуры материалов / Д.В. Жуков, М.Г. Гиорбелидзе, А.А. Мельников, С.В. Воронин // Технология металлов. – 2023. – №4. – с. 30-37.

114. Загидулин, Р.В. Оценка опасности дефектов сплошности сварных соединений стальных трубопроводов по результатам дефектоскопии металла / Р.В. Загидулин, Т.Р. Загидулин, В.Р. Мардамшин и др. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – №6(116). – с.130-139.

115. Зарипов Р.Ф. Изменение механических свойств арктических трубопроводов / Р.Ф. Зарипов, Г.Е. Коробков // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – №2(124). – с.52-61.

116. Зорин, А.Е. Изучение генезиса образования расслоений в металле труб: влияние на опасность данных дефектов и способы идентификации / А.Е. Зорин, А.Э. Толстов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – №6(116). – с.110-118.

117. Казаков, А.А. Неметаллические включения и природа дефектов холоднокатаного листа / А.А. Казаков, П.В. Ковалев, А.Л. Мясников и др. // Черные металлы. – 2006. – №2. – с.32-46

118. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., Нго Нгок Ха Некоторые практические соображения, связанные с компьютерными процедурами обработки изображений в материаловедении // Вектор науки ТГУ. – 2019. – №4(50) – С. 35-44.

119. Ляпичев, Д.М. Мониторинг напряженного состояния газопроводов как необходимый элемент контроля коррозионного растрескивания / Д.М. Ляпичев, А.С. Лопатин, Д.П. Никулина // Вести газовой науки. – 2019. – №3(40). – с.112-117.

120. Науменко, В.В. Исследование дефектов на наружной поверхности труб большого диаметра / В.В. Науменко, О.А. Багмет, К.С. Сметанин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – №6(83). – с.26-31.

121. Нохрин, А.В., Старение сталей труб магистральных газопроводов / А.В. Нохрин, В.Н. Чувильдеев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 5(2). – с.171-180.

122. О «Газпроме» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gazprom.com/about> (дата обращения 14.03.2021).

123. Отт, К. Ф. О некоторых особенностях эксплуатационного разрушения трубных сталей / К. Ф. Отт, Ю. П. Сурков, В. Г. Рыбалко. // Физика Металлов и Металловедение. – 1992. – №5. – с.106-112.

124. Отт, К. Ф. Проявление металлургической наследственности сталей / К. Ф. Отт. // Газовая промышленность. – 1992. – №9. – с.27-29.

125. Правила назначения методов ремонта дефектных участков линейной части магистральных газопроводов единой системы газоснабжения ОАО «Газпром»: Р Газпром 2-2.3-595-2011 / Науч.-исслед. ин-т природ. газов и газовых технологий-Газпром ВНИИГаз. – Введ. с 2012-06-11. – М.: Газпром экспо, 2012. - 47 с.

126. Р Газпром Инструкция по оценке дефектов труб и соединительных деталей при ремонте и диагностировании магистральных газопроводов (с изменением № 1). – М.: ОАО «Газпром», 2013. – 121 с.

127. Савин, Д.В. Анализ причин разрушения элементов обвязки крановых узлов трубопроводов с применением численного моделирования / Д.В. Савин, Д.В. Жуков, Д.В. Комаров и др. // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2021. – №7-8. – с.90-96.

128. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. – 376 с.

129. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020617224. Автоматизация обработки результатов толщинометрии с построением толщинограмм / Жуков Д. В. ; опубл. 02.07.2020.

130. Ситников В.В., Люминарский В.В., Коробейников А.В. Обзор методов распознавания объектов, используемых в системах машинного зрения // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2018. – Т.21, №4. С. 222-229.

131. СНиП 2.05.06-85\* Магистральные трубопроводы. – М.: Минстрой России. ГУП ЦПП, 1997. – 60 с.

132. СНиП II-45-75 Магистральные трубопроводы. – М.: Стройиздат, 1975. – 70 с.

133. Современные наноматериалы : монография / под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ. 2020. – 348 с.

134. СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85\* (с Изменением N 1). – М.: Проспект, 2016. – 114 с.

135. Сурков, Ю. П. Зарождение трещин при коррозионном растрескивании газопроводов / Ю. П. Сурков, В. Г. Рыбалко, М. Ю. Павлов и др. // Физика Металлов и Металловедение. – 1980. – №5. – с.15-18.

136. Сыромятникова А.С. Деградация механических свойств и структурно-фазового состояния металла труб магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях севера / А.С. Сыромятникова, А.М. Большаков // Природные ресурсы арктики и субарктики. – 2018. – №23(1). – 75-80.

137. Толстов, А.Э. Экспериментальные исследования влияния расслоений металла на работоспособность трубопроводов / А.Э. Толстов, А.Е. Зорин, Е.Е. Зорин // ЭКСПОЗИЦИЯ НЕФТЬ ГАЗ. – 2018. – №7(67). – с.62-65.

138. Устройство для измерения поверхностных дефектов трубопроводов: патент на полезную модель 154571 Российская Федерация: МПК G01B3/14 / И.В. Щербо, Д.В. Жуков // заявитель и патентообладатель ООО «Газпром трансгаз Самара». – №2014143559; заявлено 28.10.2014; опубликовано 05.08.2015.

139. Устройство для измерения поверхностных дефектов трубопроводов с индикатором часового типа: патент на полезную модель 157282 Российская Федерация: МПК G01B3/14 / И.В. Щербо, Д.В. Жуков // заявитель и патентообладатель ООО «Газпром трансгаз Самара». – №2015121920; заявлено 08.06.2015; опубликовано 05.11.2015.

140. Устройство для контроля целостности внутренних угловых сварных швов тройников с накладками через контрольные отверстия: патент на полезную модель 167403 Российская Федерация: МПК G01L7/18 / Д.В. Жуков, А.В.Афанасьев // заявитель и патентообладатель ООО «Газпром трансгаз Самара». – №2016121096; заявлено 27.05.2016; опубликовано 15.12.2016.

141. Ходжаева, Г.К. Оценка риска аварийности нефтепроводных систем в аспекте геодинамических процессов: Монография. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2016. – 132 с.

142. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору «Уроки, извлеченные из аварий» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения 20.12.2021).

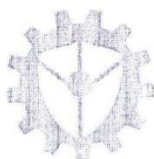
143. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением». Утверждены приказом РТН № 536 от 15.12.2020 (вступ. в силу с 01.01.2021). – Режим доступа: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/equipment/acts/Пр-536 от 15.12.2020 ФНП ОРПД.pdf>

144. Филиппов, А.А. Анализ поверхностных дефектов заготовок горячекатаного проката для холодной высадки метизов / А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – №5. – с. 35-37.

145. Храмов, Ю. А. Физики: Биографический справочник / Под ред. А. И. Ахиезера. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : Наука, 1983. – С. 251. – 400 с.

146. Щербо, И.В. Повышение достоверности данных внутритрубного технического диагностирования линейной части магистральных газопроводов / И.В. Щербо, С.А. Холодков, Д.Н. Бельков и др. // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2020. – №3-4. – с.60-69.

147. Яковлева, Е.А. Влияние режимов старения на механизм разрушения низколегированных сталей с различной структурой / Е.А. Яковлева, Г.Д. Мотовилина, Е.И. Хлусова // Вопросы материаловедения. – 2019. – №2(98). – с.11-19.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО «САМАРАИНЖИНИРИНГ»****ООО «САМАРАИНЖИНИРИНГ»**

г. Самара ул. Олимпийская, владение 57 Литера А офис 327  
Телефон 8-927-718-02-19  
e-mail: samarainjiring@yandex.ru

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ООО «Самараинжиниринг»

С.А. Бутенин  
«Самара-инжиниринг»  
« 21 » *января* 2022 г

**АКТ****использования результатов исследований**

Настоящим актом подтверждается, что проведенные Жуковым Дмитрием Владимировичем исследования структуры материала и их влияние на результаты неразрушающего контроля успешно апробированы и приняты для постоянного использования при проведении работ по неразрушающему контролю металлоконструкций, включая трубопроводы различного назначения.

Предложенная методика позволила значительно повысить качество проводимых работ. Репрезентативность метода неоднократно подтверждена при проведении ремонтов с контрольными дублирующими измерениями, включая вырезку дефектных участков. Правильная оценка структурных особенностей материала позволила обоснованно и с сохранением безопасных условий эксплуатации рассчитывать и назначать сроки ремонта объектов.

По итогам работы в 2021 году, в результате применения методики Жукова Д.В. получена экономия материальных ресурсов на сумму более 1,5 млн.руб. при обеспечении промышленной безопасности контролируемых объектов.

Главный инженер

Начальник лаборатории НК



С.В. Скородумов

П.Н. Никонов



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО «ХИМНЕФТЕАППАРАТУРА»



гарантируем безопасность эксплуатации объектов с 1995 года

ООО «Химнефтеаппаратура»  
ИНН 3442028960 КПП 344201001  
Юридический адрес: 400005, г. Волгоград, пр-кт. им. В.И. Ленина, 90 Б  
Лицензия Ростехнадзора: № 00-ДЭ-003094 от 12.07.2004г.



Телефон +7 (495) 136-66-04  
Сайт: [www.hna34.ru](http://www.hna34.ru)  
E-mail: [post@hna34.ru](mailto:post@hna34.ru)

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ООО «Химнефтеаппаратура»

  
С.В. Руссиян  
«15» марта 2022г.  
М.П.



### АКТ О ПРОМЫШЛЕННОМ ВНЕДРЕНИИ результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждается, что исследования, проведенные Жуковым Дмитрием Владимировичем в рамках его диссертационной работы «Исследование производственных дефектов трубопроводов из низкоуглеродистой стали и оценка их влияния на конструкционную прочность», интегрированы в производственный цикл диагностических работ ООО «ХИМНЕФТЕАППАРАТУРА» при определении дефектов металла обследуемых объектов.

Применение результатов исследований позволили обоснованно проводить отбраковку дефектных участков, рассчитывать допустимые параметры эксплуатации и назначать сроки ремонта. Такой подход позволил эксплуатирующим предприятиям планировать закупку материалов и назначать сроки планово-предупредительных ремонтов с недопущением перехода объектов в предельное состояние.

Считаем, что применение результатов исследований Жукова Д.В. позволили существенно улучшить систему оценки технического состояния контролируемых объектов. Применение результатов позволяет получать экономический эффект, составляющий от нескольких десятков до сотен тысяч рублей, в зависимости от контролируемого объекта.

Главный инженер

Медведев А.Ю.

Начальник ЛНК

Руссиян С.В.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО ПФ «ЭДТОН»

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО ПФ «ЭДТОН»



П.Ф. Кошенков

29 марта 2022 г.

#### АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы  
**Жукова Дмитрия Владимировича**

Комиссия в составе:

Савчук А.П. – заместитель директора по производству

Кудрявцев П.В. – начальника отдела ТД и ЭПБ

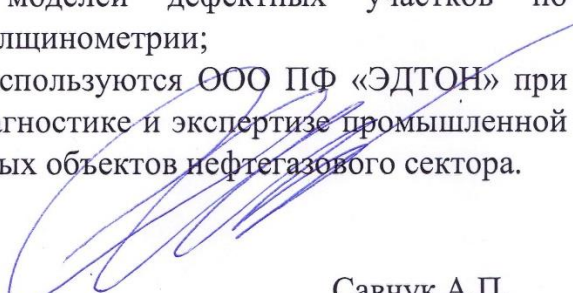
Новиков С.Н. – эксперт системы промышленной безопасности

Савин В.Г. – ведущий инженер

составила настоящий акт о том, что результаты кандидатской диссертационной работы Жукова Дмитрия Владимировича «Исследование производственных дефектов трубопроводов из низкоуглеродистой стали и оценка их влияния на конструкционную прочность», в части разработанных и представленных автором:

- особенностях диагностики раскатанных включений металла, имеющих выход на наружную поверхность;
- моделирования напряженно-деформированного состояния участков газопроводов с учетом локальных изменений упругопластических свойств материалов;
- принципов построения моделей дефектных участков по результатам дискретной толщинометрии;

получили положительную оценку и используются ООО ПФ «ЭДТОН» при выполнении работ по технической диагностике и экспертизе промышленной безопасности опасных производственных объектов нефтегазового сектора.

  
Савчук А.П.

  
Кудрявцев П.В.

  
Новиков С.Н.

  
Савин В.Г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ САМАРА»

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ИТЦ филиала  
ООО «Газпром трансгаз Самара»

И.С. Виноградов



2022 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
Жукова Дмитрия Владимировича

Комиссия в составе:

Холодков С.А. – главный инженер;

Ефименко В.А. – начальник службы диагностики оборудования и сооружений;

Мелешин Д.В. – начальник отдела неразрушающего контроля;

составила настоящий акт о том, что результаты исследований кандидатской диссертационной работы Жукова Дмитрия Владимировича «Исследование производственных дефектов трубопроводов из низкоуглеродистой стали и оценка их влияния на конструкционную прочность» успешно внедрены в производственный процесс. В частности, автором разработаны и внедрены:

- Рационализаторское предложение №651-14-2019 «Учебно-информационный стенд для изучения дефектов труб типа закат», повышающее надежность оборудования.
- Методические рекомендации «Особенности диагностики плоскостных производственных дефектов труб и СДТ».
- Рационализаторское предложение №296-14-2021 «Способ экспресс-оценки дефектности структуры материала изделия на основании результатов неразрушающего контроля», повышающее качество контроля трубопроводов.
- Рационализаторское предложение №313-14-2021 «Комплект учебных образцов с расслоением металла труб для обучения специалистов неразрушающего контроля», с экономическим эффектом 320 т.р.
- Программное обеспечение «Расшифровка результатов пошаговой толщинометрии дефектоскопом УИУ серии «Сканер» с инструкцией И-14.33-064-2021.

Работы Жукова Д.В. являются актуальными и востребованными в производстве, основаны на исследовании реальных объектов эксплуатации. Методы и результаты исследований используются при расследовании причин разрушения объектов, позволяют повысить качество диагностических работ и, как результат, надежность эксплуатации опасных производственных объектов.


  
С.А. Холодков


  
В.А. Ефименко


  
Д.В. Мелешин

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
\_\_\_\_\_ Гаврилов А.В.  
«28» 03 2022 г.



### АКТ

о внедрении (использовании) результатов научно-исследовательской работы  
(диссертационного исследования) в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования Жукова Дмитрия Владимировича по теме «Исследования производственных дефектов трубопроводов из низкоуглеродистой стали и их оценка на конструкционную прочность», выполненного на кафедре технологии металлов и авиационного материаловедения (ТМиАМ) под руководством Коновалова С.В., внедрены в учебный процесс на основании решения кафедры (протокол №6 от 02.02.2022).

Материалы диссертационной работы использовались при подготовке бакалавров и магистров по направлению 22.03.02 и 22.04.02 «Металлургия» в дисциплинах «Материаловедение» и «Термическая обработка материалов», а также для выполнения курсовых и дипломных работ.

Заведующий кафедрой ТМиАМ

\_\_\_\_\_ /Коновалов С.В. /  
«14» 03 2022 г.

Соискатель ученой степени

\_\_\_\_\_ /Жуков Д.В. /  
«14» марта 2022 г.

/ Начальник отдела аспирантуры  
докторантуры, к.т.н.

\_\_\_\_\_ /Еськина Е.В. /  
«28» марта 2022 г.

/ Начальник отдела сопровождения  
научных исследований

\_\_\_\_\_ /Родионов Л.В. /  
«28» марта 2022 г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6. КОПИИ СВИДЕТЕЛЬСТВ О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ

<p>РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ</p>  <p><b>СВИДЕТЕЛЬСТВО</b> о государственной регистрации программы для ЭВМ <b>№ 2015613296</b></p> <p><b>Расчёт допустимого внутреннего давления для трубопровода, поврежденного стресс-коррозией</b></p> <p>Правообладатель: <i>Общество с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Самара» (RU)</i></p> <p>Авторы: <i>Жуков Дмитрий Владимирович (RU), Гиорбелидзе Михаил Георгиевич (RU)</i></p> <p>Заявка № <b>2014661269</b> Дата поступления <b>05 ноября 2014 г.</b> Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ <b>11 марта 2015 г.</b></p> <p><i>Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности</i>  Л.Л. Кирий</p> 	<p>РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ</p>  <p><b>СВИДЕТЕЛЬСТВО</b> о государственной регистрации программы для ЭВМ <b>№ 2019660974</b></p> <p><b>«Оценка работоспособности участка трубопровода с дефектами КРН»</b></p> <p>Правообладатель: <i>Общество с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Самара» (RU)</i></p> <p>Авторы: <i>Жуков Дмитрий Владимирович (RU), Афанасьев Алексей Викторович (RU), Савин Дмитрий Валерьевич (RU)</i></p> <p>Заявка № <b>2019619851</b> Дата поступления <b>07 августа 2019 г.</b> Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ <b>15 августа 2019 г.</b></p> <p><i>Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности</i>  Г.П. Ильин</p> 
--	---

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2020617224**

**«Автоматизация обработки результатов толщинометрии с  
построением толщинограмм»**

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью  
«Газпром трансгаз Самара» (RU)*

Автор: *Жуков Дмитрий Владимирович (RU)*

Заявка № **2020616167**  
Дата поступления **15 июня 2020 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **02 июля 2020 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*  
 Г.П. Ильин



# ПРИЛОЖЕНИЕ 7. КОПИИ ПАТЕНТОВ НА ПОЛЕЗНЫЕ МОДЕЛИ

