

На правах рукописи



Жуков Дмитрий Владимирович

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

2.6.17. Материаловедение

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

**Научный руководитель:** **Коновалов Сергей Валерьевич**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Латыпов Олег Ренатович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедры «Материаловедение и защита от коррозии» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г.Уфа

**Литовченко Игорь Юрьевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий лабораторией  
материаловедения сплавов с памятью формы  
ФГБУН «Институт физики прочности и  
материаловедения» Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИФПМ СО РАН),  
г.Томск

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

Защита состоится «13» октября 2023 года в 16 часов 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: г.Самара, ул.Молодогвардейская, 244, ауд.200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте: [http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/zhukov\\_diss.pdf](http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/zhukov_diss.pdf)

Отзывы на автореферат просьба высылать по адресу: 443100, г.Самара, ул.Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

**Ученый секретарь**  
диссертационного совета



**Луц Альфия Расимовна**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Широкий диапазон механических свойств, хорошая свариваемость и относительная дешевизна делают сталь незаменимым конструкционным материалом, применяемым во всех отраслях промышленности. Сталь является 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, актуальной задачей является оценка опасности дефектов газопроводов. Пропущенные при производственном контроле и допущенные в эксплуатацию дефекты труб, 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. Так же 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 возникающими кольцевыми напряжениями в два раза меньшими предела текучести, структурные и механические изменения в металле, развивающиеся в течении 50 лет, незначительны.

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.

#### **Достоверность исследований**

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**

Результаты работ докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах: XXI Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия–2019» (Новокузнецк, 2019); LXI Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Тольятти, 2019); XI Международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (Черноголовка, 2020); Научно-практический семинар «Актуальные проблемы физики конденсированных сред» (Черноголовка, 2020); XIV Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2020); XVI Международная школа-семинар ЭДС–2020 (Барнаул, 2020); Международная конференция «Физика и технологии перспективных материалов-2021» (Уфа, 2021); XXII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия–2021» (Новокузнецк, 2021); XXVI Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Екатеринбург, 2022).

#### **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.

**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.

### **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.

### **Объем и структура работы**

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

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** обоснована актуальность темы диссертации, дана общая характеристика работы, степень ее разработанности, приведены цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, указан личный вклад автора, соответствие паспорту специальности, приведены структура и объем диссертации.

**В первой главе «Причины разрушения газопроводов, методы определения и критерии оценки дефектов»** проанализирована статистика инцидентов и причин отказов на газопроводах. Выявлено, что дефекты материала и конструкций, наряду с коррозионными повреждениями, внешними воздействиями и подвижками грунта относятся к основным причинам аварий.

Проведен анализ отечественных и зарубежных научных источников, отражающих результаты современных исследований структуры и микроструктуры металла газопроводов, рассмотрены эксплуатационные и производственные причины инцидентов.

Приведены основные способы контроля металла газопроводов, описаны их достоинства, недостатки, условия применения. Выполнен краткий обзор изменения критериев оценки производственных дефектов труб с течением времени. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи настоящей диссертационной работы.

**Во второй главе «Материалы, средства, методы и оборудование»** описаны основные материалы и объекты, исследованные при работе над диссертацией. Указаны условия их эксплуатации, сроки службы и особенности, выявленные при проведении диагностических работ. Исследовался металл трубопроводов, изготовленных из сталей марок 17ГС, 17Г1С, ст.20, относящихся к низкоуглеродистым сталям, содержащим кремний и марганец в качестве основных легирующих элементов. Выбор материалов обусловлен их применением в качестве основных на магистральных газопроводах и газопроводах-отводах с диаметром труб от 108 до 530 мм.

Во второй части главы приведено описание металлографического и испытательного оборудования, оборудования для пробоподготовки, приборов неразрушающего контроля и другого оборудования, использованного при исследованиях и испытаниях.

Численное моделирование методом конечных элементов проводилось в программном комплексе ANSYS. Применялся классический метод подсчета объемных соотношений фаз по линейному методу Розиваля. Используются проверенные и принятые отраслевые методики расчета допустимых толщин стенок труб, возникающих продольных и кольцевых напряжений в материале. Специальное программное обеспечение выполнено в среде IDE Lazarus, на языке Object Pascal, распространяемом на условиях GNU General Public License.

**В третьей главе «Поверхностные отслоения металла»** первая часть посвящена исследованиям проблемы искажений результатов контроля толщины поверхностных отслоений на примере производственного дефекта, представляющего собой отслоение металла от тела трубы, проходящее по сложной траектории (рисунок 1а). Такие же результаты часто обнаруживаются при контроле толщины прокатных плен.

Исследовался металл участка трубопровода из конструкционной низколегированной кремнемарганцовистой стали марки 17Г1С, диаметром 530 мм, толщиной стенки 9,0 мм. Особенность дефекта, идентифицированного как закат сложной формы, проявилась в искажении показаний приборов неразрушающего контроля, что привело к необоснованному выводу участка трубы из эксплуатации и остановке транспорта газа для проведения ремонтных работ. Дефект обнаружен на участке магистрального газопровода надземного исполнения при циклическом нагружении внутренним избыточным давлением до 2,5 МПа. Дополнительной отличительной особенностью дефекта стало его быстрое развитие после 20 лет эксплуатации. Дефектный участок был обнаружен визуально.



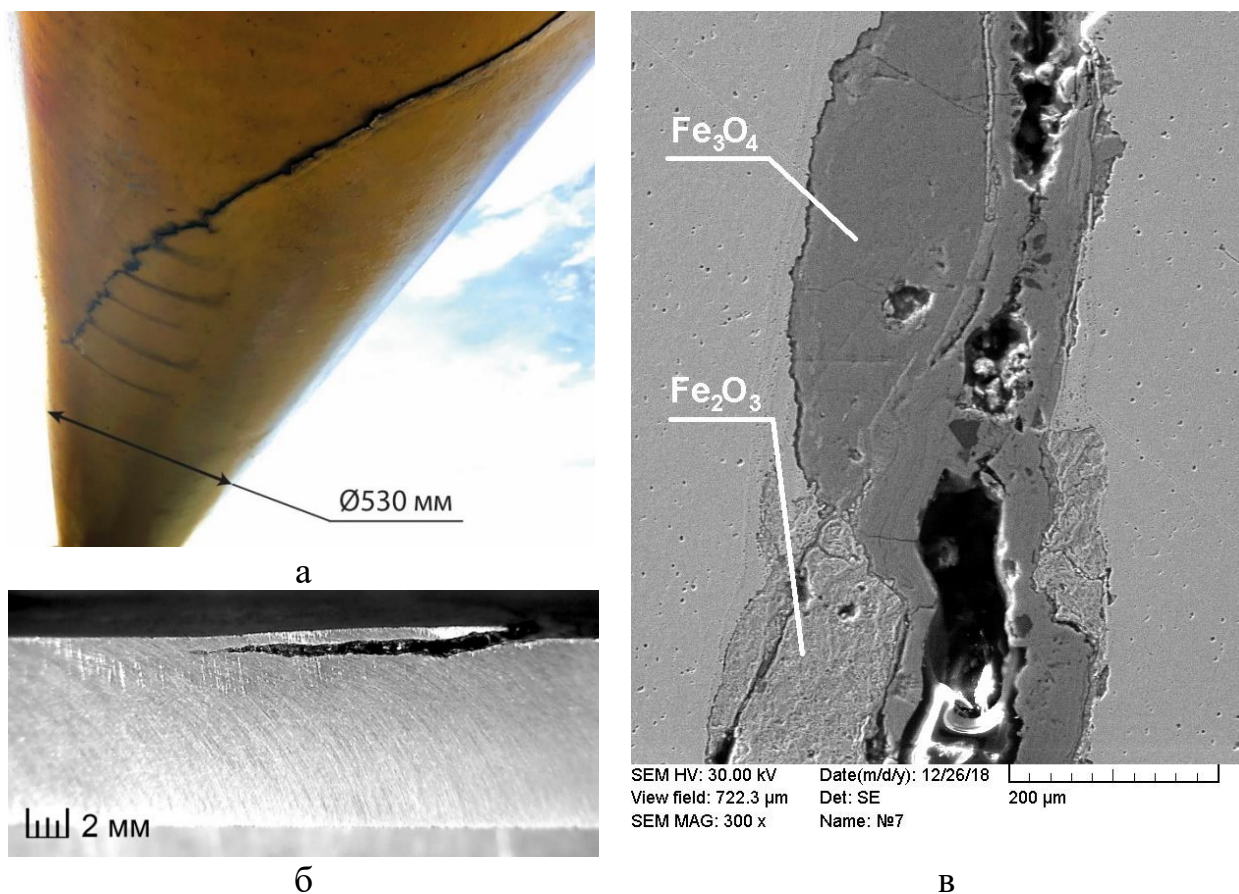


Рисунок 1 – Внешний вид дефекта (а – участок трубы с продольно-диагональным направлением отслоения; б – поперечный срез дефекта; в – электронно-сканирующая микроскопия среднего участка дефектной зоны)

Проведенные полевые обследования с наружной стороны непосредственно над зоной дефекта показали толщину, изменяющуюся в значительных пределах. 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. На этом основании газопровод был выведен в ремонт для замены дефектного участка. После вырезки участка, при визуальном осмотре выявлено, что реальная толщина отслоения не превышала 1,5 мм (рисунок 1б). Проведены неоднократные исследования в лабораторных условиях для выявления причин искажений результатов, возникших при полевом контроле.

Подтверждено экспериментально, что на результаты измерений влияет совокупность факторов, сочетающих плотные и увлажненные продукты коррозии (рисунок 1в), а также и толщина отслоения близкая к нижнему пределу чувствительности датчиков приборов контроля. Анализ условий эксплуатации и проведенные расчеты несущей способности, подтвердили возможность ремонта дефектного участка методом контролируемой шлифовки без остановки транспорта газа.

Во второй части главы рассмотрен эксплуатационный дефект трубопровода после 50 лет эксплуатации, представляющий собой подповерхностную коррозию (рисунок 2).

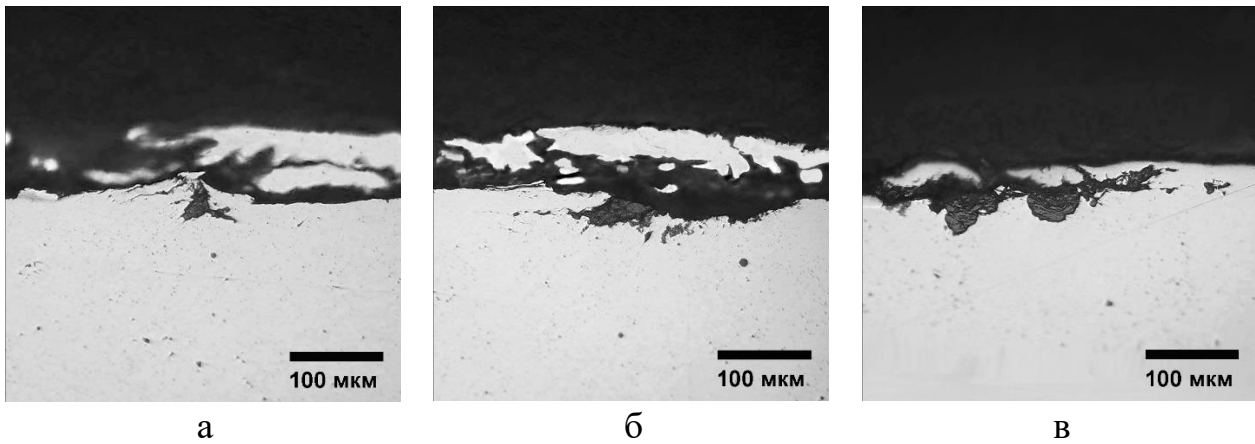


Рисунок 2 – Участки поверхности с различными этапами развития коррозии

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. Развитие коррозии вглубь основного металла не превышает 100 мкм.

Проведенные испытания показали, что при эксплуатации трубопроводов с внутренними кольцевыми напряжениями, составляющими до 50% от предела текучести и до 70 % от предела макроупругости, в материале не происходит заметных структурных и механических изменений. Для таких условий эксплуатации газопроводов, возможно их повреждение по схеме подповерхностной коррозии из-за микроповреждений изоляции.

**В четвертой главе «Исследование неметаллических включений в металле труб и оценка их влияния на результаты неразрушающего контроля и несущую способность конструкций» рассмотрены внутренние включения в металле труб, представляющие собой дефекты производства различной природы: раскатанные рыхлости, газовые пузыри, шлаковые включения, расположенные на различной глубине (рисунок 3).**

В первой части главы исследовались образцы из одношовной сварной стальной трубы, наружным диаметром 325 мм, номинальной толщиной стенки 8,0 мм, выполненной из нелегированной конструкционной углеродистой стали марки 20. Газопровод эксплуатировался под внутренним избыточным давлением до 7,5 МПа при подземном расположении в течении 25 лет. Обследуемая труба содержит внутренние раскатанные плоскостные включения, протяженные по всей длине трубной секции, составляющей 5 м, направленные параллельно стенке, дефектная область занимает до 40% по периметру трубы. В процессе эксплуатации часть дефектов получила развитие, в результате чего было образовано отслоение участка металла с выходом на внутреннюю поверхность.

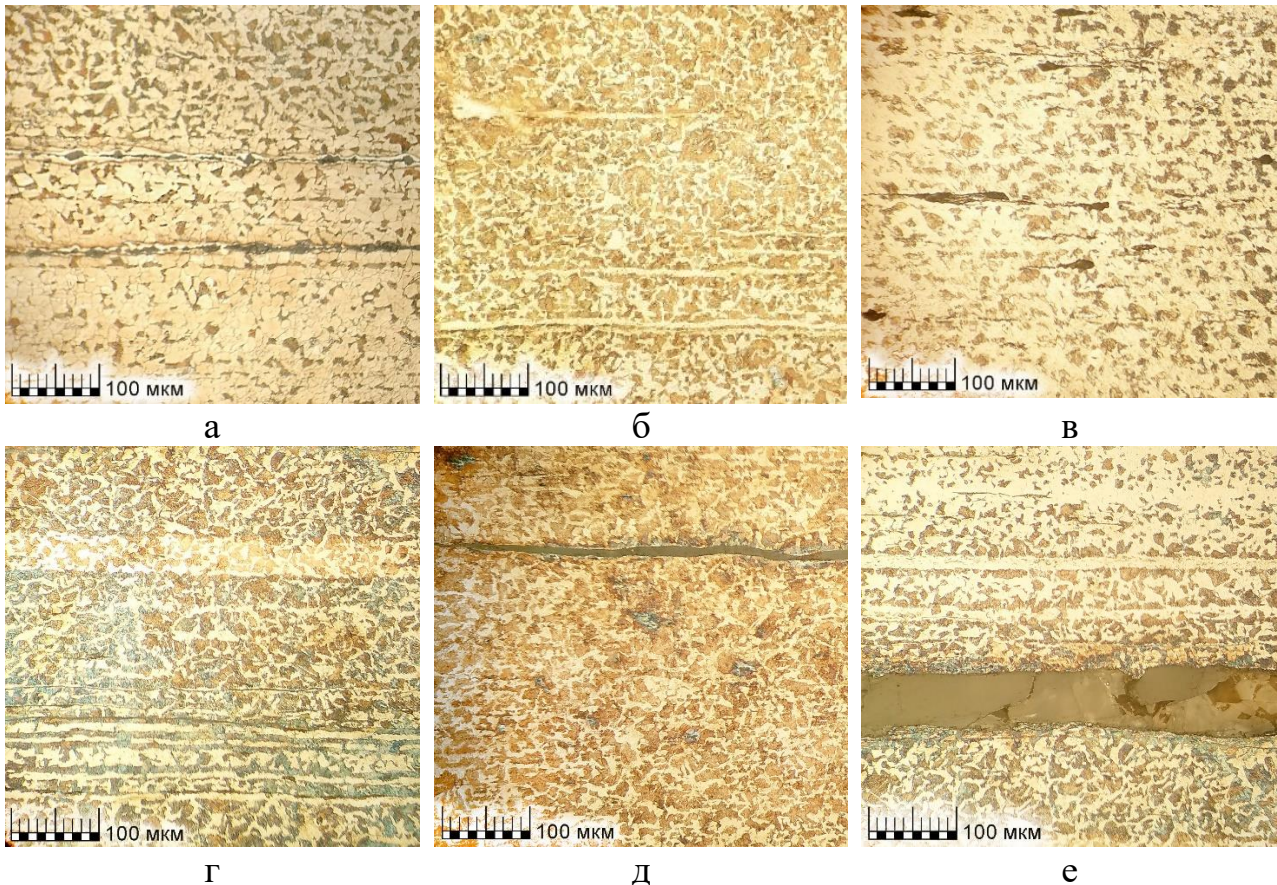


Рисунок 3 – Несплошности и особенности строения стенки трубы (а – протяженные и точечные параллельные раскатанные включения от 0,1 до 10 мкм; б – вытянутые включения, металл с ферритными прослойками; в – точечные и незначительно протяженные включения; г – полосчатость металла; д – протяженные включения толщиной до 10 мкм; е – протяженные включения шириной до 50 мкм)

Проведен анализ микроструктуры дефектных участков и оценка их влияния на результаты ультразвукового контроля. Определено, что наибольшее влияние оказывает сочетание толщины и протяженности включений. Полосчатость и химическая неоднородность, выраженная в повышении или понижении количества феррита и перлита, одиночные точечные и не протяженные включения, толщиной до 5 мкм, не оказывают влияния на показания. Включения толщиной до 15-20 мкм создают полупрозрачную для ультразвуковой волны среду, ослабляющую энергию донного сигнала, при этом на экране приборов можно увидеть сигналы от нескольких отражателей: от дефектного участка и от нижней стенки изделия. В большинстве случаев, такие сигналы соответствуют ликвационным зонам и зонам с частичной заваркой расслоений. Газовые полости и протяженные включения толщиной более 20 мкм, создают для ультразвуковой волны непрозрачное препятствие, истинную толщину изделия при этом определить невозможно.

Наличие в трубах плоскостных дефектов приводит к изменению механических свойств материала и локальным изменениям прочностных

характеристик основного металла в широком диапазоне (рисунок 4), приводящим к неравномерному распределению напряжений.

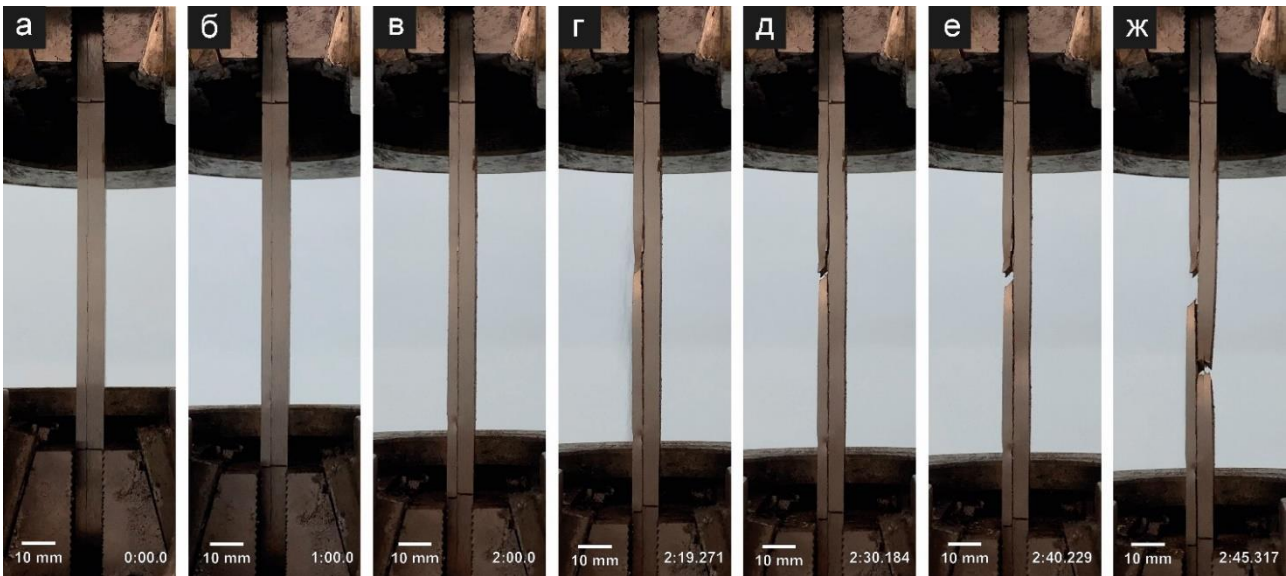


Рисунок 4 – Динамика разрушения образца, содержащего слои с отличающимися характеристиками

Наибольшее влияние наличие дефектов оказало на ударную вязкость, которая составила на образцах с дефектами  $110 \text{ Дж/см}^2$ , при испытаниях в поперечном направлении, что в 2 раза превысило вязкость бездефектных образцов, составлявшую  $53 \text{ Дж/см}^2$ . Это вызвано анизотропией металла из-за его многослойности и дополнительной работы, затрачиваемой на раскрытие межслойных границ. Наиболее негативное влияние оказывается на уменьшение относительного удлинения, которое уменьшалось до 50%.

Во второй части четвертой главы рассмотрен кольцевой сварной шов, выполненный сваркой токами высокой частоты (ТВЧ). Диаметр трубы 325 мм, изготовлена из нелегированной конструкционной углеродистой стали марки 20. Номинальная толщина стенки бездефектной трубы 6,0 мм, трубы с дефектными участками 7,5 мм. Наружный и внутренний валики усиления сварного шва механически сняты. При шурфовом контроле на шве была обнаружена поверхностная трещина протяженностью 80 мм, глубиной до 3 мм, шириной раскрытия 1 мм. Отличительной особенностью шва является наличие на одной из труб внутренних раскатанных включений, расположенных на различной глубине. Труба эксплуатировалась в составе газопровода подземного исполнения, под внутренним избыточным давлением до 7,5 МПа в течении 25 лет.

При сравнительных механических испытаниях зафиксировано ухудшение всех характеристик. Результаты испытаний приведены в таблице 1. Измеренный предел текучести соответствует бездефектному участку, незначительно превышая его на 4%, что связано с распределением очередности включения в работу слоев дефектных участков и неравномерным перераспределением нагрузки при переходе части слоев на участок упрочнения. Основное влияние на

снижение прочности сварного шва оказывают микровключения по линии сплавления (рисунок 5), оставшиеся от экзогенных и эндогенных включений в дефектной зоне свариваемой трубы

Таблица 1. Результаты испытаний

Участки	Колич. образцов	Временное сопротивление, МПа		Предел текучести, МПа		Относительное удлинение, %	
		средн.	размах	средн.	размах	средн.	размах
Бездефектные	3	515	14	389	9	11,3	2,1
С дефектами	5	441	53	404	37	6,1	2,6
С зародышем трещины	1	273	–	236	–	3,1	–

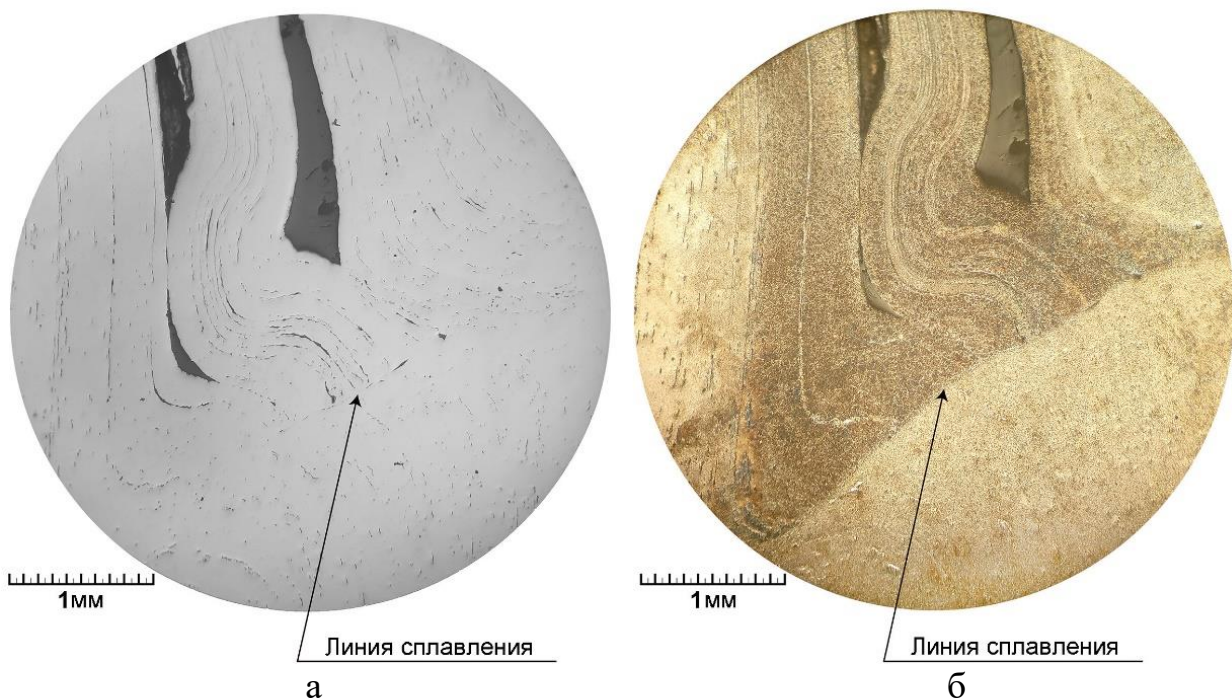


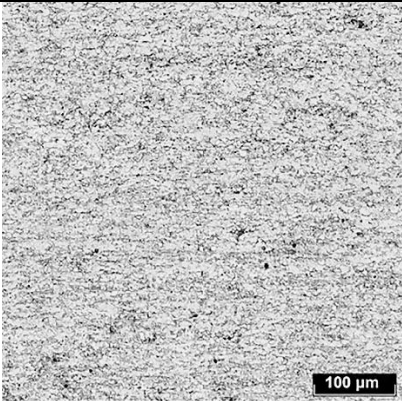
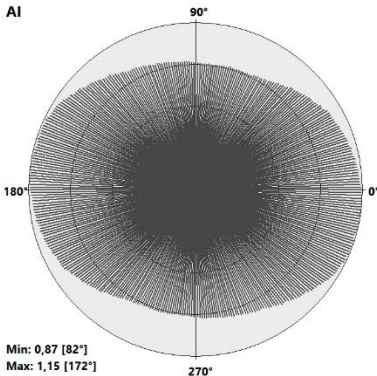
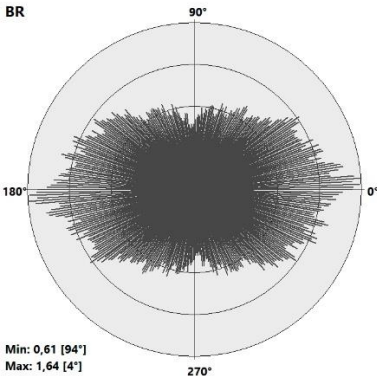
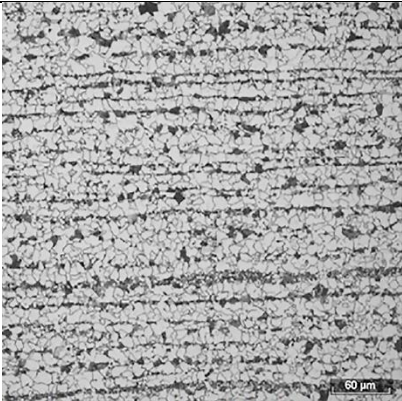
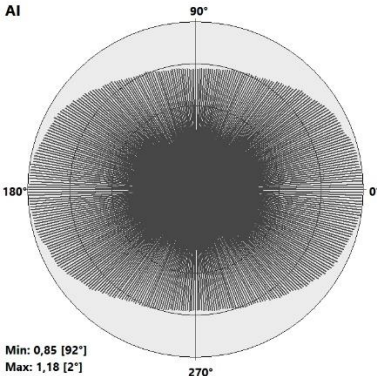
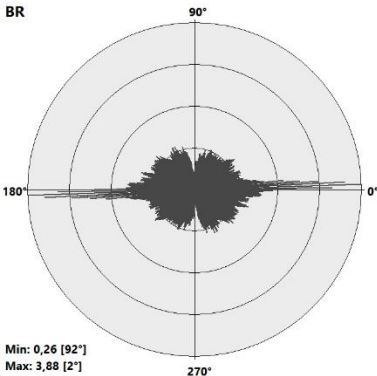
Рисунок 5 – Участок сварного шва (а – до травления; б – после травления)

В результате исследований подтверждено, что расслоения металла при сварке труб токами высокой частоты, оказывают негативное влияние на качество сварных швов. Наиболее подверженной влиянию такого рода расслоений является способность материалов к растяжению. В процессе эксплуатации, за счет расслоений, создаются условия неравномерного нагружения, что приводит к послойному разрушению дефектных участков. Проведенные исследования показали снижение прочности на 15...50% и уменьшение относительного удлинения на 40...75%.

**В пятой главе «Способ оценки неоднородности микроструктуры материалов»** приведен разработанный и апробированный способ количественной оценки неоднородности микроструктуры металлов и сплавов на основе стереологических методов. В отличие от общепринятого метода секущих,

расчеты и измерения проводятся по радиальным направлениям снимков микроструктур с шагом в 1 градус. По результатам измерений определяются радиальные направления максимальных и минимальных значений среднеквадратичных отклонений, коэффициентов анизотропии и других параметров материалов по принятым в стандартах (ASTM E1268-19, ГОСТ 5640-2020) формулам. Измерения проводятся по 180 градусам исследуемого участка, с расчетом результатов для каждого углового направления и построением графиков в полярных координатах, обеспечивающих высокую наглядность измерений. Примеры приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты способа оценки неоднородности микроструктуры

№ образца по ASTM E1268-19	Полученные после обработки результаты	
	Анизотропия, AI	Полосчатость, BR
	 <p>AI Min: 0,87 [82°] Max: 1,15 [172°]</p>	 <p>BR 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 Min: 0,85 [92°] Max: 1,18 [2°]</p>	 <p>BR 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

Применение такого подхода позволяет автоматически определять максимальные и минимальные направления неравномерностей распределения сетки кристаллов, сторонних включений или фазового состава.

В шестой главе «Практическое применение результатов работы» описан разработанный автором метод определения конфигурации внутренних дефектов металла и степени его поврежденности по результатам дискретной ультразвуковой толщинометрии. Метод обеспечивает визуализацию результатов, совмещенную с математическими алгоритмами анализа данных, предоставляя комбинированное определение дефектности структуры. Визуальная оценка

производится по построенным толщинограммам, представляющих собой геометрические фигуры, приближенные по контуру к контролируемому объекту (рисунок 6).

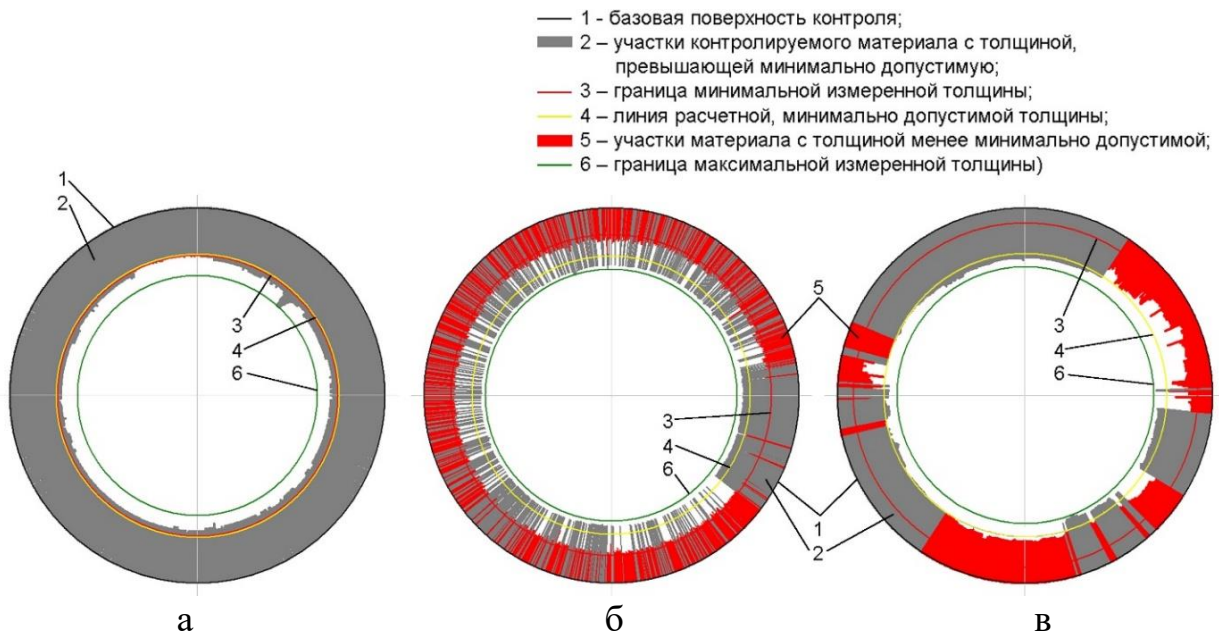


Рисунок 6 – Толщинограммы труб (а – бездефектная труба с продольным швом; б – труба с ликвационной полосой; в – труба с внутренними и выходящими на внутреннюю поверхность расслоениями)

На основе результатов исследований и материалов разработаны учебные стенды с наборами образцов. Их использование позволяет на практике изучать особенности диагностики плоскостных дефектов, приобретать необходимые компетенции и практические навыки сотрудников и повышать квалификацию персонала.

**В Приложениях** представлены копии документов, подтверждающих внедрение результатов диссертационной работы и копии охранных документов.

## 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  $Fe_2O_3$  и магнетита (окалины)  $Fe_3O_4$  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. 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.

6. 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 ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования рекомендованные ВАК РФ*

1. 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, D. Chen // CIS Iron and Steel Review. – 2021. – Vol. 1. – P.58-63.

2. 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, D. Chen, S.V. Voronin // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2021. – Vol. 15. – p. 872-876.



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

4. Жуков, Д.В. Причины образования поперечных трещин на продольном сварном шве трубы магистрального газопровода / Д.В. Жуков, А.А. Мельников, С.В. Коновалов, М.О. Дмитриева // Черные металлы. – 2022. – №9. – С. 34-38.

5. 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.

*Статьи в отечественных изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий рекомендованных ВАК РФ*

6. Жуков, Д.В. Анализ морфологии производственного дефекта металла магистральных газопроводов / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов, А.В. Афанасьев, М.И. Васьков // Производство проката. – 2019. – №9. – С. 33-38.

7. 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.

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

9. Савин, Д.В. Анализ причин разрушения элементов обвязки крановых узлов трубопроводов с применением численного моделирования / Д.В. Савин, Д.В. Жуков, Д.В. Комаров, С.А. Холодков, И.С. Виноградов // Территория «Нефтегаз». – 2021. – №7-8. – С. 90-96.

10. Жуков, Д.В. Нехарактерные дефекты газопроводов, образовавшиеся при проведении внутритрубного технического диагностирования / Д.В. Жуков, Д.В. Комаров, Д.В. Савин, А.В. Сержантов, А.В. Афанасьев // Территория «Нефтегаз». – 2021. – № 3-4. – С. 24-32.

*Статьи в иностранных изданиях, индексируемые Scopus и Web of Science*

11. 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. – A. 104359.1-11.

12. Zhukov, D.V. Express quality analysis of metal structure based on thickness data / D.V. Zhukov, S.V. Konovalov // AIP Conference Proceedings 2315. – 2020. – A. 040051.1-4.

13. 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. – A. 105235.1-12.

14. 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.

*Результаты интеллектуальной деятельности*

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613296. Расчет допускаемого внутреннего давления для трубопровода, поврежденного стресс-коррозией / Д.В. Жуков, М.Г. Гиорбелидзе; правообладатель ООО «Газпром трансгаз Самара». – Заявка №2014661269 от 05 ноября 2014 г.; зарегистрировано 11 марта 2015 г.

16. Патент на полезную модель №154571. Российская Федерация: МПК G01B3/14. Устройство для измерения поверхностных дефектов трубопроводов / И.В. Щербо, Д.В. Жуков // заявитель и патентообладатель ООО «Газпром трансгаз Самара». – Заявка №2014143559 от 28 октября 2014 г.; зарегистрировано 05 августа 2015 г.

17. Патент на полезную модель №157282. Российская Федерация: МПК G01B3/14. Устройство для измерения поверхностных дефектов трубопроводов с индикатором часового типа / И.В. Щербо, Д.В. Жуков // заявитель и патентообладатель ООО «Газпром трансгаз Самара». – Заявка №2015121920 от 08 июня 2015 г.; зарегистрировано 05 ноября 2015 г.

18. Патент на полезную модель №167403. Российская Федерация: МПК G01L7/18. Устройство для контроля целостности внутренних угловых сварных швов тройников с накладками через контрольные отверстия / Д.В. Жуков, А.В. Афанасьев // заявитель и патентообладатель ООО «Газпром трансгаз Самара». – Заявка №2016121096 от 27 мая 2016 г.; зарегистрировано 10 января 2017 г.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660974. Оценка работоспособности участка трубопровода с дефектами КРН / Д.В. Жуков, А.В. Афанасьев, Д.В. Савин; правообладатель ООО «Газпром трансгаз Самара». – Заявка №2019619851 от 07 августа 2019 г.; зарегистрировано 15 августа 2019 г.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617224. Автоматизация обработки результатов толщинометрии с построением толщинограмм / Д.В. Жуков; правообладатель ООО «Газпром трансгаз Самара». – Заявка №2020616167 от 15 июня 2020 г.; зарегистрировано 02 июля 2020 г.

*Публикации материалах конференций и других изданиях*

21. 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: издательский центр СибГИУ, 2019. – Ч.2. – С. 29-33.

22. 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. – С. 128.

23. 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, Черногоровка) под ред. Б.Б. Страумала. – Черногоровка: Научный центр РАН, 2020. – С. 114.

24. Жуков, Д.В. Подповерхностная коррозия как основной деградиационный 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, Черногоровка). – Черногоровка: Научный центр РАН, 2020. – С. 65.

25. Жуков, Д.В. Экспресс-анализ качества структуры металла на основе данных толщинометрии / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов // XIV Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» Екатеринбург, 09–13 ноября 2020 г.: сб. материалов. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2020. – 429 с. – Т.1. – С. 9-10

26. 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: издательство АлтГТУ, 2020. – С. 64-65.

27. 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. – С. 68.

28. Жуков, Д.В. Исследование причин образования поперечных трещин на продольном сварном шве трубы магистрального газопровода / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов, Д. Чен // XXII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия–2021». – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2021. – Ч.2. – С. 19-23.

29. 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. – С. 262-267.

#### *Главы в коллективных монографиях*

30. Жуков, Д.В. Глава 7. Особенности структуры дефектов проката из низкоуглеродистой стали / Д.В. Жуков, С.В. Коновалов, А.А. Мельников // Современные материалы : монография, под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2020. – С. 125-139.

*Научное издание*

Жуков Дмитрий Владимирович

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук на тему:

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

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного  
диссертационного совета 99.2.039.02 на базе  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и  
ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет  
имени С.П. Королева»  
(протокол №6 от 22.06.2023)

---

Формат 60×84 1/16. Набор компьютерный.  
Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_.  
Издательство Самарский университет  
443086, Самара, Московское шоссе, 34