

На правах рукописи



БУТУСОВА ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ
ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ НА РАННИХ СТАДИЯХ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ
КОРРОЗИОННОМ РАСТРЕСКИВАНИИ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2020 г.

Работа выполнена в Институте проблем машиностроения РАН – филиала ФГБНУ «Федерального исследовательского центра Института прикладной физики РАН» (г. Нижний Новгород)

Научный руководитель:

Мишакин Василий Васильевич,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Терентьев Владимир Фёдорович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБНУ «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)», г. Москва,
главный научный сотрудник «Лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов»

Катюхин Евгений Борисович,
кандидат технических наук, ФГУП «Российский Федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров, начальник отдела лабораторного контроля и испытаний

Ведущая организация:

Акционерное общество «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения имени И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), г. Нижний Новгород

Защита состоится 05.06.2020 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д212.165.07 при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, корп. 1, ауд. 1315.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева и на сайте <http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>.

Автореферат разослан _____ 2020г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Пачурин Герман Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Степень ее разработанности

Система трубопроводов России является уникальным и постоянно увеличивающимся объектом, основу которого составляют малоуглеродистые низколегированные стали. Она представляет собой сеть сложных технических составляющих, осуществляющую транспортировку нефти и газа под высоким давлением в сложных геолого-географических и климатических условиях, как на территории Российской Федерации, так и за её границами. При этом важно отметить, что динамика изменения количества выявленных стресс-коррозионных дефектов за последние двадцать лет указывает на непреклонный рост числа дефектов типа коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) и коррозии, что свидетельствует о непрекращающемся ухудшении состояния трубопроводной системы.

Объективный прогноз остаточного ресурса трубопроводов возможен при наличии глубокого понимания физики явлений и процессов, протекающих в материалах труб в процессе длительной эксплуатации. Технологии изготовления применяемых малоуглеродистых сталей связаны с переводом системы железо-углерод в нестабильное состояние, обусловленное превышением концентрации углерода в твердом растворе α -железа на два порядка по отношению к равновесной. Вследствие действия второго закона термодинамики, в сталях в процессе эксплуатации происходят изменения в структуре, связанные со стремлением системы перейти в более равновесное состояние (процесс старения).

С начала 2000-х годов в металловедении активно изучаются процессы деградации структуры и свойств металлов и сплавов, в частности, малоуглеродистых низколегированных сталей. В тоже время, наиболее часто применяемые средства и методы оценки степени изменений при длительных сроках службы трубопроводов не позволяют в полной мере воссоздать протекающие процессы трансформации структуры и провести оценку влияния такого изменения на эксплуатационные характеристики, в частности на процессы зарождения и развития трещин коррозионного растрескивания под напряжением. Это затрудняет оценку фактического состояния материалов трубопроводов.

Преждевременные выходы из строя трубопроводов приводят к существенным затратам, связанным как с приостановками в транспортировке углеводородов, так и с последующим ремонтом и устранением экологических последствий аварии. Перспективными направлениями их снижения являются создание системы контроля и предупреждения аварийных ситуаций с минимальными остановками в работе газо-нефтепроводов.

Одним из структурно-чувствительных методов неразрушающего контроля является электромагнитный (вихретоковый), позволяющий исследовать процесс разрушения металла на поверхности и в приповерхностном слое и отличающийся мобильностью и удобством применения. Использование вихретоковых приборов нашло широкое применение при оценке химического состава сплава, термической обработки деталей, обнаружении остаточных напряжений, трехмерных дефектов и т.д.

В связи со всем вышесказанным, выявление основных закономерностей между изменениями структуры стали в процессе старения и параметрами разрушения при коррозионном растрескивании под напряжением, а также разработка метода диагностики КРН повреждений в процессе эксплуатации на ранних стадиях, основанного на методе неразрушающего контроля, является актуальной научно-технической задачей.

Таким образом, целью диссертационного исследования является разработка метода определения поврежденности малоуглеродистых низколегированных трубных сталей на ранних стадиях разрушения при коррозионном растрескивании под напряжением на основе вихретоковых измерений.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить влияние изменения структуры в процессе старения на коррозионное растрескивание под напряжением.
2. Показать возможность использования вихретокового метода при диагностике процессов накопления повреждений и разрушения при КРН на ранних стадиях.

3. Разработать алгоритм оценки времени инкубационного периода и определения состояния материала, подверженного КРН.

4. Разработать метод определения поврежденности трубных сталей на ранних стадиях разрушения при коррозионном растрескивании под напряжением на основе вихретоковых исследований.

Объектом научного исследования являлись малоуглеродистые низколегированные стали, используемые при производстве труб большого диаметра, предназначенных для магистральных газо- и нефтепроводов, работающих при давлении до 9,8 МПа.

Предмет диссертационного исследования – процессы зарождения и роста трещин коррозионного растрескивания под напряжением.

Научная новизна

1. Получена зависимость разрушающего напряжения от уровня старения на выбранной базе испытаний. Установлено, что кривая имеет три стадии, каждая из которых характеризует различные этапы старения.

2. На основании вихретокового исследования процесса коррозионного растрескивания малоуглеродистых сталей получены зависимости вихретокового параметра от длительности испытаний для разных напряжений. Показано, что данные зависимости характеризуют процессы накопления повреждений при КРН, включая инкубационный период. Отмечено, что проведение вихретоковых измерений в режиме мониторинга позволяет выявить стадию разрушения, на которой находится материал в процессе эксплуатации.

3. Получена зависимость вихретокового параметра от уровня старения, соответствующего времени окончания инкубационного периода КРН, характеризующегося массовым зарождением трещин, средней длиной порядка нескольких размеров зерен.

4. Предложена зависимость, связывающая длительность инкубационного периода КРН с данными вихретоковых измерений. Продемонстрирована возможность определения времени появления трещин, средняя длина которых составляет порядка нескольких размеров зерен, с помощью неразрушающего контроля.

5. Предложен параметр, позволяющий определять состояния материала при КРН посредством вихретоковых измерений.

Теоретическая и практическая значимость

В результате выполненных исследований разработан метод определения поврежденности трубных сталей на ранних стадиях разрушения при коррозионном растрескивании под напряжением на основе вихретоковых измерений, проведена его апробация в лабораторных условиях и на фрагментах действующих трубопроводов. Применение данного метода позволит оперативно проводить исследования трубопроводов без длительных приостановок в работе.

Методология и методы исследования. Работа выполнена с использованием современных методов исследования. В частности, химический состав изучался с помощью оптико-эмиссионной спектрометрии. Микроструктурные исследования проводились с использованием цифровых микроскопических комплексов. Испытания на КРН проводились с применением цифровой фотографической техники. Вихретоковые исследования выполнялись на современном оборудовании, позволяющем эффективно проводить неразрушающий контроль исследуемых материалов. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в диссертационной работе, базируются на теории планирования экспериментов, математическом анализе, численных методах. Разработанные модели основаны на современных представлениях в области физического материаловедения и теории дефектов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость разрушающего напряжения от уровня старения на выбранной базе испытаний. Трехстадийный характер зависимости соответствует различным этапам старения.

2. Зависимости вихретокового параметра от длительности испытаний на коррозионное растрескивание под напряжением для разных уровней напряжений, характеризующие процессы накопления повреждений в процессе КРН.

3. Зависимость длительности инкубационного периода КРН от вихретокового параметра, позволяющая провести оценку времени образования трещин средней длиной порядка нескольких размеров зерен с помощью вихретоковых измерений.

4. Метод, позволяющий определять уровень поврежденности при КРН на ранних стадиях разрушения с помощью вихретокового контроля.

Степень достоверности результатов, обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечиваются использованием современного научного оборудования, комплексом апробированных физических методов исследования, корректными теоретическими представлениями при анализе и интерпретации экспериментальных результатов.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения разработаны и получены лично автором. Автор принимал участие в подготовке и проведении экспериментальных исследований, анализе экспериментальных данных, разработке критериев и метода оценки технического состояния сталей с помощью вихретокового метода.

Апробация работы

Часть результатов работы была представлена на Всероссийских и Международных конференциях: VI-ая Международная научно-техническая конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, Беларусь, 2011); XIX-ые Петербургских чтений по проблемам прочности, посвященные 130-летию со дня рождения академика АН УССР Н.Н. Давиденкова (Санкт-Петербург, 2010); V-ая Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур ПРОСТ-2010» (Москва, 2010); LII-ая Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Уфа, 2012 г.); Научные чтения им. И.А. Одингса «Механические свойства современных конструкционных материалов» (Москва, 2014 г.); 21-ая Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-21» (Екатеринбург, 2015 г.).

Работа выполнялась в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по Соглашению НГТУ с Минобрнауки России №14.580.21.0012 от 11.10.2017 (№075-15-2019-1392 от 20.06.2019), уникальный идентификатор проекта: RFMEFI58017X0012.

Публикации

Основные материалы исследования отражены в 16 публикациях, в том числе в 3 статьях в журналах, входящих в перечень, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, Министерства науки и высшего образования РФ по направлению 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 1-го приложения и включает 141 страницу машинописного текста, содержит 55 рисунков, 14 таблиц, список литературы из 178 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности выбранного направления исследований, сформулированы цель и задачи работы, изложены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен литературный обзор, описывающий основные способы формирования структур и их влияние на коррозионно-механическое разрушение малоуглеродистых сталей, применяемых при производстве магистральных трубопроводов большого диаметра.

Большой вклад в развитие понимания механизма коррозионного растрескивания под напряжением конструкционных металлов и сплавов внесли работы под руководством Романова В.В., Теплинского Ю.А., Сергеевой Т.К., Ажогина Ф.Ф., Томашова Н.Д., Паркинса Р.Н., Стеклова О.И., Горицкого В.М., Арабея А.Б., Филиппова Г.А., Гольдштейна М.И., Карпенко Г.В., Есиева Т.С., Сагарадзе В.В. и др. Среди зарубежных авторов, работающих в этом направлении, можно выделить Cheng Y.F., Kobayashi N., Kimura M., Zabik M.E. и др. В результате исследований

выявлены условия протекания КРН, основные этапы разрушения, а также предложены различные теории, позволяющие описать поведения материала при наличии коррозионно-агрессивной среды и статических напряжений.

Деградационным явлениям в структуре малоуглеродистых сталей и их влиянию на механические характеристики посвящены труды под руководством Панина В.Е., Есиева Т.С., Филиппова Г.А., Чувильдеева В.Н., Паркинса Р.Н., Арабея А.Б., Пышминцева И.Ю., Ботвиной Л.Р., Кантора М.М., Орлова В.В., Чура М.Н., LiX.G., ZakariaM.Y.B., KimW.K. и др. Авторами показано, что в процессе эксплуатации в малоуглеродистых сталях происходят тонкие изменения структуры, при температурах ниже $0,3 T_m$ (T_m – температура плавления стали), связанные с «уходом» атомов внедрения из зерна на границы и образованием частиц структурно-свободного цементита (процесс старения). Данные изменения существенно снижают некоторые механические характеристики, отвечающие за процессы накопления деформации в металлах и сплавах. Чувильдеевым В.Н. и соавторами предложено в качестве показателя уровня старения малоуглеродистых сталей использовать предел макроупругости, получаемый в результате релаксационных испытаний и определяющий окончания области макроупругости и начало области микропластической деформации.

Исследования металлов и сплавов с помощью вихретокового метода неразрушающего контроля проводятся коллективами под руководством Троицкого В.А., Ключева В.В., Hagemäier D. J., Mottl Z., Мишакина В.В., Khan S. H., Janoušek L., Telmo G., Chi Bum Bahn, Xu Xiaojie, Noritaka Yusa и другими. Разработанные методы диагностики материалов с помощью электромагнитных приборов показали свою эффективность при определении химического и фазового состава, выявления нарушений при изготовлении и термообработке, определении дефектности структуры.

В ходе выполнения литературного обзора произведено обоснование выбора метода неразрушающего контроля, основанного на электромагнитных характеристиках сталей, применительно к диагностике этапов разрушения при коррозионном растрескивании под напряжением.

На основании литературного обзора и сформулированных целей и задач разработана программа работ.

Вторая глава посвящена описанию методик, применяемых при проведении диссертационного исследования для раскрытия поставленных целей. Испытания на КРН проводились на плоских образцах прямоугольного сечения, нагруженных по схеме «трехточечный изгиб» (рисунок 1.а) в кипящем растворе нитратов ($57\% \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 6\% \text{HNO}_3 + 37\% \text{H}_2\text{O}$). Образцы вырезались поперек оси проката из основного металла 9 труб магистральных трубопроводов диаметром 1420 мм, отличающиеся длительностью эксплуатации, и были разделены, соответственно, на 9 серий.

Химический анализ, определение механических и релаксационных характеристик, а также параметров микроструктуры выполнялись по гостированным методикам. Методика испытаний на КРН была разработана в Научно-исследовательском физико-техническом институте ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

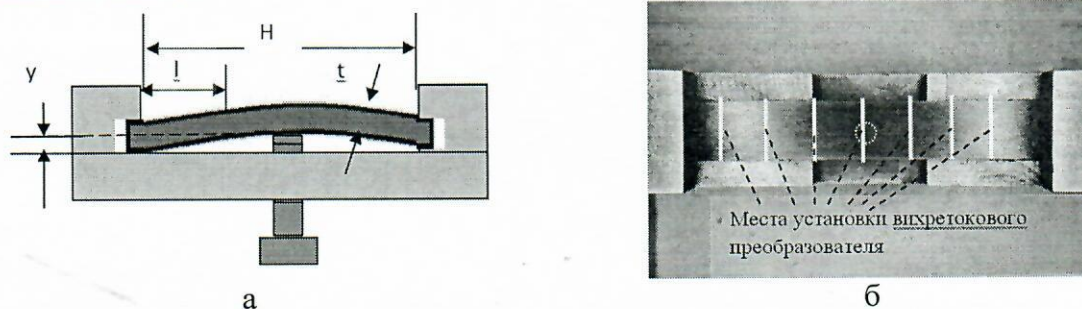


Рисунок 1. Оборудование для КРН испытаний: а – схематическое изображение трубины и образца под нагрузкой; б – реальный вид. H – расстояние между опорами, y – максимальный прогиб, t – толщина образца, l – расстояние от точки закрепления до места установки вихретокового датчика

Уровень старения (S) выбранных сталей рассчитывался на основе результатов релаксационных испытаний:

$$S = \frac{\sigma_0^{исх} - \sigma_0^{измер}(t)}{\sigma_0^{исх} - \sigma_0^{мин}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\sigma_0^{измер}(t)$ – величина предела макроупругости сплава после t лет эксплуатации, МПа; $\sigma_0^{исх}$ – величина предела макроупругости в стали в исходном состоянии (для проката из стали К60 составляет 360 МПа); $\sigma_0^{мин}$ – минимальная величина предела макроупругости стали в полностью состаренном состоянии (для К60 – 200 МПа).

Исследования изменения электромагнитных характеристик проводились с помощью вихретокового дефектоскопа ВД-70 с накладным трансформаторным дифференциальным преобразователем – ПН-6-ТД-С. Показания прибора (Р) пропорциональны сдвигу фаз измеряемого и опорного напряжений накладного преобразователя. При калибровке в качестве эталона использовался недеформированный образец, изготовленный из того же материала. Вихретоковые измерения проводились при вынимании образца из раствора в семи зонах, равномерно распределенных вдоль рабочей части (рисунок 1.б).

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований.

В пункте 3.1 описаны микроструктура выбранных объектов исследований, их основные и релаксационные механические характеристики. Показано, что структура исследованных сталей характерна для сталей контролируемого проката и отличается количеством и размерами выделившихся частиц структурно-свободного цементита (ССЦ). В качестве примера на рисунке 2 представлены фотографии структуры для одной из исследованных серий.

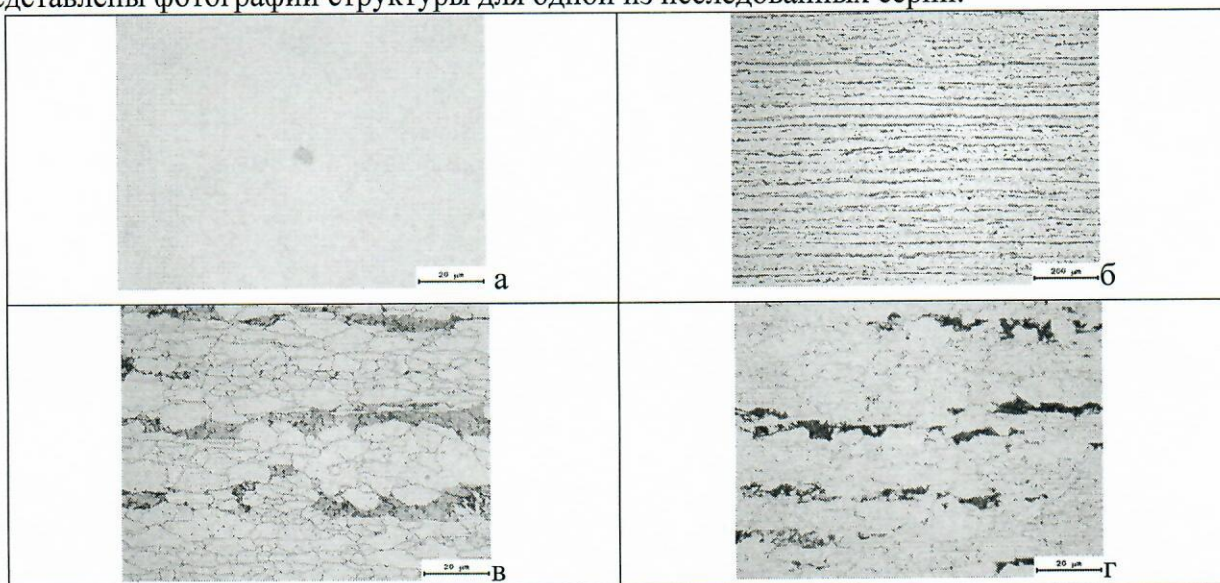


Рисунок 2. Микроструктура образцов: а – неметаллические включения; б – полосчатая феррито-перлитная микроструктура; в – зеренная структура стали; г – выделения ССЦ

По химическому составу выбранные объекты согласно ТУ 14-3-1573-96 соответствуют отечественной марке стали 10Г2ФБЮ. В соответствии с классификацией ГОСТ 19281-89 и ГОСТ 20295-85 основной металл исследованных труб по своим прочностным характеристикам может быть отнесен к классу прочности КП440 ($\sigma_{0.2} \geq 440$ МПа, $\sigma_b \geq 590$ МПа, $\delta_5 \geq 19\%$) и К60 ($\sigma_{0.2} \geq 412$ МПа, $\sigma_b \geq 588$ МПа, $\delta_5 \geq 16\%$), соответственно. Отмечено, что по химическому составу и основным механическим характеристикам исследованные стали соответствуют нормативно-технической документации для труб большого диаметра, применяемых на магистральных трубопроводах.

Результаты релаксационных испытаний показали, что объекты исследования имеют различные пределы макроупругости, соответствующие разным уровням старения, рассчитанным согласно (1).

В п. 3.2 описаны результаты исследования процессов коррозионного растрескивания под напряжением малоуглеродистых низколегированных сталей. Отмечено, что зависимость «Длина трещины ($L_{тр}$) – длительность выдержки в среде (τ)» имеет нелинейный характер и при увеличении прикладываемого напряжения смещается в сторону меньшей длительности испытаний (рисунок 3).

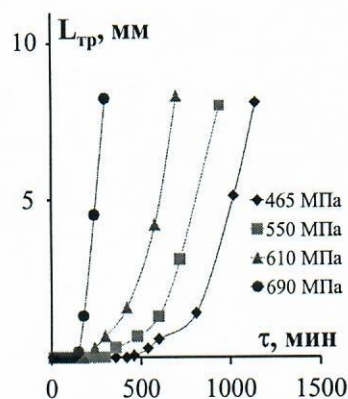


Рисунок 3. Экспериментальные зависимости $L_{тр}$ – τ

Из полученных кривых следует, что при возрастании растягивающих напряжений снижаются: длительность инкубационного периода КРН ($\tau_{инк}$), когда длина трещин составляет 20 мкм, и длительность разрушения образца ($\tau^{разр}$), при достижении трещиной длины 8000 мкм. При этом скорость роста трещины возрастает в несколько раз. Зависимости $V_{тр} - \sigma$ и $\tau - \sigma$ имеют нелинейный характер и в полулогарифмических координатах могут быть интерполированы прямыми линиями (рисунок 4).

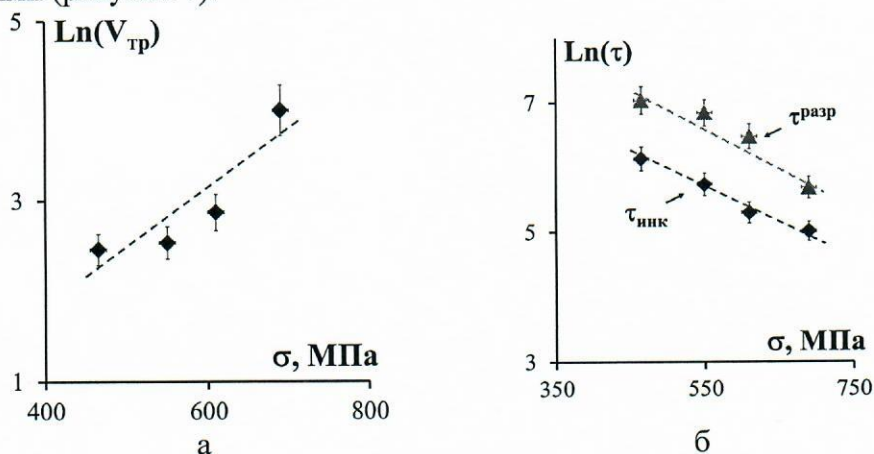


Рисунок 4. Зависимости скорости движения трещины (а) и критических времен (б) при КРН от величины приложенного напряжения

На рисунке 5 представлены зависимости вихретокового параметра (ΔP), представляющего собой разность показаний дефектоскопа в начальный момент времени (до погружения в раствор) и в текущий момент испытания, от места приложения датчика для разных длительностей выдержки в среде. Параметр ΔP определяется электромагнитными характеристиками материала и их изменениями при деградационных процессах, происходящих в структуре металлических сплавов.

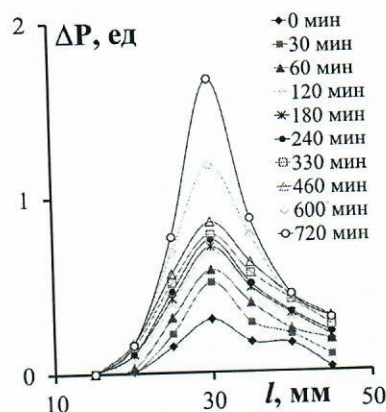


Рисунок 5. Распределение ΔP по длине образца, считая от точки закрепления

Распределение вихретокового параметра на образцах (рисунок 5) имеет близкий к симметричному вид относительно максимальной нагрузки, что соответствует распределению напряжений при выбранной схеме нагружения.

Четвертая глава посвящена анализу влияния процесса старения на зарождение и распространение трещин коррозионного растрескивания под напряжением малоуглеродистых низколегированных сталей. На основании полученных результатов предложен метод определения поврежденности трубных сталей на ранних стадиях разрушения при коррозионном растрескивании под напряжением с помощью вихретоковых измерений.

В п.4.1 на основании подходов современного материаловедения и теории дефектов описано влияние изменений структуры, происходящих в металле труб в процессах старения при температурах ниже $0,3 T_m$ и разрушения при КРН, на электрические и магнитные характеристики сплава.

В п. 4.2 выполнен анализ влияния старения на длительность инкубационного периода КРН (рисунок 6, 7).

На рисунке 6 изображена зависимость напряжения, обеспечивающего зарождение трещин КРН на выбранной базе испытаний (250 мин), от уровня старения. База в 250 минут соответствует длительности инкубационного периода КРН при максимально напряжении, на котором проводились вихретоковые исследования для сталей с уровнем старения порядка 50%. Также выбранная база позволяет снизить погрешности при аппроксимации.

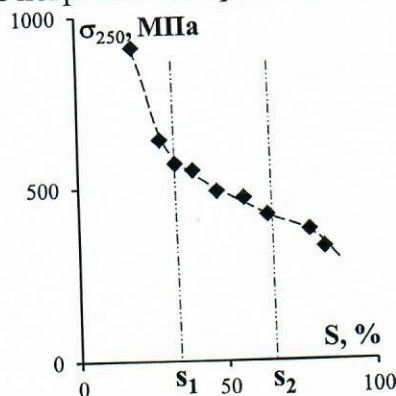


Рисунок 6. Зависимость напряжения зарождения трещины на базе 250 минут от уровня старения

Зависимость $\sigma-S$ имеет трехстадийный характер. Предполагается, что резкое снижение напряжения при увеличении уровня старения на первой стадии (до S_1) связано со снижением содержания углерода в зерне и образованием частиц структурно-свободного цемента на границах зерен. На втором этапе (от S_1 до S_2) наблюдаемое монотонное линейное снижение разрушающего напряжения обеспечивается постепенным увеличением, как объемной доли, так и

размера выпавших частиц ССЦ. Третий этап характеризуется резким снижением разрушающего напряжения вследствие образования на границах жесткого цементитного каркаса.

На рисунке 7 приведены зависимости логарифма длительности инкубационного периода КРН от прикладываемых напряжений для исследованных объектов. Как видно из представленных графиков: с увеличением уровня старения $\tau_{\text{инк}}$ снижается при одинаковых значениях эффективных напряжений, действующих в материале, а α (угол наклона кривой $\text{Ln}(\tau_{\text{инк}}) - \sigma$) уменьшается.

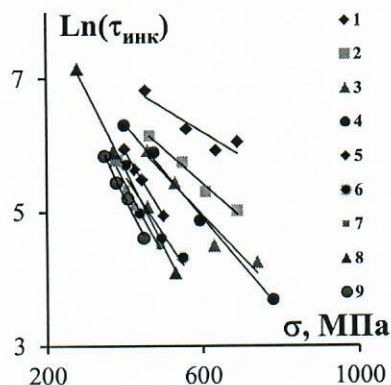


Рисунок 7. Зависимости длительности инкубационного периода КРН от напряжений сталей в различных структурных состояниях. 1-9 – номера испытанных серий

На кривой зависимости тангенса угла наклона кривой $\text{Ln}(\tau_{\text{инк}}) - \sigma$ от уровня старения S можно выделить две стадии (рисунок 8): при уровне старения до S_2 наиболее близко описывается линейной функцией (величина достоверности аппроксимации $R^2=0,98$), при $S>S_2$ – полиномом второй степени ($R^2=1$).

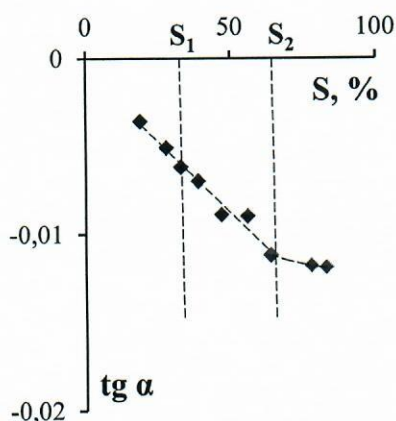


Рисунок 8. Зависимость тангенса угла наклона кривой $\text{Ln}(\tau_{\text{инк}}) - \sigma$ от уровня старения стали

По всей вероятности, угол наклона кривой $\text{Ln}(\tau_{\text{инк}}) - \sigma$ связан с изменением количества и типа дефектов, препятствующих движению дислокаций внутри зерна и на границах.

Проведенный в п. 4.3 анализ влияния старения на процесс роста трещин коррозионного растрескивания под напряжением (рисунок 9) показал, что зависимости $\text{Ln}(\tau^{\text{разр}}) - \sigma$ и $\text{Ln}(V_{\text{тр}}) - \sigma$ имеют нелинейный характер и в полулогарифмических координатах могут быть интерполированы прямыми линиями, углы наклона которых зависят от структурного состояния стали.

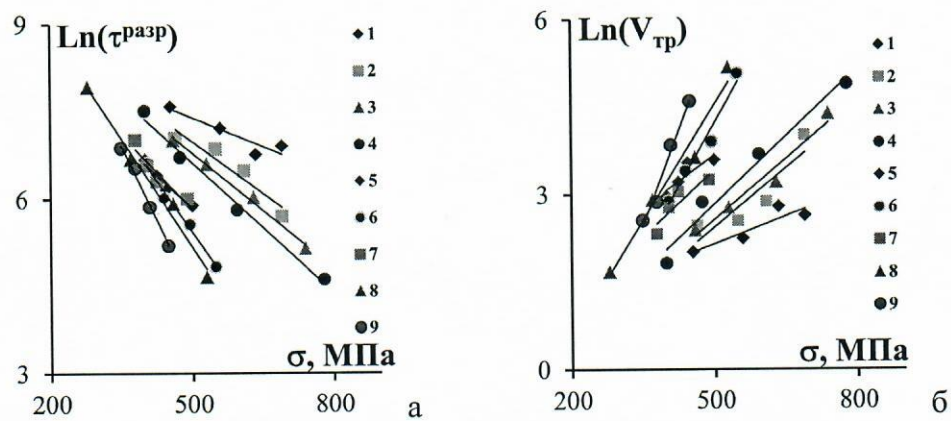


Рисунок 9. Влияние старения на разрушение при КРН: а) Зависимость времени до разрушения образца от приложенного напряжения; б) Зависимость скорости роста трещины от величины приложенного напряжения. 1-9 – номера испытанных серий

Представленные на рисунке 10 зависимости тангенса β и γ (углов наклона кривых $\text{Ln}(\tau^{\text{разр}}) - \sigma$ и $\text{Ln}(V_{\text{тр}}) - \sigma$, соответственно) от уровня старения стали имеют три стадии. На первой (до S_1) наиболее близко изображенные кривые могут быть представлены полиномами второй степени. Второй этап (от S_1 до S_2) характеризуется практически линейным изменением КРН повреждений при увеличении уровня старения. При превышении величины S_2 зависимости наиболее полно описываются полиномом второй степени с отличными от первой стадии коэффициентами. Предполагается, что трехстадийность зависимостей на рисунке 10 обусловлена структурными изменениями, препятствующими движению дислокаций внутри зерна и на границах в процессах развития трехмерного дефекта.

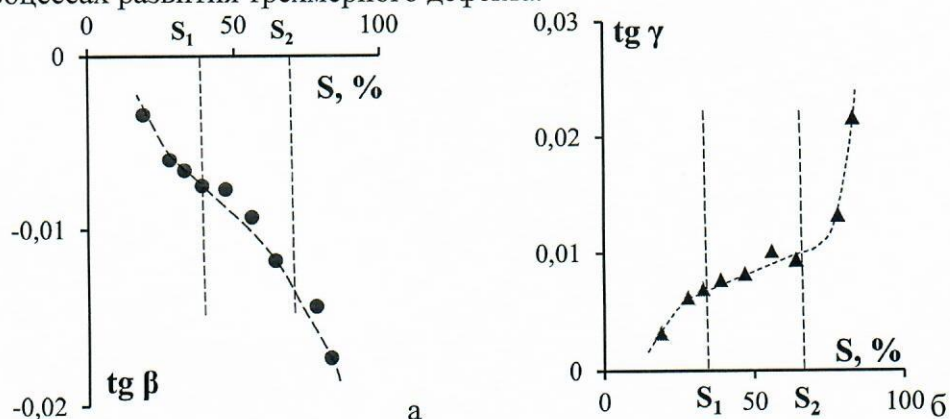
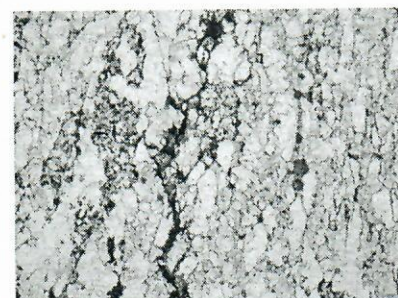


Рисунок 10. Зависимости тангенсов углов наклона кривых $\text{Ln}(\tau^{\text{разр}}) - \sigma$ (а) и $\text{Ln}(V_{\text{тр}}) - \sigma$ (б) от уровня старения стали

Исследования показали, что распространение трещин в выбранных сталях идёт по границам зерен (рисунок 11).



Серия 2



Серия 9

Рисунок 11. Распространение трещин КРН в сталях. $\times 500$

В п. 4.4 показано, что зависимости вихретокового параметра от длительности испытаний на КРН (рисунок 12) для разных эффективных напряжений имеют два характерных участка.

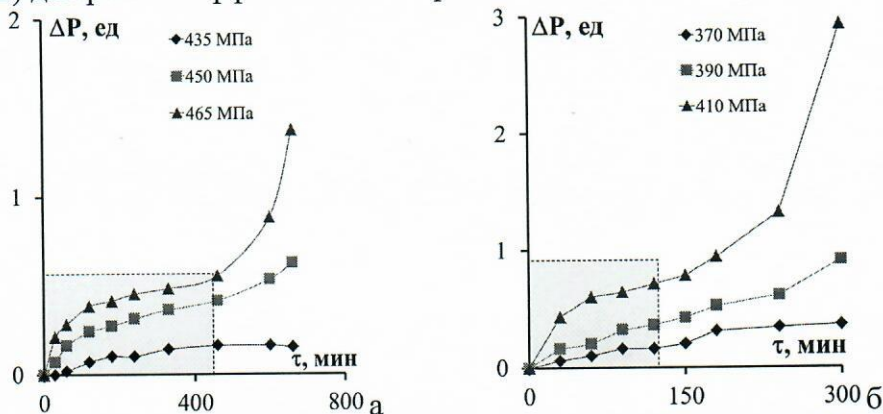


Рисунок 12. Зависимости ΔP от длительности КРН испытаний для серии 2 (а) и серии 9 (б)

На первом этапе кривая наиболее близко может быть описана полиномом второй степени по времени. Предполагается, что скорость разрушения на данной стадии определяется химическим составом поверхностного слоя исследованных образцов и скоростью диффузии кислорода к ним. Первый этап совпадает с окончанием инкубационного периода КРН. На втором участке происходит формирование и рост макротрещин, которые приводят к ускоренному изменению электромагнитных характеристик.

Вихретоковые измерения в режиме мониторинга позволяют выделить стадию разрушения, на которой находится материал.

Предложена теоретическая зависимость, позволяющая аппроксимировать экспериментальную кривую $\tau_{\text{инк}}(\sigma_0)$ с достоверностью порядка 90% (рисунок 13):

$$\tau_{\text{инк}} = \tau_{\text{инк}}^{\min} + k_1 \cdot (\sigma_0^{\text{эксн}} - \sigma_0^{\text{см}}) + k_2 / (\sigma_0^{\text{нор}} - \sigma_0^{\text{эксн}}), \quad (2)$$

где $\tau_{\text{инк}}^{\min}$ – минимальное время инкубационного периода КРН, мин; $\sigma_0^{\text{см}}$ – напряжение, соответствующее минимальному времени инкубационного периода КРН, МПа; $\sigma_0^{\text{нор}}$ – пороговое значение предела макроупругости, $\sigma_0^{\text{нор}} = 313$ МПа; k_1, k_2 – коэффициенты, ($k_1 = 1$ мин/МПа, $k_2 = 700$ мин·МПа); $\sigma_0^{\text{эксн}}$ – предел макроупругости, соответствующий определенному времени эксплуатации, МПа.

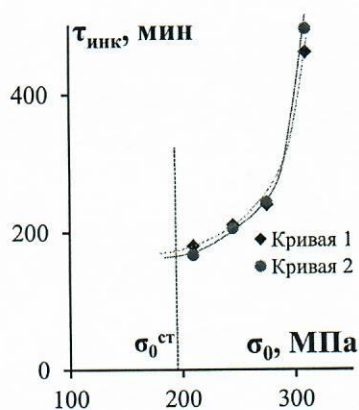


Рисунок 13. Зависимости времени окончания инкубационного периода КРН от величины предела макроупругости. Кривая 1 – экспериментальная зависимость; Кривая 2 – теоретическая

Для определения состояния металла с помощью вихретокового метода (рисунок 14) предлагается использовать следующий параметр:

$$\Pi_{mp} = \frac{\Delta P}{\Delta P^*}, \quad (3)$$

где ΔP – текущее значение вихретокового параметра; ΔP^* – значение вихретокового параметра, при котором зафиксировано образование трещин для данного уровня старения.

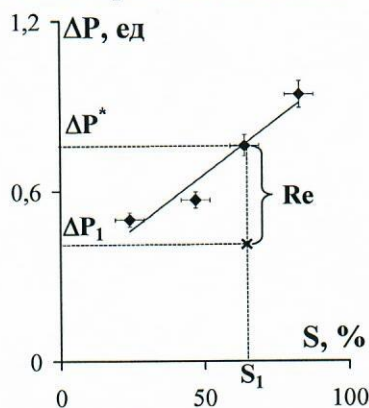


Рисунок 14. Зависимость ΔP от σ_0

При величине Π_{mp} от 0 до 0,5 (уровень ΔP_1 на рисунке 14) можно условно считать, что разрушение находится на ранних стадиях развития и сокращение ресурса (Re) вследствие коррозионного растрескивания под напряжением незначительно. В интервале значения Π_{mp} от 0,5 до 1 разрушение достигло инкубационной стадии.

Достижение параметром Π_{mp} значения порядка «1» свидетельствует о прохождении инкубационной стадии накопления микроповреждений и высокой вероятности образования множественных поверхностных трещин, а также выработки существенной части ресурса материала.

Выявлена зависимость между временем инкубационного периода КРН и вихретоковым параметром:

$$\tau_{инк} = \tau_{инк}^{min} - k_3 \cdot (\Delta P(\sigma_0) + 1) + k_4 / (\Delta P(\sigma_0) - 0.39), \quad (4)$$

где: $\tau_{инк}^{min}$ – минимальное время инкубационного периода КРН, мин; k_3 , k_4 – коэффициенты, ($k_3 = 30$ мин, $k_4 = 40$ мин); ΔP – вихретоковый параметр.

На рисунке 15 представлены зависимости экспериментального и рассчитанного согласно (4) времен окончания инкубационного периода КРН от предела макроупругости.

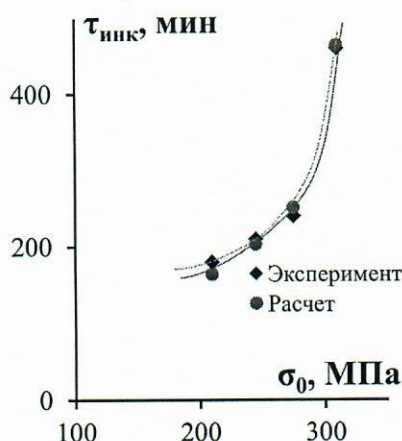


Рисунок 15. Зависимости экспериментального и рассчитанного времени окончания инкубационного периода КРН от предела макроупругости

Расчет времени инкубационного периода КРН, выполненный с помощью вихретокового параметра, с высокой точностью соответствует найденным в процессе исследований значениям. Погрешность расчетов не превысила 10%.

В п. 4.5 представлен метод определения поврежденности трубных сталей на ранних стадиях разрушения при коррозионном растрескивании под напряжением. Метод заключается в измерении и сравнении вихретоковых параметров, полученных при определении состояния материала фрагментов труб, эксплуатировавшихся различное время в близких условиях (имеющих различный уровень старения) и эталонов, соответствующих выбранной марке стали.

Первоначально проводится определение старения S материала трубы как результат сопоставления показаний вихретокового дефектоскопа в зонах с наименьшим повреждением с показаниями на эталонах. Затем сканируется интересующая область и рассчитывается вихретоковый параметр путём вычитания из полученной величины значения, зафиксированного в области наименьших повреждений. Далее, используя параметр поврежденности материала, рассчитанного согласно (3), определяется состояние металла, соответствующее незначительному сокращению ресурса вследствие коррозионного растрескивания под напряжением, прохождению инкубационной стадии накопления микроповреждений или достижению уровня с высокой вероятностью образования множественных макротрещин.

В область измерений не входит материал сварного шва и зона термического влияния.

В п. 4.6 приведен опыт внедрения разработанной технологии на действующих магистральных трубопроводах. Исследованы фрагменты двух действующих трубопроводов (Оханск-Киров, Горький-Казань). Определены их уровни старения и техническое состояние выбранных участков.

В Приложении представлены акты внедрения результатов диссертационной работы в учебную и практическую деятельность Инженерно-технического центра – филиала ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа литературных источников, теоретических и экспериментальных исследований изменений микроструктуры, релаксационных характеристик, стойкости к коррозионному растрескиванию под напряжением низколегированных трубных сталей выявлено влияние изменения структуры в процессе старения на КРН. Получена зависимость напряжения, обеспечивающего зарождение трещин на выбранной базе испытаний от уровня старения. Показано, что кривая имеет трехстадийный характер, связанный с выделением углерода из зерна и образованием разрозненных частиц структурно-свободного цементита на границах, увеличением объемной доли и размера выпавших частиц и образованием сплошного жесткого каркаса.

2. Показана возможность использования вихретокового метода при диагностике процессов накопления повреждений и разрушения при КРН на ранних стадиях разрушения. Выявлено, что «уход» углерода из объема зерна на границы и образование частиц структурно-свободного цементита приводит к увеличению относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости. При этом в процессе испытаний на КРН происходит накопление дефектов типа вакансий, дислокаций, образование и рост трещин, в результате чего также изменяются электромагнитные характеристики.

3. Разработан алгоритм оценки времени инкубационного периода и определения состояния материала, подверженного КРН. Предложена зависимость, связывающая длительность инкубационного периода КРН с данными вихретоковых измерений. Показано, что отклонение теоретических расчетов от экспериментальных зависимостей не превысило 10 %. Предложен параметр для определения состояния материала при КРН с помощью вихретокового метода, характеризующий незначительное сокращение ресурса металлического сплава,хождение инкубационной стадии накопления микроповреждений или выработки существенной части ресурса материала (высокой вероятности образования множественных макротрещин).

4. Разработан метод определения поврежденности трубных сталей на ранних стадиях разрушения при коррозионном растрескивании под напряжением с помощью вихретоковых измерений. Продемонстрирована возможность его использования в качестве метода входно-

го/выходного контроля металла труб. Исследование выведенных из эксплуатации и действующих фрагментов трубопроводов вихретоковым методом показали эффективность разработанных в диссертационной работе алгоритмов оценки состояния трубных сталей, подверженных коррозионному растрескиванию.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Использование разработанного метода исследований малоуглеродистых низколегированных сталей в процессе эксплуатации позволит снизить риски аварий, вызванных коррозионным растрескиванием под напряжением, газо-нефтегазотранспортной системы, что сократит материальные и финансовые потери, связанные с преждевременным выходом трубопровода из эксплуатации и устранением экологических последствий аварии.

Данный способ исследования может быть применен как в процессе входного контроля на предприятиях, эксплуатирующих трубопроводы, так и в процессе выходного контроля на заводах-изготовителях трубной продукции для установления уровня старения получаемой продукции и прогноза её поведения.

Дальнейшее развитие работы будет заключаться в расширении области применения разработанного метода и выбранных критериев оценки состояния материалов трубопроводов выполненных из сталей различных классов прочности (включая вновь разрабатываемые), что обеспечит более точные оценки эксплуатационной надежности трубопроводов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, Министерства науки и высшего образования РФ по направлению 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов:

1. **Бутусова, Е.Н.** Исследование влияния старения на зарождение трещин коррозионного растрескивания под напряжением малоуглеродистых сталей / Е.Н. Бутусова, В.В. Мишакин // Вопросы материаловедения. – 2019. – №2(98). – С. 102-109.

2. **Butusova, Ye.N.** On monitoring the incubation stage of stress corrosion cracking in steel by the eddy current method / Ye.N. Butusova, V.V. Mishakin, M. Kachanov // International Journal of Engineering Science. - 2020. - Vol. 148. - Article 103212. (Q1 – <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2019.103212>).

3. **Бутусова, Е.Н.** Оценка ранних стадий разрушения при коррозионном растрескивании под напряжением трубных сталей вихретоковым методом / Е.Н. Бутусова, В.В. Мишакин // Вопросы материаловедения. – 2020. – №1(101). – С. 154-160.

Основные научные статьи, опубликованные в других изданиях:

4. **Бутусова, Е.Н.** Исследование зарождения и распространения коррозионно-усталостных трещин в малоуглеродистых низколегированных сталях / Е.Н. Бутусова, В.Н. Чувильдеев, А.В. Нохрин // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013.- Т. 18. -№ 4-2.- С. 1572-1573.

5. **Бутусова, Е.Н.** Исследования процесса зарождения трещин коррозионной усталости в малоуглеродистых трубных сталях / Е.Н. Бутусова, А.В. Нохрин, В.Н. Чувильдеев, Д.Н. Котков [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 5-2. – С. 181-185.

6. **Болдин, М.С.** Исследование процесса зарождения трещин коррозионного растрескивания под напряжением в малоуглеродистых низколегированных сталях /М.С. Болдин, А.В. Нохрин, В.Н. Чувильдеев, М.К. Чегуров, **Е.Н. Бутусова** [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – №5-2. – С. 186-189.

7. **Бутусова, Е.Н.** Исследование коррозионного растрескивания под напряжением малоуглеродистых низколегированных сталей вихретоковым методом / Е.Н. Бутусова, В.В. Мишакин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – №3. – С. 52-58.

8. **Бутусова, Е.Н.** Определение времени инкубационного периода коррозионного растрескивания под напряжением малоуглеродистых низколегированных сталей вихретоковым методом / Е.Н. Бутусова, В.В. Мишакин // Вестник научно-технического развития. – 2019. – №8(144). – С. 20-27.

9. **Бутусова, Е.Н.** Исследование механизмов зарождения и распространения трещин коррозионного растрескивания под напряжением в малоуглеродистых низколегированных сталях / Бутусова Е.Н., Болдин М.С., Чегуров М.К., Лопатин Ю.Г. [и др.] // Сборник тезисов докладов «XIX Петербургских чтений по проблемам прочности, посвященные 130-летию со дня рождения академика АН УССР Н.Н. Давиденкова» Санкт-Петербург, 2010. – С. 62-63.

10. **Бутусова, Е.Н.** Влияние структуры на зарождение и рост трещин коррозионного растрескивания под напряжением в малоуглеродистых низколегированных сталях / Е.Н. Бутусова, М.С. Болдин, М.К. Чегуров, Н.А. Козлова [и др.] // Сборник тезисов докладов V-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур ПРОСТ-2010», Москва, 2010. – С. 138-139.

11. **Бутусова, Е.Н.** Исследование зарождения трещин коррозионного растрескивания под напряжением в малоуглеродистых трубных сталях / Е.Н. Бутусова, М.К. Чегуров, А.В. Нохрин, В.Н. Чувильдеев // Сборник трудов «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», Минск, Беларусь, ФТИ НАН, 2011. – Т.1. – С. 251-256.

12. **Бутусова, Е.Н.** Модель зарождения трещин коррозионного растрескивания под напряжением в малоуглеродистых трубных сталях / Е.Н. Бутусова, Н.Н. Вирясова, А.В. Нохрин, В.Н. Чувильдеев // Сборник тезисов «LII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», Уфа. 2012. – С. 52-53.

13. **Бутусова, Е.Н.** Влияние старения на стресс-коррозионную стойкость трубных сталей / Е.Н. Бутусова, М.С. Болдин, Н.А. Козлова, Д.Н. Котков [и др.] // Сборник тезисов «54-ой Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», Екатеринбург, 2013. – С. 111.

14. **Бутусова, Е.Н.** Исследование влияния структурного состояния границ зерен на коррозионную стойкость ультрамелкозернистых металлов / Е.Н. Бутусова, М.К. Чегуров, Н.А. Козлова, В.Н. Чувильдеев [и др.] // Сборник тезисов «Открытой школы-конференции стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы-2014», Уфа, 2014. – С. 112.

15. **Бутусова, Е.Н.** Экспериментальные и теоретические исследования процесса зарождения коррозионно-механических трещин в малоуглеродистых трубных сталях / Е.Н. Бутусова, А.В. Нохрин, В.Н. Чувильдеев, М.К. Чегуров [и др.] // Сборник тезисов «Научных чтений им. И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов», Москва, 2014. – С. 67.

16. **Бутусова, Е.Н.** Исследование влияния естественного старения на зарождение стресс-коррозионных трещин / Е.Н. Бутусова, Д.Н. Котков, А.В. Нохрин, В.Н. Чувильдеев // Сборник тезисов докладов «21-ой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-21», Екатеринбург, 2015. – С. 121-122.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежат:

В работах 1-3, 7-8 – результаты коррозионно-механических и вихретоковых исследований, аналитические и графические зависимости на основе разработанных алгоритмов. Метод определения поврежденности материала на ранних стадиях разрушения на основе вихретоковых измерений.

В работах 6 – частично результаты экспериментальных исследований; 4-5, 9-16 – результаты коррозионно-механических исследований, аналитические и графические зависимости на основе выбранных моделей, позволяющих описывать механизмы разрушения.