

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 31.1.007.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИТАРНОГО
ПРЕДПРИЯТИЯ «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ИМ. И.П. БАРДИНА»,
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 04 июня 2025 года № 3/25

О присуждении Ливановой Надежде Олеговне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Закономерности замедленного хрупкого разрушения высокоуглеродистого закаленного мартенсита в рельсовой и колесной стали» по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов принята к защите 31 марта 2025 года (протокол заседания № 2/25) диссертационным советом 31.1.007.01, созданным на базе федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», Министерство промышленности и торговли Российской Федерации, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2, приказ о создании диссертационного совета № 673/нк от 18 ноября 2020 года.

Соискатель Ливанова Надежда Олеговна, «09» декабря 1987 года рождения.

В 2011 году соискатель окончила государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана». Удостоверение №4/2015 о сдаче кандидатских экзаменов выдано федеральным государственным

унитарным предприятием «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» в 2015 году.

Работает научным сотрудником в лаборатории сталей и сплавов для транспорта Научного центра высококачественных сталей федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Диссертация выполнена в Научном центре высококачественных сталей федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, Филиппов Георгий Анатольевич, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», Научный центр высококачественных сталей, директор.

Официальные оппоненты:

Кудря Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра металловедения и физики прочности, профессор,

Борц Алексей Игоревич, кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «ЕВРАЗ ТОРГОВАЯ КОМПАНИЯ», департамент по развитию рельсового проката Дирекции по продажам и развитию рельсовой продукции, директор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», г. Москва в своем положительном отзыве, подписанном Шуром Евгением Авелевичем, доктором технических наук, профессором, научным консультантом, утвержденном Суховым Алексеем Владимировичем, кандидатом технических наук,

заместителем генерального директора по вопросам путевой инфраструктуры, вагонного хозяйства и материаловедения, указала, что диссертация является научно-квалификационной работой, посвященной исследованию особенностей физической природы замедленного хрупкого разрушения (ЗХР) высокоуглеродистой рельсовой и колесной стали со структурой мартенсита. На основании лабораторных и натурных испытаний, в которых автор принимала непосредственное участие, установлены особенности замедленного хрупкого разрушения высокоуглеродистой стали и определены причины образования участков мартенсита в дифференцированно-закаленных рельсах. Это позволило автору разработать способы предотвращения их формирования.

Эти результаты соответствуют требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», а её автор заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

В соответствии с п. 10 «Положения о присуждении ученых степеней» диссертация, написана самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

В соответствии с п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней» в диссертации имеются ссылки на других авторов, источники заимствования материалов или отдельных результатов, а также на научные работы, выполненные ею самостоятельно или в соавторстве.

Соискатель имеет 44 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 19 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 10 работ. Научные публикации посвящены изучению особенностей макро- и микроструктуры высокоуглеродистых рельсовых и колесных сталей, выявлению закономерностей влияния структурного состояния на уровень остаточных микронапряжений и склонность к замедленному хрупкому разрушению высокоуглеродистых сталей, определению причин образования мартенситно-бейнитной неоднородности в дифференцированно закаленных

рельсах и разработке способов предотвращения ее формирования в контролируемой области железнодорожного рельса. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах. Общий объем опубликованных статей, в которых отражены основные положения диссертации, составляет 13,7 п.л., а авторский вклад – 4,4 п.л.

Наиболее значимые работы:

1. Баева Л.А., **Ливанова Н.О.**, Филиппов Г.А. Остаточные микронапряжения и склонность к замедленному хрупкому разрушению высокоуглеродистой стали // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2018. № 4. С. 60-65. (0,75 п.л./0,25 п.л.).

2. Гетманова М.Е., Ливанова О.В., **Ливанова Н.О.**, Никулин А.Н., Филиппов Г.А. Повышение эффективности деформационной проработки металла непрерывнолитой заготовки при производстве железнодорожных колес // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2019. № 3. С. 37-47. (1,38 п.л./0,28 п.л.).

3. Баева Л.А., Волков К.В., Вылежнев В.П., **Ливанова Н.О.**, Филиппов Г.А. Влияние структурного состояния на склонность к замедленному хрупкому разрушению высокоуглеродистой рельсовой стали // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2020. № 1. С. 27-32. (0,75 п.л./0,2 п.л.).

4. Гриншпон А.С., Зикеев В.Н., **Ливанова Н.О.**, Седышев А.И., Филиппов Г.А. Оценка влияния закалочных структур на сопротивление разрушению колесной стали и разработка режимов охлаждения, исключаящих их образование в ободке колеса // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2020. № 2. С. 57-65. (1,13 п.л./0,23 п.л.).

5. Баева Л.А., Волков К.В., Вылежнев В.П., **Ливанова Н.О.**, Нарусова Е.Ю., Филиппов Г.А. Влияние нагружения в упругой области на структурное состояние и склонность к замедленному разрушению высокоуглеродистой закаленной стали // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2020. № 4. С. 80-85. (0,75 п.л./0,23 п.л.).

6. **Ливанова Н.О.**, Каскин Б.К., Куклев А.В., Нарусова Е.Ю., Филиппов Г.А. Особенности структурного состояния металла шейки дифференцированно закаленных рельсов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2021. № 4. С. 54-62. (1,13 п.л./0,35 п.л.).

7. Гетманова М.Е., Илюхин Д.С., Ливанова О.В., **Ливанова Н.О.**, Филиппов Г.А. Формирование структурного состояния высокоуглеродистой колесной стали, устойчивой к образованию дефектов тормозного происхождения // Проблемы черной металлургии и материаловедения, №1, 2021, С. 53-62. (1,25 п.л./0,2 п.л.).

8. Филиппов Г.А., Вылежнев В.П., Баева Л.А., Буржанов А.А., **Ливанова Н.О.** О механизме разрушения рельса Р65 низкотемпературной надежности после длительной эксплуатации // Проблемы черной металлургии и материаловедения, №1, 2021, С. 39-48. (1,25 п.л./0,25 п.л.).

9. Каскин Б.К., Куклев А.В., **Ливанова Н.О.**, Нарусова Е.Ю., Филиппов Г.А. Влияние химического состава и технологии производства на структурную неоднородность рельсов из стали Э76Ф // Сталь. 2022. № 6. С. 33-37. (0,63 п.л./0,12 п.л.).

10. Филиппов Г.А., **Ливанова Н.О.** Актуальные вопросы улучшения качества и свойств рельсовой стали// Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2024. №4. С.96-107. (1,38 п.л./0,69 п.л.).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: 14 положительных, из них 14 содержат замечания и пожелания. Во всех отзывах отмечено, что диссертационная работа посвящена актуальной теме ЗХР в высокоуглеродистой рельсовой и колесной стали, а также решению проблемы предотвращения образования мартенситно-бейнитных неоднородностей при производстве дифференцированно-закаленных рельсов. Повышение комплекса механических и иных служебных свойств материалов за счет оптимизации их структуры является важнейшей задачей современного материаловедения. Отмечается, что несмотря на значительное количество опубликованных работ, посвященных проблеме замедленного хрупкого разрушения низко- и среднеуглеродистых сталей явление замедленного хрупкого разрушения высокоуглеродистых сталей мало изучено.

Работа Н.О. Ливановой направлена на исследование особенностей механизма ЗХР закаленного высокоуглеродистого мартенсита и определение условий его развития в рельсовой стали, а также на разработку рекомендаций по совершенствованию сквозной технологии производства рельсов из непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) для повышения однородности структуры и снижения отбраковки железнодорожных рельсов по мартенситно-бейнитной неоднородности. В этой связи постановка настоящей работы вполне обоснована.

Отмечается, что для решения поставленной задачи автором проведен большой цикл структурно-фазовых исследований, включая оценку микронапряженного состояния в широком интервале температур отпуска, как на стандартных образцах колесной и рельсовой стали, так и на опытно-промышленных плавках рельсовой стали марки Э76Ф. Полученные результаты позволили установить физическую природу порогового напряжения при ЗХР высокоуглеродистой стали, оценить влияние остаточных микронапряжений на склонность высокоуглеродистого мартенсита к замедленному хрупкому разрушению и обоснованно предложить комплекс производственных мероприятий для минимизации отбраковки по структуре и повышения эксплуатационной надежности изделий железнодорожной отрасли.

Среди результатов, имеющих несомненную научную новизну, отмечаются: проведенный автором анализ ЗХР образцов при изгибе, позволивший изучить влияние структурного состояния и уровня остаточных микронапряжений на трещиностойкость исследуемых сталей в различных участках рельса. Так, впервые выявлена связь между уровнем локальных остаточных напряжений, определяемых по оригинальной методике рентгенографического анализа, и склонностью к ЗХР высокоуглеродистой стали в закаленном состоянии.

Основные научные положения, выводы и рекомендации работы представляются обоснованными и не подлежащими сомнениям.

В отзывах отмечается высокая практическая значимость диссертационной работы Н.О. Ливановой. Автором скорректирована технология производственного цикла «исходная заготовка-готовая продукция» и увеличения

выхода годного при производстве дифференцированно-закаленных рельсов. Внедренные рекомендации позволили уменьшить долю отбраковки продукции по структурному критерию. С учетом технологических рекомендаций изготовлены 193 партии рельсов (28 тыс. т) в условиях ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод» (ТОО «АРБЗ») из НЛЗ производства АО «Оскольский электрометаллургический комбинат им. А.А. Угарова» (АО «ОЭМК»), показавшие отсутствие отбраковки продукции по мартенситно-бейнитным дефектам.

Замечания, приведенные в отзывах:

1. **Громов Виктор Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля ФГБОУ ВО «СибГИУ», **Невский Сергей Андреевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля ФГБОУ ВО «СибГИУ»:

а) из текста автореферата не ясно, были ли проведен контроль остаточных напряжений в шейке отбракованных рельсов по ГОСТ 51685 п. 5.11;

б) в работе не описаны риски наличия закаленного мартенсита в отдельных элементах железнодорожного колеса.

2. **Платов Сергей Иосифович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Института металлургии, машиностроения и материалобработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»:

следует отметить, что представляло бы интерес дополнить приводимые автором данные статистикой разрушения железнодорожных колес и рельсов по причине наличия закаленного мартенсита в элементах готовых изделий. Из текста автореферата не ясно, является ли наличие подобных дефектов в шейке рельса критическим.

3. **Клевцов Геннадий Всеволодович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет»:

а) не очень понятно, почему при исследовании рельсовых и колесных сталей выбраны методы статических испытаний? Ведь изделия из этих сталей в процессе эксплуатации испытывают циклические нагрузки. Необходимо обоснование;

б) вопрос по рисунку 7 автореферата «Влияние упругого нагружения на ширину рентгеновских дифракционных линий ...». Непонятно, какие факторы приводят к уменьшению ширины рентгеновских дифракционных линий при невысоких напряжениях (ниже σ/σ_p), если, как указывает автор, сталь находится в упругой области (до начала микропластической деформации)? Требуется указать эти факторы;

в) размерность механических характеристик сталей, приведенных в автореферате, не соответствует системе СИ.

4. Маркелов Владимир Андреевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара»:

кинетика замедленного разрушения металлов на стадии стабильного роста трещины обычно имеет скачкообразный характер. При этом, величина скачка контролируется структурным элементом, наблюдаемым в изломе. В автореферате о кинетике такого роста стабильной трещины информация отсутствует.

5. Крылова Светлана Евгеньевна, доктор технических наук, профессор научно-образовательного центра новых материалов и перспективных технологий ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»:

а) представленная фотография излома на участке межзеренного разрушения, (рисунок 2 а) по качеству снимка не позволяет четко идентифицировать излом. На фото присутствует некая «верхняя граница», «затертости», включения, характер которых не ясен. С какой части образца

зафиксирован данный излом? Подтверждаются ли подобные признаки разрушения у более высокоуглеродистой стали Э76Ф;

б) из текста автореферата не ясно, какие конкретно были выдвинуты рекомендации к повышению температуры самоотпуска при охлаждении шейки рельса в потоке прокатного стана. За счет каких мероприятий и до какого предела удалось превысить смоделированную критическую температуру самоотпуска в $220 \pm 10^\circ\text{C}$?

6. Кулешова Евгения Анатольевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории аналитических методов исследования материалов и перспективных технологий отделения реакторных материалов и технологий Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий:

а) требуется уточнение выданных технологических рекомендаций, т.к. из текста автореферата невозможно понять, как именно были скорректированы существующие режимы;

б) из текста автореферата не ясно, были ли проведены испытания металла произведенных после выдачи рекомендаций железнодорожных рельсов на контактную усталость. Проводился ли расчет долговечности рельсов, лимитируемой контактной усталостью?

7. Фарбер Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Термообработки и физики металлов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
Хотинов Владислав Альфредович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Термообработки и физики металлов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»:

а) из приведенных в автореферате данных не совсем понятен физический смысл термина «напряжение общей текучести $\sigma_{0.2}$ » и методика его определения;

б) сравнение кривых «нагрузка P – время t », приведенных на рис. 1, невозможно: координатные оси не имеют числовых значений, характерные точки (стадии) не указаны, не выделены работа зарождения A_z и распространения A_p трещины;

в) не вполне корректен смысл фразы, что «...сумма главных остаточных напряжений зависит в большей степени от структурного состояния, чем от содержания углерода» (стр. 12). В первую очередь, содержание углерода определяет структурное состояние и уровень механических свойств стали;

г) в тексте автореферата не описана характеристика, обозначенная на рис. 4 символом B [мрад]. Кроме того, на рис. 4, видимо, перепутаны обозначения кривых $\sigma_{ост} = f(t_{отп})$ и $B = f(t_{отп})$, поскольку если это не так, тогда уровень остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ при температуре отпуска 500°C превышает 400 Н/мм^2 . В тексте же утверждается, что он близок к $\sigma_{ост}$ колесной стали.

8. Людмила Рафаиловна Ботвина, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН:

в автореферате недостаточно полно отражены результаты фрактографических исследований изломов образцов исследованных сталей на разных стадиях и при различных условиях развития замедленного хрупкого разрушения.

9. Мерсон Дмитрий Львович, доктор физико-математических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института Прогрессивных технологий, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»:

как известно, одной из причин возникновения явления замедленного хрупкого разрушения является пагубное влияние диффузионно-подвижного водорода, однако автор изначально эту версию отбрасывает, какие для этого были основания?

10. Саврухин Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»:

а) работа включает результаты обобщения и анализа большого объема комплексных экспериментальных исследований, которые имеют, безусловно, большое значение для развития научных знаний в области термической обработки

высокоуглеродистых рельсовой и колесной сталей, а также практическое значение для повышения качества, надежности и долговечности рельсовой и колесной продукции. Выводы по результатам ряда исследований привязаны к процентному содержанию углерода. В то же время, представляет интерес результаты аналогичных исследований при изменении не только процентного содержания углерода, но и сочетания процентного содержания таких элементов как углерод, марганец и кремний;

б) безусловный интерес представляют результаты оценки влияния температуры отпуска закаленных высокоуглеродистых сталей на склонность к замедленному хрупкому разрушению, полученные на основе проведенных экспериментальных исследований. Для расширения спектра исследований в области влияния химического состава стали, параметров закалки и температуры отпуска целесообразно сочетание экспериментальных исследований с процессами компьютерного моделирования на основе уникального методологического и программного обеспечения. Результаты, представленные в работе соискателем, носят научно обоснованный характер и могут быть рекомендованы для использования в рамках развития уже существующего методологического и программного обеспечения.

11. Мотовилина Галина Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник «Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов «Прометей» им. И.В. Горынина»,
Яковлева Екатерина Александровна, кандидат технических наук, начальник сектора «Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов «Прометей» им. И.В. Горынина»:

а) в практической значимости на стр. 6 упомянуто отсутствие отбраковки по «мартенситно-бейнитным дефектам», расшифровка понятия «мартенситно-бейнитный дефект» не дана, а в нормативно-технической документации такое понятие отсутствует;

б) из приведенных автором на рисунке 4 зависимостей не ясно, какие значения $\sigma_{ост}$, $V(211)$ и $\Delta a/a$ относятся к «реальным колесам повышенной твердости», а какие - к закаленным и отпущенным;

в) в тексте автореферата не приводится температура мартенситного превращения металла шейки рельса в области, имеющей химическую и структурную неоднородность, что затрудняет оценку степени прохождения процессов самоотпуска;

г) из представленных на рисунке 10 изображений нельзя понять, где расположения трещина с «выделениями вторичного цементита»;

д) на изображении 3, рисунок 16, представлена типичная междендритная трещина, наследуемая из литой структуры, которая не может быть однозначно классифицирована, как трещина ЗХР;

е) на рисунке 18 (стр. 22) представлены изображения мартенситно-бейнитных неоднородностей, выявленные в разных частях рельса, без каких-либо видимых микротрещин, упомянутых в тексте;

ж) в Заключение автореферата автор делает вывод о рекомендациях по улучшению технологии производства рельсов для линии рельсобалочного стана 950/800, значит ли это, что технология производства колёс не требует корректировки.

12. Маркова Галина Викторовна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Машиностроение и материаловедение» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»:

а) в автореферате не указаны погрешности определения остаточных микронапряжений (рис.4), твердости (рис. 17) и механических свойств (табл. 2);

б) поскольку структурную неоднородность автор справедливо связывает с химической неоднородностью, было бы целесообразно привести данные картирования распределения основных элементов в областях с дефектной структурой.

13. Чуканов Александр Николаевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры технологии и сервиса ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»:

а) в автореферате не приведены сведения о зарубежных исследованиях по тематике работы и их авторах;

б) желательно раскрыть используемые автором термины «физическое моделирование» (лабораторный эксперимент?) и «структурное состояние» (совокупность устойчивых связей структурных элементов? тип структуры?);

в) как практически реализуются рекомендуемые автором в оптимальной технологии сужения «пределов содержания углерода и марганца в готовой стали» и «интервала температуры стали в промковше»;

г) считаю, что целесообразнее использовать термин «мартенсит закалки».

14. Свирид Алексей Эдуардович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, руководитель сектора полифункциональных сплавов и интерметаллидов лаборатории цветных сплавов Института физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук:

а) в тексте автореферата не приведены значения давления на верхнем блоке сопел в установке ДЗР при охлаждении исследуемых рельсов типа Р65. В связи с этим не ясно, почему при закалке в ДЗР сформировались локальные участки мартенситно-бейнитной неоднородности как в головке, так и в шейке рельса (см. рисунок 18). Проводились ли дополнительные исследования микроструктуры методом просвечивающей электронной микроскопии для выявления мартенсита или бейнита в исследуемом рельсе?;

б) в разделе «Научная новизна» в п.5 автореферата автор указывает на метод физического моделирования по определению температуры самоотпуска шейки рельса. В описании 4-ой главы в тексте автореферата указаны лишь методы металлографического и рентгеноструктурного анализа. При этом, приведен график зависимости влияния температуры самоотпуска на твердость шейки рельса. Отсюда возникает вопрос: согласуются ли результаты эксперимента с данными физической модели?

Заключение по отзывам:

1. Раскрыты металлургические особенности природы замедленного хрупкого разрушения высокоуглеродистой стали. Проведенные в лабораторных условиях эксперименты позволили установить влияние температуры отпуска на уровень остаточных микронапряжений и склонность к замедленному хрупкому разрушению высокоуглеродистых колесной и рельсовой стали, а также смоделировать температуру самоотпуска металла шейки дифференциально-закаленного в потоке стана рельса, которая составляет 220 ± 10 °С. Показано, что для высокоуглеродистой закаленной стали отпуск при этой температуре не устраняет склонность к ЗХР.

2. Успешно решены научные и прикладные задачи. Результаты имеют важное значение для теоретического и прикладного металлостроения и могут быть использованы на практике при анализе случаев разрушения не только железнодорожных рельсов и колес, но и других металлических конструкций.

3. Достоинством работы является комплексный и методически обоснованный подход к решению поставленных задач; значительный объем металлографических исследований; применение сканирующей электронной микроскопии; изучение структурного состояния методом рентгеноструктурного анализа; проведение испытаний на склонность к замедленному хрупкому разрушению с построением скоростной зависимости.

4. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных физических методов изучения структурного состояния стали, стандартных механических и специальных свойств.

5. Основные положения и результаты работы достаточно полно освещены в публикациях и обсуждены на профильных конференциях, в том числе на международных. Автореферат хорошо оформлен, написан грамотным техническим языком, основные положения исследований подкреплены иллюстративным материалом.

6. Во всех отзывах отмечается, что диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.6.1 Металлостроение и термическая обработка металлов

и сплавов и критериям, предъявляемым ВАК, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- **Кудря Александр Викторович** - ведущий специалист в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов, физики прочности, пластичности и разрушения сталей;

- **Борц Алексей Игоревич** - ведущий специалист в области металловедения, технологического процесса производства современных железнодорожных рельсов, механики разрушения рельсовых сталей;

- **Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»** - профильная научно-исследовательская организация по разработке технологий в области железнодорожного транспорта, также на его базе действует Ученый совет, включающий секцию «Материаловедение».

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана научная концепция феноменологии явления замедленного хрупкого разрушения высокоуглеродистого закаленного мартенсита,

предложен подход к ранжированию стадий разрушения закаленной высокоуглеродистой стали, заключающийся в том, что в отличие от низко- и среднеуглеродистого мартенсита, в которых замедленное разрушение развивается в три стадии, при замедленном разрушении высокоуглеродистой закаленной стали практически отсутствует («вырождается») стадия стабильного роста трещины, что является следствием малой величины критической длины трещины, вызывающей ее неконтролируемое распространение, т.е. низкого значения вязкости разрушения,

доказано наличие связей между склонностью к ЗХР, оцениваемой по величине снижения работы разрушения при снижении скорости нагружения и уровня локальных остаточных микронапряжений, и микроискажений кристаллической

решетки ($\Delta a/a$) в высокоуглеродистой закаленной стали – чем ниже уровень остаточных микронапряжений, тем выше сопротивление ЗХР, что подтверждает их ведущую роль в механизме явления ЗХР,

введены рекомендации по повышению температуры самоотпуска при охлаждении шейки рельса в потоке прокатного стана в ТОО «АРБЗ» с целью повышения трещиностойкости в случае образования закалочных структур в неконтролируемой области рельса.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана немонотонная зависимость уровня остаточных микроискажений ($\Delta a/a$) кристаллической решетки от величины приложенного упругого напряжения в закаленном высокоуглеродистом мартенсите: при увеличении напряжений сначала их снижение, а затем возрастание. Показано, что минимум на немонотонной зависимости микроискажений $\Delta a/a$ от упругого напряжения близок по величине к пороговому напряжению при ЗХР, т.е. напряжению нагружения, ниже которого оно не наблюдается, что подтверждает физическую природу порогового напряжения, как напряжения, при котором изменяется механизм релаксационных процессов под влиянием внешнего напряжения – при низких напряжениях их релаксация, а при высоких - их возрастание, вызывающее зарождение трещины,

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы методика ускоренных испытаний на ЗХР при низкой скорости деформации в условиях сосредоточенного изгиба, фрактографический анализ, рентгеноструктурный анализ, световая и электронная микроскопия,

изложены новые положения о том, что в отличие от низко- и среднеуглеродистых сталей, для которых низкотемпературный отпуск полностью устраняет склонность к ЗХР, для высокоуглеродистого мартенсита после отпуска до 200 °С склонность к этому виду разрушения сохраняется, хотя остается в существенно меньшей степени, чем в свежезакаленном состоянии,

раскрыты закономерности влияния температуры отпуска на уровень остаточных микронапряжений и склонность к замедленному хрупкому разрушению высокоуглеродистых колесной и рельсовой стали,

изучена природа замедленного хрупкого разрушения закаленного высокоуглеродистого мартенсита и определены условия его развития в рельсовой стали. Показано, что для высокоуглеродистой закаленной стали отпуск при 200 °С не устраняет склонность к ЗХР, что является следствием неполной релаксации остаточных микронапряжений по сравнению с нагревом при более высоких температурах,

проведена модернизация существующей сквозной технологии производства железнодорожных рельсов в ТОО «АРБЗ» из непрерывнолитой заготовки в АО «ОЭМК», позволившая снизить отбраковку по дефекту мартенситно-бейнитной неоднородности.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены рекомендации по совершенствованию сквозной технологии производства НЛЗ и рельсов, обеспечивающие повышение однородности химического состава НЛЗ и снижение отбраковки рельсов по дефектам мартенситно-бейнитной неоднородности, внесены соответствующие изменения в технологическую документацию на производство и поставку рельсов. Общий объем продукции, произведенной с использованием результатов диссертационной работы, составил 193 партии рельсов (28 тыс. т.) в условиях ТОО «АРБЗ» из НЛЗ производства АО «ОЭМК», показавшие отсутствие отбраковки продукции по мартенситно-бейнитным дефектам,

определены причины повышенной отбраковки дифференцированно-закаленных рельсов, выявлены основные дефекты НЛЗ, наследуемые при прокатке и термической обработке рельсов – неоднородности химического состава и структуры и несплошности типа трещин,

создана система практических рекомендаций, направленных на предотвращение образования мартенситно-бейнитных неоднородностей в дифференцированно-закаленных рельсах в контролируемой области,

представлена оптимальная технология производства НЛЗ сечением 300×360 мм из рельсовой стали марки Э76Ф в ЭСПЦ АО «ОЭМК», включающая следующие основные положения:

- уменьшенные пределы содержания углерода и марганца в готовой стали;
- уменьшенный интервал температуры стали в промковше;
- оптимальное значение скорости вытягивания заготовок 0,5 м/мин с корректировкой ее в зависимости от температуры разливки.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ применялись современные методы исследования микроструктуры, механических свойств и склонности к замедленному хрупкому разрушению стали, исследования проводились на современном сертифицированном оборудовании,

теория исследования построена на основных положениях современного металловедения. Основным научным подходом в работе является установление связей между структурным состоянием, уровнем остаточных микронапряжений и склонностью к замедленному хрупкому разрушению высокоуглеродистой рельсовой и колесной стали,

идея базируются на анализе и обобщении собственных экспериментальных данных, опубликованных данных в области структуры и свойств высокоуглеродистой рельсовой и колесной стали и согласуются с основными положениями металловедения, а также подтверждаются результатами успешной реализации технологических решений в промышленных условиях,

использованы методы статистической обработки результатов и современное лицензионное программное обеспечение, большой объем экспериментальных работ, сопоставление полученных результатов с опубликованными данными, комплекс современных методов исследования микроструктуры металла с использованием сканирующей электронной микроскопии, исследование

поверхности излома образцов, рентгеноструктурный анализ, а также анализ механических свойств металла, в том числе с записью кривых замедленного хрупкого разрушения,

установлено совпадение результатов исследования, полученных в работе с известными из литературы, результатов лабораторных и промышленных экспериментов и испытаний, показана воспроизводимость и непротиворечивость результатов,

использованы методология и методы исследования, применяемые в металловедении, в частности, комплекс современных методов исследования структуры металла с использованием световой и сканирующей микроскопий, исследования поверхностей разрушения образцов, рентгеноструктурного анализа, а также механических свойств металла.

Личный вклад соискателя состоит в проведении анализа мировой научной литературы, постановке цели и определении задач данной работы, выборе направлений и методов получения экспериментальных данных, анализе и обобщении результатов, а также в том, что основные научные положения и результаты диссертационной работы базируются на исследованиях и результатах экспериментов, проведенных лично или с участием автора.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: о дополнительном влиянии напряжений 1-ого рода на склонность к ЗХР готовых изделий из высокоуглеродистой стали; об отсутствии сведений о времени самоотпуска в шейке рельса; о необходимости учета влияния плазменной обработки обода железнодорожного колеса на склонность к ЗХР; о важности подтверждения полученных результатов методом силовой микроскопии; о сопоставлении экспериментальных данных плотности дислокаций при мартенситном превращении с выполненными расчетами; о значимости анализа механизмов, протекающих на границах зерен, при вырождении стадии стабильного роста трещины.

Соискатель Ливанова Н.О. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию: о влиянии напряжений 1-ого

рода на склонность к ЗХР готовых изделий из высокоуглеродистой стали; о процессе самоотпуска в шейке рельса; о технологии плазменного упрочнения железнодорожных колес; о методиках, примененных в работе для оценки закаленной высокоуглеродистой стали к ЗХР; о влиянии явления ЗХР на свойства колесной высокоуглеродистой стали; о сужении предельного содержания углерода и марганца при производстве непрерывнолитой заготовки из рельсовой стали Э76Ф; о легирующих и примесных элементах в колесной и рельсовой стали; о построении скоростной зависимости при испытаниях на ЗХР при уменьшении скорости деформации; о влиянии напряжений 1-ого рода на эксплуатационную стойкость железнодорожного рельса; о методике определения периода кристаллической решетки; о влиянии легирующих элементов на период кристаллической решетки; о способах снижения образования мартенситно-бейнитной неоднородности в шейке рельса в условиях металлургического комбината; о прокаливаемости высокоуглеродистой стали; о влиянии соединений алюминия на микроструктуру и эксплуатационную стойкость железнодорожных колес и рельсов; о влиянии закалочной среды на отбраковку по мартенситно-бейнитной неоднородности; об особенностях текущей технологии производства непрерывнолитой заготовки на АО «ОЭМК»; о возможности выявления дефекта мартенситно-бейнитной неоднородности неразрушающим контролем; о вырождении стадии стабильного роста трещины при ЗХР высокоуглеродистых сталей; о природе мартенситно-бейнитной неоднородности в головке и шейке рельса; о механизме межзеренного хрупкого разрушения в изломе по месту мартенситно-бейнитной неоднородности; о статистике отбраковки по дефекту мартенситно-бейнитной неоднородности в условиях ТОО «АРБЗ».

На заседании 04 июня 2025 года диссертационный совет принял решение за решение научной задачи, направленной на выявление природы замедленного хрупкого разрушения высокоуглеродистой рельсовой и колесной стали, имеющей значение для металловедческой науки, присудить Ливановой Н.О. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 14 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 15, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель

диссертационного совета



Родионова Ирина Гавриловна

Ученый секретарь

диссертационного совета



Холодный Алексей Андреевич

04 июня 2025 года

Подпись руки Родионовой И.Г. и Холодного А.А. заверяю:
Ученый секретарь ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»
Москвина Татьяна Павловна

