

На правах рукописи



Григорьев Альберт Викторович

**ПОВРЕЖДЕНИЯ И РЕСУРС БАНДАЖА
ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Специальность:

01.02.04. "Механика деформируемого твердого тела"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2015

Работа выполнена в институте физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН г. Якутск)

Научный руководитель: **Лепов Валерий Валерьевич**, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Института физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова.

Официальные оппоненты: **Левин Алексей Иванович**, доктор технических наук, заведующий сектором ритмологии Северной техники отдела ритмологии и эргономики Северной техники ФГБУН «Якутский научный центр» (г. Якутск).

Штанов Олег Викторович, кандидат технических наук, заместитель директора по научно-исследовательской работе Комсомольск-на-Амурского филиала ООО «Информационные технологии» (г. Комсомольск-на-Амуре).

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск.

Защита состоится «20» ноября 2015 г. в 09:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.02 в ФГБОУ ВПО «Комсомольск-на Амуре государственный технический университет» по адресу 681013, г. Комсомольск-на Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201 корпус 3. Факс: 8(4217) 241-244, e-mail: diss@knastu.ru, dis@knastu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Комсомольского-на Амуре государственного технического университета и на официальном сайте организации по адресу www.knastu.ru

Автореферат разослан «15» октября 2015 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета

д.т.н. О. Е. Сысоев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Экстремальные условия эксплуатации в условиях Крайнего Севера характеризуются резкими перепадами температур, которые могут достигать 100 и более градусов на поверхности материалов, в зависимости от их отражающей способности, с многократным переходом через точку замерзания воды. Такие негативные климатические факторы в значительной степени обуславливают снижение эффективности эксплуатации технических сооружений и оборудования в условиях Крайнего Севера, включая железнодорожный транспорт.

Согласно стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года утвержденной правительством 17 июня 2008 г. необходимо преодолеть техническое и технологическое отставание России от передовых стран мира по уровню железнодорожной техники, а также повысить безопасность функционирования железнодорожного транспорта. В ближайшие 10-15 лет, рост грузопотоков ожидается на Байкало-Амурской магистрали, объемы перевозимых грузов в сторону портов могут возрасти в 7-10 раз. Такой значительный рост будет связан в основном с разработкой новых месторождений угля и руды в Республике Саха (Якутия) и в других субъектах Российской Федерации Дальневосточного региона, намечаемым строительством терминалов в портах Ванино и Советская Гавань для экспорта грузов в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, а также со специализацией Транссибирской железнодорожной магистрали на контейнерных и пассажирских перевозках. Основным направлением научных исследований в области железнодорожного транспорта в рамках данной стратегии является разработка нормативно-методологической базы для расчетов параметров эксплуатационной готовности, прочности, безопасности и ресурса подвижного состава и инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Целью диссертационной работы является разработка методики оценки поврежденности и ресурса бандажа локомотивного колеса, с учетом воздействия низких температур при эксплуатации.

Основные задачи, сформулированные для достижения поставленной цели:

- 1) Определение параметров низкотемпературного охрупчивания материала исследуемого бандажа локомотивного колеса на основе оценки изменения механических свойств стали при испытаниях на растяжение и ударный изгиб;
- 2) Разработка теоретической модели накопления повреждений для оценки влияния сезонных колебаний температуры на состояние материала, учитывающая воздействие эксплуатационных нагрузок;
- 3) Расчет меры поврежденности в материале, основанный на результатах низкотемпературных испытаний и учитывающий историю изменения температур эксплуатации по месяцам;

4) Определение расчетного ресурса бандажа локомотивного колеса, эксплуатируемого в условиях Крайнего Севера.

Научная новизна работы:

- предложен и обоснован метод определения охрупчивания путем расчетного определения меры поврежденности материала бандажа локомотивного колеса с использованием результатов механических испытаний и влияния низких температур при эксплуатации;

- предложен подход, позволяющий установить и спрогнозировать рост накопленных повреждений и снижение ресурса в зависимости от климатических условий региона;

- предложена расчетная модель накопления повреждений в материале бандажа колеса локомотива в условиях низких температур, учитывающая малоцикловое ударно-контактное нагружение;

- разработана методика оценки поврежденности и ресурса бандажа локомотивного колеса при эксплуатации в условиях низких климатических температур.

На защиту выносятся следующие основные научные результаты:

1) Методика определения охрупчивания материала бандажа локомотивного колеса в экстремальных климатических условиях Севера и Арктики, основанная на комплексе механических испытаний материала;

2) Расчетная модель накопления повреждений в бандаже локомотивного колеса с учетом специфики эксплуатации техники в конкретном регионе Крайнего Севера;

3) Методология введения и обоснование критерия разрушения, учитывающего накопление повреждений как от усталостной нагрузки, так и от ударно-контактного динамического воздействия при прохождении рельсовых стыков, чувствительного к снижению температуры эксплуатации;

4) Методика расчёта параметра поврежденности и оценки ресурса бандажа локомотивного колеса.

Практическая ценность результатов работы заключается в разработке метода оценки поврежденности и ресурса бандажа локомотивного колеса. Метод позволяет выявить закономерности охрупчивания и накопления повреждений в материале детали в процессе эксплуатации и оценить расчетный ресурс бандажа в условиях низких температур.

Результаты исследования использовались для расчета поврежденности и оценки ресурса бандажей локомотивных колес, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера в рамках научно-исследовательских работ совместно с ОАО АК «Железные дороги Якутии», а также использованы в образовательной деятельности ГБУ РС (Я) «Транспортный техникум».

Достоверность и обоснованность научных результатов работы обеспечивается использованием широко апробированных методов испытаний и моделей накопления повреждений, сертифицированных средств измерений и испытательного оборудования, а также сопоставлением полученных результатов

с опубликованными данными других авторов и практическим использованием результатов диссертационной работы при расчете ресурса бандажа локомотивного колеса.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на: Лаврентьевских чтениях (Якутск, 2006), Ярмарке инновационных научно-технических проектов молодых ученых «Молодежь, Наука, Бизнес» (Якутск, 2007), Ларионовских чтениях (Якутск, 2007), Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов "ЭРЭЛ" (г. Якутск, 2009-2014 гг.), VI Российской научно-технической конференции «Механика неоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2010), V, VI Евразийских симпозиумах по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата (Якутск, 2010, 2013), X Международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности" (Санкт-Петербург, 2010), Международной научно-технической конференции «Прочность материалов и конструкций при низких температурах» (Украина, Киев, 2010), V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2011), Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы и перспективы управления энергетическими комплексами и сложными техническими системами в арктических регионах» (Якутск, 2012), Всероссийской научно-практической конференции «Сварка и безопасность» (Якутск, 2012), 22-ой Международной конференции по композиционным, наноматериалам и технологиям (Мальта, Сан-Джулианс, 2014), VII Евразийском симпозиуме по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата (Санкт-Петербург, 2014).

Личный вклад автора состоит в разработке и реализации методики оценки поврежденности и ресурса бандажа локомотивного колеса, исследовании закономерностей накопления повреждений в материале элементов железнодорожной техники с учетом влияния низких климатических температур, анализе, обобщении, апробации и внедрении экспериментальных результатов, формулировке основных положений, определяющих новизну и практическую значимость работы. В работах по сбору данных о повреждениях колес и проведению механических испытаний участвовали сотрудники лабораторий ИФТПС СО РАН и ОАО АК «Железные дороги Якутии», которым автор выражает глубокую благодарность за оказанную помощь.

Публикации.

По результатам проведенных исследований опубликовано 16 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов. Основное содержание и выводы изложены на 128 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 27 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 85 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, выполненных в диссертационной работе, сформулированы цели и основные направления исследований, ее научная новизна и практическая значимость, излагаются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе содержится обзор и анализ работ посвященных моделированию процессов накопления повреждений, решению контактных задач при взаимодействии пары колесо-рельс. Проанализированы причины возникновения и развития повреждений колеса и рельса. Приведены проблемы эксплуатации техники в условиях низких климатических температур

Классические результаты по применению моделей накопления повреждений для описания поведения механических систем были получены Пальмгреном. Майнер применил эти закономерности к описанию процесса усталости. Моделирование процессов накопления повреждений подробно рассмотрено в работах Ю. Н. Работнова, Л. М. Качанова, Н. Т. Corten, Т. J. Dollan, С. В. Серенсена, В. П. Когаева, В. Т. Трощенко, В. В. Болотина, В. В. Лопова, Н.Н. Афанасьева, С. Н. Журкова, В. С. Ивановой, Л.Р. Ботвиной и др.. Из анализа работ следует, что модели накопления повреждений условно можно разделить на две основные группы: полуэмпирические и структурные. Наиболее перспективными как физически обоснованными представляются именно последние.

Решение задачи о контакте двух твёрдых упругих тел впервые было представлено Г. Герцем в 1882 г. Аналитические методы решения контактных задач представлены в работах Н.М. Беляева, В. Ф. Яковлева, В.М. Меланина, Е.М. Морозова, И.Г. Горячевой, Л.Р. Ботвиной, Д.Д. Калкер, и др.. В этих работах с развитием методов теории упругости получены решения от простейших видов контактов, например, взаимодействие шаров и цилиндров до численных решений контактных задач взаимодействия тел с любой произвольной формой используя методы конечных элементов и компьютерной техники.

Успехи, достигнутые в разработке методов решения контактных задач, позволили приступить к разработке методов моделирования процессов накопления усталостных повреждений в телах качения. Вопросами разработки методов моделирования процессов усталостного накопления повреждений применительно к паре колесо-рельс занимались С.М. Захаров, И.Г. Горячева, Д.П. Марков, А.В. Сакало, К. Джонсон и др.

Выполненный анализ литературных источников показал, что, несмотря на значительные успехи российских и зарубежных ученых в этом направлении, проблема накопления повреждений в элементах железнодорожной техники с учетом воздействия низких климатических температур и строительства новых

участков железной дороги на территории РС (Я) требует дополнительных исследований. Решение задачи в значительной степени осложняется протеканием структурных превращений, оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики, приводящих к охрупчиванию материала

Проблеме эксплуатации техники в условиях низких климатических температур посвящены исследования В. П. Ларионова, Н. А. Махутова, Ю. С. Уржумцева, А. М. Ишкова, В. Р. Кузьмина и др., где подробно рассматриваются причины отказов и разрушений различной техники, установлено что сезонные колебания и аномально низкие климатические температуры пагубно влияют на технические характеристики машин и оборудования, изготовленных из стали и сплавов. То есть процесс накопления повреждений, и дальнейший выход из строя отдельных узлов техники в экстремальных условиях Крайнего Севера и Арктики происходит с более высокой интенсивностью, чем в регионах с умеренным климатом.

Вышеприведенный анализ современного состояния проблемы явился обоснованием для постановки цели и задач диссертационной работы.

Во второй главе проведен обзор и анализ поврежденности локомотивных колес, эксплуатируемых в Республике Саха (Якутия).

Общую картину последовательности накопления повреждений локомотивных колес можно представить в следующем виде: в результате жесткого контакта поверхностей катания колеса и рельса под воздействием температурных напряжений, а также при прохождении колесом рельсовых стыков, на поверхностном и подповерхностном слоях накапливаются повреждения, которые служат инициаторами трещиноподобных дефектов.

Обследования колесных пар локомотивов, эксплуатируемых на территории Республики Саха (Якутия), показывают, что повреждения на поверхности катания составляют значительную часть из общего числа дефектных колесных пар, и в основном эти повреждения имеют контактно-усталостный характер образования. По результатам обследований, составлен график, из которого видно, что количество дефектных колесных пар повышается в зимний период времени (рисунок 1).

Проведены металлографические исследования шлифа, вырезанного в зоне трещины, в результате которых наблюдается деформация металла в верхней части, постепенно снижаясь в нижней части шлифа (рисунок 2).

Анализ результатов испытаний образцов на растяжение при положительных и низких температурах показал, что механические характеристики образцов (материал – колесная сталь марки 2) различаются в зависимости как от места расположения в бандаже колеса, так и от рабочей температуры испытаний. Таким образом, хотя сталь и обладает достаточно высокими механическими характеристиками при низких климатических температурах, у поверхности катания колеса наблюдается снижение напряжения пластического течения, и уменьшение относительного удлинения стали, предел текучести при испытании

ях в условиях низких климатических температур повышается, т. е. происходит охрупчивание материала (рисунок 3).

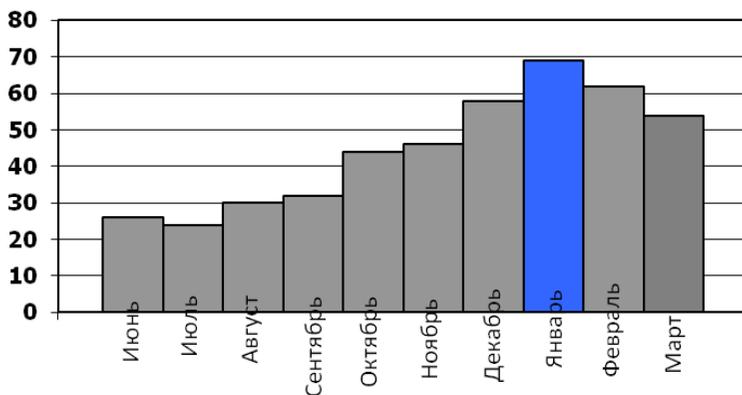


Рисунок 1. Число поврежденных колесных пар, изъятых из эксплуатации: по оси x – календарные месяцы, по оси y – количество дефектных колесных пар.



Рисунок 2. Общий вид трещины в приповерхностном слое поверхности катания бандажа локомотивного колеса

Вследствие того, что бандаж локомотивного колеса, в процессе эксплуатации, подвергается и ударным (динамическим) нагрузкам было определено сопротивление материала действию на него этих нагрузок с помощью испытаний на ударный изгиб образцов из той же марки стали.

В результате проведенных испытаний установлено, что в интервале температур $+20$ и -20 °С ударная вязкость исследуемого материала снижается незначительно. Однако в интервале -20 и -60 °С наблюдается резкое падение значения ударной вязкости (Рисунок 4).

σ , МПа

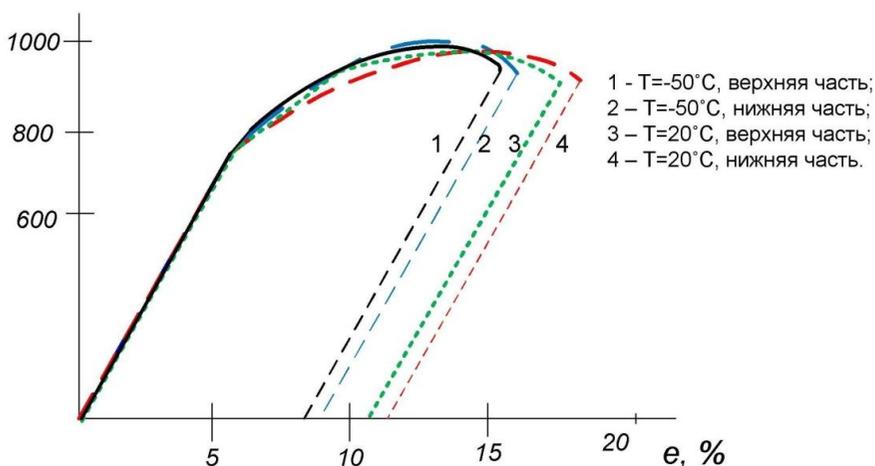


Рисунок 3. Диаграммы деформирования образцов

Ударная вязкость при температуре испытаний -60°C падает в три раза, следовательно, хотя и сталь обладает высокими механическими характеристиками, при понижении температуры уже ниже -30°C (а минимально рекомендованная температура для этой стали -40°C) материал претерпевает вязкохрупкий переход, и энергия, необходимая для его разрушения, существенно падает. Вследствие этого, снижается сопротивление материала действию ударных нагрузок, хотя прочность и удлинение по данным статических испытаний сохраняются на достаточно высоком уровне, и происходит ускоренное накопление структурных повреждений, обусловленное локализацией деформаций и образованием микротрещин.

Таким образом, при низких климатических температурах требуется меньше затрат энергии на разрушение детали от ударного нагружения. Основным механизмом накопления повреждений и разрушения в данном случае является достижение критического значения внутренней энергии материала при ударной нагрузке.

В общем виде процесс накопления повреждений в бандаже локомотивного колеса можно представить следующим образом (Рисунок 5): 1) В результате контакта с рельсом и воздействия ударных нагрузок от рельсовых стыков происходит деформация микроструктуры поверхностного слоя на глубине 3-4 мм (наклеп). В материале с деформированной структурой, при воздействии низких климатических температур повышается твердость, ухудшаются механические характеристики: повышается предел текучести материала, снижается относительное удлинение образца, материал становится более хрупким.

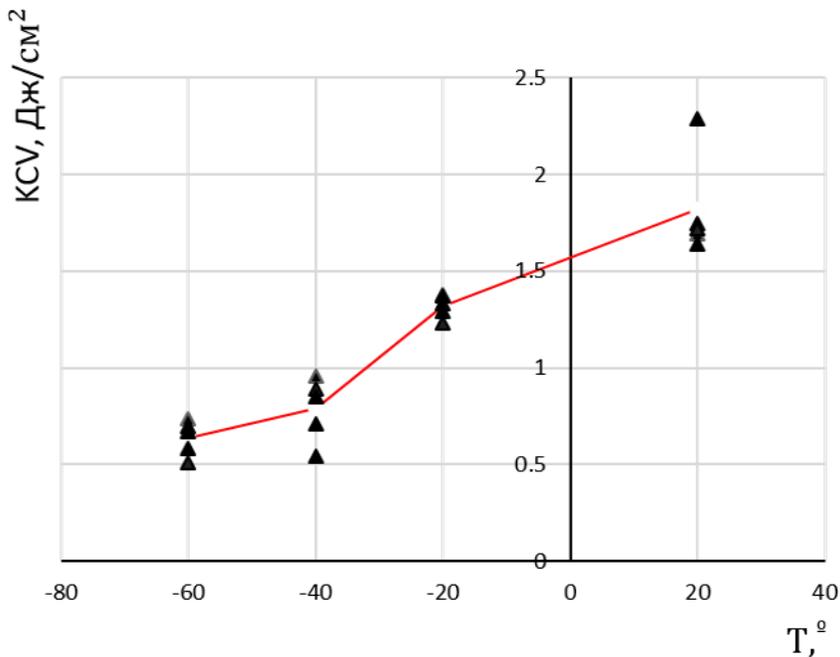


Рисунок 4. Зависимость значения ударной вязкости от температуры.

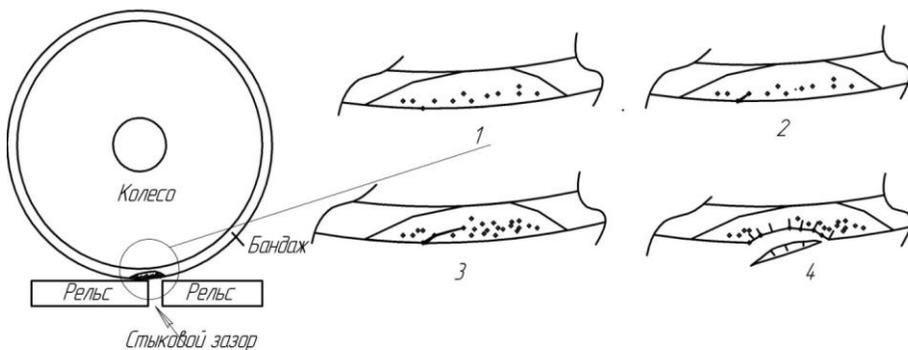


Рисунок 5. Стадия зарождения и распространения трещины: 1-образование микродефектов без взаимодействия друг с другом. 2, 3-зарождение и рост трещины путем слияния микродефектов. 4-выкрашивание (разделение на части) на поверхности катания бандажа локомотивного колеса.

В подповерхностном слое, на глубине наклепанного слоя происходит образование и рост микродефектов. 2) При дальнейшем воздействии нагрузок в

виде ударного нагружения от рельсовых стыков происходит развитие поврежденности (трещины) путем слияния образовавшихся микродефектов по границе деформированной структуры. При низких климатических температурах данный процесс происходит быстрее, так как материал находится в хрупком состоянии. Слой материала с деформированной структурой теряет свои пластические свойства и тем самым снижается сопротивление материала к большим воздействиям ударной нагрузки.

В общем виде механизм схож с усталостным выкрашиванием, но в условиях низких температур имеет свои особенности, - в частности, в результате снижения пластичности и локализации деформации у поверхности трещины располагаются более полого, а отслаивание материала происходит более часто, что приводит к недопустимому росту дефектов при небольшом числе циклов, и более быстрому снижению ресурса колеса.

Третья глава посвящена разработке расчетной модели накопления повреждений в бандаже локомотивного колеса с учетом специфики эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

В общем виде представлено условие разрушения:

$$\Psi = \Psi_F + \Psi_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Psi_{Fi} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_{Lk} = 1, \quad (1)$$

где Ψ_{Fi} - усталостная поврежденность на i - том цикле, Ψ_{Lk} - малоцикловая ударно-контактная поврежденность на k - том цикле, обусловленная снижением ударной вязкости от температуры, N , K - соответствующие показатели числа циклов.

Первое и второе слагаемые учитывают доли повреждений, вносимые соответственно многоциклового усталостью, и малоцикловым ударно-контактным нагружением. Последнее носит динамический характер, и в условиях низких климатических температур будет превалировать за счёт снижения ударной вязкости и локализации пластических деформаций, внося наибольший вклад в поврежденность.

Условие усталостного деформирования в условиях жесткого нагружения может быть записано как:

$$\Psi_F = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta n}{N_i(T)}, \quad (2)$$

где Δn - количество циклов за единичный акт повреждения, $N_i(T)$ - предельное количество циклов (предел усталости) для данного материала.

Второе слагаемое в (1) будет существенно зависеть от температуры ввиду значительного снижения ударной вязкости и соответствующей локализации

пластических деформаций в зоне выкрашивания. Выражение для поврежденности при квазистатическом пластическом деформировании в условиях жесткого нагружения можно записать как:

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \int_0^{\varepsilon_{pj}} \frac{de_j}{\varepsilon_p(T)} \quad (3)$$

где ε_{pj} - показатель пластической деформации за j -ый цикл деформирования, при этом $\sum_{j=1}^K \varepsilon_{pj} = \varepsilon_{pc}$, где ε_{pc} - предельное значение, характеризующее образование трещины.

Носителями повреждений в материале являются структурные несовершенства в виде микротрещин и микропор, неоднородностей, границ зёрен, скоплений дислокаций и других дефектов на различных масштабах. К тому же динамическая деформация и сложное объемное напряженное состояние будет затруднять применение уравнения (3). Более корректно будет заменить деформацию J -интегралом по всему контуру действующих в окрестности возникающей трещины деформаций:

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \frac{\Delta J_j}{J_c(T)}, \quad (4)$$

где ΔJ_j – изменение значения J -интеграла за j -ый цикл нагружения, $J_c(T)$ – предельное значение J -интеграла, которое соответствует возникновению разрушения, и не зависит от конфигурации образца. При этом существенной будет зависимость возникающих деформаций и способности материала к высвобождению энергии от температуры испытаний или эксплуатации.

Известна однозначная взаимосвязь трещиностойкости материала K_{IC} с величиной его ударной вязкости. Можно воспользоваться корреляционной зависимостью, полученной в работах В.С. Гиренко и др.:

$$K_{IC} = \sqrt{0,1 \frac{E}{1-\mu^2} KCV} \quad (5)$$

где KCV – ударная вязкость материала, Дж/см². Здесь следует принять во внимание, что выражение (5) справедливо для оценки трещиностойкости при достижении материалом предельного состояния без значительных пластических деформаций, так, как это происходит в условиях хрупкого разрушения при низких температурах

Усредняя динамическое воздействия на колесо по рельсовым стыкам на различных участках железнодорожного полотна, можно принять:

$$J_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{2G}, \quad (6)$$

где

$$G = \frac{E}{2(1-\mu^2)}. \quad (7)$$

В выражении (7) E – модуль упругости Юнга, μ – коэффициент Пуассона.

Далее, введем эффективный коэффициент интенсивности напряжений, характеризующий напряженно-деформированное состояние у вершины образовавшейся трещины малоциклового усталости:

$$K_{Ieff} = \sqrt{\frac{E}{1-\mu^2}} J_{Ij} \quad (8)$$

При сравнении выражений (6) и (7) приходим к выводу, что $J_{Ij} \approx 0,1 KCV$. Тогда для одиночной трещины (дефекта):

$$\int_0^{J_{IC}} \frac{\Delta J_{Ij}}{J_{IC}(T)} = \int_{T_0}^{T_3} \frac{\Delta KCV(T)}{KCV_0} = \int_{T_0}^{T_3} \left(1 - \frac{KCV(T)}{KCV_0} \right) \quad (9)$$

где KCV_0 – ударная вязкость при комнатной температуре T_0 , T_3 – температура эксплуатации колеса. Накопленную поврежденность, обусловленную малоциклового усталостью, и зависящую от температурного режима эксплуатации, тогда можно оценить с помощью следующего выражения:

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \int_{T_0}^{T_{3j}} \left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right) \quad (10)$$

где T_{3j} – температура эксплуатации на j -том участке пути (времени).

Интегральный эффект от множества различных дефектов, растущих и размножающихся на нескольких структурных уровнях (масштабах) в пределах локальной области может быть учтен зависимостью, выведенной ранее на основе логистического уравнения, или уравнения Ферхюльста, для динамики де-

фектов дислокационного и недислокационного происхождения, содержащих водород (Лепов В.В., Архангельская Е.А.):

$$\frac{d\psi}{dt} = f(T, \sigma) \cdot \psi \cdot (1 - \psi) \quad (11)$$

В случае ударно-контактной усталости по рельсовым стыкам (10) решение может быть записано в виде:

$$\Psi_L = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \int_{T_0}^{T_{эj}} \left(\left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right)^m \right), \quad (12)$$

где KCV_0 , KCV_j – ударная вязкость при комнатной температуре, и в момент j -го повреждения, соответственно, $m \sim 0,25-0,3$ – коэффициент, зависящий от материала и вида НДС. Выражение (12) может служить приближённой оценкой общей поврежденности в условиях низких климатических температур.

С понижением эксплуатационных температур условие разрушения будет выглядеть следующим образом:

$$\Psi = \Psi_L = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \int_{T_0}^{T_{эj}} \left(\left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right)^m \right) = 1, \quad (13)$$

Достижение поврежденности Ψ значения 1 будет соответствовать предельному числу нагружений, и определять ресурс бандажа колеса.

Перепады температуры окружающей среды на исследуемом участке дороги составляют в среднем более 70 °С, и если сопоставить значения ударной вязкости, полученные в результате вышеописанных испытаний на ударный изгиб с данными по температуре, то можно увидеть, что в зимнее время материал бандажа локомотивного колеса работает в неблагоприятной области с пониженной стойкостью к ударным нагрузкам, и подвергается опасности хрупкого разрушения. При этом в элементах железнодорожных конструкций также возникают большие температурные напряжения.

На рисунке 6 также представлены средние минимальные температуры за тот же период в Московской области.

В соответствие со средними температурами можно аппроксимировать значения ударной вязкости по соответствующим месяцам года. Результаты сравнения вычисленных значений ударной вязкости бандажа колеса на участке Нерюнгри Томмот и в Московской области представлены на рисунке 7.

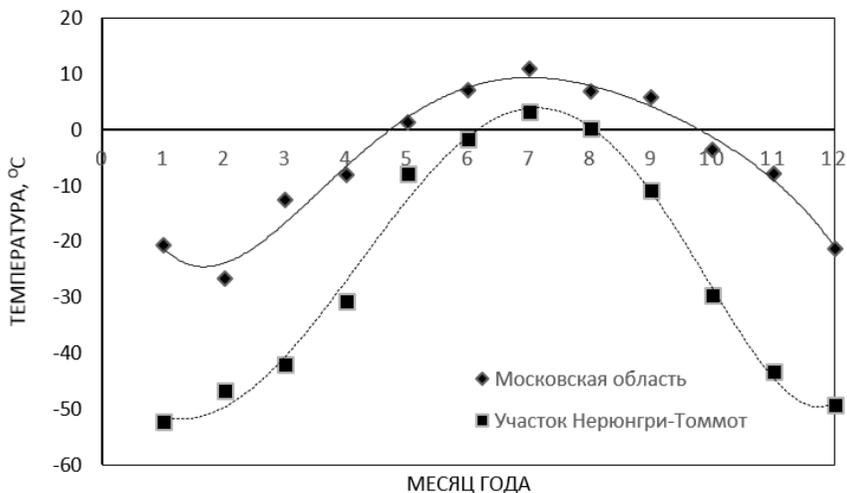


Рисунок 6. Минимальные климатические температуры.

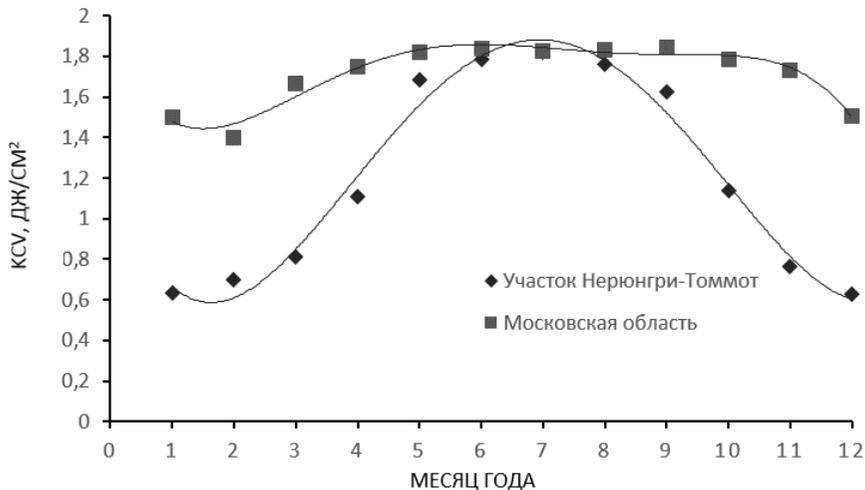


Рисунок 7. Значения ударной вязкости, соответствующие минимальным температурам.

В работе осуществлен численный расчет поврежденности, накопленной в бандаже локомотивного колеса, с учётом влияния низких температур на снижение пластичности согласно формуле (13), что выражено зависимостями ударной вязкости на соответствующем участке железной дороги: на участке Нерюнгри - Томмот мера поврежденности составила $\Psi=0,851$, тогда как в Московской области вычисление поврежденности по (13) дает величину $\Psi=0,364$,

что примерно в два с половиной раза ниже, чем для участка Нерюнгри-Томмот в Якутии. Реально же повреждения из-за более жестких условий эксплуатации (зазор между рельсами и ударная нагрузка будут значительно выше при низких температурах) отличаются еще больше. Опыт эксплуатации локомотивов на железной дороге в условиях Республики Саха (Якутия) показывает снижение срока службы колес в три раза.

Таким образом, поврежденность бандажа локомотивного колеса за указанный период только лишь от ударного воздействия по стыкам рельс достигает двух третей от предельной, и ресурс колеса, следовательно, вырабатывается значительно раньше, чем при эксплуатации в более благоприятных условиях средней полосы России.

В четвертой главе приведена разработанная методика оценки ресурса бандажа локомотивного колеса.

В настоящее время расчёт ресурса колес подвижного состава, в том числе и бандажа локомотивного колеса, в основном, проводится по усталостному износу. Недостатком существующих методов расчета ресурса, является то, что в них не учитываются повреждения, производимые при воздействии малоциклового контактно-усталостного нагружения.

На основе проведенных экспериментальных исследований и разработанной методики оценки меры поврежденности, предложена методика оценки расчетного ресурса для бандажа локомотивного колеса, согласно следующей схеме, представленной на рисунке 8:

- 1) определяется накопленная поврежденность в ободке локомотивного колеса.
- 2) проводится расчет количества циклов при условии, что когда мера поврежденности $\Psi=1$ достигается предельное состояние материала.
- 3) вычисляется пробег локомотива в километрах, с учетом длины одного рельса ~ 20 м.
- 4) определяется ресурс бандажа локомотивного колеса, с учетом числа обточек n за весь жизненный цикл колеса.

С использованием вышеописанной методики была проведена оценка ресурса бандажа локомотивного колеса, эксплуатируемого на участке железной дороге Республики Саха (Якутия) Алдан-Томмот. В соответствии с приведенной схемой определено следующее:

1. Мера накопленной в бандаже колеса поврежденности на участке Якутск-Томмот, рассчитанная по формуле (13), составила $\Psi=0,851$, что соответствует числу циклов ударного нагружения по стыкам рельсов $N_j = 6 \times 10^5$.

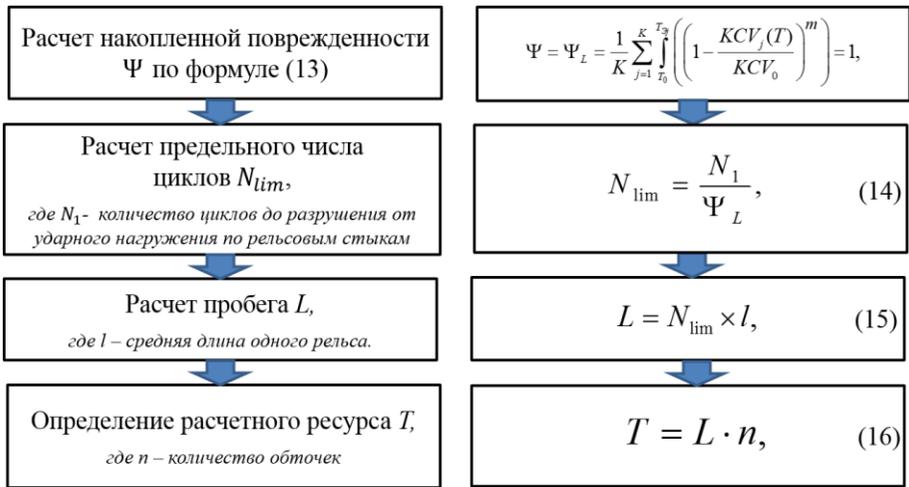


Рисунок. 8. Схема методики расчета ресурса бандажа локомотивного колеса.

2. Тогда, согласно критерию разрушения, при достижении мерой поврежденности предельной величины $\Psi = 1$, количество циклов по формуле (14) составит $N_{lim} = 7,05 \times 10^5$.

3. В соответствии с (15) рассчитывается пробег локомотива до образования недопустимого дефекта, $L = 14101$ км (с учетом средней длины рельса на данном участке дороги $l \sim 20$ м).

4. При выполнении условий по данной схеме, определяется ресурс бандажа локомотивного колеса, в данном случае составляющий $T = 112\ 808$ км (16).

Таким образом, расчет ресурса бандажа локомотивного колеса позволяет определить пробег до момента образования поверхностного повреждения браковочного (недопустимого) размера, и за весь жизненный цикл. Расчетный пробег составил 112 808 км, что в 3 раза меньше, чем аналогичный показатель в регионах с умеренным климатом. По сравнению с гарантированным заводом-изготовителем пробега (600 тыс. км) для нового бандажа этот показатель меньше в 5 раз.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе экспериментального исследования закономерностей изменения механических свойств и структуры стали в процессе эксплуатации в условиях Крайнего Севера бандажа локомотивного колеса установлено, что в зимний период интенсивность накопления повреждений резко возрастает.

2. Экспериментально выявлено, что высокоуглеродистая сталь, используемая для бандажа локомотивных колес, претерпевает низкотемпературный вязко-хрупкий переход в диапазоне умеренно низких температур эксплуатации в условиях Крайнего Севера, т.е. уже при температуре около $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обуславливает резкое снижение ударной вязкости, преобладание низкоэнергетического хрупкого образования трещин и структурную деградацию материала.

3. Впервые получены количественные характеристики поврежденности материала бандажа локомотивного колеса, обусловленной воздействием низких климатических температур эксплуатации. Ударная вязкость при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ падает более чем в три раза по сравнению с результатами испытаний при комнатной температуре, что значительно снижает сопротивление материала бандажа локомотивного колеса воздействию ударных нагрузок.

4. На основании проведенных экспериментальных и расчетных исследований и разработанной модели накопления повреждений предложен критерий разрушения, учитывающий как усталостный характер разрушения, так и ударно-контактное воздействие при прохождении рельсовых стыков.

5. Предложен подход, в котором с помощью сплайн-аппроксимации экспериментальных данных рассчитаны изменения величины ударной вязкости, соответствующие истории минимальных температур эксплуатации по месяцам. Используя данный подход, при эксплуатации техники может быть спрогнозирован рост накопленных повреждений и снижение ресурса в зависимости от климатических условий.

6. Произведена сравнительная оценка поврежденности, накопленной в бандаже колеса локомотива, с учетом распределения средних минимальных климатических температур по месяцам, в результате которого установлено, что в регионах с умеренным климатом накопленная поврежденность почти в два раза ниже, чем на территории Крайнего Севера.

7. Экспериментальные результаты и разработанная методика оценки ресурса были использованы для оценки ресурса бандажа локомотивного колеса, эксплуатируемого в условиях Крайнего Севера, что подтверждается актом внедрения ОАО АК «Железные дороги Якутии». Оценка ресурса поврежденных бандажей локомотивных колес показала, что их пробег в условиях Центральной Якутии в три раза меньше, чем в регионах с умеренным климатом, и меньше гарантированного пробега для нового бандажа в 5 раз.

8. Научно-обоснованный структурный многоуровневый подход применен для анализа механизма и построения модели накопления повреждений, а также разработки расчетно-экспериментальных методик оценки поврежденности и ресурса бандажа локомотивного колеса.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах ВАК

1. Григорьев А. В. Механизмы накопления повреждений и разрушения материала обода железнодорожного колеса при эксплуатации в условиях Севера / Григорьев А.В., Лепов В.В. // Вестник Северо-Восточного Федерального университета – 2012. – №1, Том 9. – С. 79-85.

2.. Григорьев А.В. Повреждения и ресурс колес локомотивов, эксплуатируемых в условиях Севера / Григорьев А.В., Лепов В.В. // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журнал. 2014. – №2. DOI: [10.7463/0214.0699140](https://doi.org/10.7463/0214.0699140)

3. Григорьев А.В. Влияние низких климатических температур на ресурс материала железнодорожных колес / Григорьев А.В., Лепов В.В. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5 (часть 1). – С. 18-22;

4. Григорьев А. В. Оценка ресурса элементов железнодорожной техники, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур. / Григорьев А. В., Лепов В. В., Тагров В. Н. // Наука и образование. – 2014, - №1 (73). С. 35-39.

5. Григорьев А. В. Прогнозирование накопления повреждений и ресурса локомотивных колес в условиях холодного климата. / Григорьев А. В., Лепов В.В. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015, - №2(4) том 17, С. 757-760.

Другие публикации

6. Григорьев А. В. Проблемы эксплуатации железнодорожного подвижного состава тяги и путевого хозяйства в условиях Крайнего Севера / Григорьев А. В., Лепов В. В. // Сборник статей конф. «Х – Лаврентьевские чтения». – Якутск, 2006 – Т.1. – С 95-100.

7. Григорьев А. В. Проблемы эксплуатации железной дороги в условиях низких климатических температур / Григорьев А. В., Лепов В. В. // Сборник материалов Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Эрэл-2009». – Якутск: Изд-во ЯГУ, 2010 – С. 55-58.

8. Григорьев А.В. Исследование контактно-усталостных повреждений элементов железнодорожной техники в условиях низких климатических температур / Григорьев А.В., Лепов В. В. // Высокие технологии и фундаментальные исследования: сборник трудов X Международной. науч.-практ. конф. "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности" - СПб., 2010. – Т. 4. – С. 111-114.

9. Григорьев А.В. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений элементов железнодорожной техники в условиях низких климатических температур [Электронный ресурс] /. Григорьев А. В, Лепов В. В. //

Труды V Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD-2010 (Якутск, 1-5 июня 2010 г.). Секция 2. – Якутск, 2010. – С. 31-34. - CD-ROM

10. Григорьев А. В. Контактно-усталостные повреждения колес локомотива, эксплуатируемого в условиях севера / Григорьев А. В., Лепов В. В. // Материалы V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Электронный ресурс). Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2011. Электрон. оптич. диск, вкладка «Публикации».

11. Григорьев А. В. Механические свойства и структурные изменения в железнодорожном колесе при эксплуатации в условиях низких климатических температур / Григорьев А. В., Лепов В. В. // Современные проблемы математики и механики: Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2011. – С. 113 – 117.

12. Григорьев А. В. Исследование эксплуатационных повреждений железнодорожных колес в условиях низких климатических температур / А. В. Григорьев, В. В. Лепов // Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций: сб. тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. (1-2 марта 2011 г.). - СПб., 2011. – С. 167-169.

13. Григорьев А. В. Накопление повреждений в элементах железнодорожной техники в условиях низких климатических температур / Григорьев А. В. // Результаты исследований получателей грантов Президента РС (Я) и государственных стипендий РС (Я) за 2012 год. – Якутск, 2013. – С. 124-126.

14. Обеспечение функционирования ж/д транспорта в условиях низких климатических температур – одно из важнейших условий эффективности ТЭК Севера / Григорьев А. В., Лепов В. В. // Проблемы и перспективы управления энергетическими комплексами и сложными техническими системами в арктических регионах: труды Всероссийской конференции молодых ученых, 26-28 июня 2012 г. / [редкол. Н. Ф. Стручков, Г. И. Давыдов]. – Якутск: Изд-во «Компания Дани АлмаС», 2012. – 281 с.

15. Повреждения железнодорожной техники в условиях Севера / Григорьев А. В., Лепов В. В. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Сварка и безопасность»: Том 2. – Якутск, 2012.

16. Григорьев А.В., Лепов В.В. Оценка поврежденности бандажа локомотивного колеса в условиях низких климатических температур // Труды VI евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата: Т. 2. Материалы. Якутск, 24-29 июня 2013 г. – Якутск: Ахсаан, 2013. – С.85-91.

17. Григорьев А.В. Моделирование повреждений локомотивного колеса при эксплуатации тепловозов в регионах холодного климата / Григорьев А. В.// Модернизация и развитие тепловозной тяги. Инновационный аспект: сборник материалов III международной научно-технической конференции. – Якутск: Алва-Принт, 2013 – С. 107-114.