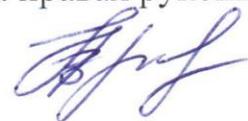


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА
ИМ. В. П. ЛАРИОНОВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



ГРИГОРЬЕВ Альберт Викторович

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

01.02.04. "Механика деформируемого твердого тела"

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
В. В. Лепов

Якутск
2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧАХ И ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР	1
1.1. ПОВРЕЖДЕННОСТЬ. МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ	10
1.2 УДАРНО - КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕСА И РЕЛЬСА.....	20
1.3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС И РЕЛЬСОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ	25
1.4. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР	34
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	37
ГЛАВА 2. ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ПОВРЕЖДЕННОСТЬ БАНДАЖА ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ.....	39
2.1. АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ БАНДАЖА ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА.	39
2.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА.....	47
2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ. ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ	58
2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА УДАРНОЙ НАГРУЗКЕ. ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ	66
2.5. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ БАНДАЖА ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА.....	71
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	74
ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В БАНДАЖЕ ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА	76
3.1 ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ.	76
3.2 ОЦЕНКА НАКОПЛЕННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В БАНДАЖЕ ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР И УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	82
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	98
4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА БАНДАЖА ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА.....	99
4.1. РАСЧЕТ РЕСУРСА БАНДАЖА ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА.....	102
4.2 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДИКИ. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС	108

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	112
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	117

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации техники в экстремальных климатических условиях Крайнего Севера имеют место резкие перепады температур, значения которых могут достигать более ста градусов на поверхности материалов, в зависимости от их отражающей способности, с многократным переходом через точку замерзания воды. Такого рода негативные климатические факторы значительно снижают эффективность эксплуатации различных видов технических сооружений и оборудования в условиях Крайнего Севера, в том числе и железнодорожный транспорт.

Как отражение актуальности решаемых прикладных задач современной науки, в комплексе программ Правительства Российской Федерации до 2030 года предусматривается разработка мероприятий по снижению риска аварий, инцидентов и катастроф, в том числе техногенного характера.

Согласно стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года утвержденной правительством 17 июня 2008 г., перед транспортными и научно-исследовательскими организациями поставлена задача по устранению технического и технологического отставания России от передовых стран мира по уровню развития железнодорожного транспорта, а также по обеспечению безопасности функционирования железнодорожного транспорта. В ближайшие 10-15 лет, прогнозируется повышение грузооборота на Байкало-Амурской магистрали. Значительный рост объемов перевозимых грузов будет связан в основном со строительством магистрального газопровода «Сила Сибири» и «ВСТО», а также разработкой новых месторождений угля и руды на территории Республики Саха (Якутия), других субъектах Дальневосточного региона Российской Федерации, экспортом грузов в страны Азиатско-Тихоокеанского региона. В этой связи основным направлением научных исследований в области железнодорожного транспорта в рамках данной стратегии является разработка нормативно-методологической базы для определения

эксплуатационных параметров прочности, безопасности и долговечности подвижного состава и всей соответствующей железнодорожной инфраструктуры, в том числе и используемой в условиях Крайнего Севера.

Наиболее актуальной в настоящее время при эксплуатации в экстремальных климатических условиях остается задача прогнозирования предельного состояния и ресурса как целиком сложных технических систем, объектов и конструкций, так и их отдельных элементов. При расчете ресурса конструкций возникает задача описания механических, физико-химических, и других процессов, приводящих к достижению материалом и элементом конструкции своего предельного состояния. Таким образом, при решении задачи прогнозирования предельного состояния и ресурса конструкций важным пунктом становится создание модели, описывающей процесс разрушения в материале, накопления в нем усталостных, коррозионных, пластических и других видов повреждений.

В этих условиях, использование моделей накопления повреждений является наиболее универсальным средством для описания различных механических процессов в материалах и элементах конструкций. Известно, что условно существует два основных подхода к построению моделей накопления повреждений: полуэмпирические (феноменологические), и структурные.

Теоретические и модельные подходы, экспериментальные и численные аспекты исследуемой проблемы были изучены в работах отечественных и зарубежных ученых: В.В. Болотина, Л.Р. Ботвиной, К.Б. Броберга, Д. Броека, Дж. Коллинза, И.Г. Горячевой, Р.В. Гольдштейна, В.В. Лепова, В.П. Ларионова, Н. А. Махутова, А.А. Гриффитса, Н.Н. Давиденкова, Т. Екобори, А.А. Ильюшина, Е. М. Морозова, Л. М. Качанова, Ю.Н. Работнова, С.В. Серенсена, В.Т. Трощенко, А.В. Сакало, С.М. Захарова, В. М. Чернова, В. С. Гиренко и др.

При взаимодействии колеса и рельса возникают довольно высокие давления, достигающие более 1000 Мпа, которые приводят к большим

пластическим деформациям, что, в свою очередь, ведет к образованию повреждений поверхности катания и достаточно быстрому выкрашиванию поверхностных повреждённых слоев.

Целью 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 на основании полученных результатов низкотемпературных испытаний и с учетом распределения минимальных температур по месяцам;
- 4) Определение расчетного ресурса бандажа локомотивного колеса, эксплуатируемого в условиях Крайнего Севера.

Научная новизна:

- 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.

Достоверность и обоснованность научных результатов работы обеспечивается применением апробированных методов испытаний, корректным использованием моделей накопления повреждений, поверенных средств измерений и испытательных приборов, а также сопоставлением полученных результатов с данными других авторов и практическим использованием результатов диссертационной работы при расчете ресурса бандажа локомотивного колеса.

Практическая значимость 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 в образовательной деятельности ГБУ РС (Я) «Транспортный техникум».

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).

Положения, выносимые на защиту:

- 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.

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 благодарность за оказанную помощь.

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 16 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов. Основное содержание и выводы изложены на 125 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 27 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 85 ссылок.

ГЛАВА 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧАХ И ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР

1.1. ПОВРЕЖДЕННОСТЬ. МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Под повреждением понимают событие, которое заключается в нарушении исправного состояния объекта, или целостности материала, а также элемента конструкции, при котором объект соответствует всем нормативно-техническим и проектно-конструкторской требованиям. Повреждение отличается от отказа тем, что объект сохраняет своё работоспособное состояние. При накоплении повреждений конструкция или ее элемент теряет своё работоспособное состояние, что в свою очередь, может привести к отказу. Одним из видов отказа является разрушение объекта, элемента конструкции или материала.

Разрушение в виде разделения материала на части по механизму развития трещин является заключительным этапом, предпосылкой которому служат изменения структуры материала в виде «разрыхления» и образование разрывов в материале.

Развитию теории деформирования и разрушения конструкционных материалов посвящено множество работ [1-7]. В теории разрушения наиболее распространенным является усталостное разрушение, которое происходит при циклическом нагружении, т.е. под действием многократного приложения повторно-переменных нагрузок. В этом случае трещины в материале начинают развиваться задолго до полного разрушения (до исчерпания несущей способности детали) независимо от того, пластическое это будет разрушение или хрупкое [8].

При контактном взаимодействии колеса и рельса причиной разрушения, как правило, является поверхностная усталость, которая имеет место при наличии контакта вращающихся поверхностей [9]. Необратимые изменения структуры, материала, возникающие на различных стадиях деформирования, как правило, становятся причиной образования поврежденности.

Возникшая необходимость оценки долговечности по критерию зарождения и развития трещин при разных видах нагружения привела к введению понятия поврежденности. Данный термин отражает возникновение определенных физических процессов, приводящих к постепенному образованию в материале микродефектов различного типа.

Для определения степени поврежденности материала можно воспользоваться физическими методами оценки параметров, характеризующих различные свойства и структуру материала, таких как: дефект модуля упругости, внутреннее трение, степень помутнения, разность между модулями при растяжении и сжатии, электросопротивление и т.п. Методами физического анализа, могут служить различные механические испытания (растяжение, сжатие, ударный изгиб и т.д.), электронная и оптическая микроскопия, высокоскоростная кино- и фотосъемка, метод рассеяния рентгеновских лучей под малыми углами и другие.

В настоящее время, достаточно широко, в механике разрушения используют способ описания различных механических процессов в материалах в виде моделей накопления повреждений. Используя модели накопления повреждений можно получить кинетические уравнения накопления, повреждений которые, в свою очередь, могут быть непосредственно использованы в моделях расчета ресурса конструкции или деталей.

В современном состоянии данного вопроса, создано большое число моделей накопления повреждений. Часть из которых описывает процесс в целом, часть моделей описывает процессы только в стадии зарождения

трещины, а другая часть только стадию распространения трещины. При этом повреждения оцениваются мерой накопленной поврежденности.

В соответствии с классификацией [10, 11] используют два основных подхода к построению теоретических моделей: полуэмпирический (феноменологический), основанный на обобщении результатов экспериментов и структурный, описывающий и объясняющий явления из внутренней структуры объектов.

Уравнение накопления повреждений. Простейшие модели основаны на введении скалярной меры повреждений. В данном случае, поврежденность описывается некоторым скаляром ω [10]. В начальной стадии, то есть при отсутствии поврежденности $\omega=0$; далее, с течением времени функция убывает. Функцию ω , в действительности, можно трактовать как термин «сплошность». В работе [12] Ю.Н. Работнов обосновал функцию ψ , которая в начальный момент имеет значение $\psi=0$, а в момент разрушения ψ равна 1. Соответственно, функцию ψ можно трактовать как поврежденность и, следовательно, принять $\psi=1-\omega$.

Одной из основных частей, входящих в широкий класс моделей накопления повреждений, является кинетическое уравнение накопления повреждений [3], которое представлено в следующем виде:

$$\frac{d\psi}{dt} = f(\psi, q), \quad (1. 1.)$$

где - $f(\psi, q)$ - функция меры повреждений ψ и вектора нагрузок q .

Вектор нагрузок принято считать функцией времени $q(t)$. Сам процесс $q(t)$ включает в себя как деформационные, силовые, температурные, химические, так и все любые воздействия, влияющие на исчерпание ресурса объекта. В простейшем случае функция $q(t)$ представляется в виде скалярного процесса в котором заданы все внешние силы, которые действуют квазистатично.

Полуэмпирические модели накопления повреждений. В настоящее время большое значение имеют полуэмпирические или феноменологические модели, которые основаны на результатах различных макроскопических испытаний. В таких моделях степень поврежденности зависит, в основном, от варьирования значений тех или иных механических характеристик во времени или с развитием деформации.

Условно полуэмпирические (феноменологические) модели можно разделить на три основные группы: силовые, энергетические и деформационные. Силовые модели основываются на допущении, что повреждения в элементе материала зависят от напряжений и не зависят от деформаций, возникающих при нагружении. В настоящее время имеется достаточное число различных моделей накопления повреждений, в которых внешняя нагрузка определяется уровнем напряжений [9, 13].

В основе деформационных моделей находится предположение о том, что процесс накопления повреждений связан с ростом деформаций. В этом случае, при достижении предельных значений деформаций, происходит разрушение. Напряжения, возникающие при деформировании материала, в деформационных моделях не учитываются. В основном деформационные модели базируются на модели Коффина-Мэнсона [9, 14]. Наиболее известными моделями данного типа являются модели Морроу-Мэнсона [15] и Лэнджера [16].

Энергетические модели накопления повреждений основываются на предположении о том, что процесс накопления повреждений связан с уровнем накопленной внутренней энергии материала. Основным недостатком данного вида является то, что такую модель накопления повреждений невозможно использовать для прямых инженерных расчетов, вследствие того, что на накопление повреждений расходуется не вся, а только лишь некоторая эффективная доля необратимой работы деформирования. Тем не менее, при использовании энергетических моделей учитываются напряжения и деформации [17].

Структурные модели накопления повреждений. Повреждение материалов представляет собой процесс, который происходит на различных уровнях и в широком диапазоне. Повреждения на атомно-молекулярном (микро-) уровне исследуются средствами физики твердого тела, более крупные в рамках материаловедения и макроскопические дефекты (трещины и т.п.) рассматриваются механикой деформируемого твердого тела.

Наличие нескольких уровней рассмотрения приводит к тому, что возникает необходимость выбора некоего базового масштаба в котором рассматривается структурная эволюция (на различных структурных уровнях существуют те или иные масштабы и связанные с ними физические). За такой масштаб можно принять, например, расстояние между атомами, размер зерна, микропор, длина трещины, а также характерный размер ансамбля зерен и микротрещин (мезо уровень) [10, 17, 18].

Структурные модели накопления повреждений условно можно разделить на две группы: вероятностно-статистические и структурно-физические [13, 19]. Первая группа основана на теории вероятностей и математической статистики, с использованием гипотезы «наислабейшего звена»: В.В. Болотин, В. Вейбул, С.В. Серенсен, В.П. Когаев и др. [20, 21, 22, 23] и статистической теории Н.Н. Афанасьева [13, 24]. Статистические теории, основанные на гипотезе «наислабейшего звена», имеют ряд предположений: 1) причиной разрушения материала является наиболее опасный дефект, который имеется в образце; 2) в процессе нагружения характеристики дефектов остаются постоянными; 3) свойства материала характеризуются кривой распределения критических напряжений для дефектов в данном материале [13, 20].

Структурно-физические модели накопления повреждений основаны на физике твердого тела или аналогичных физических процессов. Данный вид моделей, можно разбить на две подгруппы: модели кинетического подхода и модели континуальной теории дефектов. Первая подгруппа данного вида моделей основана на описании хода процесса кинетической зависимостью,

впервые полученной Аррениусом и примененной С. Н. Журковым в теории прочности твердых тел [25]. Далее модели кинетического подхода получили развитие в работах В.С. Ивановой [26], И. А. Одингга [27] В. В. Федорова [28], Регеля-Слуцкера [29]. Вторую группу составляют модели, основанные на континуальной теории дефектов [30, 31]. При построении моделей используют несколько масштабных уровней: микро и макро. Наиболее подробно модели этой группы рассмотрены в работах Т. Екобори и В. Е. Панина [18, 19].

При моделировании поврежденности используют много разных подходов, в которых скорость накопления повреждений рассматривается как функция напряжений в данной точке, температуры и других параметров в зависимости от механизма разрушений, материала и т.д.

Подробнее рассмотрим результаты исследований, где для описания процесса накопления поврежденности использована термокинетическая модель [32], в которой скорость накопления повреждений задается соотношением:

$$q(x, y, z, t) = \frac{1}{\mathcal{G}} \exp\left(-\frac{U - \gamma\sigma(x, y, z, t)}{kT(x, y, z, t)}\right), \quad (1.2)$$

где U – энергия активации; \mathcal{G} и γ – характеристики материала; k – постоянная Больцмана; $\sigma(x, y, z, t)$ – характеристика поля напряжений в точке (x, y, z) внутри деформируемого тела в момент времени t . Используя в качестве $\sigma(x, y, z, t)$ различные характеристики поля напряжений или их комбинации, в рамках данного подхода можно воспроизвести различные типы разрушения.

Функция поврежденности $Q(x, y, z, t)$ в произвольный момент времени t рассчитывается по формуле [32]:

$$Q(x, y, z, t) = \int_0^t q(x, y, z, t) dt + Q_0(x, y, z), \quad (1.3)$$

где функция $q(x, y, z, \tau)$ – определяется по формуле (1.2), а функция Q_0 является начальной поврежденностью. При усталостном поверхностном разрушении предложен макроскопический подход, который заключается в построении положительной неубывающей во времени функции $Q(M, t)$, которая характеризует меру повреждения в некоторой точке M и зависит от амплитудных значений в этой точке. Разрушение происходит в момент времени t , при достижении функцией порогового значения [33].

Для исследования накопления повреждений в железнодорожном колесе была использована модель линейного суммирования повреждений: в котором, в каждый момент времени рост параметра поврежденности не зависит от накопленной ранее поврежденности. При этом считалось, что скорость накопления усталостных повреждений $\frac{dQ(x, y, z, t)}{dt}$ определяется амплитудным значением максимальных касательных напряжений в рассматриваемой точке [34]:

$$q(x, y, z, t) = \frac{dQ(x, y, z, t)}{dt} = c[\Delta\tau_1(x, y, z, t)]^m, \quad (1.4)$$

где c и m – постоянные, определяемые экспериментально; $\Delta\tau_1(x, y, z, t)$ – разница между максимальными и минимальными значениями касательных напряжений в точке с координатами x, y, z, t за один цикл нагружения.

Используя выражение (1.4) можно рассчитать поврежденность $Q(x, y, z, N)$, накопившуюся в произвольной фиксируемой точке с координатами x, y, z в течение N циклов, используя следующее соотношение [34]:

$$Q(x, y, z, N) = \int_0^N q(x, y, z, n)dn + Q_0(x, y, z), \quad (1.5)$$

где $Q_0(x, y, z)$ – распределение начальной поврежденности в материале.

Разрушение наступит при условии [35]:

$$Q(x, y, z, L) = 1, \quad (1.6)$$

где L – число циклов до разрушения.

Подставляя (1.4) в формулу (1.5) и учитывая условие (1.6) получено соотношение, позволяющее рассчитать число L циклов до разрушения при переменных напряжениях σ , в качестве которых рассматриваются максимальные касательные τ_1 или растягивающие напряжения, так как их минимальные значения за цикл равны нулю:

$$\int_0^L c\sigma^m(x, y, z, n)dn + Q_0(x, y, z) = 1, \quad (1.7)$$

Для определения поврежденности, накопленной в материале колеса за N циклов, используется выражение [34]:

$$Q(x, y, z, N) = \int_0^N c\sigma^m(x, y, z, n)dn, \quad (1.8)$$

При исследовании процессов накопления контактно-усталостных повреждений в железнодорожных колесах используется несколько подходов. В работах [35, 36] проведены испытания колёсных сталей на контактно-усталостную прочность. При описании напряжённо-деформированного состояния в области контакта было использовано максимальное Герцевское давление, при определении которого предполагалось, что деформации образцов упругие.

В работе [37] численно-аналитическим методом получены исходные данные для кривой контактной усталости колёсной стали. При этом

предполагается, что первое нагружение образца сопровождается деформациями упруго-пластического характера, а при последующих нагружениях материал работает в пределах упругих деформаций. При этом параметром, характеризующим напряжённое состояние в области контакта, служит эквивалентное напряжение, основанное на критерии Данг Вана. Таким образом, цикл напряжений определяется амплитудным значением напряжений τ_{\max}^a и средним гидростатическим давлением σ_0 .

В результате расчётов получены значения эквивалентных напряжений τ_{DV} , основанных на критерии Данг Вана, для точек с максимальным напряжением τ_{\max}^a при соответствующих нагружениях:

$$\tau_{DV} = \tau_{\max}^a + a_{DV}\sigma_0, \quad (1.9)$$

В процессе эксплуатации колеса железнодорожного подвижного состава имеет место сложное взаимодействие механизмов нагружения приводящее к повреждению. Наряду с усталостным воздействием, возникает необходимость проанализировать процессы и последствия накопления повреждений в материале элемента конструкции от совместного действия с ударно-контактным нагружением от самого рельсового пути и рельсовых стыков. Понимание реагирования структур материалов элементов техники на ударную нагрузку необходимо в дальнейшем для улучшения характеристик и надежности железнодорожного транспорта. В работе [38] приведен обзор расчетных и экспериментальных исследований, посвященных ударному нагружению и разрушению твердых тел.

При прохождении рельсовых стыков возникают значительные динамические ударные нагрузки, которые могут существенно повлиять на работоспособность колеса. Так, при контакте со стыком наблюдаются вертикальные ускорения, достигающие до 50g и ударные силы превышающие 400 кН (40 тс) [39].

В последнее время, в связи с повышением значения твердости материала рельсов и с массовым использованием более мощных рельсов типа Р65 и Р75 характер ударного взаимодействия колеса при прохождении рельсовых стыков существенно изменился.

В работах [40, 41] установлено, что контактная прочность повышается за счет повышения содержания углерода и твердости стали. В работе Л. К. Силкоккс [42] установлено, что материал железнодорожных колес должен иметь высокие характеристики прочности и твердости в целях обеспечения требуемого сопротивления к повреждениям контактно-усталостного характера. Однако, повышение твердости, только посредством повышения содержания углерода в материале, приводит к улучшению прочности стали, но при этом снижается ударная вязкость и, как следствие, пластичность материала. Наблюдаются разрушения хрупкого вида, следовательно, деформации упругого и пластического характера практически отсутствуют и разрушение металла происходит в виде выкрашивания [43,44,45].

1.2 УДАРНО - КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕСА И РЕЛЬСА.

Механическое нагружение деформируемых твердых тел в большинстве случаев является результатом взаимодействия двух или более контактирующих объектов. Следовательно, при рассмотрении процессов нагружения твердых тел возникает необходимость анализа условий контактного нагружения. В основном при решении задач контактного взаимодействия тел применяются уравнения теории упругости, пластичности, ползучести, которые зависят от уровня силового воздействия на материал и различных свойств материала.

Применительно к паре колесо-рельс контактное взаимодействие было исследовано в работах Н. М. Беляева [46], где была развита известная теория контакта упругих тел Герца и получены теоретические выражения для напряжений при контакте тел. Из теории Герца следует, что область контакта двух тел можно представить в виде эллипса. Математическое решение данной нормальной задачи, которое представлено в работе [47] можно представить, как: два ненагруженных тела (поверхности катания колеса и рельса) имеют одну точку контакта. Тогда геометрически можно определить расстояние между недеформированными телами, при известных радиусах кривизны в точке контакта. Коэффициент Пуассона ν и модуль упругости E , характеризуют упругие свойства колеса и рельса и считаются одинаковыми. В результате приложения нагрузки нормальной силой F , образуется площадка контакта в форме эллипса с большой полуосью в направлении продольной оси рельса, которая представлена на рисунке. 1.1.

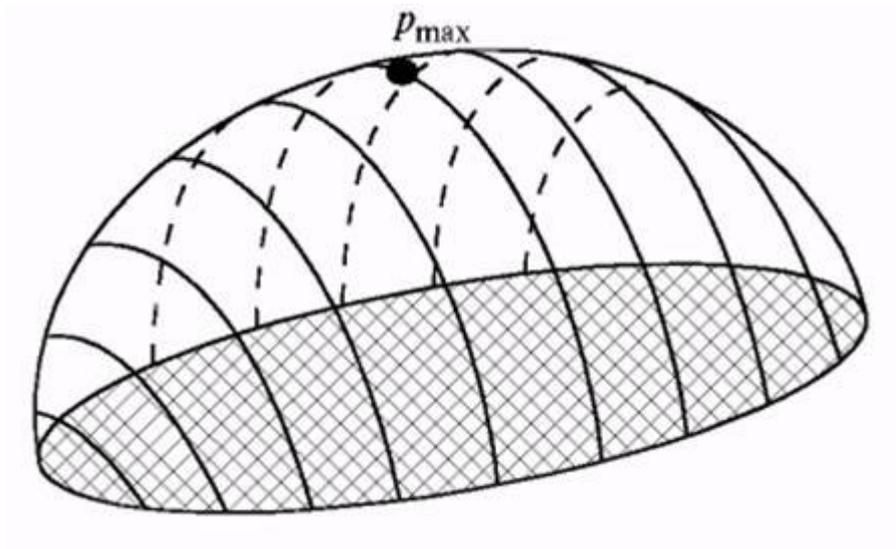


Рисунок 1.1 - Распределение нормальных герцевских напряжений на площадке контакта [47].

Максимальное контактное напряжение P_{\max} может быть рассчитано по формуле [47]:

$$P_{\max} = \sqrt[3]{\frac{2EF^2}{2\pi^3 r_e^2 (1-\nu^2)^2}}, \quad (1.10)$$

где r_e - эквивалентный радиус, зависящий от характерных радиусов взаимодействующих тел (колеса и рельса) в месте контакта.

Таким образом, существует зависимость нормальных напряжений на поверхностях катания рельса и колеса от приложенной нагрузки, возникающей между колесом и рельсом, радиусов кривизны поверхностей колеса и рельса и их упругих свойств. Однако, в случае, когда зона контакта колеса и рельса имеет два или больше точек контакта или, когда контактная зона располагается не по центру контактирующих тел, при использовании метода Герца возникают существенные погрешности определения напряжений.

В работах В. Ф. Яковлева [48, 49] разработаны экспериментальные методы определения контактных напряжений с использованием тензорезисторов. Получены поправочные коэффициенты к решению Герца-Беляева, а также учитываются влияния края головки рельса на контактные напряжения. Основываясь на полученных экспериментальных данных В.Ф. Яковлев показал, теорию Н.М. Беляева можно применить только в центральной области контакта колеса и рельса, при расположении площадки контакта вне центра, возникает погрешность в расчетах.

В работах [50, 51] исследованы контактные напряжения, где подробно приведен численный расчет по решению Герца-Беляева при нагрузке 100 кН. В результате проведенных расчетов установлено, что в случае взаимодействия неизношенных колес и рельсов контактное пятно представляет собой круг радиусом 7 мм.

Расчет напряжений в колесе является довольно сложной задачей. Исследования [52, 53], показывают, что данная задача пока не имеет точного решения. В современном мире для решения таких задач применяют различные компьютерные программы и механизмы. Например, в работе [53], выявлено, что при наклоне диска колеса напряжения понижаются до 50 %, а S-образная модель диска существенно снижает напряжения от вертикальных и боковых нагрузок, а также напряжения, возникающие при нагреве колеса.

Вследствие того, что разработка теоретических методов оценки напряжений в колесах имеет некоторые сложности, возникает необходимость проведения экспериментальных исследований. При выполнении экспериментальных исследований [54], колеса подвергались действию вертикальных, горизонтальных сил и вибрационных нагрузок. Была произведена оценка влияния отдельных факторов и определение конструктивных форм элементов колеса. Установлено, что по вследствие износа и обточек колеса уменьшается толщина обода, соответственно возрастают напряжения в области гребня колеса.

В работе [55] с помощью метода конечных элементов проведены исследования допускаемых напряжений в колесе по критерию усталостной прочности. В этом случае основным недостатком является осесимметричная постановка задачи, которая не совсем соответствует реальной эксплуатационной форме нагружения колеса.

В работе В. М. Меланина исследовано напряженно- деформированное состояние, вызванное ударом о головку рельса [56]. В данном случае при моделировании напряженно-деформированного состояния колеса были приняты следующие условия: обод колеса был представлен в виде криволинейного стержня, уравнения напряженно-деформированного состояния были основаны на гипотезе плоских сечений, а обод колеса аппроксимировался стержневыми конечными элементами, диск колеса представлял собой оболочку вращения и представлялся в виде оболочечных конечных элементов. Такая аппроксимация существенно упрощает процесс

моделирования, что дает возможность получить конечные аналитические выражения, недостатком такого подхода является то, что при это можно получить только примерные значения напряжений.

Таким образом, представленный анализ работ, посвященных контактному взаимодействию твердых тел применительно к паре колесо-рельс содержит решение многих основных вопросов механики разрушения. Однако, процессы взаимодействия колеса и рельсового стыка при воздействии низких климатических температур эксплуатации, а также их влияние на механические характеристики материала при контактных нагрузениях требуют дополнительных исследований.

1.3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС И РЕЛЬСОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Существует множество видов дефектов колес и рельсов. Сведения, о которых приведены в правилах и руководствах железных дорог. Эти нормативные документы содержат информацию о классификации дефектов, их кодов, описаний, причин возникновения и инструкции по действиям, которые следует предпринимать в соответствующих случаях.

Одним из самых распространенных причин поврежденности деталей и узлов железнодорожной техники является контактная усталость. В условиях взаимодействия колеса с рельсом реализуется значительные давления, достигающие более 1000 МПа [34], которые приводят к пластическим деформациям поверхностного слоя.

Железнодорожное колесо в процессе эксплуатации подвергается большим циклическим нагрузкам, в результате которых возникают усталостные повреждения, особенно в контактирующих с рельсом частях колеса. При диаметре колеса примерно равном 1 м и пути его пробега около 50 000 км поверхность катания и слои металла под ней испытывают до 10^7 циклов «нагружение-разгрузка», при этом в точке контакта напряжения могут превышать предел текучести. Такого числа циклов нагружения достаточно для зарождения усталостных трещин. Например, на лабораторных образцах, используемых при испытаниях стали на трещиностойкость, усталостная трещина наносится при напряжении равном 0,5 предела текучести и числе циклов около 10^5 [34].

Образование и рост таких дефектов зависит таких факторов как: условия эксплуатации, химический состав, механические свойства материала, размеры колесной пары, качества содержания и ремонта. При этом немаловажное значение имеет время года и климатические условия.

При появлении на поверхности катания колеса различных эксплуатационных дефектов возникает необходимость проведения

технического обслуживания и ремонта локомотива с выкаткой колесных пар и технологических операций в виде обточки или смены бандажей колес. Это приводит к вынужденному простоя локомотива и дополнительным значительным эксплуатационным и финансовым расходам.

Наиболее распространенным дефектом колес являются выщербины и раковины на поверхности катания, которые являются повреждениями контактно-усталостного характера, развивающегося под поверхностью обода колеса под действием нормальных и касательных напряжений (рисунок 1.2) [57].



а)



б)

Рисунок 1.2 - а) Выкрашивания и б) Выщербина в виде раковины на поверхности катания колеса [57].

Контактная усталость и износ при определенных условиях возникают на железных дорогах и приводят к повышенному выходу из строя колес и рельсов. При росте грузонапряженности на отечественных железных дорогах в 1960-70-х годах установлено несоответствие используемых рельсов типа Р50 к более жестким условиям эксплуатации. Существенно вырос выход из строя рельсов по контактно-усталостным повреждениям головки рельса [57] (рисунок 1.3, 1.4).

Трещина в виде раковины эллиптической формы имеет характерные кольца, распространяющиеся параллельно поверхности рельса. Во многих случаях происходит выкрашивание металла из раковины, образовавшейся на выкружке головки рельса. При определенных условиях выкрашивание может приводить к поперечным трещинам: при достижении трещиной критической величины (около 10 мм), ее задняя кромка может распространиться вглубь рельса и привести к его излому (рисунок 1.3, 1.4) [57].

Образование раковин относится к дефектам, возникающим на некоторой глубине от поверхности. Дефект зарождается под действием высоких касательных напряжений от контактного взаимодействия, преимущественно в местах строчечных оксидных включений в рельсовой стали. Главными металлургическими факторами, оказывающими влияние на образование выкрашиваний, являются объем оксидных включений в процентах, длина строчек и твердость по Бринеллю [57].

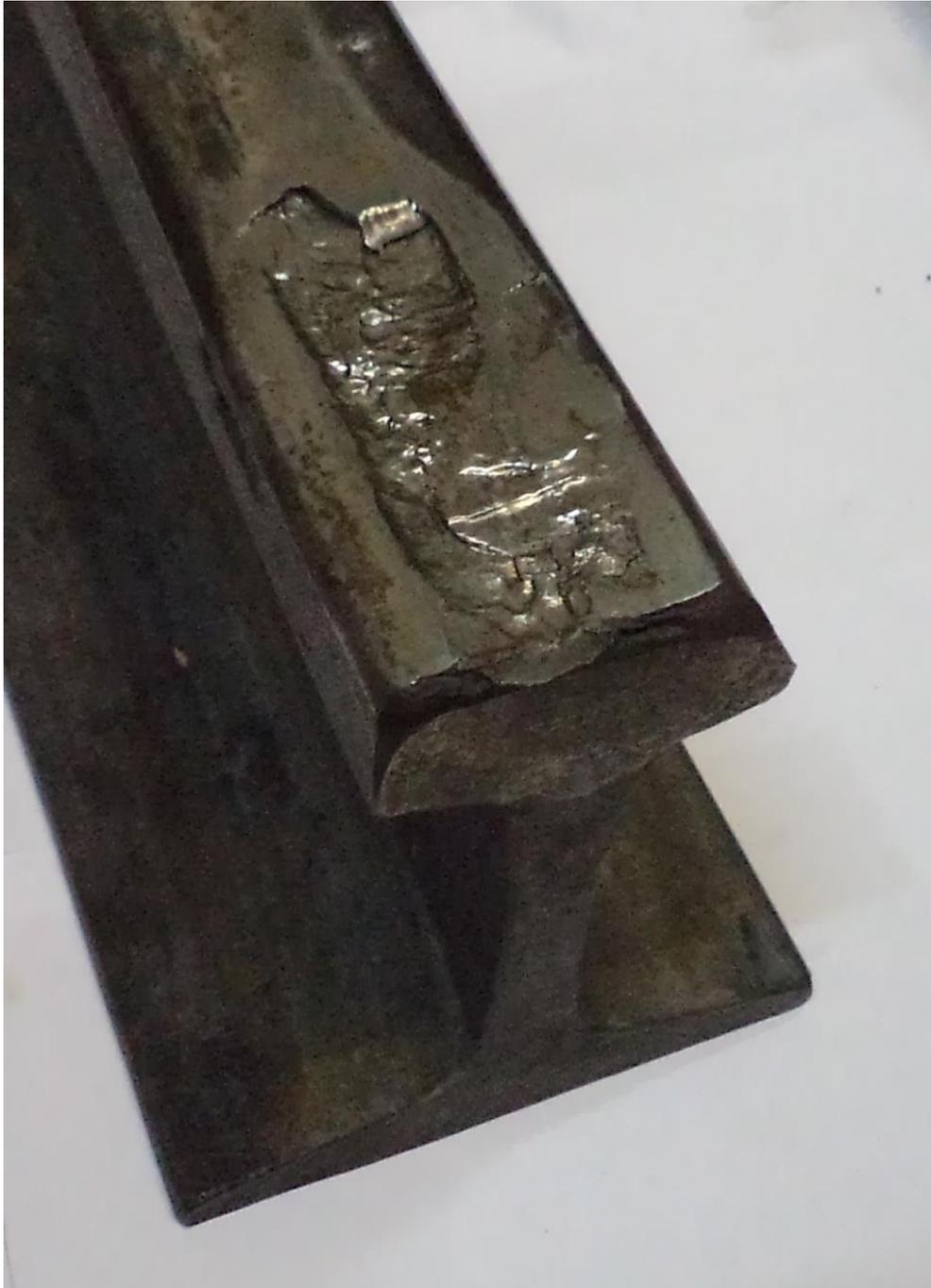


Рисунок. 1.3 - Контактнo-усталостные повреждения на головке рельса в зоне стыка.

Механические факторы, такие, как нормальные, продольные и касательные усилия, и особенно остаточные напряжения, также оказывают влияние на образование поперечных трещин в головке рельса.

Обнаружение небольших поперечных трещин, образовавшихся от выкрашиваний, затруднено при дефектоскопировании, так как горизонтальная составляющая раковины выкрашивания маскирует вертикальную составляющую поперечной трещины.

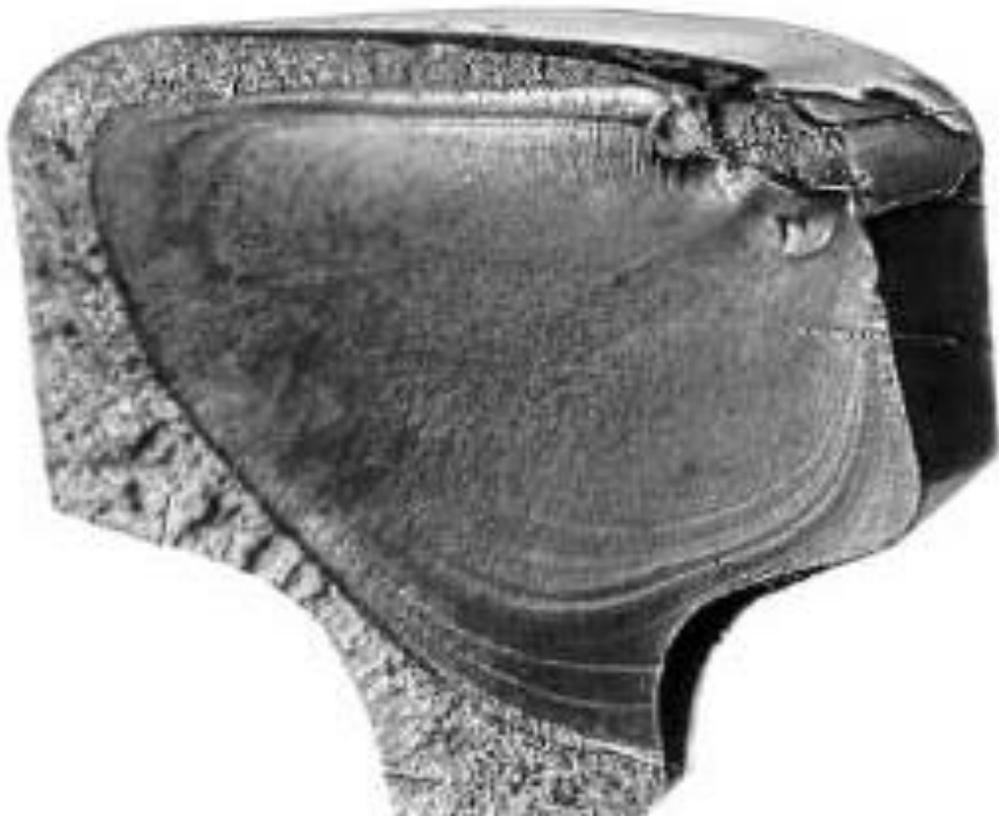


Рисунок 1.4 - Поперечная трещина, возникшая от выкрашивания на выкружке головки рельса [57].

При рассмотрении безопасности движения при взаимодействии колеса и рельса наиболее опасными являются дефекты в стыковых соединениях, возникающие от ударно-контактного вида нагружения. Прохождение колесом рельсового стыка сопровождается несколько иными условиями взаимодействиями чем в средней части рельса. Траектория движения колеса понижается и происходит ударный контакт, вследствие чего повышается местная пластическая деформация головки рельса и поверхности катания колеса.

Вследствие того, что при прохождении колеса через рельсовый стык возникает ударное нагружение, при этом сила удара достигает до 150 кН (15 тс). Более того, в случае увеличения стыкового зазора рельсов более 25 мм, особенно при воздействии низких климатических температур, с учетом температурного расширения материала рельса, удар может увеличиться до 920 кН (92 тс) [58].

Множество исследований посвящены изучению механических свойств материала рельсов в эксплуатации. Важнейшим параметром работоспособности рельсовой стали является предел выносливости, который установлен в пределах 10^6 - 10^7 циклов по российским и международным стандартами. В работе [59] выполнен анализ данных расчетно-экспериментальных методов, где на основе определения механических свойств рассчитывается предел прочности. Приведены зависимости, учитывающие связь предела выносливости с пределом прочности, предела выносливости и твердости (по шкале Бринелля и Виккерса), твердости с пределом прочности и т.д.

Экспериментальные результаты, полученные для рельсовой стали, описываются формулой [59]:

$$p_f = 3,12 \text{ НВ} , \quad (1.11)$$

Эмпирическая зависимость (1.11) является среднестатистической для различных материалов. Следует также отметить, что в процессе эксплуатации рельса изменяется микроструктура материала при контакте с железнодорожным колесом. Следовательно, при взаимодействии колеса и рельса происходит увеличение значения твердости материала рельса, соответственно сопротивление контактной усталости повышается. Значительное повышение твердости ведет к упрочнению поверхностного слоя рельса вследствие пластической деформации, однако одновременно возникает значительная остаточная деформация, которая приводит к разупрочнению, и, как следствие охрупчиванию и дальнейшему разрушению материала, что подтверждено результатами металлографических исследований [59].

При эксплуатации железнодорожного подвижного состава отмечается, что в зимнее время в России и Северной Америке интенсивность образования выщербин на поверхности катания железнодорожного колеса значительно увеличивается по сравнению с летним периодом времени. Считается, что одной из причин более интенсивного образования поверхностных повреждений является увеличение жесткости пути и, таким образом, степени влияния неровностей пути на силы, действующие между колесом и рельсом. Также другой причиной считается наличие жидкости в виде воды от дождя или растаявшего снега, которая существенно увеличивает скорость распространения трещин за счет гидростатического давления жидкости, запертой в трещине. Особенно неблагоприятные условия возникают, если за сухим периодом, в течение которого трещина зарождается, следует влажный период, когда вода увеличивает скорость распространения трещины [57].

Таким образом, множество работ посвящено вопросу повышения работоспособности и ресурса колеса и рельса как наиболее ответственных элементов железнодорожного транспорта. В монографии Е.М. Морозова и М.В. Зернина приводится подробный обзор научных исследований контактной пары колесо – рельс, где применяется подход с точки зрения механики разрушения [60].

1.4. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования особенностей эксплуатации техники при низких климатических температурах в работах советских и российских механиков [61, 62, 63, 64]) показали, что с понижением температуры работоспособность и надежность нефтегазового оборудования, транспортной и горнодобывающей техники, резко падает. Интенсивность образования повреждений в зимнее время и в переходной осенне-весенний период резко увеличивается и по сравнению с летним сезоном превышение составляет порой десятикратную величину.

Так, опыт эксплуатации в зонах с экстремально холодным климатом такой техники Севера, как экскаваторы, бульдозеры, карьерные автосамосвалы, конструкции, машины и оборудование, применяемое при разработке месторождений полезных ископаемых, свидетельствует о том, что в зимний период по сравнению с летним среднемесячная выработка машин сокращается в 2,0-3,1 раза, а себестоимость перерабатываемой горной массы увеличивается в 2-2,6 раза. При этом наблюдается снижение наработки на отказ в 1,6-2,4 раза, сокращается период между вынужденными ремонтами и повышается трудоемкость восстановления [61].

В этих условиях повышение надёжности локомотивов, обеспечивающих безотказность движения поездов, становится одной из актуальных задач. Если при этом учесть, что идет увеличение грузовых перевозок, продолжается строительство новых железных дорог в тех регионах, где имеют место суровые климатические условия эксплуатации (низкие температуры, высокогорье, ледовые комплексы и т.д.), то данная проблема приобретает ещё большее значение.

Наличие дефектов в таком элементе железнодорожной техники, как бандаж локомотивного колеса, обуславливается нарушениями технологии изготовления, в частности, металлургическими факторами, и

неэффективностью последующего дефектоскопического контроля. Процессы возникновения и дальнейшего непрогнозируемого роста дефектов вызываются отклонениями от установленных норм эксплуатации техники, контроль за которыми в условиях холодного климата и резких колебаний температуры организовать достаточно сложно.

Анализ исследований в области влияния климатических факторов на работу машин и механизмов, на ресурс, надежность и работоспособность транспортной техники показывает, что вопросы взаимосвязи особенностей эксплуатации техники с экстремальными условиями холодного климата и их длительным воздействием на материал недостаточно изучены и остаются открытыми. Вопросы прогнозирования работоспособности техники в этом аспекте требуют более углубленного изучения [65, 66].

В связи с планами строительства новых участков железной дороги и открытия постоянного сообщения с центральным районом, а в перспективе и с северными областями Российской Федерации, ожидается увеличение числа эксплуатируемой в условиях низких климатических температур техники, и возникновения соответствующих проблем.

Исследователями отмечается ряд моментов, вызывающих, в частности, снижение усталостной прочности деталей и элементов машин, эксплуатируемых при низких климатических температурах [64]:

- повышение уровня циклических нагрузок из-за частичных и полных отказов демпфирующих систем, температурных напряжений от суточного перепада и т.п.;

- ростом концентрации напряжений в элементах вследствие повышения сопротивления материалов начальной пластической деформации;

- более существенным, чем при температуре $T_0 = 293 \text{ K}$, снижением исходного предела выносливости элементов в результате повреждающего действия циклических перегрузок высокого уровня;

- снижением ресурса пластичности.

Указанные выше моменты оказывают влияние на уровень максимальных напряжений и интенсивность процессов накопления повреждений, а также времени развития усталостной трещины. Это приводит к тому, что в условиях значительных перегрузок понижение температуры сопровождается уменьшением разрушающих напряжений деталей и элементов. В результате изменяются фактические запасы прочности, снижается ресурс, возрастает риск отказа конструкций.

Условия эксплуатации железной дороги, расположенной на территории Крайнего Севера, отличаются низкими климатическими температурами и резкоконтинентальным климатом, годовой период отрицательных температур составляет более 200 суток, а минимальные температуры достигают 60°C ниже нуля, также колебания температур составляют более 70°C . Значительная часть территории Республики Саха (Якутии) характеризуется как район вечномёрзлых грунтов.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

В первой главе рассмотрено применение моделей накопления повреждений при оценке процесса накопления усталостных повреждений в материале. На основе обзора существующих моделей было проведено сравнение моделей различных типов и указано, что можно использовать как структурное моделирование, так и феноменологическое (полуэмпирическое) или их комбинацию.

При контактном взаимодействии железнодорожного колеса и рельса повреждения в основном наблюдаются на рабочих поверхностях данных элементов от циклических нагрузок. Трещина образовывается на поверхности катания и может развиваться вглубь металла, что может вызвать аварию или крушение. Факторами, учитывающими специфику эксплуатации системы колесо-рельс при создании модели накопления повреждений, являются контактная усталость и ударное нагружение от рельсовых стыков.

Также из анализа теоретических и экспериментальных работ следует, что сезонные колебания и экстремально низкие климатические температуры отрицательно сказываются на характеристиках динамической прочности машин и оборудования из малоуглеродистой и закаленной стали, не говоря уже о снижении общей эксплуатационной надежности изделия. Таким образом, выход из строя отдельных узлов техники в условиях Крайнего Севера происходит с повышенной интенсивностью. Однако, обоснований повышенного количества отказов и выхода из строя колесных пар вследствие накопления повреждений на поверхности катания накоплено пока недостаточно, и необходимы дополнительные исследования. В ряде работ в качестве основных причин преждевременного разрушения локомотивных колес железнодорожной техники предлагаются расклинивающее действие воды, попавшей в поверхностные микротрещины, неполадки тормозной системы и нарушения тормозного режима, а также недостаточная твердость материала колес. Но подобные причины и предполагаемые механизмы отказов

не совсем соответствуют наблюдаемой статистике разрушений при эксплуатации железнодорожной техники в условиях низких климатических температур.

Таким образом, первичный анализ имеющихся подходов к оценке причин отказов локомотивных колес приводит к необходимости рассмотрения процессов накопления повреждений и разрушения колеса и рельса, учитывающих цикличность нагрузки и сезонность образования повреждений. При этом возникает насущная необходимость исследования механических характеристик реальных узлов железнодорожной техники с целью определения механизма разрушения и влияния низких температур на механические свойства материала.

ГЛАВА 2. ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ПОВРЕЖДЕННОСТЬ БАНДАЖА ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ

2.1. АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ БАНДАЖА ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА.

Исследованию контактно-усталостных повреждений элементов и узлов железнодорожной техники, а также изучению изменений механических свойств и структуры материалов колеса и рельса при различных условиях эксплуатации посвящено большое число работ, в которых используются различные методы и подходы. Тем не менее, среди них отсутствуют исследования поврежденности узлов железнодорожной техники, эксплуатируемой в условиях аномально низких климатических температур Крайнего Севера, в силу того, что железнодорожный транспорт начал использоваться в таких условиях сравнительно недавно. В связи с этим возникла необходимость определения общей картины накопления повреждений и разрушения при низких температурах в реальном узле железнодорожной техники, в частности бандаже локомотивного колеса, исчерпавшем свой ресурс в зимний период эксплуатации, с использованием методов металлографии, оптической микроскопии, испытаний на растяжение цилиндрических образцов с целью определения механических характеристик. Основным показателем, характеризующим поведение материала детали при понижении рабочей температуры, является сопротивление материала образцов на ударный изгиб.

Для оценки поврежденности колесных пар тепловозов локомотивного парка предприятия ОАО АК «Железные дороги Якутии» г. Алдан Республика Саха (Якутия) проводился сбор и анализ данных по дефектным колесным парам подлежащим обточке. Для этих целей были исследованы три магистральных тепловоза 2ТЭ10М-2235, 3ТЭ10М^К-2795, GE-0884 и один

маневровый ТЭМ2-5010. Все тепловозы имеют различные технические характеристики и эксплуатационные нагрузки.

В результате проведенных исследований поврежденности бандажей локомотивных колес, установлено преобладание повреждений контактно-усталостного характера таких как: выщербины, выкрашивания, раковины на поверхностной части бандажа локомотивного колеса (рисунок 2.1). Такие дефекты на поверхности катания могут развиваться от поверхности вглубь металла тем самым спровоцировать выход детали из строя, при неблагоприятных обстоятельствах к аварии или крушению подвижного состава. Также, из-за частых случаев образования таких дефектов существенно снижается ресурс, и повышаются экономические расходы,

Данные мероприятия по мониторингу поврежденности узлов железнодорожной техники проводились в календарный период: зима, весна, лето, осень.

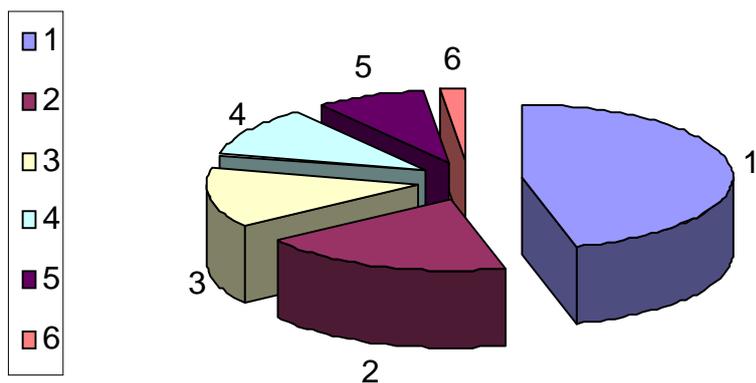


Рисунок 2.1 - Повреждения колесных пар локомотивного парка ОАО АК «Железные дороги Якутии»: 1- выкрашивания, выщербины, раковины; 2-остроконечный накат; 3-опасная форма гребня; 4-риска на гребне; 5-разность диаметров больше допустимой нормы; 6-тонкий гребень.

Из многочисленных фундаментальных и прикладных работ в области хладостойкости конструкций наблюдается резкое снижение работоспособности техники, в том числе и транспортной, при низких климатических температурах. Количество выхода из строя в зимнее время и переходные осенне-весенние периоды резко увеличивается по сравнению с летним временем.

С целью определения влияния такого внешнего фактора как температура окружающей среды, был проведен анализ технического состояния колесных пар локомотивного парка, который показал, что в зимние и переходные месяцы при отрицательных температурах число отцепок по повреждениям контактно-усталостного характера возрастает по сравнению с летними месяцами (рисунок 2.2).

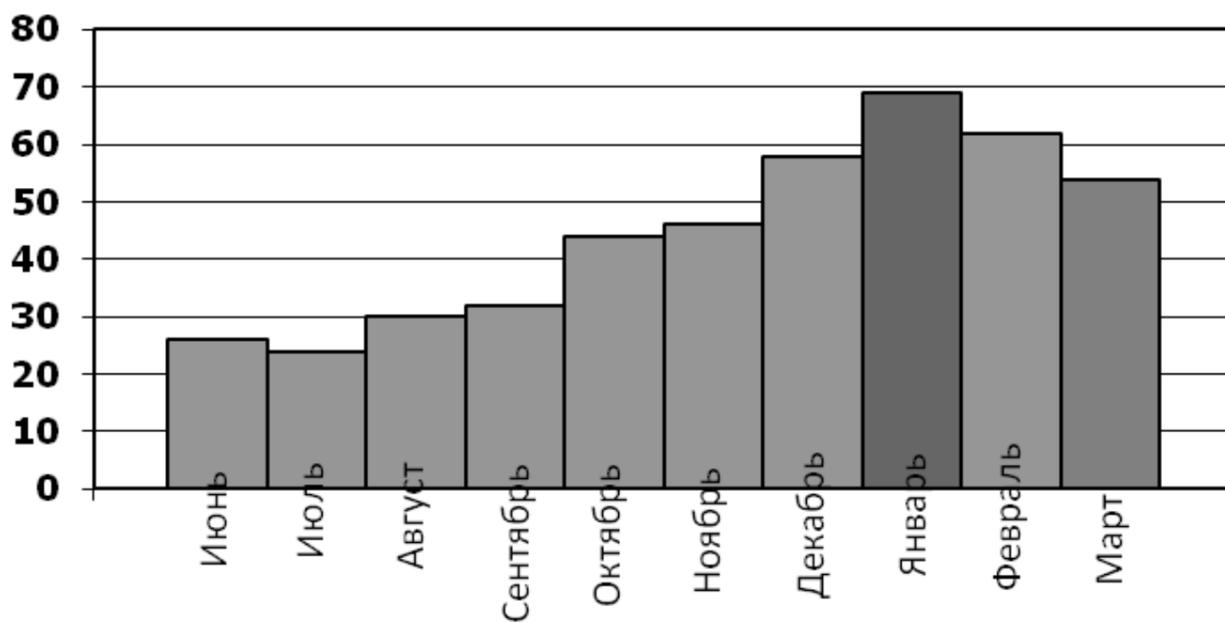


Рисунок 2.2 - Выход из строя колесных пар тепловозов в летние, зимние и переходные месяцы.



Рисунок 2.3 - Выкрашивание на поверхности катания бандажа
локомотивного колеса.

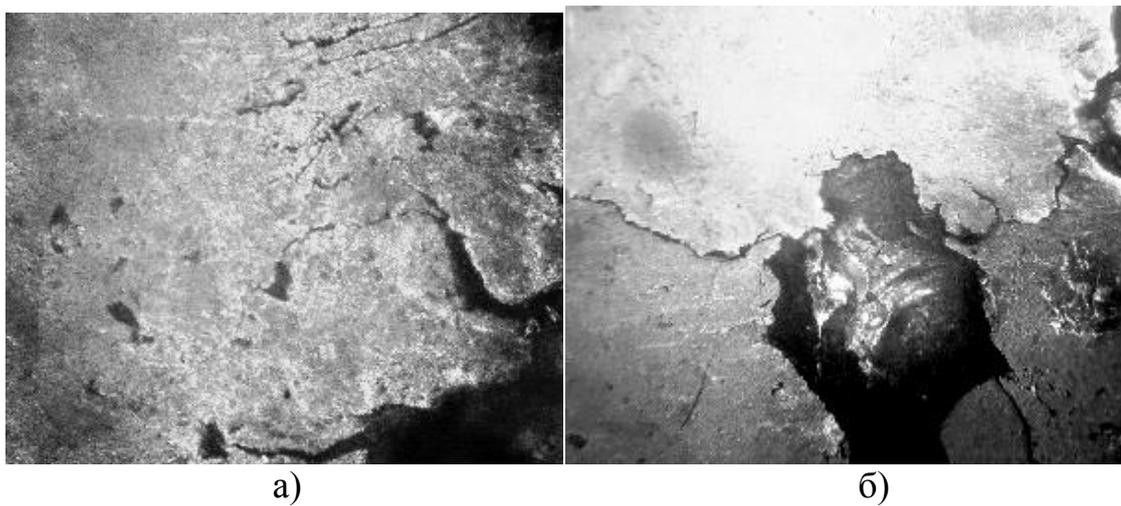


Рисунок 2.4 - Участок бандажа локомотивного колеса с поверхностными повреждениями: а) увеличение $\times 80$; б) увеличение $\times 20$.

2.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА

Когда на деформируемое твердое тело (металлический образец в случае механических испытаний) действует сила или некоторая система сил, тело реагирует на это, изменяя свою форму. При этом наблюдается изменение различных характеристик, которые определяют поведение и конечное состояние металлического образца в зависимости от вида и интенсивности приложенных сил, такие характеристики называются механическими свойствами металла.

Основным материалом для производства железнодорожных колес служит сталь с средним содержанием углерода около 0,45 - 0,65 %. В зависимости от вида подвижного состава марка стали подразделяется на: марка 1 - для пассажирских вагонов локомотивной тяги, пассажирских локомотивов, путевых машин, немоторных вагонов электро- и дизель-поездов; 2) марка 2 и 3 - для грузовых вагонов, маневровых и грузовых локомотивов.

По требованиям государственных стандартов механические свойства материала бандажа локомотивного колеса должны соответствовать значениям, указанным в таблице 2.2 [67].

Таблица 2.2 - Требования к механическим характеристикам стали для бандажа локомотивного колеса.

Бандаж (ГОСТ 398-96)					
	σ_b , МПа	δ , %	Твердость, НВ	КСУ, Дж/см ² , при t °С, не менее	
				20	-60
Марка 2	930-1110	10	269	>0,25	>0,15
Марка 3	1000-1270	8	275	>0,20	>0,15

Для дальнейшего сравнения механических характеристик опытного образца со значениями ГОСТ и определения марки стали был проведен химический анализ материала исследуемого бандажа локомотивного колеса. Результаты химического анализа приведены в таблице 2.3. Химический анализ произведен на установке «Foundry-master» (производства Германии, год выпуска 2005 г.) отдела материаловедения ИФТПС СО РАН г. Якутск.

Химический состав исследуемого бандажа локомотивного колеса, выраженный в процентах массы, соответствует требованиям стандарта ГОСТ 398-94, МС ИСО 1005/1-1982 (Е) и ASTM A 551-81. Установлено, что по химическому составу марка стали опытного образца соответствует колесной стали марки 2 (таблица 2.3).

Одним из универсальных параметров оценки свойств металла является твердость. Применение испытаний на твердость имеет ряд преимуществ перед другими видами испытаний, такими как: простота измерений, неразрушающий вид контроля образцов, а также возможностью приблизительно оценить по значениям твердости другие механические характеристики металла.

Таблица 2.3 - Химический состав стали.

Содержание	Химические элементы				
	C	Si	Mn	P (не более)	S (не более)
По ГОСТ 398-94					
Марка 1	0,5-0,6	0,2-0,42	0,6-0,9	0,035	0,04
Марка 2	0,57-0,65	0,2-0,42	0,6-0,9	0,035	0,04
Марка 3	0,6-0,68	0,22-0,45	0,6-0,9	0,035	0,04
МС ИСО 1005/1-1982 (E) (не более)					
Марка В1	0,48	0,5	1,2	0,04	0,04
Марка В2	0,58	0,5	0,9	0,04	0,04
Марка В3	0,6	0,5	1,1	0,04	0,04
Марка В4	0,7	0,5	0,9	0,04	0,04
Марка В5	0,6	0,5	0,8	0,04	0,04
Марка В6	0,65	0,5	0,9	0,04	0,04
США ASTM A 551-81					
Класс А и АНТ	0,5-0,65	0,15-0,35	0,6-0,9	0,05	0,05
Класс В и ВНТ	0,6-0,75	0,15-0,35	0,6-0,9	0,05	0,05
Измеренное значение					
Образец	0,6	0,33	0,83	0,02	0,02

С целью уменьшения износа колеса и рельса повышают твердость материала, однако это приводит к увеличению жесткости так называемой «контактной пружины» [44], при этом возникают высокие нормальные и касательные напряжения и, следовательно, повышается интенсивность накопления повреждений в подповерхностном слое, также повышение твердости снижает пластичность материала, что ведет к охрупчиванию, тем самым снижая сопротивление материала ударным нагрузкам.

Значение твердости было определено с помощью стационарного твердомера с внедрением шарика диаметром 2,5 мм при нагрузке 187,5 кгс на поперечном темплете по среднему значению трех измерений: 1) в зоне гребня; 2) под поверхностью катания и 3) на границе зоны основного металла (рисунок 2.5). Такая схема позволяет оценить однородность металла по твердости в поперечном сечении образца.

Анализ распределения твердости металла на поверхности исследуемых темплетов, изготовленных из бандажа локомотивного колеса показал, что на участке №2 (под поверхностью катания) значение твердости металла несколько выше, чем на участках №1 и №3. Это обусловлено неоднородностью структуры материала на различных зонах исследуемых образцов.

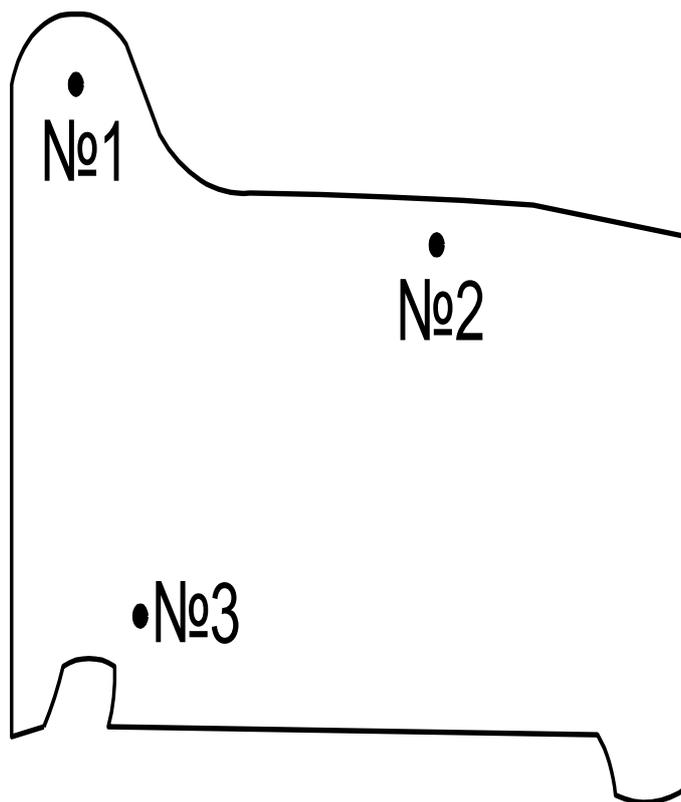


Рисунок 2.5 - Точки контроля измерения твердости.

Для определения влияния перепадов температур окружающей среды на изменение значения твердости была проведена твердометрия по шкале Бринелля ультразвуковым портативным твердомером МЕТ-У1 производства ООО Центр «МЕТ» Россия. Образцы в виде фрагментов локомотивного бандажа и железнодорожного рельса типа Р65 были выдержаны при температуре окружающей среды в диапазоне от -45°C до -54°C в течении 36 часов. Анализ данных полученных при измерениях твердости при комнатной температуре и при температуре -51°C (заданная температура была зафиксирована обычным бытовым термометром и сверялась с данными метеослужбы г. Якутск) показал, что при понижении температуры твердость, в среднем, повысилась на 9 % по сравнению с измерениями при комнатной температуре. Также наблюдается разница в значениях твердости в зависимости от месторасположения контрольных точек. Вблизи дефекта значение твердости намного превышает значение твердости основного металла, поверхности катания, гребня и рабочей боковой грани рельса. Это говорит о том, что дефект образовался в наиболее напряженном участке данных элементов конструкции. Также можно предположить, что с понижением температуры материал теряет пластичность в приповерхностных зонах контакта. Тем самым происходит охрупчивание материала бандажа локомотивного колеса и рельса, образование дефекта происходит с повышенной интенсивностью. В таблице 2.4 приведены результаты измерений значения твердости по шкале Бринелля в различных зонах бандажа локомотивного колеса и железнодорожного рельса типа Р65.

Следует отметить, что в числе технологических мероприятий по повышению эксплуатационного ресурса за счет повышения сопротивления износу рабочих поверхностей железнодорожного колеса и рельса, в настоящее время, приоритетным направлением является увеличение твердости материала путем. Однако, при эксплуатации в регионах с резко-континентальным климатом, необходимо учитывать то, что с повышением твердости материал колеса и рельса становится более хрупким. Увеличение

твердости материала уменьшает интенсивность изнашивания колеса и рельса, но может привести увеличению образования опасных поверхностных повреждений, особенно от ударного нагружения при прохождении рельсовых стыков.

Таблица 2.4 - Значения твердости колеса и рельса при положительных и низких температурах окружающей среды.

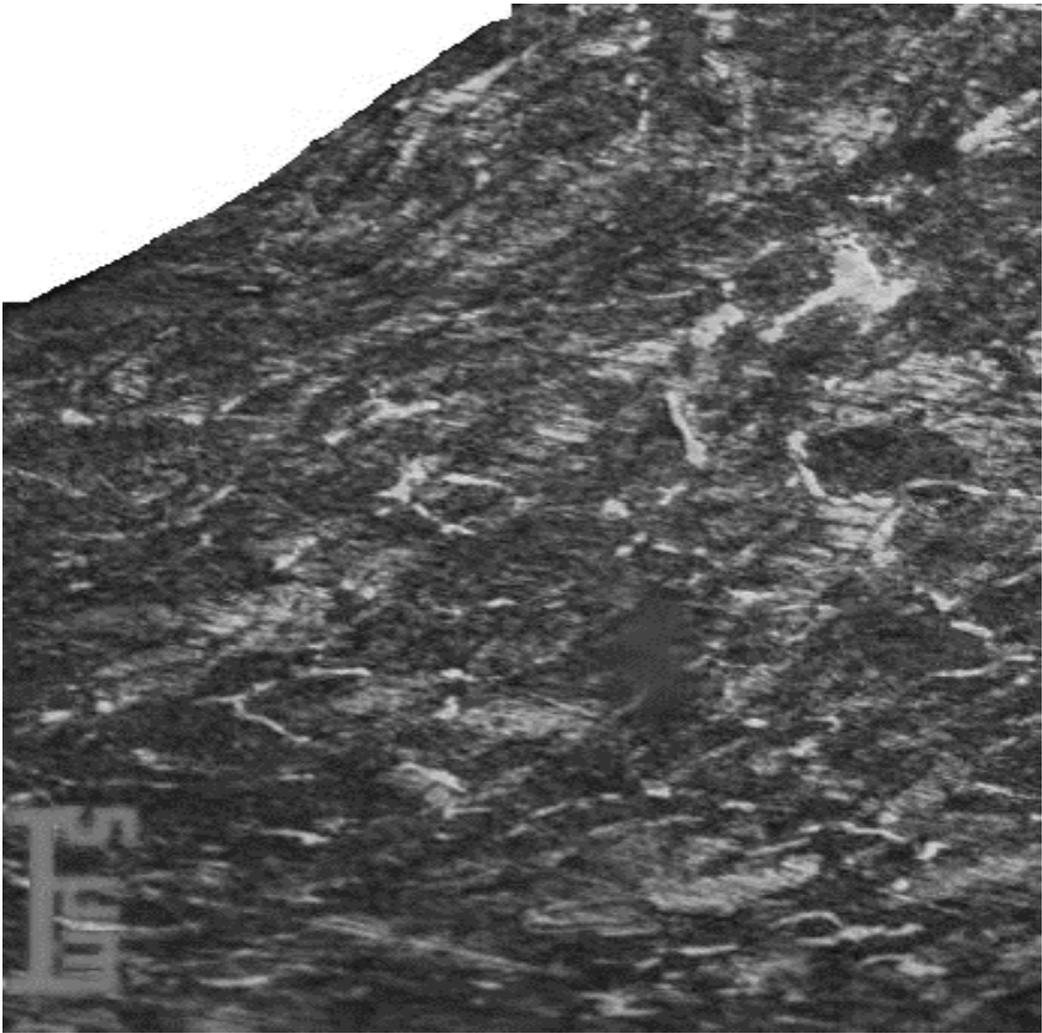
Температура испытаний, °С	Среднее значение твердости по зонам измерений, НВ				
	1	2	3	4	5
	Поверхность катания	Основной металл	Гребень, боковая поверхность	Около дефекта	
колесо					
+20	422	278	450	465	
-51	459	300	476	510	
рельс					
+20	418	368	335	541	
-51	470	389	351	575	

Для определения особенностей механизма образования такого специфического повреждения на поверхности катания бандажа локомотивного колеса, был использован метод металлографии и оптической микроскопии. В перпендикулярном поверхности катания сечении приповерхностного слоя бандажа железнодорожного колеса обнаружен участок с трещиной, направление роста которой меняется в пределах острого угла (~20°) (Рисунок 2.6). Образец был подвергнут предварительной полировке и травлению по стандартной для углеродистых сталей методике. При металлографических исследованиях микрошлифа вырезанного из реального бандажа, наблюдается значительная деформация зерен структуры металла в верхней части трещины (Рисунок 2.7).

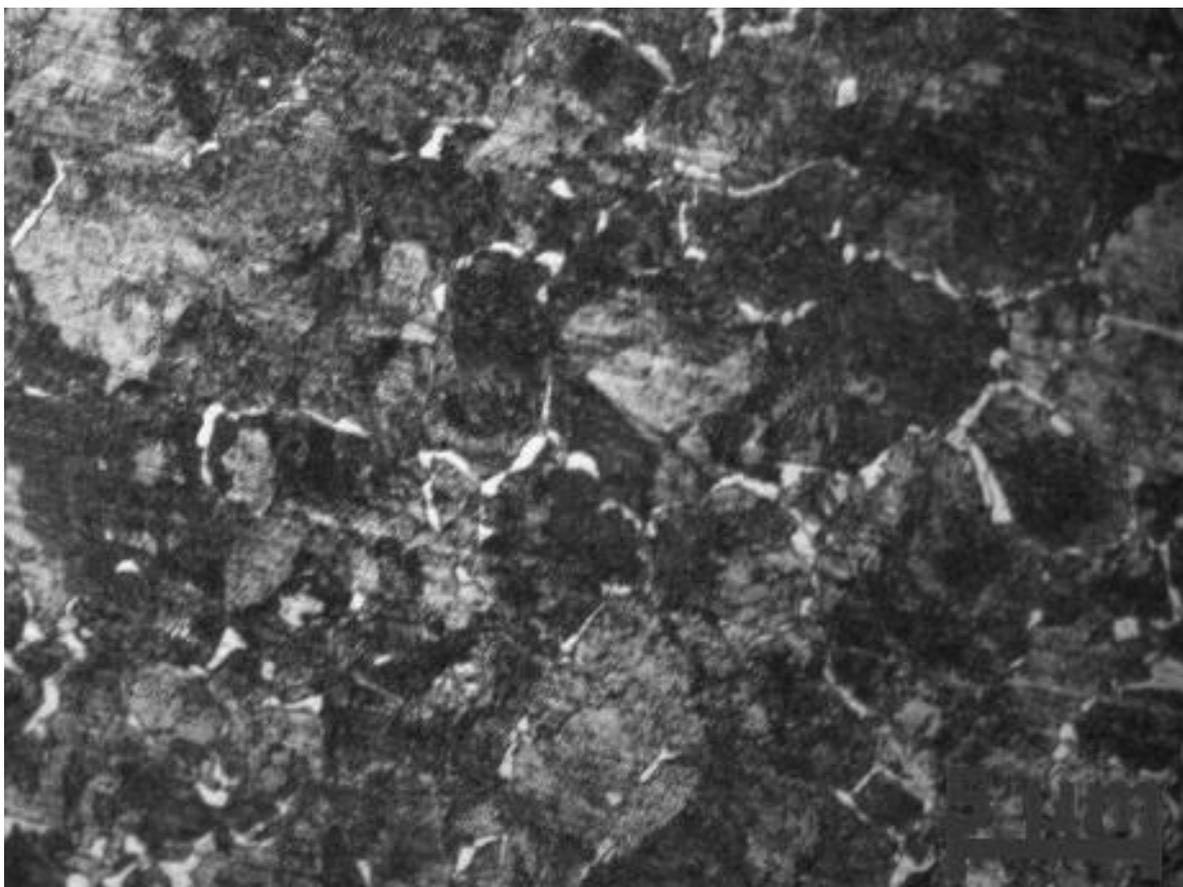


Рисунок 2.6 - Общий вид трещины в приповерхностном слое поверхности катания бандажа локомотивного колеса.

Трещина распространяется по направлению неметаллических включений и по границам зерен. На глубине 1,5-2 мм от поверхности деформированной структуры не наблюдается (рисунок 2.7). Образование и развитие анализируемой трещины идет недалеко от поверхности вдоль деформированной ударно-термическим воздействием структуры металла. Процесс накопления повреждений в материале бандажа локомотивного колеса завершается образованием макроскопической трещины, которая ведет к образованию дефекта в виде выкрашиваний и выщербин.



a)



б)

Рисунок 2.7 - Структура металла на верхней части трещины (а) нижней части шлифа на глубине 2 мм от трещины (б). Увеличение x500.

2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ. ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Образцы, изготовленные по ГОСТ 11150–84 [68] из материала фрагмента вырезанного бандажа локомотивного колеса, испытывали на одноосное растяжение. Чертеж образца показан на рисунке 2.8. Данные испытания проводились с целью исследования зависимости механических характеристик образцов от рабочей температуры и влияния низких температур на механические характеристики материала. Образцы для испытаний закреплялись в захватах разрывной машины «ZWICK/ROELL» германского производства, находящейся в Центре коллективного пользования ИФТПС СО РАН. Охлаждение образцов производилось путем подачи жидкого азота в криогенную камеру разрывной машины. При достижении внутри камеры температуры -50°C , подача азота приостанавливается. Каждый образец при заданной температуре был выдержан в течение 60 минут до начала растяжения.

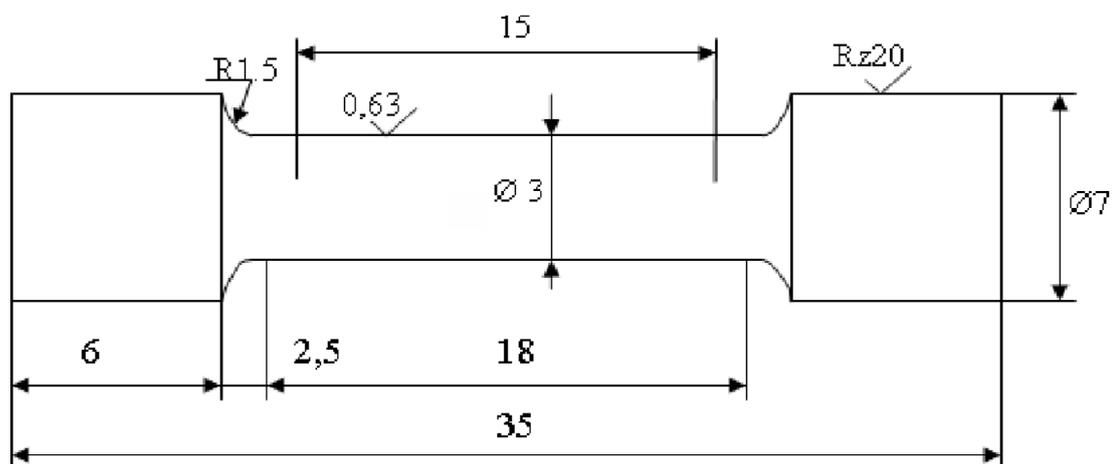


Рисунок 2.8 – Основные размеры цилиндрического образца, мм по ГОСТ 11150-84.

Цилиндрические образцы из материала бандажа локомотивного колеса, вырезали таким образом, чтобы продольная ось образца была параллельна плоскости поперечного сечения бандажа локомотивного колеса (рисунок 2.9).

Образцы с номерами с 1 по 6 вырезаны в зоне, прилегающей к поверхности катания бандажа локомотивного колеса, а с номерами с 7 по 12 - в нижней части (основной металл).

На первом этапе изготовления образцов из сегмента бандажа локомотивного колеса были вырезаны заготовки квадратного сечения, маркированные с торцовой стороны. На следующем этапе заготовкам придали заданную геометрию с помощью токарной обработки. Рабочий участок образцов был отполирован с чистотой обработки, соответствующей шероховатости не более 0,4 мкм.

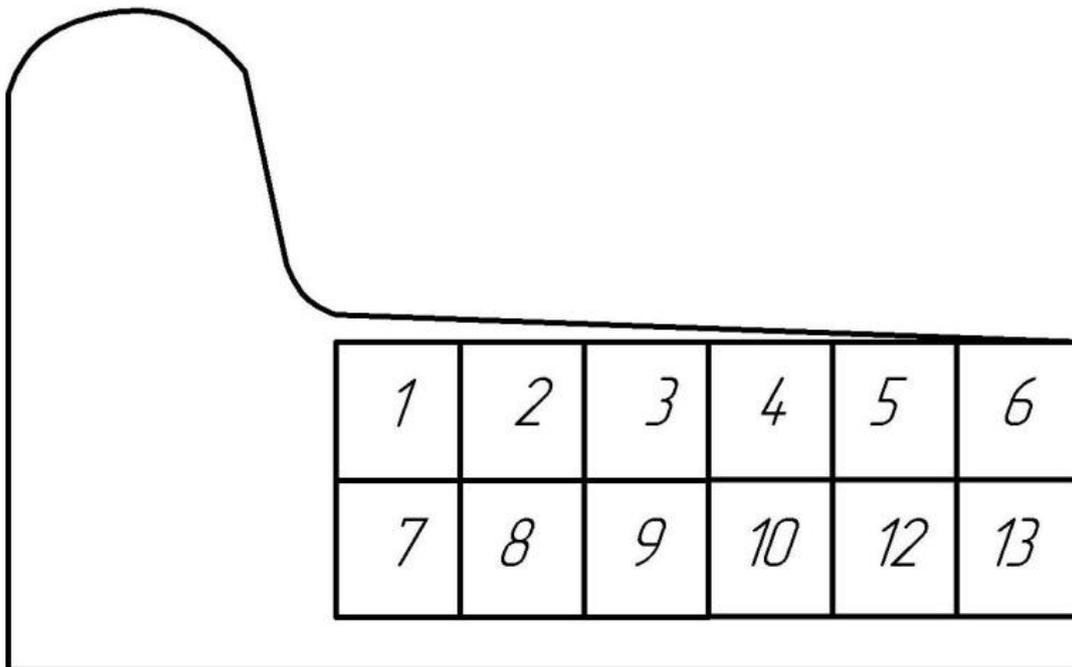


Рисунок 2.9 - Направление вырезки образцов из бандажа локомотивной колесной пары.

В результате испытаний цилиндрических образцов на растяжение при положительной температуре окружающей среды установлено, что в силу различий микроструктуры у поверхности катания и в нижней части бандажа локомотивного колеса, где находится зона основного металла, значения механических характеристик различаются. Наблюдается деформационное и термическое упрочнение металла колеса у поверхности катания. Относительное удлинение также соответственно падает.

В связи с тем, что при эксплуатации подвижного состава температура воздуха в зимний период на территории Республики Саха (Якутия) составляет -50°C , аналогичные испытания образцов из материала исследуемого бандажа локомотивного колеса были проведены при данной температуре. Результаты испытаний представлены в виде диаграммы деформирования образцов на рисунке 2.10, где видно, что предел прочности при температуре -50°C у поверхности катания практически не изменился, тогда как предел текучести σ_T существенно повысился.

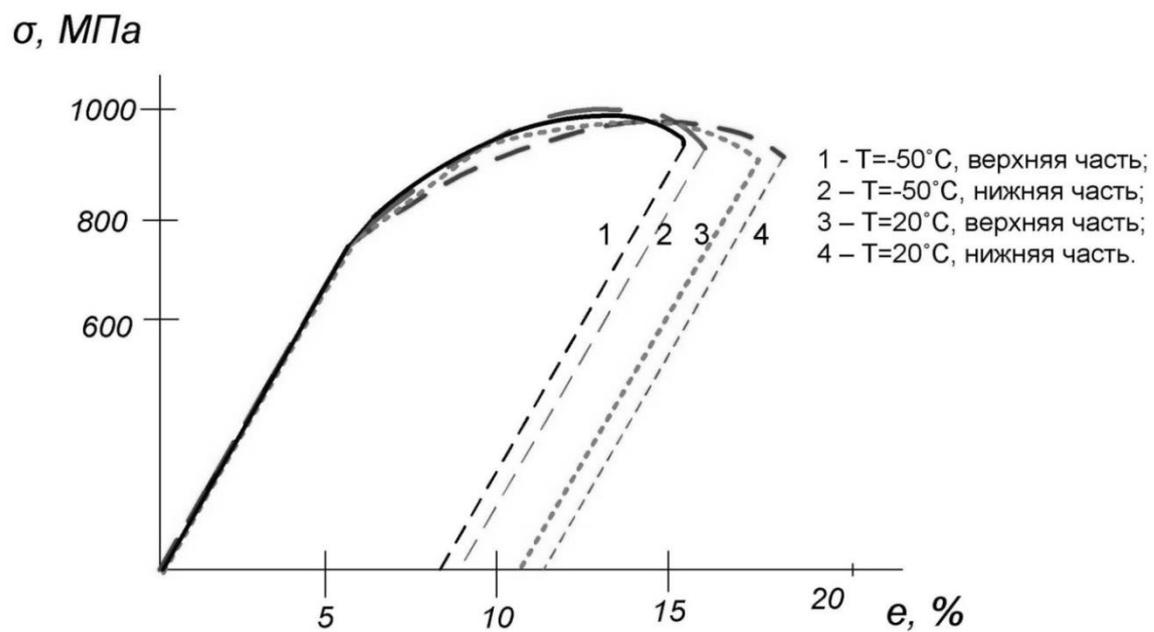


Рисунок 2.10 - Диаграмма деформирования образцов из материала бандажа локомотивного колеса при различных температурах испытаний.

Таким образом анализ полученных значений механических характеристик, приведенных в таблицах 2.5 и 2.6 показал, что значение предела текучести σ_T при рабочей температуре испытаний -50°C выше, чем при 20°C . Предел текучести характеризует сопротивление материала пластической деформации.

Таблица 2.5 - Механические характеристики образцов из металла нижней части бандажа при -50°C и при комнатной температуре.

При температуре -50°C					
№ образца	S_0	L_0	σ_T	σ_B	δ
7	12,57	26,0	747,61	1035,3	8,64
8	12,57	26,0	769,85	1135,21	8,93
9	12,57	26,0	749,77	1029,49	8,33
Среднее значение			755,74	1066,67	8,63
При комнатной температуре					
10	12,57	26,0	708,97	1067,77	10,61
11	12,57	26,0	686,12	1012,94	10,14
12	12,57	26,0	705,40	1030,90	10,09
Среднее значение			690,16	1037,2	10,28

Следовательно, при понижении температуры сопротивление материала пластической деформации повышается, тем самым, материал бандажа локомотивного колеса становится более хрупким. Механические характеристики образцов различаются в зависимости как от места расположения в бандаже локомотивного колеса, так и от рабочей температуры испытаний.

Таблица 2.6 - Механические характеристики образцов из металла зоны, прилегающей к поверхности катания, при -50 °С и при комнатной температуре.

При температуре -50°С					
№ образца	S ₀	L ₀	σ _T	σ _B	δ
4	12,57	26,0	775,07	1023,94	8,10
5	12,57	26,0	771,17	1052,22	7,89
6	12,57	26,0	776,70	1098,07	8,11
Среднее значение			774,31	1058,08	8,03
При комнатной температуре					
1	12,57	26,0	694,38	1025,78	10,79
2	12,57	26,0	714,17	989,75	10,45
3	12,57	26,0	695,83	997,97	11,24
Среднее значение			702,12	1004,5	10,28

В результате проведенных экспериментальных исследований, выявлено, что при низких климатических температурах сталь обладает достаточно высокими механическими характеристиками, у поверхности катания колеса наблюдается характерное повышение напряжения как пластического течения, так и разрыва, но заметно снижается ее пластичность - относительного удлинение стали падает приблизительно на 20%.

2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА УДАРНОЙ НАГРУЗКЕ. ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Вследствие того, что бандаж локомотивного колеса, в процессе эксплуатации, подвергается существенным ударным (динамическим) нагрузкам возникает необходимость определения сопротивления материала действию на него этих нагрузок. Распространенным методом определения сопротивления материала действию ударных нагрузок являются испытания на ударный изгиб. Разрушение образца с концентратором в виде V-образного надреза происходит при ударе маятникового копра. В результате испытаний определяют ударную вязкость, которая характеризует надежность материала, и его сопротивление хрупкому излому.

Для определения значения ударной вязкости из материала бандажа локомотивного колеса были вырезаны образцы для испытаний на ударный изгиб (рисунок 2.11). Образцы испытывались согласно ГОСТ 9454-78 [69] на маятниковом копре Zwick Roell (производства Германии) Центра коллективного пользования ИФТПС СО РАН.

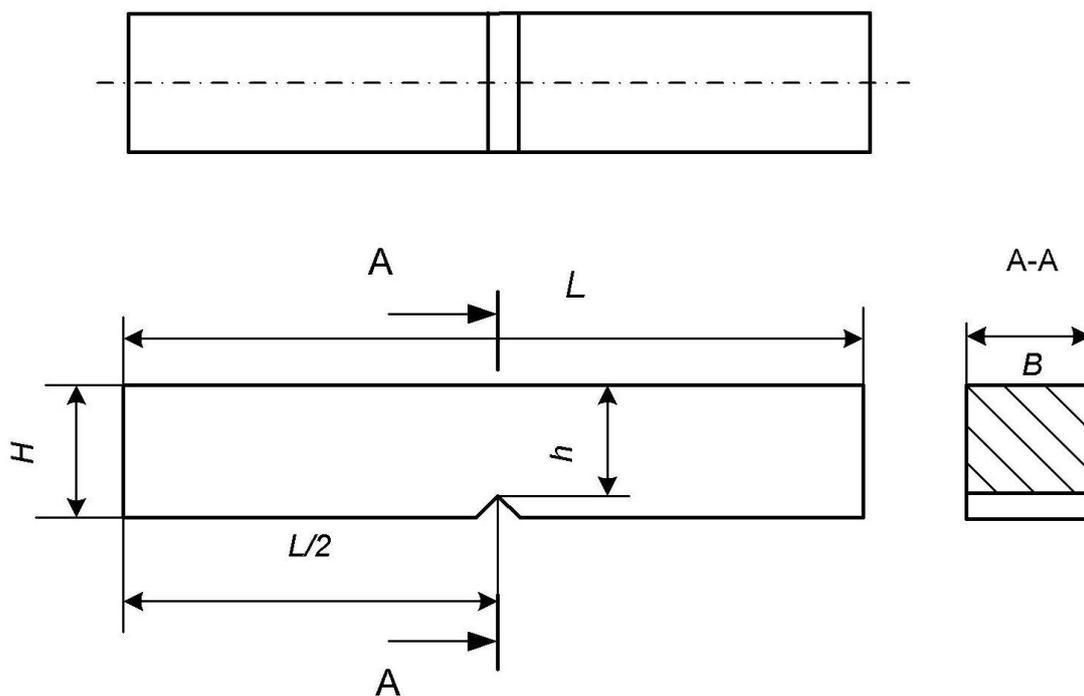


Рисунок 2.11 - Образец с V-образным надрезом для испытаний на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78.

Основные размеры образцов представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 Основные размеры образцов, мм.

Вид концентратора	Длина L , (предельное отклонение 0,6)	Ширина, B (предельное отклонение 0,1)	Высота, H (предельное отклонение 0,1)	Высота рабочего сечения h (предельное отклонение 0,05)
V-образный надрез	55	10	10	8

Поскольку, исследуемый узел железнодорожной техники эксплуатируется в широком диапазоне климатических температур, то принципиальным является исследование ударной вязкости материала данного узла, как при положительных (20°C), так и при отрицательных температурах (-20°C , -40°C , -60°C). Результаты испытаний представлены в таблице 2.8. Охлаждение образцов производилось в охлаждающей камере LAUDA master.

В интервале температур $+20$ и -20°C ударная вязкость исследуемого материала снижается незначительно. В интервале -20 и -60°C наблюдается резкое падение значения ударной вязкости, что представлено на рисунке 2.12.

Таким образом, ударная вязкость при температуре испытаний -60°C снижается в три раза, и, несмотря на то, что сталь обладает высокими механическими характеристиками, при понижении температуры материал практически теряет свои пластические свойства. В результате низкотемпературного вязко-хрупкого перехода снижается сопротивление материала действию динамических ударных нагрузок. Это обусловлено резким снижением подвижности основных носителей пластической деформации, - дислокаций, энергия активации которых падает ниже потенциального барьера пластического сдвига в данной структуре.

Таблица 2.8. - Результаты испытаний на ударную вязкость.

№ п/п	№ образца	Т _{образца} °С	KCV, Дж/см ²
1	1	-60	0,70
2	2		0,58
3	3		0,74
4	4		0,51
5	5		0,67
Среднее значение			0,62
6	6	-40	0,71
7	7		0,54
8	8		0,96
9	9		0,89
10	10		0,85
Среднее значение			0,79
11	11	-20	1,33
12	12		1,37
13	13		1,38
14	14		1,23
15	15		1,29
Среднее значение			1,32
12	16	20	2,29
13	17		1,75
14	18		1,69
15	19		1,72
16	20		1,64
Среднее значение			1,82

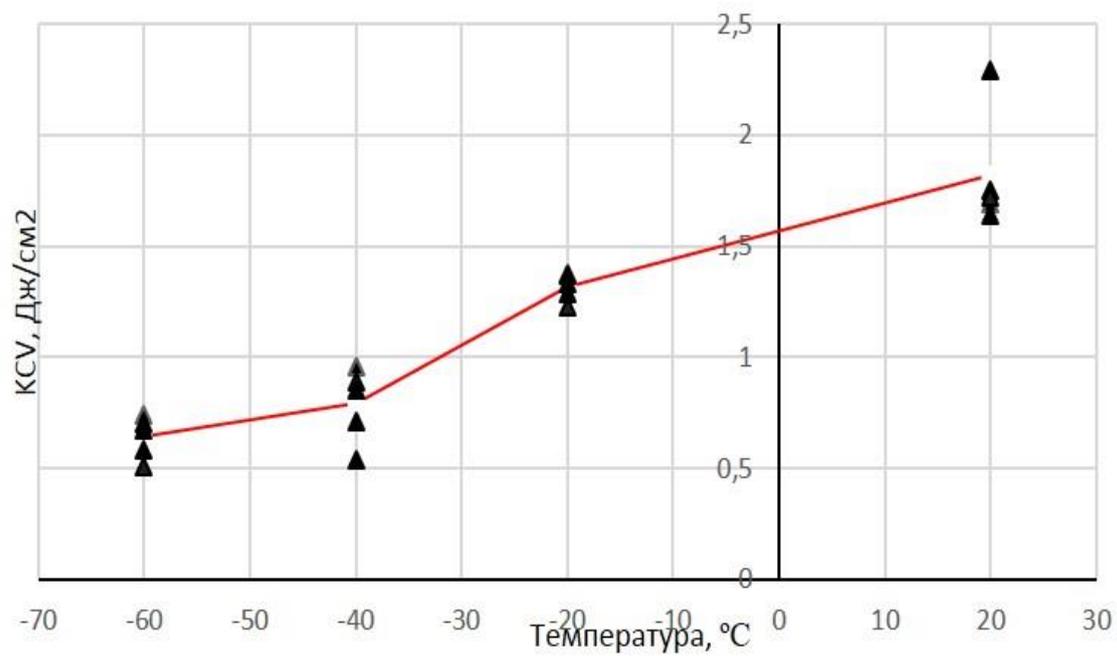


Рисунок 2.12 - Ударная вязкость материала бандажа локомотивного колеса.
 По оси x - температура испытаний $^{\circ}\text{C}$, по оси y - значение ударной вязкости,
 $\text{Дж}/\text{см}^2$.

2.5. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ БАНДАЖА ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА

Как показали проведенные эксперименты, истощению пластичности материала предшествуют повышение твердости и предела текучести, снижение относительного удлинения и резкое падение ударной вязкости при низких температурах. Следует отметить, что ударная вязкость характеризует энергию, затраченную на динамическое разрушение.

Кинетика изменения накопленной энергии поврежденности для сталей представлена в работах В.В. Федорова [70, 71], в которых показано, что в процессе усталостных испытаний происходит рост запасенной энергии до некоторого критического значения, при котором происходит разрушение материала. Теория прочности Федорова связывает разрушение с достижением внутренней энергией материала некоторого критического значения, называемого энергией активации разрушения. В целом при понижении температуры этот барьер будет достигаться позднее, а предел усталости - расти, что и подтверждается рядом экспериментальных исследований.

Однако снижение пластичности играет определяющую роль при динамическом, ударно-контактном виде нагружения. При низкой температуре происходит падение подвижности основных носителей пластической деформации, - дислокаций, и накапливаемая энергия сразу начинает переходить в дефекты – микропоры и трещины.

Таким образом, при низких климатических температурах требуется меньше затрат энергии на разрушение материала, особенно при динамическом ударном нагружении. Основным механизмом накопления повреждений и разрушения в данном случае является снижение критического значения внутренней энергии материала, необходимого для разрушения, и образование трещин. Так как в условиях низких температур сопротивление материала ударной нагрузке снижается более чем в три раза, то критическое значение внутренней энергии достигается быстрее.

В общем виде процесс накопления повреждений в бандаже локомотивного колеса можно представить следующим образом (рисунок 2.13):

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. 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 [4], 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 снижению ресурса колеса.

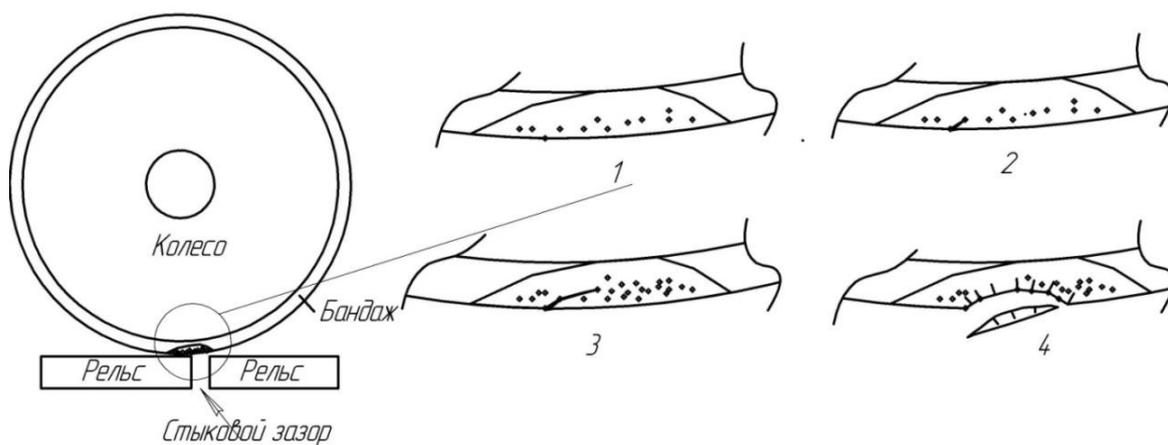


Рисунок 2.13 - Стадия зарождения и распространения трещины с дальнейшим выкрашиванием на поверхности бандажа локомотивного колеса:

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.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Анализ статистических данных показал, что из всего количества выхода из строя колесных пар, повреждения на поверхности катания составляют 42 %. Также, необходимо отметить, что в зимних и переходных (осень, весна) календарных периодах интенсивность образования таких повреждений возрастает. То есть подтверждается предположение о том, что дефектообразование имеет циклический и сезонный характер.

Из анализа измеренных значений твердости при положительных и отрицательных температурах воздуха следует, что твердость поверхностного слоя повышается при понижении температуры. Повышение твердости материала колеса и рельса приводит к снижению прочности колес при ударных нагрузках. Тем самым, поверхностный слой бандажа при минусовой температуре теряет свои пластические свойства. В числе мероприятий по повышению эксплуатационного ресурса за счет снижения износа рабочих поверхностей железнодорожного колеса и рельса, в настоящее время, приоритетным направлением является увеличение твердости материала. При эксплуатации в регионах с резко-континентальным климатом, необходимо учитывать то, что с повышением твердости материал колеса и рельса становится более хрупким. Увеличение твердости материала уменьшает интенсивность изнашивания колеса и рельса, но может привести к увеличению образования опасных поверхностных повреждений, в том числе и от ударного нагружения при прохождении рельсовых стыков.

В результате проведенных механических испытаний на растяжение цилиндрических образцов, определено, что хотя сталь и обладает достаточно высокими механическими характеристиками, при понижении рабочей температуры сопротивление материала пластической деформации повышается, однако относительное удлинение падает, и, таким образом, материал бандажа локомотивного колеса становится более хрупким.

Проведенные испытания на ударный изгиб показали, что в интервале температур +20 и – 20 °С ударная вязкость исследуемого материала снижается незначительно. В интервале -20 и -60 °С наблюдается резкое падение значения ударной вязкости. Значение ударной вязкости при температуре испытаний - 60 °С снижается более чем в три раза, следовательно, снижается сопротивление материала действию ударных нагрузок.

Установлено, что снижение пластичности играет определяющую роль при динамическом, ударно-контактном виде нагружения. При понижении температур происходит падение подвижности основных носителей пластической деформации, - дислокаций, и накапливаемая энергия сразу начинает переходить в дефекты – микропоры и трещины. Соответственно, при низких климатических температурах требуется меньше затрат энергии на разрушение материала, особенно учитывая динамический характер ударного нагружения. В механизме накопления повреждений и разрушения, в данном случае, основным фактором разрушения и образования трещин является снижение критического значения внутренней энергии материала.

В целом можно сказать, что проблема более высокой интенсивности образования поверхностных повреждений непосредственно связана с эксплуатацией данных элементов железнодорожной техники в условиях аномально низких климатических температур. Поверхностный слой с деформированной структурой при понижении температуры окружающей среды быстрее теряет свои пластические свойства, тем самым ускоряется процесс накопления повреждений. Дополнительно возникают большие ударно-контактные нагрузки вследствие увеличения стыкового зазора рельсов в зимний период, что может при неблагоприятных обстоятельствах привести к излому колеса и дальнейшему сходу поезда с рельсов, так как происходит удар по колесу, находящемуся в хрупком состоянии. Таким образом, локализация деформации у поверхности трещины приводит к более частым отколам, недопустимому росту дефектов, и снижению ресурса колеса.

ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В БАНДАЖЕ ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА

3.1 ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ.

В процессе эксплуатации бандажа локомотивного колеса, как отмечалось ранее, имеет место сложное взаимодействие двух видов нагружения многоциклового усталостного и малоциклового ударного. При моделировании накопления повреждений необходимо учесть последствия комплексного накопления повреждений от совместного действия контактной усталости и ударного нагружения. При определении поврежденности бандажа локомотивного колеса с учетом различных условий эксплуатации существует ряд трудностей и поэтому возникает необходимость внести различного рода упрощения и схематизацию реального процесса нагружения.

В процессе накопления повреждений в материале происходят необратимые изменения структуры вследствие движения и размножения дислокаций, появления и соединения вакансий, образования полос скольжения, развития микродефектов, разрыхления, упрочнения и разупрочнения. Причиной всех этих процессов, в основном, являются такие внешние факторы как: влияние климатических условий, параметры нагруженности, и другие условия эксплуатации.

Как известно, при понижении рабочей температуры происходит «охрупчивание» материала, следовательно, при низких климатических температурах имеет место хрупкое разрушение.

Как было отмечено выше, одной из причин образования выкрашиваний в подповерхностных слоях бандажа локомотивного колеса является накопление поврежденности в материале под действием ударной нагрузки между контактирующими телами, значение которой возрастает с понижением рабочих температур.

В результате воздействия любой нагрузки происходит первоначальный акт разрушения материала, т.е. развивается поврежденность, объем, степень и характер которого, в основном, зависит от механических характеристик материала, числа циклов, значений и вида прилагаемых напряжений, рабочих температур, и множества других факторов.

В этих условиях основываясь на концепции накопления повреждений Качанова-Работнова [76, 77], а также предполагая автомодельность процессов накопления повреждений в материале бандажа локомотивного колеса от многоциклового статического (усталостного, *fatigue*) и малоциклового ударного (*low-cycle*, существенно зависящего от температуры эксплуатации) нагружения, величина общей накопленной поврежденности Ψ выразится суммой Ψ_F и Ψ_L (величин поврежденности от усталостного многоциклового воздействия и ударно-контактного малоциклового). Тогда за N и K циклов соответствующих нагрузок величина накопленной поврежденности Ψ составит:

$$\Psi = \Psi_F + \Psi_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \psi_{Fi} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \psi_{Lk} , \quad (3.1)$$

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 ударно-контактной нагрузкой, учитывающей снижение ударной вязкости и локализацию пластических деформаций. В условиях низких температур именно воздействие ударного нагружения будет вносить наибольший вклад в накопление повреждений, за

счет падения пластичности, т.е. способности материала сопротивляться образованию трещин, оцениваемой испытанием на ударную вязкость.

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

$$\Psi_F = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta n}{N_i(T)}, \quad (3.2)$$

где Δn - количество циклов в единичном акте повреждения, $N_i(T)$ - предельное количество циклов (предел усталости) для данного материала.

Второе слагаемое в (3.1) 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:

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \int_0^{\varepsilon_{pj}} \frac{de_j}{\varepsilon_p(T)}, \quad (3.3)$$

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 (3.3). Более корректно

будет заменить деформацию J -интегралом по всему контуру действующих в окрестности возникающей трещины деформаций:

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \frac{\Delta J_j}{J_C(T)}, \quad (3.4)$$

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 [78]:

$$K_{IC} = \sqrt{0,1 \frac{E}{1-\mu^2} KCV} \quad , \quad (3.5)$$

где KCV – ударная вязкость материала, Дж/см². Здесь следует принять во внимание, что выражение (3.5) 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:

$$J_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{2G}, \quad (3.6)$$

где

$$G = \frac{E}{2(1-\mu^2)}, \quad (3.7)$$

В выражении (3.7) E – модуль упругости Юнга, μ – коэффициент Пуассона [79].

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

$$K_{Ieff} = \sqrt{\frac{E}{1-\mu^2} J_{Ij}}, \quad (3.8)$$

При сравнении выражений (3.6) и (3.7) приходим к выводу, что $J_{Ij} \approx 0,1 KCV$. Тогда:

$$\int_0^{J_{IC}} \frac{\Delta J_{Ij}}{J_{IC}(T)} = \int_{T_0}^{T_{\text{э}}} \frac{\Delta KCV(T)}{KCV_0} = \int_{T_0}^{T_{\text{э}}} \left(1 - \frac{KCV(T)}{KCV_0} \right), \quad (3.9)$$

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

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \int_{T_0}^{T_{\text{э}j}} \left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right), \quad (3.10)$$

где $T_{\text{э}j}$ – 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

дефектов дислокационного и недислокационного происхождения, содержащих водород [80,81]:

$$\frac{d\psi}{dt} = f(T, \sigma) \cdot \psi \cdot (1 - \psi) \quad , \quad (3.11)$$

В случае ударно-контактной усталости по рельсовым стыкам решение (3.10) может быть записано в виде:

$$\Psi_L = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \int_{T_0}^{T_{эj}} \left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right)^m , \quad (3.12)$$

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 (3.12) может служить приближённой оценкой общей поврежденности в условиях низких климатических температур.

С понижением эксплуатационных температур условие разрушения будет выглядеть следующим образом:

$$\Psi = \Psi_L = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \int_{T_0}^{T_{эj}} \left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right)^m = 1, \quad (3.13)$$

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

3.2 ОЦЕНКА НАКОПЛЕННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В БАНДАЖЕ ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР И УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Согласно результатам испытаний (см. глава 2, таблица 2.9), ударная вязкость *KCV* при температуре испытаний равной -60°C падает в три раза, следовательно, хотя и сталь обладает высокими механическими характеристиками, при понижении температуры уже ниже $-20-30^{\circ}\text{C}$ (а минимально рекомендованная температура для этой стали -40°C) материал претерпевает вязко-хрупкий 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.

На рисунке 3.1 представлена зависимость ударной вязкости от температуры после сплайновой аппроксимации.

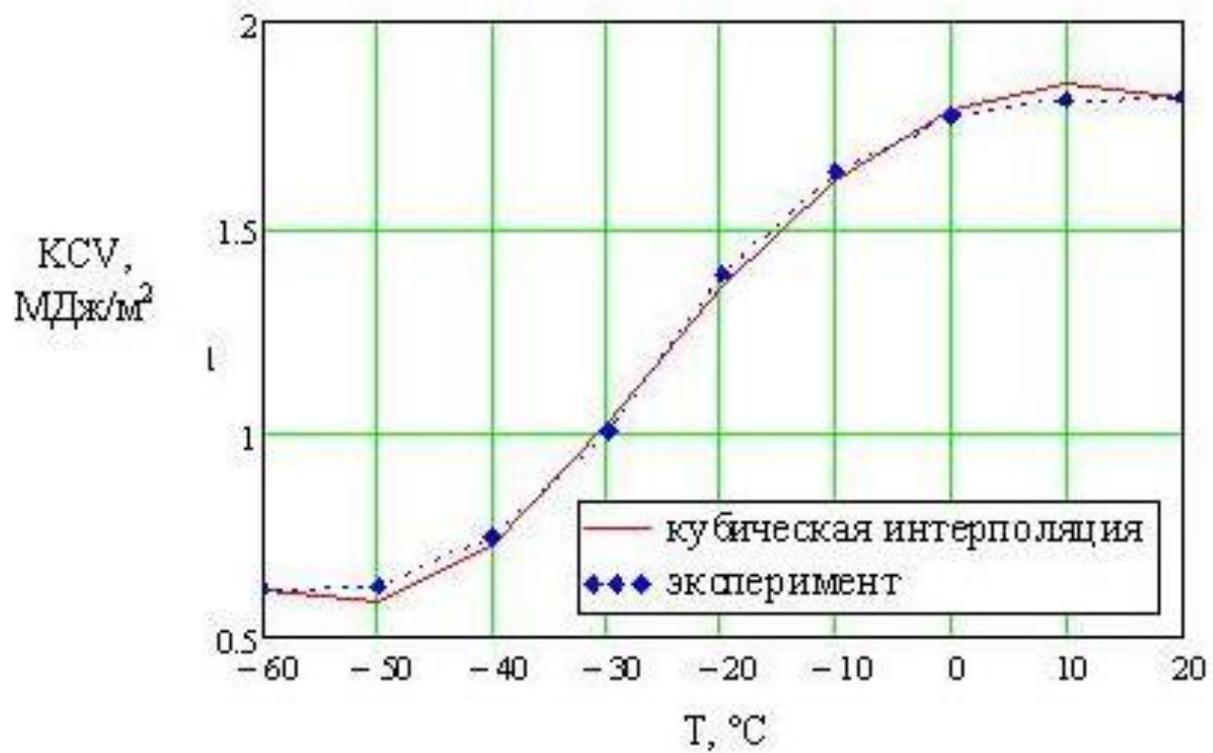


Рисунок 3.1 - Сплайн интерполяция зависимости значения ударной вязкости от температуры.

Уменьшение значения KCV при низких температурах испытаний говорит об ухудшении способности материала высвободить энергию пластических деформаций, и коррелирует с J_C , обретающей физический смысл, таким образом, как вязкость разрушения. При равных значениях температуры такая связь была получена, также экспериментально в работе [82] для высокопрочной жаростойкой стали.

В целях оценки накопления повреждений, использовались данные по температуре окружающей среды на эксплуатируемом участке железной дороги (рисунок 3.2).

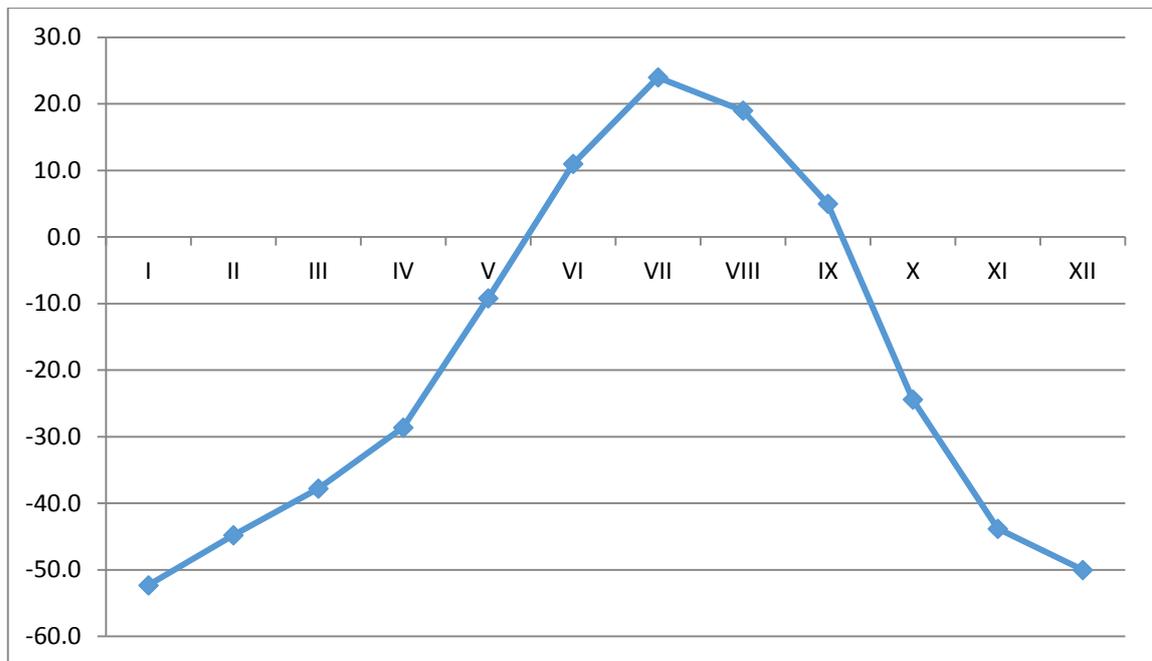


Рисунок 3.2 - Средние значения температуры окружающей среды по шкале Цельсия в г. Томмот РС (Я), предоставленные метеослужбой Республики Саха(Якутия). По оси *x*-месяц года; *y*-значение температуры.

Как видно из приведенного рисунка 3.2, перепады температуры окружающей среды в среднем составляют более $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 подвергается большой опасности, работая в неблагоприятной области с пониженной стойкостью к ударным нагрузкам, а также испытывая большие температурные напряжения. И именно в это время возрастает и величина этих нагрузок, ввиду температурного расширения компенсаторных промежутков между рельсами. Так что даже такое сопоставление не позволяет полностью оценить накопленную при эксплуатации поврежденность.

Тем не менее, элементы железнодорожной техники эксплуатируются и при самых низких температурах окружающей среды, поэтому в дальнейшем использовались и данные о минимальных температурах на участке Нерюнгри-Томмот (рисунок 3.3).

Значения минимальных температур окружающей среды на участке эксплуатации в основном отрицательные, и большей частью ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, таким образом, большую часть года элементы колеса эксплуатируются при пониженных значениях ударной вязкости. На рисунке 3.4 представлены вычисленные согласно сплайновой аппроксимации значения ударной вязкости материала бандажа локомотивного колеса, соответствующие минимальным температурам (рисунок 3.3). Значения ударной вязкости на рисунке 3.4 получены сплайн-интерполяцией по кривой, представленной на рисунке 3.1 с использованием программного комплекса Mathcad 14.0 (образовательная лицензия).

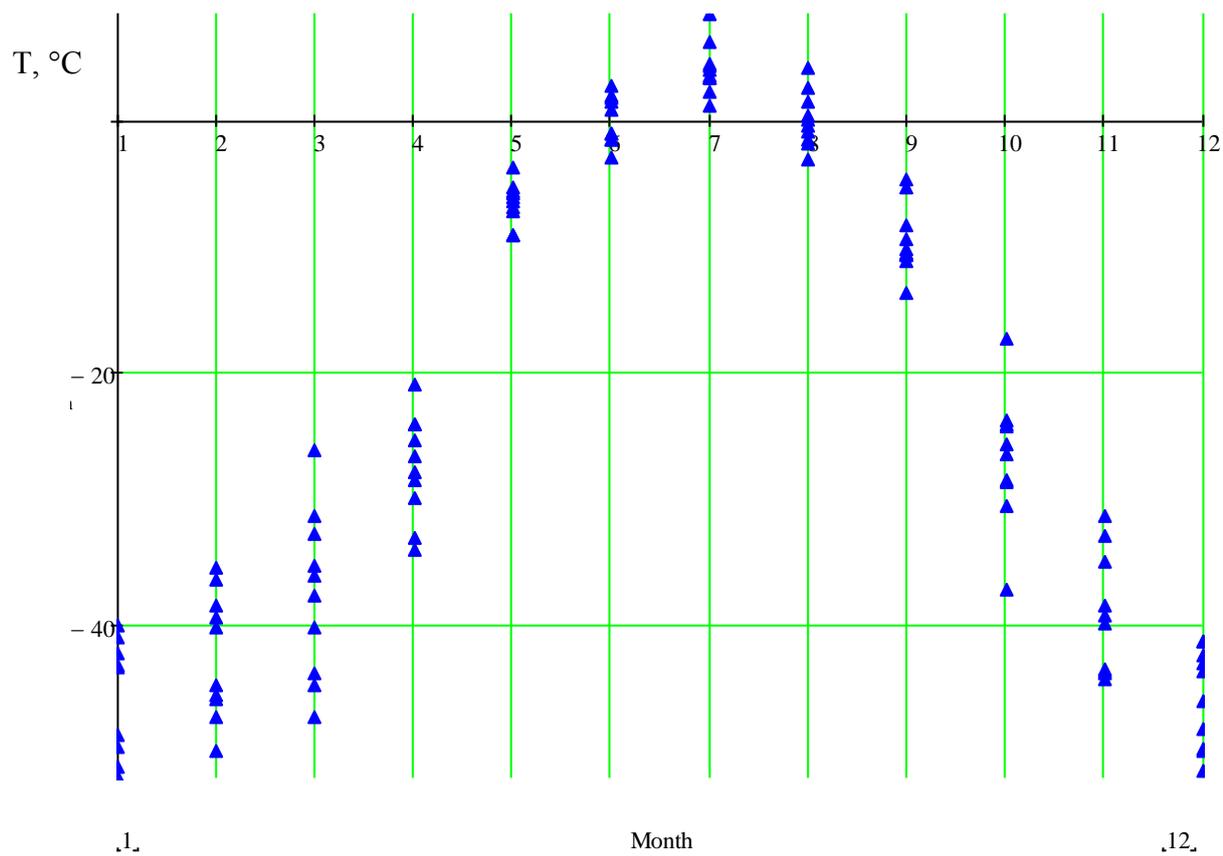


Рисунок 3.3 - Минимальные температуры окружающей среды на участке Нерюнгри-Томмот, предоставленные метеослужбой Республики Саха (Якутия). По оси ординат - значение температуры; по оси абсцисс - месяц года.

Таким образом, на основании проведенных исследований предложен критерий разрушения (3.13), учитывающий ударное воздействие при прохождении рельсовых стыков, чувствительное к снижению температуры эксплуатации.

С другой стороны, возможен учет геометрии образующихся при деформации бандажа колеса микротрещин, если принять во внимание следующую связь между энергетическим (J -интеграл) и деформационным (открытием трещины) критериями [83]:

$$J_C = m \cdot \sigma_{TD} \cdot \delta_C, \quad (3.14)$$

где σ_{TD} - динамический предел текучести; m - коэффициент, зависящий от вида напряженного состояния, для случая плоской динамической деформации $m = 1,6$; δ_C - критическое раскрытие трещины CTOD (crack tip opening displacement).

Критическое значение раскрытия трещины может быть выражено в виде [83]:

$$\delta_C = \frac{8\varepsilon_p l_0 \sigma_{TD} (1-\nu^2)}{\pi E}, \quad (3.15)$$

где $\varepsilon_p = (l - l_0)/l_0$; l, l_0 - текущая и начальная длина трещины с пластической зоной, ν - модуль Пуассона, E - модуль Юнга. С учетом (3.14) и (3.15) выражение (3.4) примет вид:

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \left(1 - \frac{e\sigma_{TD}^2}{e_{C0}\sigma_{TD0}^2} \right), \quad (3.16)$$

где $e = (l - l_0)$ и $e_{c0} = (l_c - l_0)$ – ширина пластической зоны [84], l_c – критическая длина трещины. С помощью оптической микроскопии была определена критическая длина развивающейся трещины, соответствующая отколу – около 10 мм. Изучена также новая трещина, зарождающаяся на глубине 2 мм под отколом, длиной 340 микрон. Пластическая зона вокруг новой трещины определяется остаточной деформацией зёрен, и примерно соответствует 70-100 мкм, вырастая для откола до 2 мм. Таким образом, принимая $l_0=0,42$ мм, $l_c=12$ мм, получаем среднее подрастание трещины за цикл около 20 нм. Динамический предел текучести будет сильно зависеть от температуры, что затрудняет подсчет поврежденности. Тем не менее, расчёт по соотношению (3.16), как уточненный по сравнению с (3.13), легко выполним в случае установления связи характеристик ударной вязкости KCV и динамической текучести σ_{TD} .

Ударная нагрузка от рельсовых стыков, значительно ухудшает условия работы, что ведет к зарождению многих опасных дефектов наряду с усталостью металла и может привести к полному отказу колеса в эксплуатации и стать причиной крушения поезда. Если учесть, что длина железнодорожного рельса на участке в среднем составляет 20 м, то может быть рассчитано количество циклов до разрушения от ударно-контактного нагружения. Зимой ресурс колеса от одной обточки до другой составляет всего два месяца, за каждый из которых оно пробегает в среднем 5500 километров (в основном декабрь-февраль и январь-март). Ремонт занимает около одного месяца, и включает обточку бандажа всех колес, независимо от индивидуальных повреждений. Усталостный износ в зимнее время практически отсутствует, количество циклов $K=5,5 \times 10^5$, что соответствует малоцикловой усталости.

В настоящем же исследовании осуществлен подсчет поврежденности, накопленной в бандаже локомотивного колеса, учитывающий влияние низких температур на снижение пластичности согласно (3.13), что выражено

зависимостями ударной вязкости на соответствующем участке железной дороги (рисунок 3.4): $\Psi=0,851$.

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 России.

Для подтверждения недопустимости эксплуатации колес из одного того же материала в условиях Крайнего Севера и средней полосы России, необходимо учесть температурные условия эксплуатации и оценить, таким образом, разницу в процессах накопления повреждений в различных климатических зонах. Для этого воспользуемся данными Гидрометцентра РФ, например, в Московской области (рисунок 3.5).

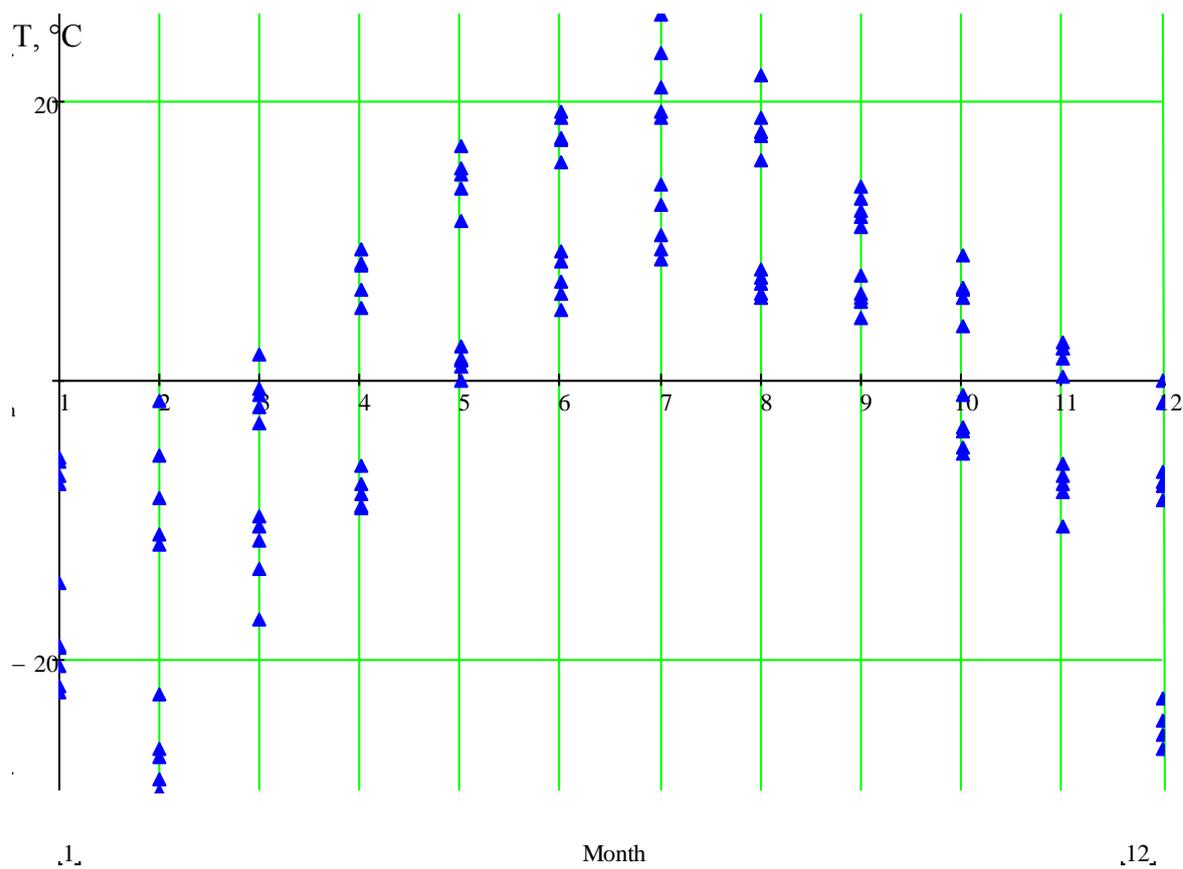


Рисунок 3.5 - Средние и минимальные температуры окружающей среды в Московской области за 2008-2012 гг., по данным Гидрометцентра РФ. По оси ординат - значение температуры; по оси абсцисс - месяц года.

Воспользовавшись кривой на рисунке 3.1, получим значения KCV для значений температуры, приведенных на рисунке 3.6. Значения ударной вязкости на рисунке 3.6 получены сплайн-интерполяцией по кривой, представленной на рисунке 3.1 с использованием программного комплекса для ЭВМ Mathcad 14.0 (образовательная лицензия).

В данном случае вычисление поврежденности по (3.13) дает величину $\Psi = 0,364$, что примерно в два 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) будут отличаться еще больше. Опыт эксплуатации показывает снижение срока службы колес в условиях Республики Саха (Якутия) в три раза.

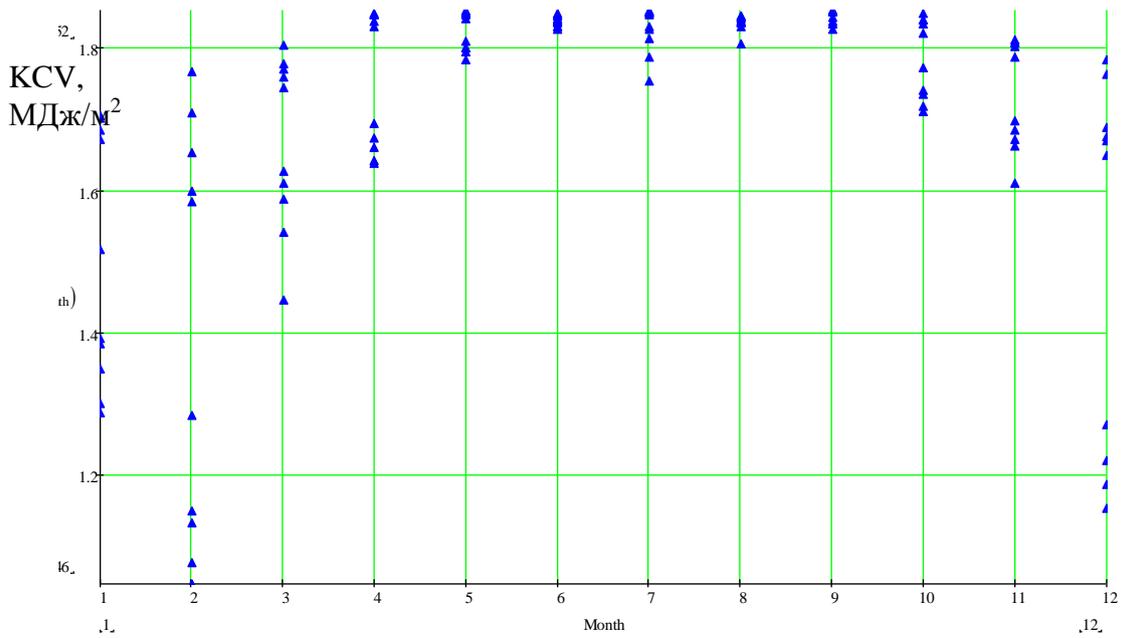


Рисунок 3.6 - Вычисленные значения ударной вязкости, соответствующие средним и минимальным температурам в Московской области. По оси ординат – значение ударной вязкости; по оси абсцисс – месяц года

Для наглядности представим средние значения минимальных температур окружающей среды участка эксплуатации Нерюнгри-Томмот и Московской (соответствующие рисункам 3.3 и 3.5.) в виде графика (рисунок 3.7).

На рисунке 3.8 представлены усредненные значения ударной вязкости, соответствующие рисункам 3.4 и 3.6.

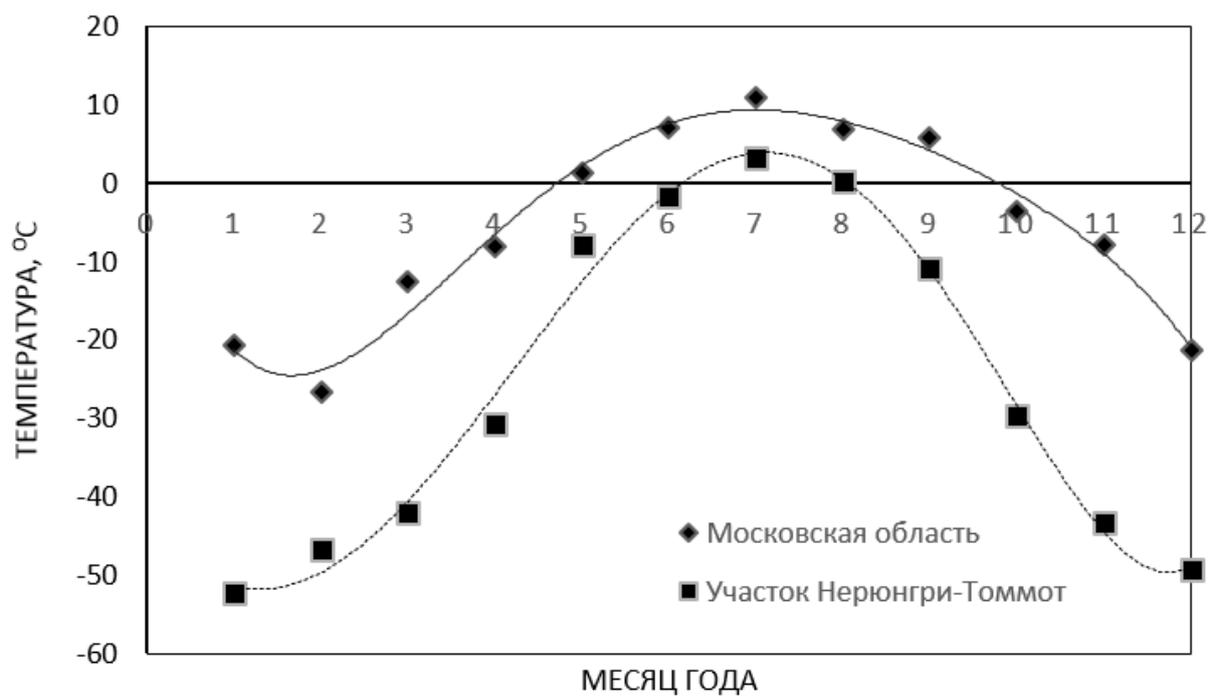


Рисунок 3.7. Средние значения минимальных климатических температур участка эксплуатации Нерюнгри – Томмот и Московской области.

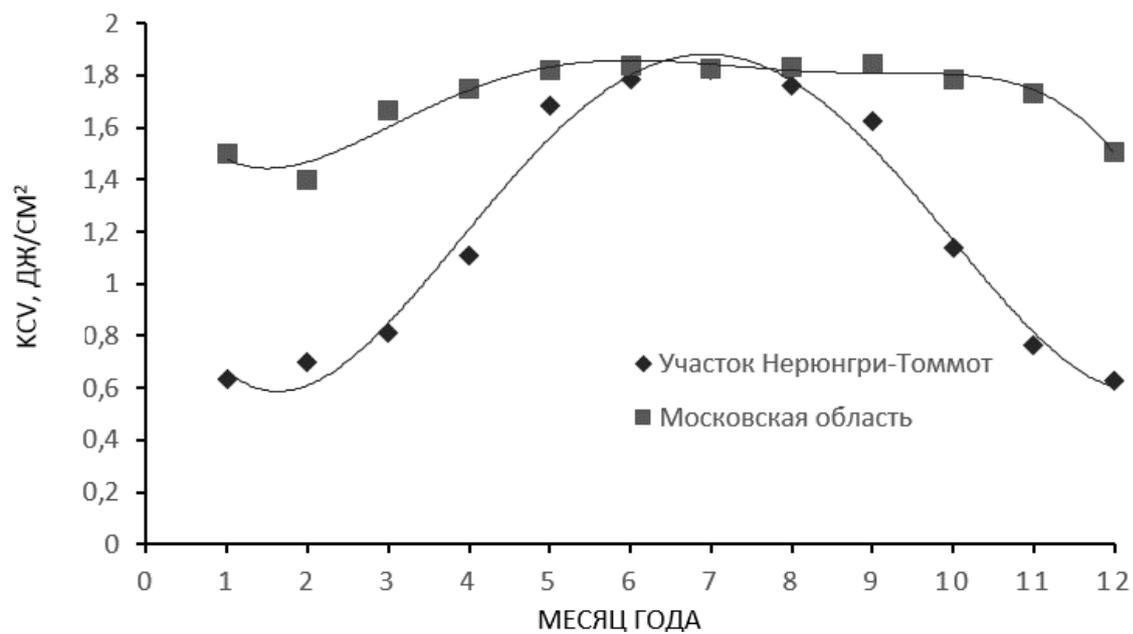


Рисунок 3.8. Средние значения ударной вязкости, соответствующих минимальным температурам участка Нерюнгри-Томмот и Московской области.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

На основании проведенных экспериментальных и расчетных исследований и модели накопления повреждений предложен критерий разрушения Ψ , учитывающий как усталостный характер разрушения, так и ударное воздействие при прохождении рельсовых стыков, чувствительное к снижению температуры эксплуатации.

Предложен подход, в котором с помощью численной аппроксимации рассчитаны значения ударной вязкости, соответствующие минимальным температурам региона по календарным месяцам. С помощью него при эксплуатации техники может быть спрогнозирован рост накопленных повреждений и снижение ресурса в зависимости от климатических условий.

Произведен расчет накопленной поврежденности в бандаже колеса, с учётом влияния низких температур на снижение пластичности, в результате которого установлено, что в регионах с умеренным климатом накопленная поврежденность почти наполовину ниже, чем на территории Крайнего Севера.

Таким образом, поврежденность бандажа локомотивного колеса за указанный период только лишь от ударного воздействия по стыкам рельс достигает значительной величины от предельной, и ресурс колеса, таким образом, вырабатывается намного раньше, чем при эксплуатации в регионах с более умеренным климатом, например, в средней полосе России.

В условиях низких климатических температур на процесс накопления общей поврежденности Ψ значительное влияние оказывает снижение пластичности материала, измеряемое величиной ударной вязкости материала, тогда как усталостная составляющая остается практически неизменной и даже снижается. При этом напряженно-деформированное состояние колеса в зоне контакта с рельсом будет также становится более жестким, за счет увеличения зазора между рельсами при низкой температуре эксплуатации.

4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА БАНДАЖА ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА

Одной из самых сложных задач, непременно, является определение достаточно точного ресурса различных машин и конструкций, от начала их эксплуатации до перехода в предельное состояние. Особенно важным моментом является проблема индивидуальной оценки ресурса машин и конструкций по результатам наблюдения за их состоянием в процессе эксплуатации, что позволит сформировать технические задачи в области диагностирования объектов, оптимизировать финансовые затраты, а также позволит изготовить детали и узлы с оптимальным ресурсом в зависимости от условий их эксплуатации.

В современной постановке задачи определения ресурса элементов различных конструкций применяются два основных подхода в виде математического моделирования и различного рода экспериментальных методов. Каждый из которых обладает определенными преимуществами и недостатками.

Используя метод математического моделирования можно в зависимости от объема информации разработать модели с достаточно высокой точностью, которые позволяют определять ресурс деталей, узлов, элементов и машин в целом конструкций. При определении ресурса объектов, работающих в режиме постоянного нагружения с применением математических моделей, можно получить результаты с высокой точностью. Однако, оценка ресурса объектов, работающих в режиме переменного нагружения, значительно усложняет математический аппарат.

Также, существует метод имитационного (ситуационного) моделирования, который представляет собой логико-математическое описание исследуемого объекта при этом алгоритм функционирования реализуется в виде программного комплекса для компьютера, целях проектирования, анализа и оценки функционирования объекта. Одним из

распространенных видов такого моделирования является трехмерное конечно-элементное моделирование.

Методы экспериментального подхода позволяют воспроизводить условия работы машин и конструкций, максимально приближенные к реальным, такие испытания требуют существенных временных и финансовых затрат на изготовление опытного образца и экспериментального оборудования.

Ресурс элементов железнодорожной техники определяют следующие основные моменты: производственные (заводские) факторы, которые воздействуют на ресурс при изготовлении деталей и узлов; эксплуатационные факторы, соответственно сказываются на ресурсе в процессе эксплуатации; ремонтно-восстановительные факторы, которые действуют на ресурс при проведении ремонта и восстановления деталей и узлов условиях депо или завода.

Повышение ресурса колес необходимо вести путем разработки и внедрения научно-обоснованных технических систем и подходов управления жизненным циклом системы «колесо-рельс». Современное состояние проблемы показывает, что ресурс колеса и рельса повышается путем увеличения значения твердости материалов контактирующих поверхностей, без системного научно-обоснованного подхода к анализу условий эксплуатации, производственных и ремонтно-восстановительных аспектов данной проблемы.

В работе [85] предложен следующий подход к оценке срока службы колес в общем случае при котором ресурс колеса определяется отношением полного допустимого эксплуатационного износа, то есть уменьшения диаметра колеса по кругу катания к фактическому коэффициенту α для данного колеса и условий эксплуатации. Значение полного допустимого износа, на железных дорогах Европы составляет 25 - 35 мм и включает в себя «чистый» износ, который возникает в результате эксплуатационного взаимодействия рельса, и потери металла, связанные с технологическими

операциями по восстановлению профиля и удалению дефектов на поверхности катания. Коэффициент α и его значение зависит от таких параметров, как твердость, структура, термообработка материала, геометрические характеристики колеса, геометрические параметры и профиль рельса. Немаловажную роль при этом играют конструктивные и динамические параметры подвижного состава.

Это можно выразить как:

$$DRV = \sum \frac{PU - DEF_i}{\alpha}, \quad (4.1)$$

где DRV — ресурс колеса по пробегу, км; PU — допустимый износ, мм; DEF_i - снятие металла при i -той обточке, мм [85].

Однако, численное определение коэффициента α в данной работе не указано. Более того, предложенная модель основывается на случайных величинах, и ее достоверность в значительной степени зависит от наличия обширной базы данных. Предполагается, что используя данную модель можно получить удовлетворительные результаты при накопления объема информации в течение 3 - 4 лет по подвижному составу, годовой пробег которого составляет более 200 тыс. км.

4.1. РАСЧЕТ РЕСУРСА БАНДАЖА ЛОКОМОТИВНОГО КОЛЕСА

В данное время ресурс колес подвижного состава, в том числе и бандажа локомотивного колеса, в основном рассчитывается по износу гребня и поверхности катания. Недостатком существующего подхода к расчету ресурса, является то, что в них не учитываются повреждения контактно-усталостного характера на поверхности катания. Таким образом, в современной постановке задачи определения ресурса бандажа локомотивного колеса не существует метода определения ресурса, учитывающего контактные повреждения и воздействие низких климатических температур эксплуатации.

При эксплуатации элементов железнодорожной техники, в частности бандажа локомотивного колеса имеют место повторяющиеся циклы нагружения. В данном случае возникает необходимость рассчитать количество циклов до разрушения (образования недопустимого выкрашивания или откола на поверхности катания).

Цикл нагружения в процессе накопления усталостных повреждений упрощенно можно представить, как единичный контакт радиального сечения колеса с рельсом за один оборот. То есть за один оборот колесо испытывает один цикл нагружения. Тогда, количество циклов N на один километр пути будет равно 303 циклов на 1 км, при среднем диаметре колеса равному 1050 мм.

При проведении работ по исследованию поврежденности колесных пар локомотивного парка ОАО АК «Железные дороги», пробег тепловозов между обточками по причине образования на поверхности катания бандажей локомотивных колес недопустимых дефектов в виде выщербин и выкрашиваний различного рода составляет в среднем 12 000 км. Тогда количество циклов на 12 тыс. км составит:

$$N = 303 \times 12 \times 10^3 \approx 3,636 \times 10^6.$$

Очевидно, что материал колеса накапливает повреждения, близкие к пределу усталости для данной стали, эксплуатируемой в условиях низких температур.

В то же время, число ударно-контактных повреждений по стыкам рельсов, учитывая среднюю длину одного рельса в пути равную 20 м, будет равно: $N_I = 12 \times 10^6 / 20 = 6 \times 10^5$, что соответствует малоцикловому повреждению.

Экспериментально определить характеристики контактно-усталостной долговечности колёсных сталей представляется достаточно сложной задачей. В исследованиях, проведенных в работе [34] представлено вычисление предела контактно-усталостной выносливости материала железнодорожного колеса. Который соответствует максимальным контактным давлениям по Герцу 1000 МПа. В работе [37] получены значения контактно-усталостной прочности колёсной стали в виде кривой, с помощью которой можно определить число циклов до разрушения в зависимости от критерия, характеризующего напряжённое состояние в площадке контакта.

Во многих работах таким критерием является максимальное касательное напряжение. Еще Н.М. Беляевым установлено, что на некоторой глубине от поверхности катания существуют наибольшие касательных напряжений [72]. Основываясь на его исследования С.П.Тимошенко, Vand, Schimtter и другие положили в основу причин выкрашивания поверхности зубчатых колес [73] «теорию наибольших касательных напряжений», действующих под углом 45° к центральной линии. Известно, что повреждения контактно-усталостного характера образуются и при отсутствии существенных дефектов материала [34] на определенной глубине от поверхности катания, где возникают максимальные эквивалентные напряжения.

В качестве примера рассчитаем количество циклов с использованием кривой контактной усталости, которая аппроксимировалась функцией [37]:

$$N = 2,603 \cdot 10^{11} \tau_{DV}^{-2,5}, \quad (4.2)$$

где τ_{DV} - эквивалентное напряжение, базирующееся на критерии Данг Вана; N - число циклов до разрушения.

Значения эквивалентных напряжений τ_{DV} , по критерию Данг Вана, для точек с наибольшими значениями τ_{max}^a , которые при соответствующих уровнях нагрузки определяются по формуле [37]:

$$\tau_{DV} = \tau_{max}^a + a_{DV} \sigma_0, \quad (4.3)$$

где τ_{max}^a - переменные напряжения, вызывающие повреждения материала образца при их определённом уровне; σ_0 - отрицательное гидростатическое давление, возникающее в точках, расположенных в площадке контакта, $\sigma_0 = 0,387p_0$ [37]; a_{DV} - соответствует коэффициенту чувствительности материала к асимметрии цикла переменных напряжений. В зависимости от предела прочности материала образца при температуре -50°C , $\sigma_B = 1058$ МПа (определено в Главе 2) его значение принято равным 0,2 [74]

В круговом контакте при максимальном давлении $p_0 = 1000$ МПа точка с наибольшими касательными напряжениями τ_{max} , равная $0,32p_0$, располагается на оси z , проходящей от центра контактного пятна, на глубине $0,5a$, где a - радиус пятна контакта [75]. Нормальные напряжения в ней равны $\sigma_x = \sigma_y = 0,18p_0$, $\sigma_z = -0,8p_0$.

Подставляя полученные данные в формулу 4.4 полученную в работе [37], получим значение эквивалентного напряжения:

$$\tau_{DV} = \tau_{max}^a + a_{DV} \sigma_0 = \frac{1}{2} 0,32p_0 - 0,2 \cdot 0,387p_0 = 82,6 \text{ Мпа} \quad (4.4)$$

То есть, можно считать, что при условиях низких климатических температур, цикл считается повреждающим, если напряжения τ_{DV}

превышают значение 82,6 МПа. Далее определим число циклов до разрушения N по формуле 4.2, $N = 4,2 \cdot 10^6$.

Однако следует отметить, что расчет по данной методике не отражает реальных условий эксплуатации в районах Крайнего Севера. Во-первых, в условиях низких климатических температур требуется меньше энергии и силы удара для достижения критического значения энергии разрушения. Во-вторых с понижением температуры предел прочности σ_B не снижается, и имеет повышенное значение от которого напрямую зависит значение a_{DV} аналогичное коэффициенту чувствительности материала к асимметрии цикла переменных напряжений. Следовательно, результаты расчета предельного количества циклов по данному методу в условиях низких климатических температур искажаются. В этих условиях возникает необходимость рассчитать предельное количество циклов до разрушения (образование выщербины или откола), учитывающее сезонное снижение температур эксплуатации бандажа локомотивного колеса.

На основе проведенных в данной работе экспериментальных, эксплуатационных и расчетных исследований предложена методика оценки ресурса для бандажа локомотивного колеса по схеме, приведенной на рисунке 4.1:

- по формуле (3.13) определяется накопленная поврежденность в ободе локомотивного колеса.
- проводится расчет количества циклов при условии, что когда $\Psi=1$ достигается предельное состояние материала.
- вычисляется пробег локомотива в километрах, с учетом длины одного рельса ~ 20 м.
- определяется ресурс бандажа локомотивного колеса, с учетом числа обточек n за весь жизненный цикл колеса.

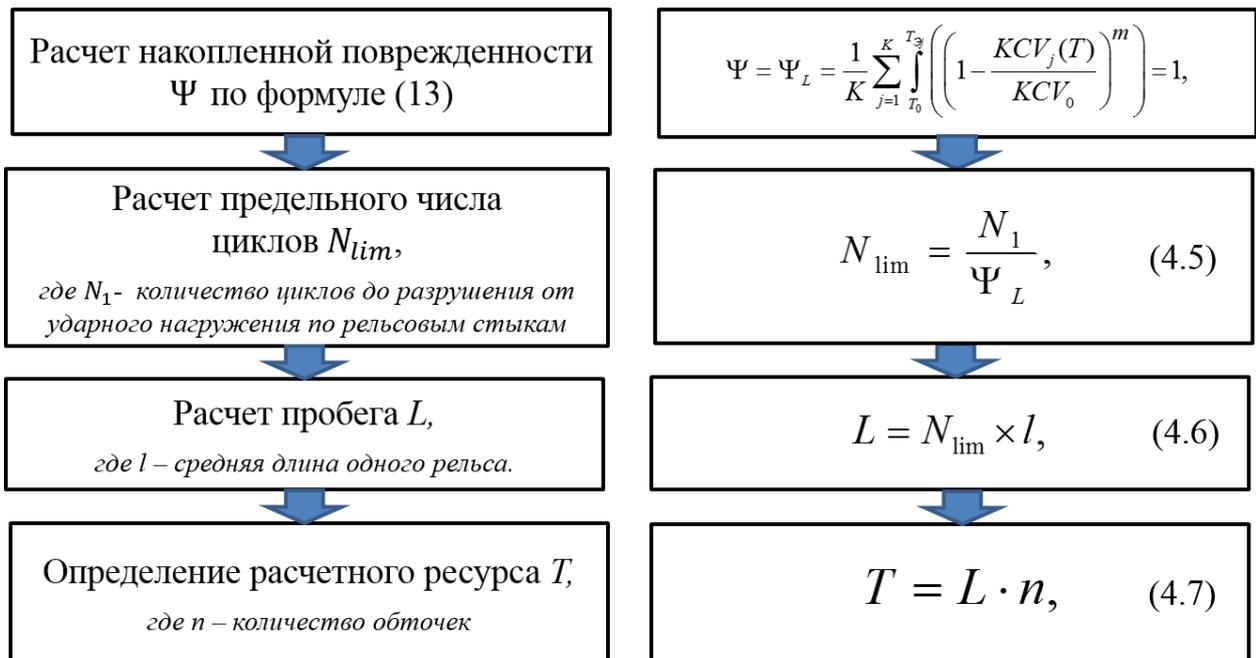


Рисунок 4.1 - Схема методики расчета ресурса бандажа локомотивного колеса.

С использованием вышеописанной методики оценки поврежденности и ресурса бандажа локомотивного колеса был проведен расчет ресурса бандажа локомотива, эксплуатируемого на железной дороге Республики Саха (Якутия). В соответствии с приведенной схемой определим следующее:

1. Мера накопленной поврежденности, рассчитанная по формуле (3.13), составит $\Psi=0,853$, что соответствует числу циклов ударного нагружения по стыкам рельсов $N_l = 6 \times 10^5$.

2. Тогда, при условии достижения предельной меры повреждений $\Psi= 1$, наступает разрушение материала, и количество циклов по формуле (4.5) станет равным $N_{lim} = 7,05 \times 10^5$.

3. Далее, согласно (4.6) 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 $T = 112\ 808$ км (4.7).

Таким образом, расчет ресурса бандажа локомотивного колеса позволил определить пробег до момента образования поверхностного повреждения браковочного размера и за весь жизненный цикл. Расчетный пробег составил 112 808 км, что 3 раза меньше, чем пробег бандажа в регионах с умеренным климатом и меньше гарантированного заводом-изготовителем пробега для нового бандажа почти в 5 раз.

4.2 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДИКИ. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

В результате экспериментальных и расчетных исследований, проведенных в данной работе установлено, что причиной возрастания интенсивности образования повреждений на поверхности катания бандажа локомотивного колеса является истощение пластических свойств и снижения сопротивления материала от воздействия ударных нагрузок при прохождении рельсовых стыков в условиях низких климатических температур.

Исходя из вышеприведенных рассуждений, можно предложить следующую схему определения ресурса бандажа локомотивного колеса (рисунок 4.2):

1. Сбор эксплуатационных данных:

1.1. Обследование колесных пар локомотивов, проходящих плановый и текущий ремонты. При обследовании необходимо описать вид дефекта, его расположение, размеры, измерить твердость в различных зонах поверхности катания.

1.2. Определение эксплуатационного пробега колесных пар до образования на поверхности катания бандажа локомотивного повреждения недопустимого размера.

2. Определение механических свойств материала:

2.1. Согласно ГОСТ 11150-84 проводятся механические испытания на гладких образцах для определения следующих механических свойств материала: σ_B , σ_T , δ (Температура испытаний +20 и -50°C).

2.2. По ГОСТ 9454-78 проводятся испытания на ударный изгиб в диапазоне температур от +20 до -60°C. Определяется значение ударной вязкости KCV .

2.3. По результатам испытаний определяется зависимость ударной вязкости KCV материала от рабочей температуры.

2.4. Расчет меры накопленной поврежденности в бандаже локомотивного колеса, с учетом влияния низких температур на снижение пластичности с использованием следующей зависимости (3.13):

2.5. Определение расчетного ресурса по представленной методике (рисунок 4.1).

3. Сравнение расчетных и эксплуатационных данных.

Представим алгоритм использования предложенной методики определения ресурса бандажа локомотивного колеса, с использованием эксплуатационной температуры в качестве расчетного фактора в виде блок-схемы (рисунок 4.2):



Рисунок 4.2 - Блок - схема определения ресурса бандажа локомотивного колеса.

Для изготовления бандажей локомотивных колес с 1981 г. используется сталь марки 2. Данная сталь углеродистая, низколегированная с ферритно-перлитной структурой. Для повышения износостойкости бандажной стали используют увеличение содержания углерода в ней, что улучшает прочностные характеристики материала (твердость, предел прочности, предел текучести), но наряду с этим снижает пластические свойства (относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость). При эксплуатации бандажа локомотивного колеса в условиях низких климатических температур большое значение имеет пластичность, т.е. вязкость материала контактирующих элементов железнодорожной техники. Как известно, при одинаковых значениях твердости материала показатели пластических свойств можно повысить с помощью вариации размеров и формы структуры материала. В частности, вязкость стали можно повысить путем легирования и.т.д.

Следовательно, добиться повышения механических характеристик стали для бандажей локомотивных колес, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур нужно посредством тщательно подобранной термической обработки (закалка, отпуск) и легированием. Улучшение качества колес и их механических свойств материаловедческими способами является основным аспектом для увеличения сопротивляемости колес контактно-усталостным повреждениям в условиях низких климатических температур.

Важно отметить, что при внедрении в производство железнодорожных колес новых марок в условиях низких климатических температур можно с использованием вышеописанной методики исследований подобрать элемент железнодорожной техники с оптимальными характеристиками. Также предложенная методика определения ресурса позволит спрогнозировать достижение предельной поврежденности данного узла, что позволит оптимизировать и спланировать финансовые расходы на содержание колесных пар.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Обоснована необходимость расчета предельного количества циклов до разрушения (образование выщербины или откола), учитывающее сезонное снижение температур эксплуатации бандажа локомотивного колеса.

Предложена методика оценки ресурса для бандажа локомотивного колеса, основанная на проведенных в настоящей работе экспериментальных, эксплуатационных и расчетных исследований.

Произведен расчет предельного количества циклов до образования на поверхности катания повреждения, недопустимого размера N_{lim} , определен пробег локомотива L , соответствующий предельному количеству циклов.

С использованием данной методики была проведена оценка ресурса бандажа локомотивного колеса, эксплуатируемого в условиях Крайнего Севера, за весь жизненный цикл, который равен 112 808 км, что намного меньше чем фиксируемый пробег бандажа в регионах с умеренным климатом и меньше гарантированного заводского пробега для нового бандажа в 6 раз.

Таким образом, обоснованная экспериментальными исследованиями расчетная методика определения ресурса бандажа позволяет спрогнозировать остаточный ресурс такого наиболее важного с точки зрения безопасности движения элементов железнодорожной техники, как локомотивное колесо и колесная пара локомотива в целом.

Приведены рекомендации по применению разработанной методики.

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 повреждённых бандажей локомотивных колёс 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, который равен 600 тыс. км 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.

Следует отметить, что в современной перспективе развития транспорта на Дальнем Востоке и в Сибири результаты работ в области прогнозирования жизненного цикла локомотивных колес в экстремальных климатических условиях позволяют значительно повысить показатели безопасности и экономической эффективности таких проектов за счет уменьшения расходов, связанных с возрастанием риска отказов, и в целом снижают угрозу безопасности движения.

Акционерная компания
"ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ
ЯКУТИИ"
Открытое акционерное общество



"САХА СИРИН ТИМИР
СУОЛА"
Акционерная компания
Аһаҕас акционернай общество

ИНН 1435073060 КПП 144950001
р/сч 40702810276270000236
в Якутское отделение №8603 ОАО
«Сбербанк России» г.Якутск
БИК 049805609
к/сч 30101810400000000609
ОКПО 40822893

ул. Маяковского, 14, г. Алдан,
Республика Саха (Якутия), 678900
тел.(41145)3-22-56, факс(41145)3-05-93
e-mail: info@rw-y.ru

от 13.03.14 № 46
на № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов

Результаты диссертационной работы Григорьева Альберта Викторовича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в производственной деятельности ОАО АК «Железные дороги Якутии» в виде:

1. Методики проведения экспериментальных исследований по сбору и анализу информации о техническом состоянии колесных пар тепловозов локомотивного парка предприятия ОАО АК «Железные дороги Якутии» г. Алдан Республика Саха (Якутия) для оценки поврежденности в условиях низких климатических температур.
2. Экспериментальных данных по определению механических характеристик материала, сопротивления ударной нагрузке, описания механизма разрушения бандажа локомотивного колеса в условиях низких климатических температур.
3. Критерия разрушения, учитывающего как усталостный характер разрушения, так и ударное воздействие при прохождении рельсовых стыков, чувствительное к снижению температуры эксплуатации.
4. Методики оценки ресурса бандажа локомотивного колеса и рекомендаций по применению разработанной методики.

Использование указанных результатов позволяет оценить реальное техническое состояние бандажей колесных пар с учетом их эксплуатации в условиях низких климатических температур, рассчитать эксплуатационный ресурс данного узла в зимний календарный период. Оптимизировать время и расходы на текущее содержание колесных пар.

Заместитель
генерального директора



Д. Д. Трофимов

САХА РЕСПУБЛИКАТЫН
АНАЛ ҮӨРЭХТЭЭНИН,
КААДЫРДАРЫ БЭЛЭМНЭЭНИН УОННА
АТТАРАН ТУРУОРУУ
МИНИСТИЭРИСТИБЭТЭ

«ТРАНСПОРТНАЙ ТЕХНИКУМ»
САХА РЕСПУБЛИКАТЫН
ГОСУДАРСТВЕННОЙ БЮДЖЕТНОЙ
ТЭРИЛТЭТЭ



МИНИСТЕРСТВО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ,
ПОДГОТОВКИ И РАССТАНОВКИ КАДРОВ
РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)
«ТРАНСПОРТНЫЙ ТЕХНИКУМ»

678080, РС(Я), М-Кангаласский улус, п.Н-Бестях, ул.Ленина 40/1, тел(факс) (41143) 47-457, ttmb2011@yandex.ru

АКТ о внедрении результатов

Результаты диссертационной работы **Григорьева Альберта Викторовича**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в образовательной деятельности ГБУ РС (Я) «Транспортный техникум» в виде:

1. Экспериментальных данных по исследованию изменений механических характеристик и структуры материала бандажа локомотивного колеса в условиях низких климатических температур;
2. Методик оценки поврежденности и ресурса бандажа локомотивного колеса в условиях низких климатических температур.

Результаты работы включены в материал лекций учебной дисциплины «Конструкция и техническая эксплуатация подвижного состава»

Эффект внедрения: Повышение уровня знаний студентов по данным разделам учебной программы.

Заместитель директора
по УПР

/ И. В. Нестеров/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хеллан К. Введение в механику разрушения: Пер. с англ. / Хеллан К. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
2. Партон В.З. Механика разрушения: От теории к практике. Изд. 2-е. / В. З. Партон. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 240 с.
3. Кривцов А.М. Деформирование и разрушение твердых тел с микроструктурой. / А. М. Кривцов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 304 с.
4. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности / Л. Р. Ботвина; отв. ред. И. И. Новиков; Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. – М.: Наука, 2008. – 334 с.
5. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография. / И. Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.
6. Махутов Н.А. Проблемы разрушения, ресурса и безопасности технических систем. / Н.А. Махутов. – Красноярск: Гарда, 1997. - 519 с.
7. Серенсен С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. / С. В. Серенсен. – М.: Атомиздат, 1975. - 192 с.
8. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, В. А. Огарев, А. Л. Квитка и др. – К.: Вища шк., 1986 г. – 775 с.
9. Коллинз Дж. Повреждение материалов и конструкций. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. / Коллинз Дж. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
10. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
11. Болотин В.В. Объединенные модели разрушения и их применение к прогнозированию ресурса. / Болотин В. В. // Физ-хим. механика материалов. – 1982. – № 3– С. 3-11.

12. Работнов Ю.Н. Механизм длительного разрушения. / Ю.Н. Работнов // В кн. «Вопросы прочности материалов и конструкций». – М.: Изд-во АН СССР, 1959.

13. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. / В. Т. Трощенко. – Киев: Наук.думка, 1981 – 344 с.

14. Усталость и выносливость металлов. / М.: Изд. иностр. лит., 1963. – 497 с.

15. Карзов Г.П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. / Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. – СПб.: Политехника, 1993. – 391.

16. Матвеев В.В.. К обоснованию использования деформационных критериев многоциклового усталостного разрушения металлов. Сообщение 1. Анализ известных подходов. / В. В. Матвеев // Проблемы прочности. – №5 – 1994 – С. 11-12.

17. Панин В.Е. Влияние сдвиговой устойчивости кристаллической структуры поликристаллов на механизм их усталостного разрушения на мезомасштабном уровне / Т. Ф. Елсукова, Г. В. Ангелова, С. В. Сапожников. // Физическая мезомеханика. – №2 – 1998 – С. 48-50.

18. Панин В.Е. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, П. В. Макаров и др.// – Новосибирск: Наука, 1995, - т. 1. – 298 с.

19. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. / Т. Екобори – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.

20. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

21. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. / В. П. Когаев – М.: Машиностроение, 1993. – 364 с.

22. Weibull W. A statistical theory of the strength of materials. / Weibull W// Proc. Roy. Swed. Inst. Eng. Res. – 1939. – №.151.– P.1-45.

23. Когаев В. П. Статистическая методика оценки влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости./ В.П. Когаев, С. В. Серенсен// Заводская лаборатория. – 1962. – №1. – С.79-87.
24. Волков С. Д. Статистическая теория прочности. / С. Д Волков. – М.: Машгиз, 1960. – 176 с.
25. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел / С. Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1968. – №3. – С. 46-52.
26. Иванова В. С. Природа усталости металлов. / В. С. Иванова, Ф. М Терентьев. – М.: Металлургия, 1976. – 456 с.
27. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность. / И. А. Одинг. – М.:Машгиз, 1962. – 260 с.
28. Федоров В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. / В. В. Федоров. – Ташкент: изд-во ФАН Узбекской ССР, 1985. – 168 с.
29. Регель Р. В. Кинетическая природа прочности твердых тел. / Р. В. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский – М.: Наука, 1974. – 560 с.
30. Владимиров В.И. Дисклинация в кристаллах. / В. И. Владимиров, А. Е. Романов. – Л.: Наука, 1986. – 224 с.
31. Хирт Дж. Теория дислокаций. / Дж. Хирт, И Лоте. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.
32. Чекина О. Г. Моделирование разрушения приповерхностных слоев при контактировании шероховатых тел/ О. Г. Чекина // Прочность и пластичность. – 1996. – Т.1. – С. 181-191.
33. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. / И. Г. Горячева – М.: Наука, 2001. – 478 с.
34. Захаров С. М. Контакт-усталостные повреждения колес грузовых вагонов. / С. М. Захаров – М.: Интекст, 2004. – 160 с.
35. Марков Д. П. Трибология и её применение на железнодорожном транспорте / Д.П. Марков. – М.: Интекст, 2007. – 408 с.

36. Школьник, Л.М. Повышение стойкости вагонных колёс в эксплуатации карбонитридным упрочнением стали / Л.М. Школьник, Д.П. Марков, Ю.С. Пройдак и др. // Вестник ВНИИЖТ. – 1994. – №6. – С. 40-44.

37. Сакало А. В. Контактно-усталостная прочность колесной стали. / А. В. Сакало. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 2. – С. 35-41.

38. Колмогоров В. Л. Ударное нагружение твердых тел: обзор и новая теория: пер. Е. Е. Верстаковой. / В. Л. Колмогоров, У. Джонсон, С. Р. Рид, Г. Г. Корбетт; Под ред. В. Л. Колмогорова. – Екатеринбург.: УрО РАН, 2006. – 321 с.

39. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Ж. Коган: Под. ред. М. Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.

40. Кислик В. А. Выбор стали для вагонных колесных пар. / В. А. Кислик, А. И. Кармазин // Железнодорожный транспорт. – 1965. - №8. – С. 24-25.

41. Ларин Т. В. Исследование механизма износа, усталостного выкрашивания, образования выщербин и наволакивания на поверхности катания цельнокатаных колес. / Т. В. Ларин // Труды ВНИИЖТа. – 1977 - Вып.58 – С.51-68.

42. Силкокс Л. А. Влияние повышения веса и скорости поезда на подвижной состав. / Л. А. Силкокс. – М.: Трансжелдориздат, 1947. – 255 с.

43. Коган А. Я. Расчет нестационарного напряженно-деформированного состояния рельсового стыка. / А. Я. Коган, Ю. Л. Пейч. // Вестник ВНИИЖТ. – 2002 – № 2 – с. 31-39.

44. Данилов В. Н. Расчет рельсовой нити в зоне стыка. Труды ВНИИЖТ. Вып. 70./ В. Н. Данилов. – М.: Трансжелдориздат, 1952. – 113 с.

45. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. / А. Я. Коган. – М.: Транспорт, 1997. – 326 с.

46. Беляев Н. М. Местные напряжения при сжатии упругих тел / Н. М. Беляев. // Труды по теории упругости и пластичности. - М.: Гостехиздат. - 1957. - с. 57 - 145

47. Воробьев А. А. Исследование напряженного состояния пятна контакта колеса и рельса /А. А. Воробьев, П. Г. Сорокин // Новые материалы и технологии в машиностроении. - Брянск: БГИТА. - 2004. - т. 3. - с. 8-18.

48. Яковлев В.Ф. Исследование контактных напряжений колеса и рельса под действием вертикальных и касательных сил. / В. Ф. Яковлев. // Труды ЛИИЖТ. – 1962. - Вып.187. - с. 3-89.

49. Яковлев В.Ф. О применимости теории Герца-Беляева к расчету контактных напряжений в боковых выкружках головки рельса и гребне колеса. / В. Ф. Яковлев. // Труды ЛИИЖТ. – 1963. - Вып. 210. - с. 121-123.

50. Ахметзянов М. Х. Исследование контактных напряжений в железнодорожных рельсах методом фотоупругих составных моделей. / М. Х. Ахметзянов, В. Н. Агуленко // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений. - 1982. - с. 61-67.

51. Александров А.Я. Определение контактных напряжений в железнодорожных рельсах с помощью метода компенсирующих нагрузок. / А. Я. Александров, В. В. Шушунов // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений. – 1984. – с. 5-8.

52. Дувалян С. В. Аналитическое определение напряжений в диске цельнокатаного колеса. / С. В. Дувалян. // Вестник ЦНИИ МПС. – 1960. - № 3. - с. 36-40.

53. Йонссон С. Расчет колес железнодорожного подвижного состава на цифровых вычислительных машинах. / С. Йонссон. // Ежемесячный бюллетень Международной ассоциации ж.-д. конгрессов. – 1967. - № 5. - с. 72-81.

54. Наумов И. В. Прочность прессовых соединений и напряжений элементов колесных пар вагонов. / И. В. Наумов, Н. И. Мартынов, В. Н. Гудков - М.: Транспорт, 1969. - 104 с.

55. Есаулов В. П. Определение напряжённого состояния вагонных колёс при помощи МКЭ. / В. П. Есаулов, А. В. Сладковский, В. В. Токарев // Вопросы совершенствования конструкций и технического содержания вагонов: Межвуз. сб. научн. тр. - ДИИТ Днепропетровск. - 1991. с. 7 - 12.

56. Меланин В. М. Удар колеса о рельс: нагрузки и деформации. / В. М. Меланин // Мира транспорта. - 2010 - №3 - с. 20-25.

57. Харрис У. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса. Перевод с англ. / У. Харрис, С. Захаров, Д. Ландгрэн, Х. Турне, В. Эберсон. - М.: Интекст, 2002. - 416 с.

58. Кудрявцев Н. Н. Исследование динамики необрессоренных масс вагонов. / Н. Н. Кудрявцев. // Труды всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта –1965 – Вып. 287.

59. Махутов Н. А. Метод оценки механического состояния материала рельсов после длительной эксплуатации. / Н. А. Махутов, Л. А. Сосновский, А. А. Кебилов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2007. - Т. 73, № 8. - с. 49-54

60. Морозов Е. М. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. / Е. М. Морозов, М. В. Зернин. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 544 с.

61. Ишков А. М. Математическая ритмология в работоспособности техники на Севере. / А. М. Ишков – Якутск: Изд-во СО РАН, 2000. – 320 с.

62. Махутов Н. А. Хладостойкость (метод инженерной оценки) / Н. А. Махутов, А. В. Лыглаев, А. М. Большаков: по ред. М. П. Лебедева, Ю. Г. Матвиенко – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 195 с.

63. Григорьев Р. С. Методы повышения работоспособности техники в северном исполнении. / Р. С. Григорьев, В. П. Ларионов, Ю. С. Уржумцев – Новосибирск: Наука, 1987. – 252 с.

64. Ларионов В. П. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: Результаты и перспективы. / В. П. Ларионов, В. Р. Кузьмин, О. И. Слепцов и др. – Новосибирск: Наука, 2005. – 290 с.

65. Богатин О. Б. Работоспособность техники в условиях Крайнего Севера и исследования в области трибологии в НИЦ «Север». / О. Б. Богатин, С. Н. Попов, А. М. Ишков. // Машины, материалы и конструкции в арктических условиях: Тезисы Международного советско-скандинавского семинара. – Якутск: ЯНЦ СО АН СССР. – 1991. – С. 9 - 10.

66. Степанов В. П. Влияние знакопеременных нагрузок на хладостойкость материала рессор автомобиля МАЗ-504. / В. П. Степанов, А. М. Ишков, Р. С. Григорьев, Е. Е. Иванов. // Хрупкое разрушение металлов при низких температурах: сб. научных трудов. – Якутск, ЯФ СО АН СССР. – 1976. – с. 51-56.

67. ГОСТ 398-96. Бандажи из углеродистой стали для подвижного состава железных дорог широкой колеи и метрополитена. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 15 с.

68. ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9651-84 ГОСТ 11150-84, ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1985. - 63 с.

69. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – М.: Изд-во стандартов, 2003 – 10 с.

70. Федоров В. В. Термодинамический метод оценки длительной прочности. / В. В. Федоров. // Проблемы прочности. – 1972. - №9 – с. 45-47.

71. Федоров В. В. Кинетика поврежденности и разрушения твердых тел. / В. В. Федоров. – Ташкент: ФАН, 1985. – 167 с.

72. Беляев Н.М. Вычисление наибольших расчётных напряжений при сжатии соприкасающихся тел. / Н. М. Беляев // Сборник научных трудов ЛИИПС. -1929 -Вып. 102.- с. 8-10.

73. Осипян А. В. Экспериментальные исследования питинговых разрушений в зубчатых колесах. / А. В. Осипян // Труды НАТИ. – 1945. - в. 43.

74. Справочник по сопротивлению материалов / под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Наукова думка, 1988 – 736 с.

75. Беляев Н. М. К вопросу о местных напряжениях в связи с сопротивлением рельсов смятию / Н. М. Беляев. // Труды по теории упругости и пластичности – 1957. – с. 215-260.

76. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. / Л. М. Качанов. – М: Наука, 1974.–312 с.

77. Работнов Ю. Н. Введение в механику разрушения. / Ю. Н. Работнов – М: Наука, 1987. – 80 с.

78. Гиренко В.С. Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных сталей и их сварных соединений. / В.С. Гиренко, Э.В. Котенков // Автоматическая сварка. – 1985. – №9. – Библиогр.: с. 13-20.

79. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Часть 2. АН Украины. Институт проблем прочности. / Отв. редактор В.Трощенко. - Киев: Наукова думка, 1994. - 701 с.

80. Архангельская Е. А. Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды. / Е. А. Архангельская, В. В. Лепов, В. П. Ларионов // Физическая мезомеханика – 2001. - Т.4, №4. - с. 81-87.

81. Lepov V.V. Structural evolution modeling of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials. / V. V. Lepov // World Journal of Engineering. – 2012. – 10.

82. Чернов В. М. Вязкость разрушения хромистой (12%) ферритно-мартенситной стали ЭК-181 при нагружении на сосредоточенный изгиб. / В. М. Чернов, Г. Н. Ермолаев, М. В. Леонтьева-Смирнова // Журнал технической физики. - 2010. – т.80, вып. 7. – с.72-77.

83. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. / В. В. Панасюк - Киев: Наук. думка, 1968. - 246 с

84. Барахтин Б.К. Статистические характеристики множественного разрушения металлических мишеней при динамическом нагружении и их связь с механическими параметрами материалов. / Б.К. Барахтин, Ю.И.

Мещеряков, Г.Г. Савенков // Журнал технической физики. - 2010. – т.80. - №1.
– с.79-84.

85. Stevenot G., Demilly F. Срок службы железнодорожных колес / G.
Stevenot, F. Demilly // Железные дороги ми