На правах рукописи

Краснов Олег Геннадьевич

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА И КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ РЕЛЬСОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГРУЗОВОГО ДВИЖЕНИЯ

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание, проектирование железных дорог

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ).

Научный консультант:	**Савин Александр Владимирович**, доктор технических наук, доцент.
Официальные оппоненты:	**Шур Евгений Авелевич**, доктор технических наук, профессор, акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», научный центр «Рельсы, сварка, транспортное материаловедение», главный научный сотрудник; **Андреева Людмила Александровна**, доктор технических наук, профессор, закрытое акционерное общество «Промтрансниипроект», заместитель генерального директора; **Шаповалов Владимир Владимирович,** доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», кафедра «Транспортные машины и триботехника», профессор.
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения».

Защита состоится «20» октября 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 1235.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РУТ МИИТ и на сайте www.miit.ru.

Автореферат разослан «____» августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Гринь Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение осевых нагрузок признано во всем мире одним из главных направлений, позволяющих кардинально увеличить провозную способность линий за счет увеличения производительности вагонов. По этому пути пошли США, Канада, Австралия, ЮАР, Швеция. Внедрение подвижного состава с повышенными осевыми нагрузками происходит на российских железных дорогах. Для повышения ресурса рельсов в 2012–2013 гг. проведена реконструкция технологических линий на АО «ЕВРАЗ ЗСМК», строительство нового производства на ПАО «ЧМК». Реконструкция производства позволила организовать выпуск дифференцированно-термоупрочненных рельсов с печного нагрева разных категорий качества по ГОСТ Р 51685-2013.

В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.» поставлена задача доведения технического и технологического уровня инфраструктуры, сферы ее содержания и ремонта до лучших мировых стандартов. Протоколом совещания под председательством Министра промышленности и торговли Российской Федерации Д. В. Мантурова основными целевыми показателями предусматривается увеличение межремонтного срока между капитальными ремонтами пути до 2000…2500 млн т брутто. В соответствии с «Долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» до 2025 г.» предусмотрено увеличить срок службы рельсов до 1500 млн т брутто. Вместе с тем, по данным Управления пути и сооружений ОАО «РЖД» за 2020 г., на российских железных дорогах было заменено 142 838 рельсов в 25-метровом эквиваленте. Из них 30 636 (или 21,4%) изъятий рельсов приходится при достижении предельного состояния по износу, 70 838 (или 49,6 %) – по контактно-усталостным дефектам. Таким образом, более 71 % всех изъятий рельсов приходится на износ и дефекты контактно-усталостного характера, что усугубляется интенсификацией грузового движения путем внедрения грузовых вагонов и локомотивов с осевыми нагрузками 245 кН.

Проблема установления научно обоснованных факторов, определяющих интенсивность износа рельсов и образования контактно-усталостных дефектов на их поверхности, разработка методов прогнозирования износа рельсов и их контактно-усталостной долговечности с учетом категорий качества, структуры поездопотока и величин осевых нагрузок, уровней непогашенных ускорений, лубрикации рельсов, уклонов продольного профиля пути и массы поездов, типов применяемых промежуточных рельсовых скреплений, а также более точных способов учета силового воздействия на путь от подвижного состава с повышенными осевыми нагрузками и состояния пути является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Исследования, посвященные изучению износа рельсов, развитию методов расчета, совершенствованию критериев и анализу результатов износа в разных условиях эксплуатации, проводились под руководством и с участием

отечественных ученых А. Ю. Абдурашитова, С. М. Андриевского, Е. С. Антерейкина, М. Ф. Вериго, А. А. Воробьева, Т. К. Голутвиной, С. М. Захарова, Н. И. Карпущенко, А. Я. Когана, Д. П. Маркова, Л. П. Мелентьева, К. Н. Мищенко, А. М. Орловой, В. О. Певзнера, В. В. Шаповалова, Г. М. Шахунянца, Е. А. Шура и др.

Известны работы зарубежных ученых в области теории и практики износа в системе «колесо – рельс» Д. Арчарда, А. Капура, Д. Кика,

Е. Клятона, Е. Магель, Д. Пиотровски, Д. Хендрика, Д. Станфорда, В. Шпехта и др.

Исследованиями контактно-усталостной повреждаемости рельсов, совершенствования методов расчета контактно-усталостной прочности, изменения структуры поверхностного слоя от длительного воздействия поездной нагрузки, влияния остаточных напряжений на контактно-усталостную прочность, повышения ресурса рельсов методами механической обработки поверхности катания проводились под руководством и с участием отечественных ученых А. Ю. Абдурашитова, А. И. Александрова, М. Х. Ахметзянова, И. С. Баулина, А. И. Борца, М. Ф. Вериго, Ж. А. Галина, М. Н. Георгиева, И. З. Генкина, В. Е. Громова, В. Н. Данилова, В. А. Кислика, Б. С. Ковальского, А. Я. Когана, А. Д. Конюхова, В. С. Коссова, Н. Н. Кудрявцева, Н. А. Махутова, К. В. Морозова, Н. И. Мусхелишвили, В. В. Павлова, Д. Л. Петрова, Д. Ю. Погорелова, Е. В. Полевого, В. Л. Порошина, В. А. Рейхарта, А. В. Савина, В. И. Сакало, Ю. А. Самойловича, Л. А. Сосновского, С. П. Тимошенко, Е. А. Шура, В. Ф. Яковлева и многих других.

Известны работы зарубежных ученых в области контактно-усталостной прочности и повреждаемости рельсов М. Брауна, К. Джонсона, К. Данг Вана, А. Екберга, М. Ишиды, Ф. Картера, Дж. Калкера, Дж. Коллинза, Ю. Шена, Ш. Шенга, А. Фатеми, Г. Фромма и др.

Цель работы – разработка научно обоснованных методов прогнозирования износа рельсов разных категорий качества и их контактно-усталостной повреждаемости для условий интенсификации грузового движения.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **задачи**:

– разработана структурная схема и аналитические выражения для расчета бокового и вертикального износа рельсов различных категорий качества для разных условий эксплуатации;

– установлены нормативы интенсивности износа рельсов разных категорий качества для базовых условий эксплуатации;

– определены количественные значения функциональных коэффициентов, определяющие интенсивность бокового и вертикального износа рельсов разных категорий качества, от эксплуатационных факторов (радиуса кривых участков пути, уровней непогашенных ускорений, периодичности лубрикации рельсов, продольного профиля пути и массы поездов, конструкции экипажных частей подвижного состава и величин

осевых нагрузок, типа применяемых промежуточных рельсовых скреплений);

– разработана методика прогнозирования износа рельсов различных категорий качества для разных условий эксплуатации и программное обеспечение для автоматизированного расчета износа рельсов;

– разработан алгоритм прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов, определены параметры деформационных кривых пластической и упругой усталости рельсовой стали, влияние на контактно-усталостную повреждаемость извилистого движения колесных пар и деградации механических свойств поверхности катания от пропущенного тоннажа;

– разработана методика формирования интегрального распределения вертикальных сил от суточного пакета поездов для конкретного перегона с учетом наиболее значимых факторов состояния пути, в том числе выплесков во влажном и сухом состояниях;

– разработана методика прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин с учетом деградации механических свойств от пропущенного тоннажа;

– определены закономерности технологии фрезерования рельсов в пути при репрофилировании изношенной головки рельса и удаления контактно-усталостных повреждений, распространяющихся на глубину до 2,5 мм.

Объектом исследования являются рельсы железнодорожного пути.

Предметом исследования являются методы прогнозирования интенсивности износа и контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов в условиях интенсификации грузового движения.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1 Разработана структурная схема и аналитические выражения для прогнозирования количественных значений бокового и вертикального износа рельсов с использованием впервые введенного понятия «базовая интенсивность износа».

2 На основания комплексных экспериментальных и теоретических исследований установлены количественные значения функциональных коэффициентов, определяющих интенсивность бокового и вертикального износа рельсов разных категорий качества, от эксплуатационных факторов (радиуса кривых участков пути, уровней непогашенных ускорений, периодичности лубрикации рельсов, продольного профиля пути и массы поездов, конструкции экипажных частей подвижного состава и величин осевых нагрузок, типа применяемых промежуточных рельсовых скреплений).

3 Установлено, что распределения вертикальных сил от взаимодействия колес подвижного состава и пути в составе поездов, сформированных из вагонов с близкими осевыми нагрузками, представляют стационарные, эргодичные процессы с незначительными величинами асимметрии (не более 3…3,5 % от средних значений) и хорошо аппроксимируются нормальным законом по критерию согласования Колмогорова – Смирнова.

4 Разработан алгоритм прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости рельсов до образования трещин на поверхности катания. Разработана конечно-элементная модель прокатки вагонного колеса по рельсу, которая позволила установить, что компоненты тензора напряжений на поверхности рельса находятся в непропорциональном многоосном напряженном состоянии, и обосновать использование деформационной модели многоосной усталости Брауна – Миллера для прогнозирования повреждаемости рельсов.

5 Разработана методика определения интегрального распределения вертикальных сил, позволяющая учитывать воздействие от разного типа подвижного состава с учетом конструкций ходовых частей и величин осевых нагрузок, скорости движения, жесткости подрельсового основания от сезонности (лето, зима), поперечного профиля пути, состояния пути (наличия влажных или сухих выплесков), доли каждого типа подвижного состава в суммарном воздействии на путь.

6 Разработана методика прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин с использованием деформационной модели многоосной усталости Брауна – Миллера и с учетом деградации механических свойств поверхности катания рельсов от пропущенного тоннажа.

7 Впервые для российских железных дорог установлены закономерности технологии фрезерования рельсов в пути при репрофилировании изношенной головки рельса и удаления контактно-усталостных повреждений, распространяющихся на глубину до 2,5 мм. Разработана методика определения геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колес с преобразованием облака точек, полученных в процессе измерений координатно-измерительной машиной, методом сингулярного разложения и использования алгоритмов Делоне.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1 Разработаны и подготовлены к утверждению «Нормативы интенсивности износа рельсов разных категорий качества».

2 Разработана и подготовлена к утверждению «Методика прогнозирования износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации».

3 Для автоматизации расчета износа рельсов разработана программа для ЭВМ «Программа расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации».

4 Для определения распределений точек контакта колеса с рельсом по поперечному сечению с учетом извилистой траектории движения колесных пар разработано и изготовлено устройство на основе системы технического зрения и предложен алгоритм обработки видеосигналов.

5 Установлены средние значения и статистические характеристики вертикальных и боковых сил, действующих на наружный и внутренний рельсы от разных типов грузовых, пассажирских вагонов и локомотивов в кривых участках пути малого и среднего радиуса, в том числе от грузовых

вагонов с осевыми нагрузками 245 и 265 кН. Предложено ранжирование подвижного состава по кластерам в зависимости от диапазона силового воздействия.

6 Разработана и предложена к внедрению методика прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин, позволяющая определять влияние повышенных осевых нагрузок от подвижного состава на снижение ресурса рельсов по контактно-усталостной повреждаемости.

7 Разработаны и переданы на АО «Калужский завод «Ремпутьмаш» мероприятия по совершенствованию технологии фрезерования рельсов, конструкции рабочих органов и измерительной системы рельсофрезерного поезда РФП-1.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования в диссертации строились на основе: методов теории вероятностей и математической статистики, деформационных моделей при многоосном циклическом нагружении, численного моделирования с использованием программных комплексов «Универсальный механизм», MARC, Fatigue (MSC Sofware), математического программирования и современных методов вычислительной математики. Экспериментальные методы реализовывались с применением вибро- и тензометрирования.

Положения, выносимые на защиту.

1 Методика прогнозирования износа рельсов различных категорий качества для разных условий эксплуатации.

2 Методика формирования интегрального распределения вертикальных нагрузок от суточного пакета поездов и структуры поездопотока.

3 Методика прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин с использованием деформационной модели многоосной усталости Брауна – Миллера и учетом деградации механических свойств рельсовой стали в зависимости от пропущенного тоннажа.

4 Методика определения геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колес рельсофрезерного поезда с преобразованием облака точек методом сингулярного разложения и с использованием алгоритмов Делоне.

Степень достоверности и апробация результатов исследования основана на корректном использовании математических моделей, аналитических решений и численных расчетов, сопоставлении теоретических решений с экспериментальными данными, применении современных программных вычислительных средств, удовлетворительной сходимости (в пределах 15 %) результатов расчетов и экспериментальных исследований, проведенных в условиях рядовой эксплуатации на Большом московском окружном кольце (БМО) Московской дирекции инфраструктуры (ДИ); на перегонах Блокпост Южный – Калманка Западно-Сибирской ДИ, Качканар – Смычка Свердловской ДИ, Слюдянка-2 – Ангасолка Восточно-Сибирской ДИ, Голутвин – Луховицы Московской ДИ.

Основные положения работы изложены и одобрены:

– на XIII международной научно-практической конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта» (Днепропетровск, ДИИТ, 2012 г.);

– на 14-й и 15-й научно-технических конференциях «Подвижной состав XXI века (Идеи. Требования. Проекты)» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 2017–2018 гг.);

– на 12-й научно-практической конференции «Проблемы измерения и метрологии в технике» (Москва, МГТУ им. Баумана, 2017 г.);

– на 17-й научно-практической конференции «Новые материалы» (Москва, ВИАМ, 2017 г.);

– на 4-й научно-технической национальной конференции «Путь XXI века» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 2018 г.);

– на научно-техническом совете ОАО «РЖД» от 29.12.2017;

– на XVI международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», на чтениях, посвященных памяти профессора Г. М. Шахунянца (Москва, РУТ МИИТ, 3–4 апреля 2019 г.);

– на международной научной конференции «FarEastCon-2019» (Владивосток, ДВФУ, 1–4 октября 2019 г.);

– на объединенном ученом совете ОАО «РЖД» (Москва, АО «ВНИИЖТ», 14 марта 2019 г.);

– на круглом столе в пресс-центре издательского дома «Гудок» «Инновационные решения для ремонта и модернизации путевой инфраструктуры» (Москва, 9 октября 2019 г.);

– на III международной научно-практической конференции «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 23–25 октября 2019 г.);

– на 134-й рельсовой комиссии (Владивосток, 3–4 октября 2018 г.);

– на 135-й рельсовой комиссии (Новокузнецк, 25–27 сентября 2019 г.);

– на 136-й рельсовой комиссии (Анапа, 21–23 октября 2020 г.);

– на 137-й рельсовой комиссии (Челябинск, 22–24 сентября 2021 г.);

– на I международной научно-практической конференции «Наука 1520. ВНИИЖТ: загляни за горизонт» (Москва, ВНИИЖТ, 26–27 августа 2021 г.);

– на научно-технических советах в ОАО «РЖД» (2016–2021 гг.), посвященных проблемам повышения эксплуатационной стойкости рельсов и развитию тяжеловесного движения на российских железных дорогах.

Исследования по данной работе поддержаны грантом по проекту РФФИ 17-20-01-088/17.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, включающего 274 наименования, изложена на 312 страницах основного текста, включающего 101 рисунок, 62 таблицы и 11 приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение содержит обоснование актуальности проблемы разработки методов прогнозирования износа рельсов разных категорий качества и их контактно-усталостной повреждаемости для условий интенсификации грузового движения**.**

Определены цели, задачи и методы исследования, пути решения задач, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ эксплуатационных данных по отказам рельсов в условиях эксплуатации. Установлено, что в кривых участках пути малого радиуса на перевальных участках и участках с высокой грузонапряженностью интенсивность бокового износа превышает нормативные значения в 1,5…2,0 раза. Интенсивность износа возросла с ростом грузонапряженности, что может быть объяснено внедрением нового подвижного состава (локомотивов и вагонов) с повышенными осевыми нагрузками и оригинальными конструкциями экипажных частей.

Количество дефектов поверхности катания рельсов контактно-усталостного происхождения составляет более половины от общего количества всех дефектных рельсов. Внедрение нового подвижного состава с повышенными осевыми нагрузками приводит к повышению контактных давлений на поверхности катания рельсов. Для оценки влияния повышенных осевых нагрузок на интенсивность износа и контактно-усталостную долговечность рельсов необходимо разработать научно обоснованные методики прогнозирования их ресурса.

Одним из способов повышения ресурса рельсов является обработка поверхности катания рельсов методами шлифования, фрезерования или строгания. Для условий интенсификации грузового движения, при котором из-за повышенных осевых нагрузок зарождение контактно-усталостных трещин происходит на большей глубине, наиболее эффективным способом механической обработки рельсов является фрезерование.

В результате выполненного анализа опубликованных работ по теоретическим и экспериментальным исследованиям по повышению износостойкости рельсов, их контактно-усталостной долговечности для условий интенсификации грузового движения сформулированы основные направления исследования. Это позволило сформулировать цель и задачи настоящей работы.

Во второй главе на основании анализа ранее проведенных исследований, введенного понятия «базовая интенсивность износа», ранжирования факторов, влияющих на интенсивность износа разработаны структурная схема и аналитические выражения для прогнозирования

бокового и вертикального износа рельсов для разных условий эксплуатации (рисунок 1).

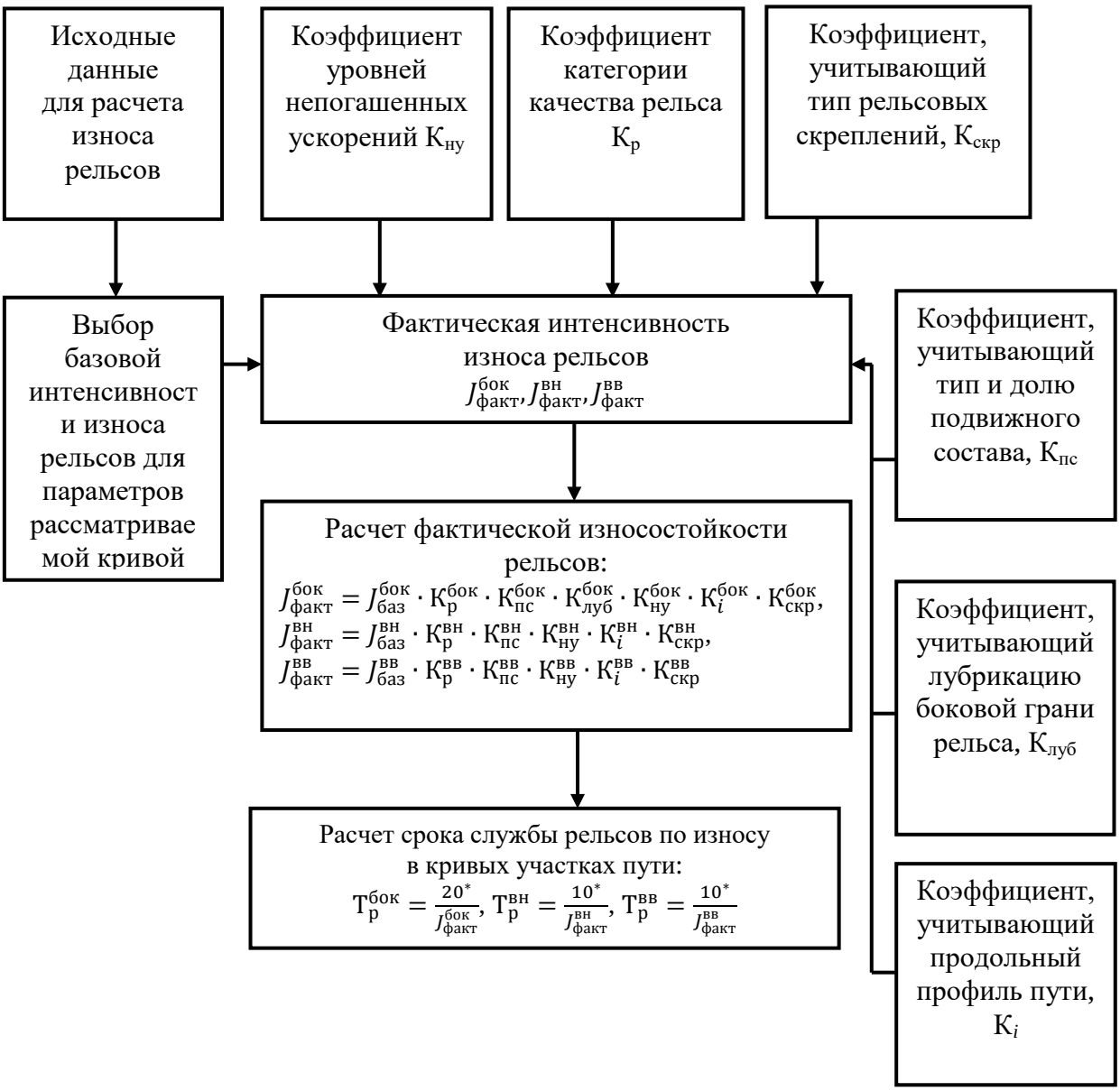

Рисунок 1 – Структурная схема прогнозирования износа рельсов разных категорий качества в разных условиях эксплуатации

Базовая интенсивность износа рельсов соответствует интенсивности износа конкретных категорий рельсов от воздействия конкретного типа подвижного состава при движении последнего с равновесной скоростью для кривого участка пути конкретного радиуса.

В качестве базовых параметров выбраны:

– рельсы категории ДТ350 производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» как наиболее массово внедряемые на российских железных дорогах;

– грузовой полувагон на тележках 18-100;

– кривые участки пути радиусом 300, 400, 500, 600 м;

– продольный профиль пути с уклоном не более 5 %;

– коэффициент трения между колесом и рельсом 0,25.

Для проведения виртуальных экспериментов по изнашиванию рельсов выбран программный комплекс «Универсальный механизм» с подключенными модулями UM Subsystems и UM Loco, а также входящий в него программный инструмент Rail Profile Wear Evolution. Принято линейное соотношение между объемом удаляемого материала и работой сил трения скольжения в контакте.

Экспериментальным путем определены параметры бокового и вертикального износа рельсов ДТ350 в опытном кривом участке пути радиусом 493 м в зависимости от пропущенного тоннажа в границах БМО Московской ДИ. Путем проведения многовариантных расчетов с использованием программного инструмента Rail Profile Wear Evolution определялись коэффициенты износа, скачка и плотности мощности сил трения для модели изнашивания Шпехта по критерию наибольшей сходимости расчетных и экспериментальных данных применительно к контакту «колесо – рельс». Коэффициент износа влияет на интенсивность умеренного изнашивания на поверхности катания рельса – вертикальный износ. Коэффициент скачка – это повышающий коэффициент, характеризующий изнашивание на боковой поверхности рельса. Критическая плотность мощности сил трения – принимаемая величина плотности мощности, при превышении которой износ переходит из умеренного состояния в интенсивный.

На основании моделирования установлено, что плотность мощности сил трения зависит от радиуса кривого участка пути и скорости движения экипажа. На рисунке 2 представлены результаты расчета плотности мощности сил трения путем численного моделирования движения грузового вагона в кривом участке пути с различной скоростью движения. Выполнены многовариантные расчеты процесса изнашивания с учетом фактических типов и долей подвижного состава, курсирующего по опытной кривой. Методом подбора определены: коэффициент износа k_v = $2{,}57 \cdot 10^{-13}$, коэффициент скачка k_γ = 12 и критическая плотность мощности $P_{кр}$ = 30 Вт/мм² для категории рельсов ДТ350. Предложен метод оценки интенсивности износа рельсов разных категорий качества путем определения их коэффициентов износа. Методом моделирования определены базовые интенсивности бокового и вертикального износа рельсов для кривых участков пути разных радиусов и величин возвышений наружного рельса.

Величины базовой интенсивности бокового износа наружного рельса категории ДТ350 для кривых участков пути разного радиуса от воздействия грузовых полувагонов на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230 кН представлены в таблице 1.

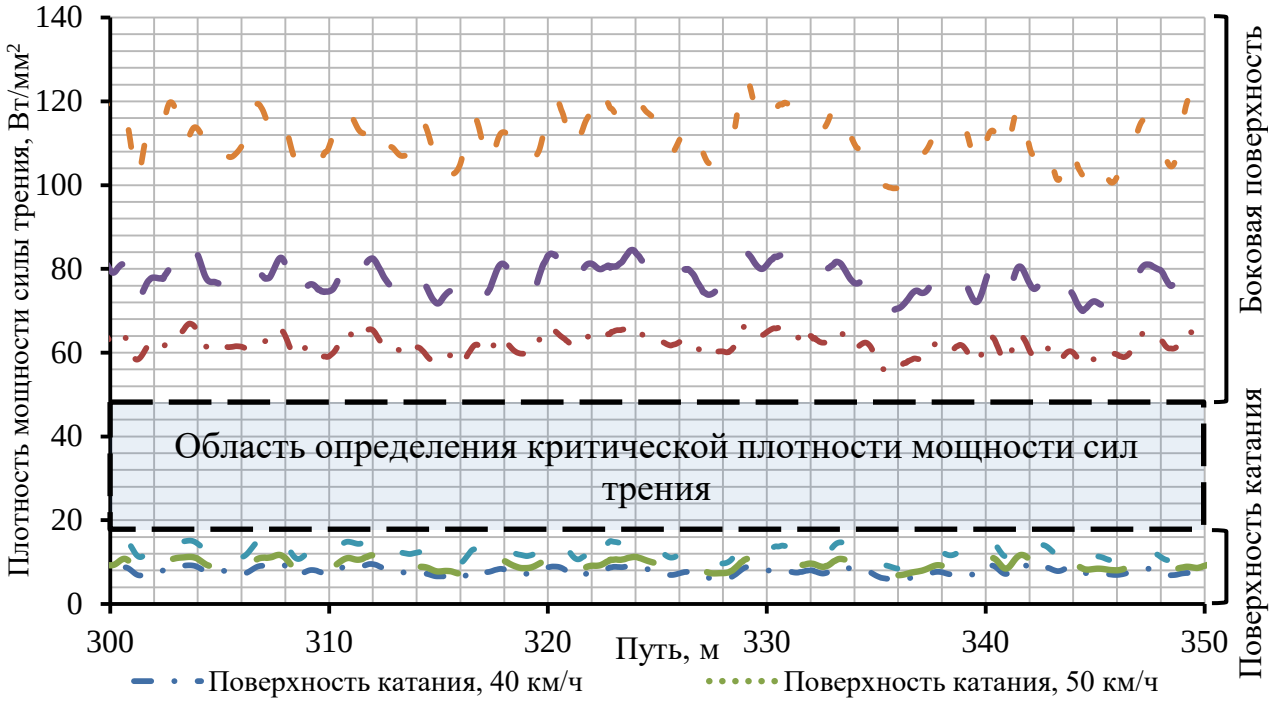

Рисунок 2 – Расчетные осциллограммы плотности мощности сил трения на боковой грани и поверхности катания рельсов

Таблица 1 – Базовая интенсивность бокового износа наружного рельса категории ДТ350 в зависимости от радиуса кривой и возвышения наружного рельса

Возвышение рельса, мм	Радиус кривого участка пути, м				
	300	400	500	600	650
30	–	–	–	0,039673	0,035437
40	–	–	–	0,040074	0,034991
50	–	–	0,053253	0,042867	0,037517
60	–	–	0,055997	0,044904	0,039265
70	–	0,072808	0,058221	0,046424	0,040486
80	–	0,075639	0,060059	0,047566	0,041325
90	0,101638	0,078138	0,061604	0,048427	–
100	0,105345	0,080371	0,062918	–	–
110	0,108774	0,082386	0,064043	–	–
120	0,113319	0,086139	–	–	–
130	0,116314	0,087820	–	–	–
140	0,119134	–	–	–	–
150	0,121802	–	–	–	–

В третьей главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований факторов, влияющих на интенсивность износа рельсов.

Влияние категории рельсов. На основании проведенного анализа износа рельсов по данным, полученным специалистами АО «ВНИКТИ», АО «ВНИИЖТ», ПКБ И, специалистами Дирекций инфраструктуры железных дорог установлены коэффициенты, отражающие соотношение величин износостойкости рельсов разных категорий качества (таблица 2).

Таблица 2 – Коэффициенты, отражающие соотношение величин износостойкости рельсов разных категорий качества

ДТ350	ДТ350 (ЧМК)	ДТ350У	ДТ350НН	ДТ400ИК	Т1	ВС250Я	ДТ370ИК
1,00	1,06	0,94	1,023	0,84	0,97	0,72	0,94

Установлено:

– интенсивность бокового и вертикального износа рельсов является величиной не постоянной, а функционально зависящей от пропущенного тоннажа;

– зависимость интенсивности износа от пропущенного тоннажа описывается степенной функцией;

– определены базовые интенсивности износа рельсов разных категорий качества для базовых условий эксплуатации.

Влияние конструкции экипажных частей и величин осевых нагрузок. На основании экспериментально установленных средних значений вертикальных и боковых сил, действующих на наружный и внутренний рельсы от разных типов грузовых, пассажирских вагонов и локомотивов установлены коэффициенты приведения к средним значениям боковых и вертикальных сил от воздействия базового полувагона. Для использования этих данных в расчетах износа рельсов принято допущение, что работа сил трения пропорциональна средним значениям боковых и вертикальных сил, действующих на рельсы от колес подвижного состава. С учетом уровней силового воздействия предложено ранжирование подвижного состава по кластерам в зависимости от диапазона силового воздействия.

На основании анализа значений коэффициентов приведения $К_{пр}$ подвижной состав по воздействию на путь в кривых участках пути разделили на группы:

1) локомотивы:

– I кластер – инновационные локомотивы с осевой нагрузкой 245 кН и повышенной силой тяги;

– II кластер – серийные грузовые и пассажирские локомотивы с осевыми нагрузками не более 230 кН и умеренной силой тяги;

2) вагоны:

– I кластер – инновационные грузовые вагоны с осевыми нагрузками 245 кН и выше;

– II кластер – серийные грузовые вагоны с осевыми нагрузками 230 кН (полувагоны, цистерны, хопперы, лесовозы и т.д.) на тележках модели 18-100;

– III кластер – пассажирские вагоны, моторвагонный подвижной состав, контейнеровозы и т.п.;

– IV кластер – порожние грузовые вагоны.

Коэффициенты приведения силовых факторов от воздействия колес локомотивов и вагонов на рельсы к средним значениям вертикальных и боковых сил базового грузового полувагона приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты приведения силовых факторов от воздействия колес локомотивов и вагонов на рельсы к средним значениям вертикальных и боковых сил базового грузового полувагона в кривых разных радиусов

Силовой фактор	$R \leq 350$	$350 \leq R \leq 650$	$R \leq 350$	$350 \leq R \leq 650$
	Кластеры локомотивов			
	I		II	
Боковые силы, действующие на наружный рельс	0,88…1,20* 0,77…1,50*	1,88…2,23* 1,81…2,09*	1,60 0,84	2,63 1,92
Вертикальные силы, действующие на наружный рельс	1,00…0,97* 0,86…1,10*	1,28…0,98* 1,45…1,13*	1,18 0,95	1,58 1,40
Вертикальные силы, действующие на внутренний рельс	0,94…1,10* 0,88…0,99*	1,07…1,10* 1,16…0,90*	1,11 0,99	1,26 1,11
	Кластеры вагонов			
	I		II	
Боковые силы, действующие на наружный рельс	1,10 1,10	0,88 1,10	1,00 1,00	1,00 1,00
Вертикальные силы, действующие на наружный рельс	1,07 1,10	1,14 1,07	1,00 1,00	1,00 1,00
Вертикальные силы, действующие на внутренний рельс	1,08 1,11	1,01 1,10	1,00 1,00	1,00 1,00
	III		IV	
Боковые силы, действующие на наружный рельс	0,75 0,64	0,84 1,38	0,21 0,17	0,25 0,30
Вертикальные силы, действующие на наружный рельс	0,55 0,81	0,62 0,87	0,21 0,21	0,22 0,29
Вертикальные силы, действующие на внутренний рельс	0,60 0,65	0,63 0,87	0,31 0,23	0,22 0,27

Примечание. В числителе – спуск; в знаменателе – подъем.
*Работа локомотива в режиме толкача.

Интегральный коэффициент приведения боковых сил, воздействующих на наружный рельс от разных типов подвижного состава может быть вычислен по формуле:

$$К_{пс}^{бок} = К_{локI}^{бок} \cdot \gamma_{локI} + К_{локII}^{бок} \cdot \gamma_{локII} + К_{вагI}^{бок} \cdot \gamma_{вагI} + К_{вагII}^{бок} \cdot \gamma_{вагII} + \quad (3.1)$$
$$+ К_{вагIII}^{бок} \cdot \gamma_{вагIII} + К_{вагIV}^{бок} \cdot \gamma_{вагIV},$$

$К_{локI,}^{бок}$ $К_{локII}^{бок}$, – коэффициенты, учитывающие отношение средних значений боковых сил, действующих на наружный рельс от локомотивов кластера I, II к средним значениям боковых сил от базовых грузовых вагонов, например $К_{локI}^{бок} = \frac{F_{локI}^{ср}}{F_{баз}^{ср}}$ для локомотивов I кластера;

$\gamma_{локI}$, $\gamma_{локII}$ – доля локомотивов кластеров I и II в суточном пакете поездов;

$К_{вагI}^{бок}$, $К_{вагII}^{бок}$, $К_{вагIII}^{бок}$, $К_{вагIV}^{бок}$ – коэффициенты, учитывающие отношение средних значений боковых сил, действующих на наружный рельс от вагонов кластеров I, II, III, IV к средним значениям боковых сил от базовых грузовых полувагонов, например $К_{вагI}^{бок} = \frac{F_{вагI}^{ср}}{F_{баз}^{ср}}$ для вагонов I кластера;

$\gamma_{вагI}$, $\gamma_{вагII}$, $\gamma_{вагIII}$, $\gamma_{вагIV}$ – доля вагонов кластеров I–IV в суточном пакете

поездов.

Аналогично определяются интегральные коэффициенты приведения вертикальных сил, воздействующих на наружный и внутренний рельсы от разных типов подвижного состав.

Влияние уклонов продольного профиля пути. Влияние уклонов продольного профиля определялось на основании статистической обработки экспериментальных данных по износу рельсов в 45 кривых радиусами 292…308 м, расположенных на подъемах и спусках с уклонами до 20 ‰. Данные предоставлены техническим отделом Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ. Для всех категорий рельсов на подъемах и спусках наблюдалась устойчивая тенденция к повышению интенсивности износа с увеличением величины уклона. Во всех случаях интенсивность износа на спусках выше, чем интенсивность износа на подъемах 7…12 %. Изменение интенсивности износа рельсов от уклонов описывается степенными функциями, параметры которых зависят от направления уклонов (спуск, подъем) и категорий качества рельсов. Углы наклона линий трендов для рельсов разных категорий качества имеют близкие значения, что позволяет усреднить значения функциональных коэффициентов. Зависимости функциональных коэффициентов от величины уклонов пути на спусках и подъемах представлены на рисунке 3.

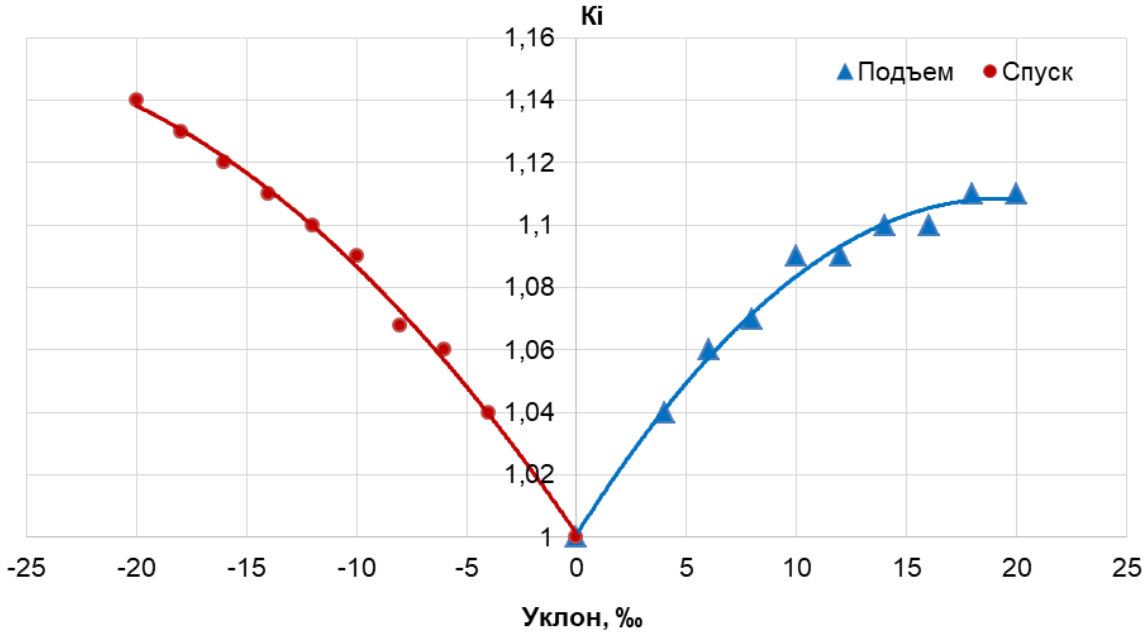

Рисунок 3 – Зависимости функциональных коэффициентов от уклонов пути на спусках и подъемах

Влияние типа и периодичности смазки. Выражения для определения коэффициентов трения в зависимости от типа смазки и количества пропущенных осей представлены в таблице 4.

Снижение интенсивности износа с учетом изменения коэффициента трения в зависимости от количества пропущенных осей в среднем может

составлять до 50 %. Зависимости интенсивности износа рельсов от величины коэффициентов трения ($К_{тр}$ = 0,12; 0,19; 0,25) представлены на рисунке 4.

Таблица 4 – Расчет коэффициента трения для учета лубрикации в боковом износе головки наружного рельса

Смазка	Коэффициент трения $К_{тр}$		Количество пропущенных осей *Os*	Формула для расчета коэффициента трения
	исходный	конечный		
СР-КУ	0,13	0,27	25000	$0,13 + 2,8 \cdot 10^{-6} \cdot Os$
СР-КУ	0,12	0,25	20100	$0,12 + 4,0 \cdot 10^{-6} \cdot Os$
МС-27	0,12	0,26	18900	$0,12 + 4,2 \cdot 10^{-6} \cdot Os$
КР-400	0,12	0,26	30240	$0,12 + 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot Os$
КР-400	0,12	0,26	24696	$0,12 + 3,2 \cdot 10^{-6} \cdot Os$

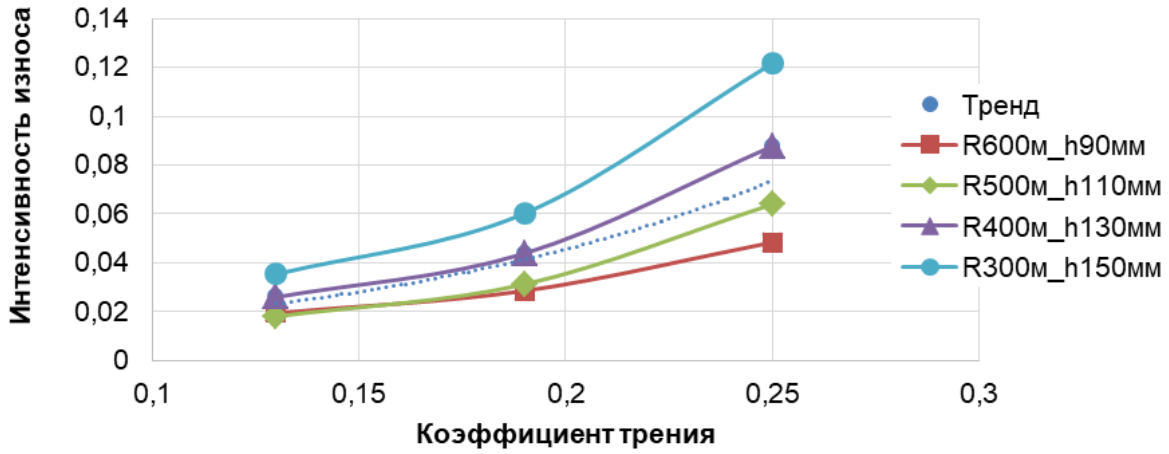

Рисунок 4 – Зависимости интенсивности износа рельсов от величины коэффициентов трения для кривых разных радиусов

Влияние непогашенного ускорения. При исследовании влияния непогашенного ускорения на интенсивность износа рельсов установлено, что минимальный износ наблюдается при равновесной скорости движения, когда непогашенное ускорение равно нулю. Природа повышенного износа наружного и внутреннего рельсов от знака непогашенного ускорения различна: при росте положительных непогашенных ускорений интенсивность износа повышается за счет увеличения вертикальных и боковых сил, контактных давлений, мощности сил трения на поверхности катания и боковой грани наружного рельса с одновременным снижением на внутреннем рельсе.

Избыток возвышения наружного рельса в крутых кривых при нереализованных скоростях движения (отрицательные непогашенные ускорения) вызывает перераспределение продольного скольжения колес с внутренней на наружную рельсовую нить из-за их жесткой насадки на оси и затруднительного вписывания тележек экипажных частей подвижного состава по причине перевалки кузова внутрь колеи и дополнительного пригруза скользунов. Установлены функциональные коэффициенты, определяющие влияние уровня и знака непогашенного ускорения на интенсивность износа рельсов. Функциональные коэффициенты, определяющие интенсивность бокового износа рельсов от величины

непогашенного ускорения для кривых участков пути разного радиуса, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Базовая интенсивность бокового износа наружного рельса в зависимости от величин непогашенного ускорения для кривых участков пути разных радиусов

Радиус кривой *R*, м	Непогашенное ускорение *a*, м/с^2						
	–0,3	–0,2	–0,1	0	0,1	0,2	0,3
300	0,142782	0,128730	0,118418	0,113319	0,114452	0,118985	0,129295
400	0,099660	0,090257	0,083666	0,080371	0,080853	0,083988	0,090016
500	0,073272	0,066665	0,062161	0,060059	0,060359	0,062221	0,066065
600	0,053885	0,049394	0,046251	0,044904	0,045084	0,045802	0,048496

Влияние промежуточных рельсовых скреплений. Определены экспериментально-расчетным путем значения крутильной жесткости рельсов, прикрепленных к шпалам разными типами промежуточных рельсовых скреплений. Результаты значений крутильной жесткости представлены в таблице 6. Выполнено моделирование процесса изнашивания наружного и внутреннего рельсов ДТ350 при разных типах скреплений. На рисунке 5 представлены графики изменения бокового и вертикального износа рельсов от значений крутильной жесткости при моделировании в кривых различного радиуса от воздействия колес базового полувагона с осевой нагрузкой 230 кН при движении с равновесной скоростью.

Экспериментально-расчетным путем установлено, что наиболее значимое влияние промежуточные рельсовые скрепления оказывают в кривых участках пути малого радиуса $R \leq 350$ м, а также при более низких значениях крутильной жесткости 530 кН·м/рад, когда динамическая разуклонка имеет наибольшие значения, увеличивая интенсивность износа на 6…8 %. При кривых средних радиусов 350 м < $R \leq 650$ м и скреплениях с крутильной жесткостью 650…750 кН·м/рад влияние промежуточных рельсовых скреплений на износ рельсов не превышает 3…4 %. Полученные функциональные коэффициенты позволяют откорректировать значения интенсивности бокового и вертикального износа с учетом применяемых типов промежуточных рельсовых скреплений.

Ранжирование факторов. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований процессов изнашивания рельсов от разных факторов, полученным количественным значениям износа выполнено ранжирование факторов по доле влияния их на интенсивность износа.

Установлены факторы, позволяющие управлять износом рельсов:

- категория качества рельсов (подбор категории качества рельсов может снижать интенсивность износа на 16…30 %);
- тип смазки и периодичность лубрикации (мощный фактор, позволяющий снижать интенсивность износа на 50…60 %);
- уровень непогашенного ускорения (необходимо стремиться к движению основной доли подвижного состава со скоростями, близкими к равновесной. Не допускать длительного движения поездов с уровнями отрицательного непогашенного ускорения менее – 0,2 м/с^2. Это позволит

снизить интенсивность износа рельсов на 20…30 %);

- стабильность подуклонки рельсов (минимизировать тенденцию к изменению подуклонки рельсов в кривых участках пути из-за релаксации подрельсовых прокладок от пропущенного тоннажа путем использования прокладок повышенной жесткости. Это может снизить интенсивность износа рельсов на 8…12 %).

Таблица 6 – Экспериментально-расчетные значения крутильной жесткости рельсов в зависимости от типа промежуточных рельсовых скреплений при действии боковой силы 39,2 кН на плече 0,1564 м

Тип скрепления		Рельс	Боковое отжатие головки рельса, мм	Угол поворота, рад	Крутильная жесткость, кН·м/рад	Среднее значение крутильной жесткости, кН·м/рад
	АРС-4	левый	1,34	0,0086	715,1	728,1
		правый	1,29	0,0083	741,1	
	ЖБР-65	левый	1,74	0,0111	551,7	533,6
		правый	1,86	0,0119	515,6	
	ЖБР-65ПШМ	левый	1,38	0,0088	696,4	673,9
		правый	1,47	0,0094	651,4	
	ЖБР-65ПШР	левый	1,28	0,0082	747,6	725,0
		правый	1,37	0,0087	704,0	
	PANDROL	левый	1,28	0,0082	751,5	721,7
		правый	1,39	0,0089	691,9	
	VOSSLOH	левый	1,61	0,0103	594,9	611,4
		правый	1,53	0,0098	628,0	
	КБ65	левый	2,45	0,0157	391,1	397,8
		правый	2,37	0,0152	404,4	

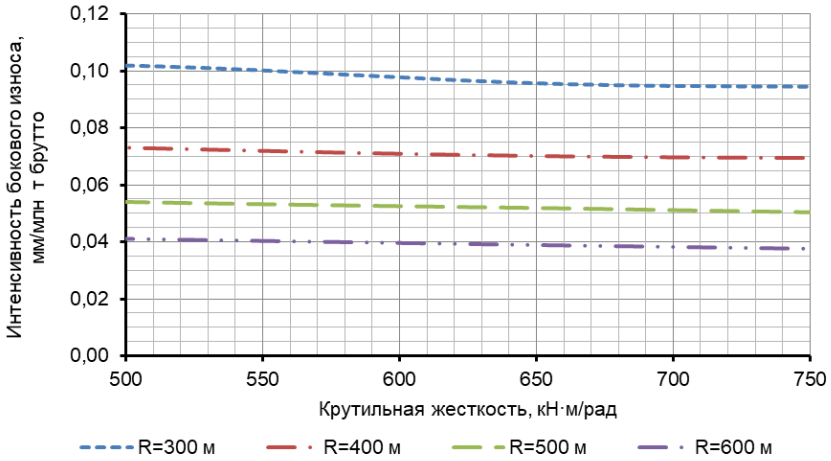

Рисунок 5 – Интенсивность бокового износа в зависимости от крутильной жесткости рельсов в кривых разных радиусов

Структурная схема факторов, ранжированных по доле вклада их в интенсивность износа рельсов, представлена на рисунке 6.

Рисунок 6 – Структурная схема факторов, ранжированных по доле вклада их в интенсивность износа рельсов

Для автоматизации проведения расчетов разработано программное обеспечение в среде графического программирования Lab View 2011. На примере 36 кривых проведено моделирование бокового износа рельсов с использованием разработанной методики. Выполнен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по износу рельсов, представленных техническим отделом Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ. Разность между расчетными и экспериментальными данными не превышала 15 %.

В четвертой главе представлены результаты теоретических исследований контактно-усталостной повреждаемости рельсов от величин осевых нагрузок. Разработан алгоритм определения контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов.

Разработана конечно-элементная модель прокатки вагонного колеса по рельсу. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния от вертикальной нагрузки на колесо 120 кН в контакте «колесо – рельс» (рисунок 7) показывают, что максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения в материале рельса расположены на глубине до 5 мм от поверхности катания рельса. С увеличением глубины эти напряжения быстро уменьшаются.

Распределение касательных напряжений в зоне контакта колеса с рельсом (рисунок 8) показывает, что значительные касательные напряжения возникают лишь в пределах небольшой зоны вблизи контакта. Касательные напряжения в других частях модели близки нулю.

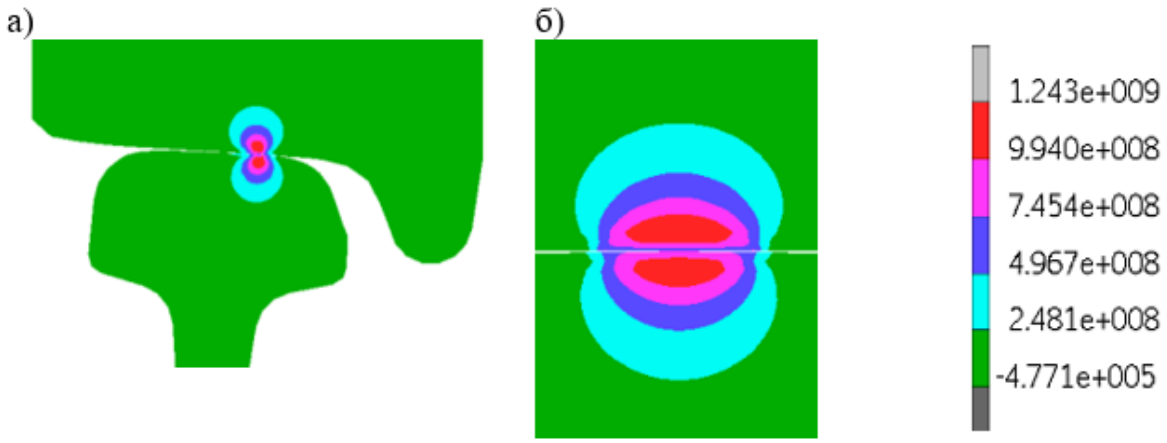

Рисунок 7 – Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в контакте «колесо – рельс»: а) вид сечения в поперечном направлении рельса; б) вид сечения в продольном направлении рельса

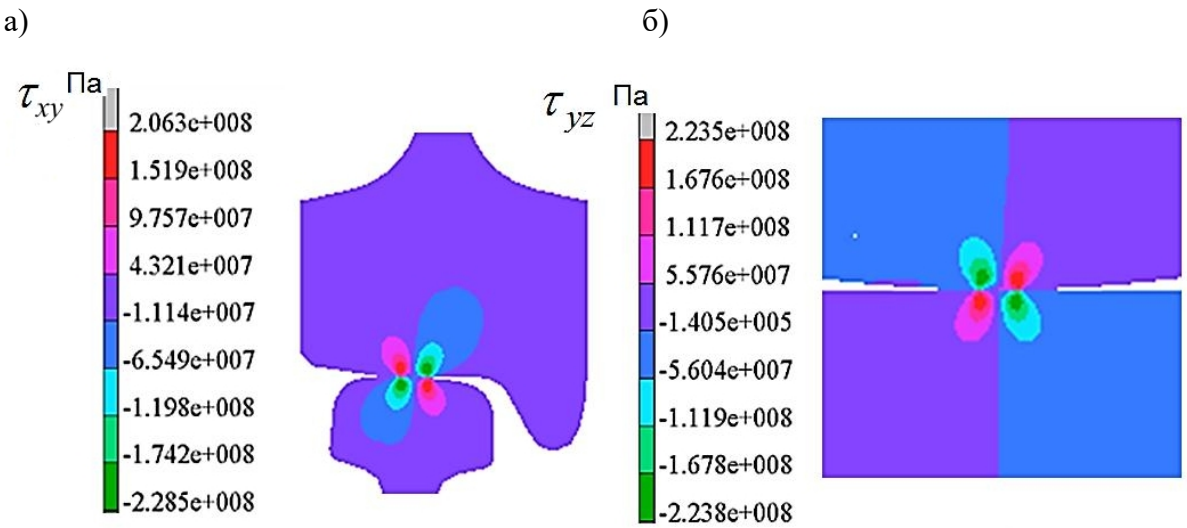

Рисунок 8 – Распределение касательных напряжений в контакте «колесо – рельс»: а) сечение в поперечном направлении рельса; б) сечение в продольном направлении рельса

Изменение компонент тензора напряжений в одной из точек поверхности катания рельса, лежащей на пути прокатки колеса при нагрузке на колесо 120 кН (рисунок 9), показывает, что максимальное нормальное σ_{yy} и максимальное касательное τ_{yz} напряжения на поверхности катания рельса не возникают одновременно, их максимумы сдвинуты во времени.

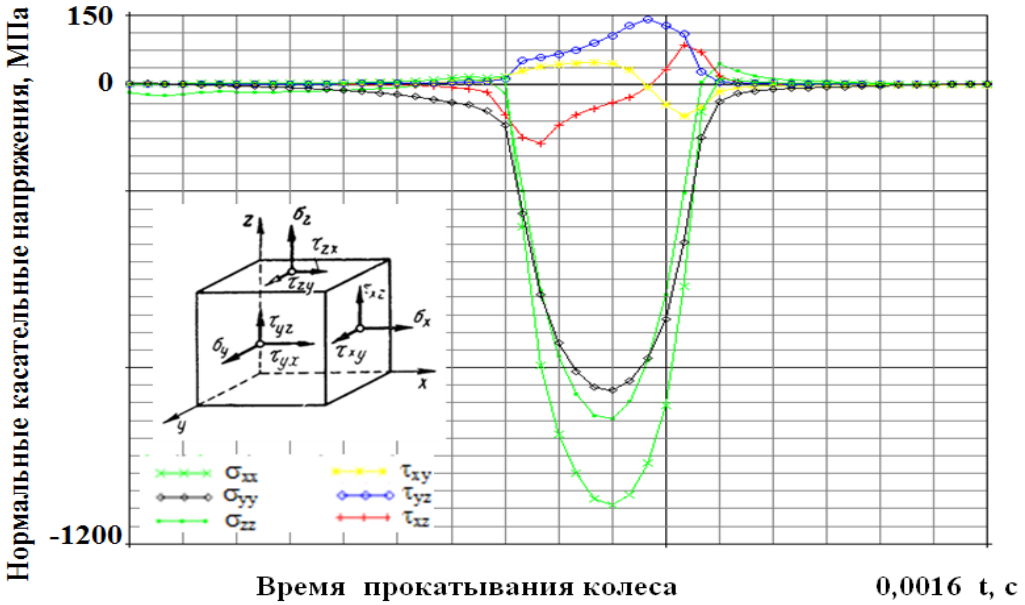

Рисунок 9 – Изменение компонент тензора напряжений в точке поверхности катания рельса при прокатывании колеса: σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz} – нормальные напряжения тензора вдоль осей *XX*, *YY*, *ZZ*; τ_{xz}, τ_{yz}, τ_{xz} – касательные напряжения на площадках, нормальных к осям *XX*, *YY*, *ZZ*

Характерной особенностью работы поверхности головки рельса является работа при циклическом упругопластическом нагружении. Деформационные подходы, основанные на учете как упругой, так и пластической составляющей деформации, наиболее точно подходят для исследования усталости материала на поверхности катания рельсов. Сравнивая механизмы разрушения, соответствующие известным моделям, с учетом характерной особенности работы поверхности головки рельса в упругопластической зоне при многоосном циклическом нагружении, включающем деформации растяжения-сжатия, нормальные к площадке максимальных сдвиговых деформаций в зоне контакта колеса с рельсом, для расчета контактно-усталостной повреждаемости рельсов предложена модель Брауна – Миллера.

В модели учитывается влияние деформаций сжатия, нормальных к площадке контакта и сдвиговых деформаций в зоне контакта колеса с рельсом. Случай многоосного усталостного разрушения описывается уравнением:

$$\varepsilon_a \cong \frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \alpha_{bm}\Delta\varepsilon_{\perp} = \beta_1 \frac{\sigma'_f - 2\sigma_{\perp\text{mean}}}{E}(2N_p)^b + \beta_2\varepsilon'_f(2N_p)^c, \qquad (4.1)$$

где ε_a – суммарная деформация в зоне контакта колеса с рельсом;
$\Delta\gamma_{max}$ / 2 – амплитуда максимальных сдвиговых деформаций, достигаемых на некоторой площадке в зоне контакта;
α_{bm}, β_1, β_2 – коэффициенты, равные $\alpha_{bm} = 0{,}3$; $\beta_1 = (1+\nu) + (1-\nu)\,\alpha_{bm}$; $\beta_2 = 1{,}5 + 0{,}5\alpha_{bm}$; ν – коэффициент Пуассона;
$\Delta\varepsilon_\perp$ – размах нормальных деформаций на этой площадке;
$\sigma_{\perp mean}$ – среднее за цикл нормальное напряжение на этой площадке;
E – модуль Юнга рельсовой стали;
N_p – число циклов нагружения до появления трещины;
σ'_f, ε'_f – коэффициенты усталостной прочности (осевой) и усталостной пластичности.

С использованием модифицированного метода твердости Расла – Фатеми для рельсов определены параметры деформационных кривых усталости. Эмпирические параметры σ'_f, ε'_f, b, c найдены с использованием характеристик механических свойств рельсовой стали. Деформационные кривые упругой, пластической и суммарной усталости для рельсовой стали представлены на рисунке 10.

При принятии усредненных характеристик показателей усталостной прочности и усталостной пластичности рельсовой стали, расчетных компонент тензора напряжений и деформаций, вычисленных для группы поверхностных и внутренних узлов конечно-элементной модели рельса, расположенных в зоне концентрации контактных напряжений при прокатке колеса под разной вертикальной нагрузкой в программном комплексе MSC.Fatigue, рассчитаны относительные повреждения на поверхности рельса за один цикл прокатки колеса. Расчет выполнен в предположении, что накопление усталостных повреждений материала головки рельса происходит в результате многократно повторяющихся нагружений, вызывающих повышение напряжений (деформаций) в зоне контакта катящегося колеса по рельсу.

Выполненная аппроксимация точек относительной повреждаемости W рельсов при прокатывании колеса с разной величиной нагрузки позволила получить теоретическую зависимость относительной повреждаемости от вертикальной силы в виде полинома:

$$W(F_i) = 9{,}15 \cdot 10^{-7} F_i^3 - 7{,}65 \cdot 10^{-5} F_i^2 + 0{,}00289 F_i, \qquad (4.2)$$

где F_i − вертикальная сила.

Полученные результаты относительной повреждаемости при прокатывании колеса по поверхности катания рельса от величин колесных нагрузок являются основой для проведения расчетов по повреждаемости рельсов до образования контактно-усталостных трещин на поверхности катания.

Получена зависимость относительной повреждаемости поверхности катания рельсов от значений вертикальной силы F_i (рисунок 11).

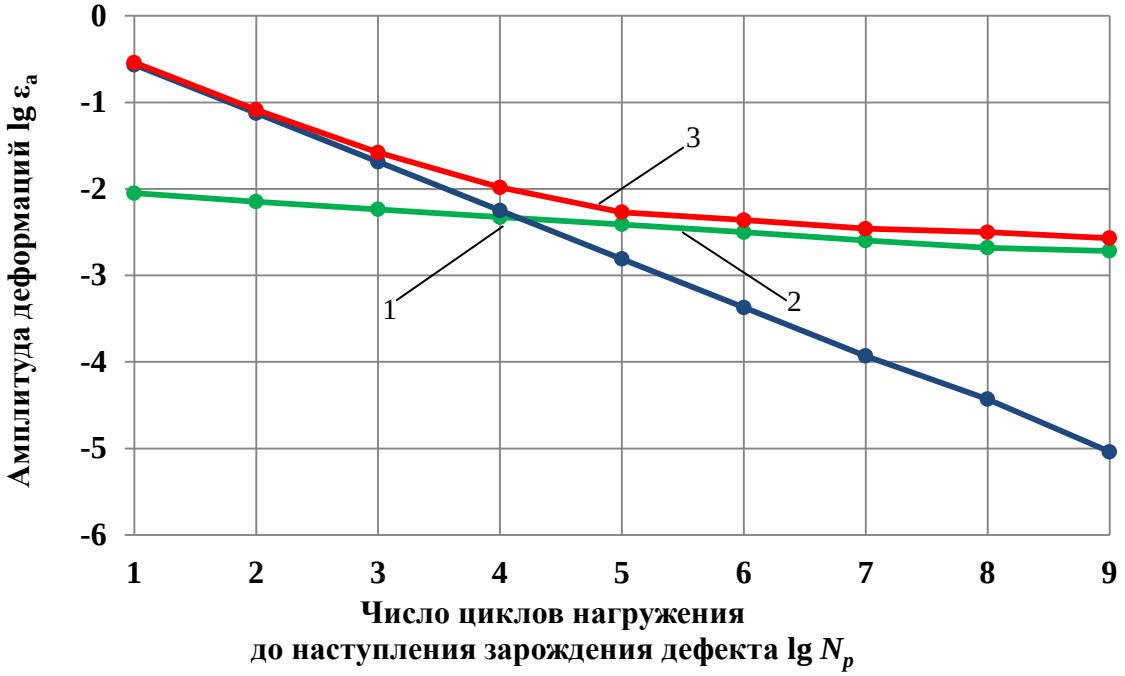

Рисунок 10 – Деформационные кривые усталости для рельсовой стали:
1 – кривая пластической усталости; 2 – кривая упругой усталости:
3 – кривая суммарной усталости

Рисунок 11 – Зависимость относительной повреждаемости за один цикл проката колеса от значений вертикальной силы F_i

В процессе движения колесные пары подвижного состава движутся по извилистым траекториям из-за конической формы поверхностей катания колес. Для определения статистического положения точек контакта колес с рельсом использован метод измерения горизонтального зазора между рельсом и гребнем колеса в движении. Для этого разработано устройство на основе системы технического зрения и предложен алгоритм обработки видеосигнала. Экспериментальным путем установлено, что распределение точек контакта колес подвижного состава по поперечному сечению головки

рельса неравномерно, основная доля приходится на продольные полосы поверхности катания рельса, расположенные на расстоянии 20...25 мм от внутренней боковой грани (~26,4 %) и на расстоянии 25...30 мм (22 %).

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований по воздействию на путь грузовых вагонов с нагрузками 230, 245 и 265 кН/ось на разных моделях тележек при пробегах до 150 тыс. км. На основании анализа результатов экспериментальных исследований установлено:

- распределения вертикальных сил от взаимодействия колес подвижного состава и пути в составе поездов, сформированных из вагонов с близкими осевыми нагрузками, представляют стационарные, эргодичные процессы с незначительными величинами асимметрии (не более 3,0…3,5 % от средних значений);
- спектральный анализ процессов взаимодействия колес с рельсами позволил установить, что спектральные плотности мощности сигналов в зоне контакта колес с рельсами представляют случайные процессы с распределением энергии по гармоническим составляющим в диапазоне частот до 30 Гц при скорости движения до 40 км/ч и смещении энергетических спектров в область более высоких частот до 60 Гц с повышением скорости до 80 км/ч;
- ансамбли вертикальных сил от воздействия поездов, сформированных из однородных вагонов, хорошо аппроксимируются нормальным законом по критерию согласования Колмогорова – Смирнова. В условиях реальной эксплуатации распределения вертикальных сил от разных поездов имеют различия, определяемые доминированием групп вагонов с разными осевыми нагрузками. Наиболее часто встречающимися являются двухмодальные распределения.

Выражение для интегральной частости вертикальной силы F_i от разных типов подвижного состава k_1, k_2, $k_3 \ldots k_j$, участвующих в формировании закона распределения частостей для сил F_i, можно записать в виде:

$$\begin{aligned} F_1 &\rightarrow P_1^{\Sigma} = \gamma_{k_1} P_{F_1}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_1}^{k_2} + \cdots \gamma_{k_j} P_{F_1}^{k_j}; \\ F_2 &\rightarrow P_2^{\Sigma} = \gamma_{k_1} P_{F_2}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_2}^{k_2} + \cdots \gamma_{k_i} P_{F_2}^{k_j}; \\ F_i &\rightarrow P_i^{\Sigma} = \gamma_{k_i} P_{F_i}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_i}^{k_2} + \cdots \gamma_{k_i} P_{F_i}^{k_j}, \end{aligned} \tag{5.1}$$

где F_1, $F_2 \ldots$ F_i – вертикальные силы в статистическом распределении с шагом Δ;

P_i^{Σ} – интегральная частость вертикальной силы F_i от суточного пакета поездов;

$P_{F_1}^{k_1}$, $P_{F_1}^{k_2} \ldots P_{F_i}^{k_j}$ – частости вертикальной силы F_1 в зависимости от типа подвижного состава $k_1 \ldots k_j$. Статистические характеристики частостей для вертикальных сил должны быть экспериментально установлены отдельно для каждого типа подвижного состава;

$\gamma_{k_1}, \gamma_{k_2} \ldots \gamma_{k_j}$ – доля подвижного состава k_j, курсирующего в суточном пакете

поездов;

k_j – тип подвижного состава, курсирующий на данном участке;

k – тип подвижного состава (k_1 – локомотивы; k_2 – грузовые поезда из полногруженых вагонов с нагрузкой до 230 кН/ось на тележках модели 18-100; k_3 – грузовые поезда из порожних и малогруженых вагонов на тележках модели 18-100; k_4 – грузовые поезда из инновационных вагонов с нагрузкой 245 кН/ось; k_5 – грузовые поезда из инновационных вагонов с нагрузкой 265 кН/ось; k_6 – пассажирского поезда; k_7 – скоростные пассажирские поезда («Невский экспресс» и др.); k_8 – высокоскоростные поезда («Сапсан»); k_9 – моторвагонный подвижной состав).

В качестве примера представлен расчет интегрального распределения вертикальных сил на прямом участке перегона Голутвин – Подлипки Московской ДИ, 2-й главный путь. Для построения функции распределения плотности вероятности вертикальных сил на данном участке пути определим функции плотности распределения для каждого типа подвижного состава:

$$f(P_i^{\Sigma}) = \gamma_{k_1} \cdot f(P_{F_i}^{K_1}) + \gamma_{k_2} \cdot f(P_{F_i}^{K_2}) + \gamma_{k_6} \cdot f(P_{F_i}^{K_6}) + \gamma_{k_9} \cdot f(P_{F_i}^{K_9}), \quad (5.2)$$

Для учета эксплуатации рельсов в летний и зимний период выражение для интегрального распределения вертикальных сил F_i запишется как:

$$P_{j\text{л}+\text{з}}^{\Sigma}(F_i) = \alpha P_{j\text{л}}^{\Sigma}(F_i) + \beta P_{j\text{з}}^{\Sigma}(F_i), \quad (5.3)$$

где $P_{j\text{л}}^{\Sigma}(F_i)$, $P_{j\text{з}}^{\Sigma}(F_i)$, $P_{j\text{л}+\text{з}}^{\Sigma}(F_i)$ – интегральные частости от всех типов подвижного состава k_j, проходящего по рассматриваемому участку в течение суток, для летних, зимних климатических условий и суммарная частость с учетом доли эксплуатации рельсов в летних и зимних условиях.

В результате расчетов получено интегральное распределение вертикальных сил на перегоне Голутвин – Подлипки Московской ДИ (рисунок 12).

Экспериментальными исследованиями установлено, что уровни нагруженности рельсов зависят не только от величин осевых нагрузок, но и состояния пути. Так, наличие выплесков во влажном состоянии определяет увеличение средних значений вертикальных сил от груженых грузовых вагонов в 1,28 раза, от порожних в 1,4 раза. Характер распределений вертикальных сил сохраняется со смещением в сторону более высоких средних значений вертикальных сил. При этом величины среднеквадратических отклонений изменялись не более чем на 4…6 %.

Интегральные плотности распределения вертикальных сил на выплесках с учетом воздействия типов подвижного состава k_j примут вид:

– на сухом выплеске:

$$f\left(P^{\Sigma k_j}(F_i^{\text{в.с.}})\right) = \gamma_{k_1} f\left(P_{F_i^{\text{в.с.}}}^{k_1}\right) + \gamma_{k_2} f\left(P_{F_i^{\text{в.с.}}}^{k_2}\right) + \ldots + \gamma_{k_j} f\left(P_{F_i^{\text{в.с.}}}^{k_j}\right), \quad (5.4)$$

– на влажном выплеске:

$$f(P^{\Sigma k_j}(F_i^{\text{в.в.}})) = \gamma_{k_1} f\left(P_{F_i^{\text{в.в.}}}^{k_1}\right) + \gamma_{k_2} f\left(P_{F_i^{\text{в.в.}}}^{k_2}\right) + \ldots + \gamma_{k_j} f\left(P_{F_i^{\text{в.в.}}}^{k_j}\right). \quad (5.5)$$

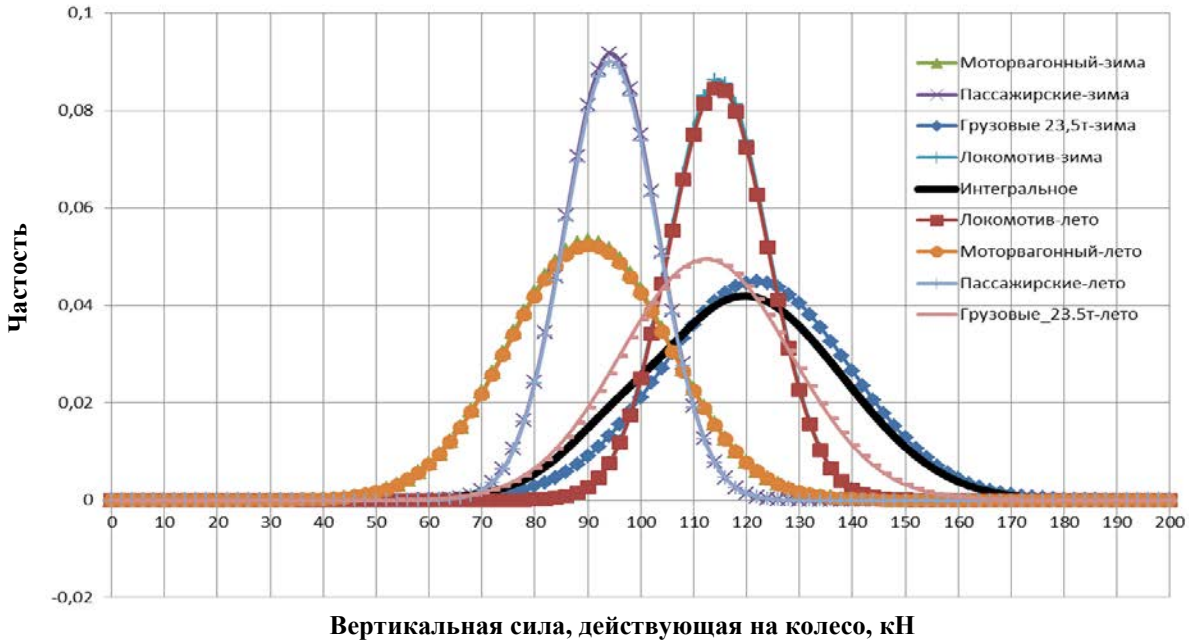

Рисунок 12 – Интегральное распределение вертикальных сил, действующих на рельсы от суточного пакета поездов, с учетом летнего и зимнего периодов эксплуатации

Принимая, что выплески могут быть в двух состояниях – влажный и сухой, разобьем работу рельсов, расположенных на выплесках, на три периода: весенний – осенний (влажный), летний (сухой) и зимний (при зимнем периоде различий в уровнях вертикальных сил на выплесках и эталонном пути не установлено).

Выражение для интегральной плотности распределения вертикальных сил для условий эксплуатации рельсов на влажном, сухом выплесках в летний и зимний периоды, запишется:

$$f(P^{\Sigma}(F_i^{\Sigma})) = \alpha_1 f(P^{\Sigma k_j}(F_i^{\text{в.в.}}) + \alpha_2 f(P^{\Sigma k_j}(F_i^{\text{в.с.}}) + \beta f(P^{\Sigma k_j}(F_i^{з})_{,} \qquad (5.6)$$

где $\alpha_1 = \frac{t^{\text{в.в.}}}{T_л}, \alpha_2 = \frac{t^{\text{в.с.}}}{T_л}$ – коэффициенты, учитывающие время работы рельсов на влажном и сухом выплесках в летний период;

$\beta = \frac{T_з}{T_{год}}$ – коэффициент, учитывающий время работы рельсов в зимний период;

$t^{\text{в.в.}}, t^{\text{в.с.}}, T_з, T_л$ – время работы рельсов на влажном и сухом выплесках в зимний и летний периоды;

$F_i^{\text{в.в.}}, F_i^{\text{в.с.}}, F_i, F_i^{з}$ – текущее значение вертикальных сил на влажном, сухом выплесках и пути без выплесков в летний и зимний периоды;

$P_i^{k_j}(F_i), P_i^{k_j}(F_i^{\text{в.в.}}), P_i^{k_j}(F_i^{\text{в.с.}})$ – частости вертикальных сил F_i , $F_i^{\text{в.в.}}$, $F_i^{\text{в.с.}}$ от типа подвижного состава k_j для случаев, когда рельсы эксплуатируются соответственно на пути без выплесков, на участках с влажными и сухими выплесками;

$f(P_i^{k_j}(F_i)); f(P_i^{k_j}(F_i^{\text{в.в.}})); f(P_i^{k_j}(F_i^{\text{в.с.}}))$ – плотности распределения вертикальных сил от типа подвижного состава k_j для случая, когда рельсы эксплуатируются на пути без выплесков, на участках с влажными и сухими

выплесками.

Таким образом, разработана методика определения интегрального распределения вертикальных сил от суммарного воздействия разных типов подвижного состава с учетом доли каждого из них, скоростей движения, климатических условий (зима, лето), состояния пути в виде наличия выплесков (влажных, сухих). Разработанная методика позволяет определять суммарное воздействие на рельсы и верхнее строение пути от воздействия всех типов подвижного состава, курсирующих по рассматриваемому участку.

В шестой главе приведены теоретические основы методики прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости рельсов до образования трещин на поверхности катания с учетом деградации механических свойств рельсовой стали от пропущенного тоннажа.

Выражение для накопления контактно-усталостных повреждений на поверхности катания рельсов от воздействия одного блока нагружения может быть записано:

$$W_{\Sigma} = \int_{F_{i\,\min}}^{F_{i\,\max}} P_i^{\Sigma}(F_i) W_i(F_i)\, dF_i, \qquad (6.1)$$

$P_j^{\Sigma}(F_i)$ – интегральная частость вертикальной силы от типов подвижного состава k_j;

где $W_i(F_i)$ – относительная повреждаемость поверхности рельса от вертикальных сил F_i, рассчитанная с учетом многоосного нагружения по модели Брауна – Миллера с использованием программного комплекса MSC.Fatigue.

Для определения пропущенного тоннажа до образования трещин на поверхности катания от контактно-усталостной повреждаемости введено понятие эквивалентная нагрузка $F_i^{\text{экв}}$ – поездная нагрузка, которая по повреждающему действию эквивалентна одному блоку нагружения.

Выражение для величины эквивалентной нагрузки $F_i^{\text{экв}}$ примет вид:

$$F_i^{\text{экв}} = \int_{F_{i\,\min}}^{F_{i\,\max}} P_j^{\Sigma}(F_i) \cdot F_i d\, F_i. \qquad (6.2)$$

Выражения (6.1), (6.2) позволяют определить интегральную повреждаемость и величину эквивалентной нагрузки для прогнозирования пропущенного тоннажа до образования контактно-усталостной трещины на поверхности катания рельса для одной рельсовой нити. Суммарный пропущенный тоннаж по пути будет в два раза больше. Тогда с учетом выражений (6.1), (6.2) суммарная пропущенная поездная нагрузка $T_{\text{кут}}^{\Sigma}$ в млн т брутто с учетом извилистого движения колесной пары до образование трещины на поверхности катания определится как:

$$T_{\text{кут}}^{\Sigma} = \frac{2 \cdot 10^7 \cdot F_i^{\text{экв}}}{W_{\Sigma}\, \text{К}_{\text{изв}}}, \qquad (6.3)$$

где $T_{\text{кут}}^{\Sigma}$ – величина пропущенного тоннажа по двум рельсовым нитям пути без учета деградации механических свойств рельсовой стали, до образования трещин на поверхности катания;

$F_i^{\text{экв}}$ – вертикальная нагрузка от колеса на рельс, эквивалентная по повреждающему действию одному блоку нагружения;

W_Σ – суммарная относительная повреждаемость от прокатки эквивалентной нагрузки $F_i^{экв}$;
$K_{изв}$ – коэффициент, учитывающий повреждаемость поверхности рельса с учетом извилистого движения колесной пары.

Принимая во внимание тот факт, что в модели Брауна – Миллера не учитывается деградация механических свойств материала рельсов на поверхности катания, а количественные зависимости от пропущенного тоннажа отсутствуют, был использован метод экспертных оценок. Предложено изменение интегральной повреждаемости рельсов представить в виде экспоненциальной зависимости:

$$W_\Sigma^t = W_\Sigma^1 a e^{-bt}, \qquad (6.4)$$

где W_Σ^t – интегральная повреждаемость поверхности катания рельсов после пропуска тоннажа t;
a, b – эмпирические коэффициенты;
t – текущее значение пропущенного тоннажа с начала эксплуатации рельсов;
W_Σ^1 – интегральная повреждаемость поверхности катания рельсов для нового рельса.

Интегральная повреждаемость, с учетом деградации механических свойств поверхностного слоя рельсов, в детерминированном виде для условных интервалов по пропущенному тоннажу t может быть определена:

$$W_\Sigma^T = \Upsilon_{t1} W_\Sigma^{t_1} + \Upsilon_{t2} W_\Sigma^{t_2} + \cdots + \Upsilon_{td} W_\Sigma^{t_d}, \qquad (6.5)$$

где $\Upsilon_{t1}, \Upsilon_{t2}, \Upsilon_{td}$ – доля интервалов с характерными механическими свойствами. Для рассматриваемого случая примем $\Upsilon_{t1} = \Upsilon_{t2} = \cdots = \Upsilon_{td} = const$:

$$\gamma_{td} = \frac{t_d}{T}. \qquad (6.6)$$

Тогда выражение (6.3) с учетом (6.4), (6.5) для определения пропущенного тоннажа по пути до образования трещин на поверхности катания рельсов с учетом деградации механических свойств запишется в виде:

$$T_{кут}^{\Sigma} = \frac{2 \cdot 10^7 \cdot F_{экв}}{W_\Sigma^T \cdot K_{изв}}. \qquad (6.7)$$

Путем верификации расчетных и экспериментальных данных до образования контактно-усталостных трещин на участках экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» Московской ДИ получены расчетные зависимости относительной повреждаемости для объемно-закаленных рельсов по условным интервалам пропущенного тоннажа с учетом деградации механических свойств поверхности катания рельсов, а также определены значения интегральной повреждаемости для летних и зимних условий экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ». Результаты расчета представлены в таблице 7.

С учетом результатов сравнительных стендовых испытаний образцов рельсовых сталей ОТ350, ДТ350, ДТ370ИК на контактно-усталостную прочность, проведенные АО «ВНИИЖТ» для прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости дифференцированно-термоупрочненных

рельсов, приняты величины относительной повреждаемости ниже в 1,3 раза, чем для объемно-закаленных рельсов.

По разработанной методике выполнены расчеты срока службы рельсов до образования трещин на поверхности катания на примере Зиловской дистанции пути Забайкальской ДИ. Установлено, что увеличение доли грузовых вагонов с нагрузками 245 кН/ось с 9 до 64 % приведет к снижению службы рельсов до образования трещин контактно-усталостного характера на поверхности катания рельсов на 11,3 %.

Таблица 7 – Зависимости относительной повреждаемости и величины интегральной повреждаемости объемно-закаленных рельсов для условных интервалов по пропущенному тоннажу и условий нагруженности рельсов характерных для экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ»

№	Интервал, млн т брутто	Зависимость относительной повреждаемости от величины колесной нагрузки, $W(F_i) = f(F_i)$	Интегральная повреждаемость $W_{\Sigma л}^{t}$ летом	Интегральная повреждаемость $W_{\Sigma з}^{t}$ зимой
1	0…30	$W(F_i) = 0{,}0000010686\ F_i^{\ 3} - 0{,}0001185704\ F_i^2 + 0{,}0054596564 F_i$	0,69	0,92
2	30…60	$W(F_i) = 0{,}0000013601\ F_i^3 - 0{,}0001509078\ F_i^2 + 0{,}0069486536\ F_i$	0,88	1,18
3	60…90	$W(F_i) = 0{,}0000015544\ F_i^3 - 0{,}0001724660\ F_i^2 + 0{,}0079413184\ F_i$	1,01	1,34
4	90…120	$W(F_i) = 0{,}0000018458\ F_i^3 - 0{,}0002048034\ F_i^2 + 0{,}0094303156\ F_i$	1,19	1,59
5	120…150	$W(F_i) = 0{,}0000027202\ F_i^3 - 0{,}0003018155\ F_i^2 + 0{,}0138973073\ F_i$	1,77	2,35
6	150…180	$W(F_i) = 0{,}0000033031\ F_i^3 - 0{,}0003664903\ F_i^2 + 0{,}0168753017\ F_i$	2,14	2,85
7	180…210	$W(F_i) = 0{,}0000050518\ F_i^3 - 0{,}0005605145\ F_i^2 + 0{,}0258092849\ F_i$	3,28	4,36
8	210…240	$W(F_i) = 0{,}0000076748\ F_i^3 - 0{,}0008515509\ F_i^2 + 0{,}0392102598\ F_i$	4,98	6,63
9	240…270	$W(F_i) = 0{,}0000094235\ F_i^3 - 0{,}0010455752\ F_i^2 + 0{,}0481442430\ F_i$	6,12	7,05
10	270…300	$W(F_i) = 0{,}0000117551\ F_i^3 - 0{,}0013042742\ F_i^2 + 0{,}0600562207\ F_i$	7,63	10,16

В седьмой главе приведены результаты исследований по отработке технологии фрезерования поверхности катания рельсов. Установлено, что после проведения фрезерования формировался поперечный профиль в виде многоугольника. В качестве примера на рисунке 13 показан характерный поперечный профиль рельса после фрезерования рельсофрезерным поездом РФП-1:

- полностью профили отфрезерованного рельса и по ГОСТ 51685-2013 совпадают в зоне рабочей выкружки боковой грани (на участке А – Б);
- на внутренней боковой грани профиля (рабочая грань) вслед за выкружкой (от Б до В) вместо радиуса сопряжения 80 мм образуется прямой

участок шириной 10,7 мм, формирующий продольную полосу, с глубиной в средней части до 0,5 мм;

- на участке от В до Г отфрезерованный профиль имел угловое смещение по отношению к исходному профилю в направлении часовой стрелки. Это возможно при расхождении подуклонок рельса и поверхности резания кассет фрезерного колеса;
- на внешней поверхности головки рельса (нерабочей грани) вместо плавной поверхности симметричной рабочей грани имеела место поверхность с переломом профиля в точках Г и Д. На участке Г–Д образована наклонная площадка с занижением от заданного профиля до 2 мм.

Таким образом, поперечный профиль, формируемый при фрезеровании рельсофрезерным поездом РФП-1, совпадал с заданным профилем Р65 только в зоне рабочей выкружки, а в остальных зонах он не соответствует требуемому очертанию.

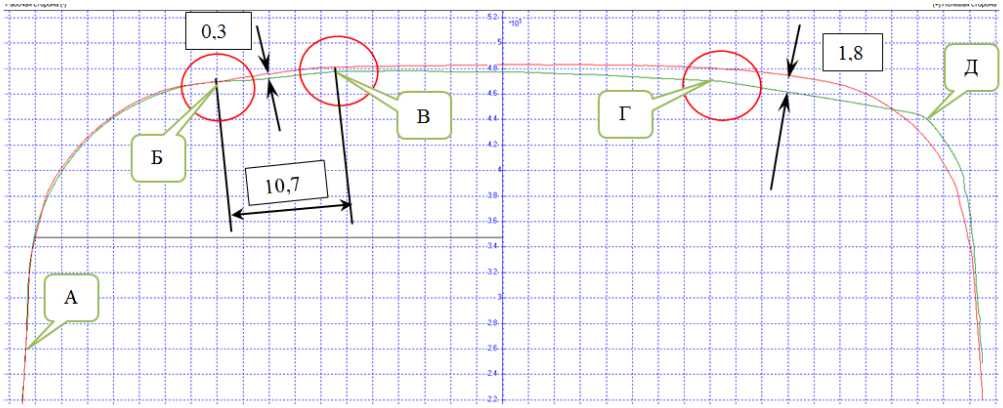

Рисунок 13 – Поперечные профили рельсов Р65: зеленый цвет – поперечный профиль отфрезерованного рельса; красный цвет – новый рельс по ГОСТ 51685-2013

Для установления причин некачественного формирования поперечного профиля было проведено измерение режущих кромок четырех кассет фрезерных колес с помощью высокоточной координатно-измерительной машины FARO Fusion 6. Облако точек кассеты в изометрии с видом ее боковой поверхности и поверхности резания представлены на рисунке 14.

Рисунок 14 – Облако точек кассеты в изометрии с видом ее боковой поверхности и поверхности резания

Из полученного в результате измерений общего облака точек выделены облака точек для каждой из твердосплавных пластин. Каждое облако точек представлялось в виде матрицы M размером $n \times 3$, где n – количество строк, равно количеству точек в облаке, столбцы – это координаты X, Y, Z. Для полученной матрицы производится сингулярное разложение вида:

$$M = USV^*, \tag{7.1}$$

где S – матрица размером $n \times 3$, у которой элементы, лежащие на главной диагонали, – это сингулярные числа (все элементы, не лежащие на главной диагонали, являются нулевыми);

U (порядка n) и V (порядка 3) – две унитарные матрицы, состоящие из левых и сингулярных векторов соответственно;

V^* – сопряженно-транспонированная матрица к V.

Решения систем уравнений сингулярного разложения в нашем случае использовалось для сжатия и распознавания изображений.

Дальнейшим шагом являлось разбиение облака точек на треугольники с использованием алгоритма Делоне, позволяющего максимизировать минимальный угол среди углов всех построенных треугольников, исключая образование тонких треугольников. Процесс триангуляции (разбивка на треугольники) с использования алгоритма Делоне для максимизации углов всех построенных треугольников в метрике Евклида приведен на рисунке 15.

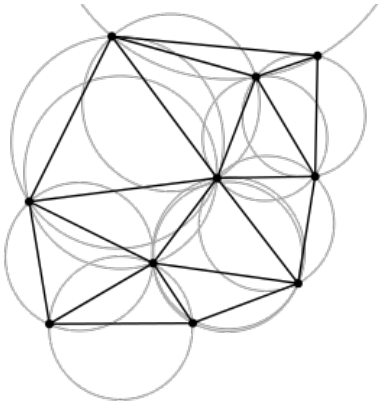

Рисунок 15 – Пример использования алгоритма Делоне
для максимизации углов всех построенных треугольников

Для каждого полученного треугольника вычисляются косинусы нормали к осям координат. Отбираются те треугольники, для которых косинусы нормали совпали (плюс/минус СКО) с косинусами плоскости, полученной методом сингулярного разложения.

По каждому облаку точек с помощью матричных преобразований (сингулярное разложение) и с использованием алгоритма Делоне (разбиение облака точек на треугольники) определялись точки, лежащие в горизонтальной и вертикальной плоскостях твердосплавных пластин.

По отобранным точкам определялась формула плоскости вида

$$x \cdot \cos a + y \cdot \cos b + z \cdot \cos c - p = 0, \tag{7.2}$$

где a, b, c – углы вектора нормали плоскости к осям x, y, z.

Формула линии кромки резания твердосплавной пластины определялась как пересечение передней вертикальной и горизонтальной плоскостей. Путем совмещения кромок резания всех пластин на кассете получена линия резания кассеты, образующая фактический формируемый профиль рельса (профиль резания кассеты). Результаты построения линии резания кассеты показаны на рисунке 16.

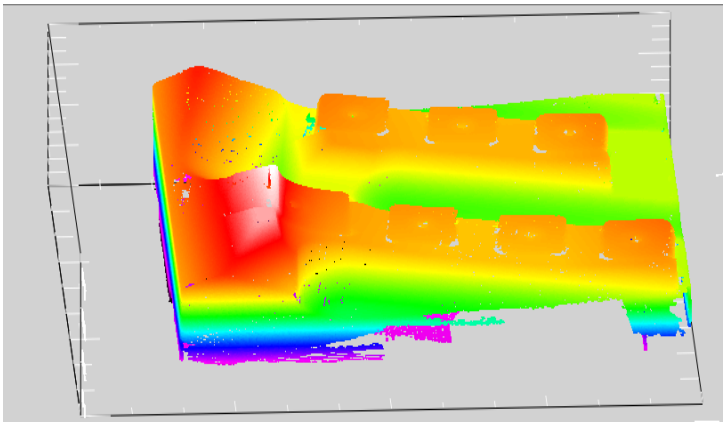

Рисунок 16 – Построенная по данным облака точек изображение кассеты с твердосплавными пластинами в изометрии в координатах *X–Y–Z*

Выполненные исследования геометрических параметров режущих поверхностей кассет показали:

- фактическая подуклонка на случайно выбранных кассетах из четырех фрезерных колес имела разброс от 1:32 до 1:44;
- величины фактической подуклонки кассет близки к 1:40, что не соответствует нормативному устройству российской рельсовой колеи, где номинал 1:20;
- при несовпадении значений геометрических параметров поверхности резания кассет фрезерных колес и рельсов происходит ухудшение профиля рельса после фрезерования – формируется ломаная линия, поверхность с излишним наклоном к поверхности катания колеса (1:20). Чем больше расхождение между подуклонками, тем больше отклонения от поверхности головки рельса Р65.

Показано, что качество формируемого поперечного профиля рельсов зависит:

- от калибровки и настройки режущей поверхности фрез, т.к. некачественная режущая поверхность определяет формирование ломанного профиля поверхности катания рельсов, повышенный съем металла;
- от геометрических параметров рельсовой колеи (изменения ширины колеи, поперечного профиля пути);
- от величины подуклонки рельсов.

Жесткая установка фрез под номинальную величину подуклонки рельсов определяет:

- ухудшение профиля рельса по отношению к исходному и к новому Р65 при фрезеровании рельсов с подуклонкой более 1/18 и менее 1/22;

- образование ступенек в зоне сопряжения обработанной поверхности рабочей выкружки и необработанной боковой поверхности рельса.

Созданная методика позволила разработать мероприятия по улучшению качественных параметров отфрезерованного профиля рельсов и передать их на АО «Калужский завод «Ремпутьмаш».

В процессе экспериментальных исследований установлено, что метод фрезерования позволяет эффективно удалять дефекты контактно-усталостного характера поверхностного слоя. Анализ расшифровки дефектограмм, полученных после проезда дефектоскопной тележки РДМ-2 до и после фрезерования показал:

- в прямом участке пути до фрезерования выявлены многочисленные пропадания донного сигнала (с углом ввода 0°) с суммарной длиной от 56 до 4916 мм на рельс. После фрезерования пропадание донного сигнала практически отсутствует. На отдельных рельсах остались зоны пропадания сигнала с суммарным значением от 24 до 160 мм. Когда глубина дефектов больше глубины фрезерования, дефекты удаляются частично. Для полного их удаления требуется увеличить съем металла путем повторного прохода;
- на действующем пути в кривой R = 650 м пропуски донных сигналов практически отсутствуют. Был зарегистрирован один пропуск длиной 168 мм. При проходе рельсофрезерного поезда РПФ-1 дефектоскопом РДМ-2 пропуски донных сигналов не зафиксированы.

Таким образом, показана эффективность удаления контактно-усталостных повреждений, распространяющихся на глубину до 2,5 мм, с использованием рельсофрезерного поезда. Разработана методика определения геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колес с преобразованием облака точек, полученных в процессе измерений координатно-измерительной машиной, методом сингулярного разложения и использования алгоритмов Делоне. Выполненные экспериментальные исследования технологии фрезерования рельсов и созданная методика позволили разработать мероприятия по совершенствованию технологии фрезерования рельсов, конструкции рабочих органов и параметрам режущего инструмента, измерительной системы рельсофрезерного поезда РФП-1 и передать их на АО «Калужский завод «Ремпутьмаш».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных комплексных теоретических и экспериментальных исследований получены новые научно обоснованные технические и технологические решения по снижению износа и контактно-усталостной повреждаемости рельсов для условий интенсификации грузового движения.

1. Разработана структурная схема и аналитические выражения для расчета бокового и вертикального износа рельсов с использованием впервые введенного понятия базовой интенсивности износа. На основании

комплексных экспериментальных и теоретических исследований установлены количественные значения и закономерности изменения интенсивности износа в зависимости от категорий качества рельсов, радиуса кривых участков пути, уровней непогашенных ускорений, периодичности лубрикации, продольного профиля пути и массы поездов, конструкции экипажных частей подвижного состава и величин осевых нагрузок, типа применяемых промежуточных рельсовых скреплений. Это позволило разработать научно обоснованную методику прогнозирования износа рельсов различных категорий качества для определения количественных величин бокового и вертикального износа в разных условиях эксплуатации.

2. По результатам многовариантных расчетов износа рельсов с использованием программного инструмента Rail Profile Wear Evolution в составе программного комплекса «Универсальный механизм» по критерию максимальной сходимости экспериментальных и расчетных данных в опытных кривых участках пути установлены параметры модели изнашивания Шпехта: коэффициент износа k_v = 2,57·10^{-13}, коэффициент скачка k_γ = 12 и критическая плотность мощности $P_{кр}$ = 30 Вт/мм² для рельсов ДТ350. Предложен метод оценки интенсивности износа рельсов разных категорий качества путем определения их коэффициентов износа.

3. Выполнено ранжирование факторов по доле их вклада в интенсивность износа рельсов. Выделены факторы, позволяющие управлять износом рельсов: категория качества рельсов, тип смазки и периодичность лубрикации, уровни непогашенных ускорений, стабильность подуклонки рельсов. Рациональный выбор управляющих факторов с использованием методики прогнозирования позволит минимизировать интенсивность износа рельсов в различных условиях эксплуатации.

4. Для автоматизации проведения расчетов износа рельсов разработана программа для ЭВМ в среде графического программирования Lab View 2011. На примере 36 кривых проведено моделирование бокового износа рельсов с использованием разработанной программы и выполнен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по износу рельсов, представленных техническим отделом Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ. Разность между расчетными и экспериментальными данными не превышала 15 %.

5. Разработан алгоритм прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости рельсов до образования трещин на поверхности катания. На разработанной конечно-элементная модели прокатки вагонного колеса по рельсу исследовано напряженно-деформированное состояния зоны контакта. По результатам моделирования установлено, что компоненты тензора напряжений на поверхности рельса находятся в непропорциональном многоосном напряженном состоянии. Это позволило обосновать применение деформационной модели Брауна – Миллера для прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости рельсов на поверхности катания до образования трещин.

6. Определены параметры деформационных кривых упругой,

пластической и суммарной усталости рельсовой стали с использованием модифицированного метода твердости Расла – Фатеми. Установлена полиноминальная зависимость относительной повреждаемости поверхности катания рельсов от вертикальной силы F_i путем проведения расчетов в программном комплексе MSC.Fatigue с использованием усредненных характеристик показателей степени усталостной прочности и пластичности рельсовой стали и расчетных напряжений в зоне контакта колеса и рельса.

7. Разработано устройство на основе системы технического зрения, предложен алгоритм обработки видеосигнала для определения распределений точек контакта колеса с рельсом по поперечному сечению. Путем испытаний груженого грузового вагона, оборудованного разработанным устройством, установлено, что основная доля точек контакта приходится на продольные полосы поверхности катания рельса, расположенные на расстоянии 20...25 мм от внутренней боковой грани (26,4 %), и на продольные полосы поверхности катания рельса, расположенные на расстоянии 25...30 мм (22 %).

8. Разработана методика определения интегральных распределений вертикальных сил, позволяющая учитывать воздействие от разного типа подвижного состава с учетом конструкции ходовых частей и величин осевых нагрузок, скорости движения, жесткости подшпального основания от сезонности (лето, зима), поперечного профиля пути, а также состояния пути в виде влажных и сухих выплесков.

9. Разработана методика прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин с учетом деградации механических свойств рельсовой стали в зависимости от пропущенного тоннажа. Расчетным путем установлено, что увеличение доли грузовых вагонов с осевыми нагрузками 245 кН с 9 до 64 % для условий Забайкальской ДИ приведет к снижению сроков до зарождения контактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов на 11,3 %.

10. Впервые для российских железных дорог установлены закономерности формирования методом фрезерования изношенного поперечного профиля головки рельса в прямых и кривых участках пути и эффективность удаления контактно-усталостных повреждений, распространяющихся на глубину до 2,5 мм, с использованием рельсофрезерного поезда. Разработана методика определения геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колес с преобразованием облака точек методом сингулярного разложения и использования алгоритмов Делоне, которая позволила выбрать рациональный профиль режущего инструмента для качественного репрофилирования изношенной головки рельса.

11. Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации являются:

- исследования по рациональному выбору управляющих факторов для снижения интенсивности износа рельсов;
- исследования контактно-усталостной повреждаемости рельсов в кривых участках пути малых и средних радиусов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1 Краснов, О. Г. Динамические силы и процессы в рельсах при ударном взаимодействии колес с дефектами / О. Г. Краснов, О. К. Богданов, М. Г. Акашев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – № 6. – С. 354–364.

2 Влияние величины осевых нагрузок на контактно-усталостную долговечность рельсов / В. С. Коссов, Г. М. Волохов, О. Г. Краснов, М. Н. Овечников, А. Л. Протопопов, В. В.Огуенко //Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 3. – С. 149–155.

3 Краснов, О. Г. Описание взаимодействия колес с дефектами на поверхности катания и рельсов / О. Г. Краснов // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. – 2018. – № 3. – С. 65–66.

4 Оценка воздействия на путь грузовых вагонов с осевыми нагрузками 25 и 23,5 тс / В. С. Коссов, А. А Лунин, О. Г. Краснов, А. В. Спиров // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 3. – С. 63–68.

5 Коссов, В. С. Тензометрическая колесная пара для подвижного состава с осевой нагрузкой до 30 тс / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. – 2017. – № 4. – С. 68–69.

6 Краснов, О. Г. Дополнительные затраты на тягу поездов из-за наличия дефектов на поверхности катания колес / О. Г. Краснов // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 29–34.

7 Коссов, В.С. Воздействие на путь грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками / В. С. Коссов, А. А. Лунин, О. Г. Краснов, А. В. Спиров // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 3. – С. 19–23.

8 Краснов, О. Г. Вибрационные процессы в балластном слое при нестационарных режимах нагружения /О. Г. Краснов, О. К. Богданов // Мир транспорта. – 2016. – № 6. – С. 66–77.

9 Коссов, В. С. Исследование напряженного состояния земляного полотна от воздействия грузовых вагонов с осевыми нагрузками до 30 тс / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, А. Л. Протопопов // Мир транспорта. – 2018. – № 7. – С. 70–91.

10 Коссов, В. С. Взаимодействие подвижного состава и пути в зонах понижения сварных стыков / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 8. – С. 19–25.

11 Коссов, В. С. Влияние сухих выплесков на динамику взаимодействия подвижного состава и пути / В. С. Коссов, О. Г.Краснов, М. Г. Акашев // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 2. – С. 23–25.

12 Краснов, О. Г. Методика определения интегрального распределения сил, действующих на путь // О. Г. Краснов / Мир транспорта. – 2019. – № 4. – С. 6–21.

13 Коссов, В. С. Влияние смятия в зоне сварных стыков на силовое воздействие подвижного состава на путь / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – № 1. – С. 35–43.

14 Коссов, В. С. Влияние влажных выплесков на динамику взаимодействия подвижного состава и пути / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – № 2. – С. 29–31.

15 Краснов, О. Г. Исследование геометрических параметров режущего инструмента рельсофрезерного поезда / О.Г. Краснов, А. В. Недбайло // Мир транспорта. – 2020. – № 4. – С. 67–71.

16 Коссов, В.С. Экспериментально-теоретический метод определения износостойкости рельсов разных категорий качества / В.С. Коссов, А.А. Лунин, О.Г. Краснов, М.Г. Акашев // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 7. С. 51–57.

17 Краснов, О. Г. Влияние непогашенного ускорения на интенсивность износа рельсов / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, Н.М. Никонова. // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. – 2021. – № 4. – С. 68–69.

18 Коссов, В.С. К вопросу определения относительной контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов / В. С. Коссов, А. В. Савин, О. Г. Краснов // Мир транспорта. – 2021. – № 1. – С. 6–17.

б) публикации в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science:

19 Kossov, V. S. Dynamics of Rolling Stock Wheels and Track Interaction in Areas of Welded Rail Joints Crush / V. S. Kossov, O. G. Krasnov, N. M. Nikonova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 459. – 022049.

в) патенты:

20 Патент № 2441206 Российская Федерация, МПК G01L 5/16 (2006.01), G01L 1/22 (2006.01). Устройство для измерения боковых и вертикальных сил взаимодействия колеса с рельсом: № 2010144830/28: заявл. 02.11.2010: опубл. 27.01.2012 / О. Г. Краснов, А. Л. Бидуля, В. С. Коссов, Н. Н. Астанин; заявитель ОАО «РЖД». – 7 с.: ил.

21 Патент № 2513338 Российская Федерация, МПК B61K 9/08 (2006.01), E01B 35/12 (2006.01). Способ оценки состояния рельсового пути: № 2012156356/11: заявл. 25.12.2012: опубл. 20.04.2014 / А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, Н. Н. Никитина; заявитель ОАО «РЖД». – 8 с.: ил.

22 Патент № 2566654 Российская Федерация, МПК G01L 5/16 (2006.01). Устройство измерения и регистрации сил взаимодействия между колесом и рельсом: № 2014103289/28: заявл. 31.01.2014: опубл. 27.10.2015 / А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, О. Л. Фролова; заявитель ОАО «РЖД». – 10 с.: ил.

г) публикации в других научных изданиях и материалах конференций

23 Краснов, О. Г. Прогнозирование сил в контакте колеса с рельсом с использованием нейронных сетей / О. Г. Краснов, Н. Н. Астанин // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. – 2010. – Вып. 92. – С. 126–136.

24 Коссов, В. С. Результаты эксплуатационных испытаний геометрически-силового метода оценки состояния пути / В. С. Коссов, А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Труды XIII международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта» (Днепропетровск, 2012 г.). – С. 67–68.

25 Краснов, О. Г. Прогнозирование сил взаимодействия колес грузовых вагонов и пути / О. Г.Краснов, Н. Н. Астанин // Труды XIII международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта» (Днепропетровск, 2012 г.). – С. 71–72.

26 Краснов, О. Г. Исследование вертикальных сил взаимодействия дефектных колес с рельсами / О. Г. Краснов, В. Н. Сенча // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 2. – С. 42–45.

27 Краснов, О. Г. Оценка состояния пути геометрически-силовым методом на искусственных неровностях / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, В. М. Сасковец // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – № 7. – С. 24–29.

28 Краснов, О. Г. О некоторых особенностях виляния колесной пары грузового вагона / О. Г. Краснов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 3. – С. 38–40.

29 Краснов, О. Г. Влияние ударных сил на вибрации в балластном слое / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, А. В. Ефименко // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 3. – С. 5–10.

30 Краснов, О.Г. Результаты оценки состояния пути диагностическим поездом геометрически-силовым методом / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, А. В. Ефименко, Т. Ю. Некрасова // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 20–24.

31 Коссов, В. С. Статистический и спектральный анализ вертикальных сил и прогибов рельсов от воздействия грузовых вагонов с осевыми нагрузками 25 и 23,5 тс / В. С. Коссов, О. Г. Краснов // Сборник тезисов XII международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века (идеи, требования, проекты)» (СПб.: ПГУПС императора Александра I, 2017 г.). – С. 119–121.

32 Краснов, О. Г. Статистический анализ грузовых вагонов с повышенным динамическим воздействием на железнодорожный путь / О. Г. Краснов // Сборник тезисов XII международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века (идеи, требования, проекты)» (СПб.: ПГУПС императора Александра I, 2017 г.). – С. 122–123.

33 Краснов, О. Г. Дополнительные затраты на тягу поездов из-за наличия дефектов на поверхности катания колес / О. Г. Краснов // Proceedings of articles the International scientific conference “Science and Life” (Karlovy

Vary: Moscow, 2016). – P. 7–14.

34 Краснов, О. Г. Методика непрерывного оценивания вертикальных и боковых сил в зоне контакта колеса с рельсом / О. Г. Краснов // Сборник тезисов XIV всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017 г.). – С. 259–262.

35 Коссов, В. С. Создание тензометрической колесной пары для непрерывной регистрации вертикальных и боковых сил в зоне контакта колеса с рельсом / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, Н. К. Закаблукова, М. Г. Акашев // Сборник тезисов XIV всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017 г.). – С. 251–254.

36 Коссов, В. С. О влиянии повышенных осевых нагрузок на долговечность рельсов / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, А. Л. Протопопов // Сборник тезисов XIII международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века (идеи, требования, проекты)» (СПб.: ПГУПС императора Александра I, 2018 г.). – С. 169–170.

37 Коссов, В. С. Повышение надежности рельсов при эксплуатации в условиях низких температур / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, В. Н. Огуенко // Труды XVI международной научно-технической конференции (чтений памяти профессора Г. М. Шахунянца) «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». Секция 2. Железнодорожный путь для высокоскоростного движения и высоких осевых нагрузок. – М., 2019. – С. 82–87.

38 Краснов, О. Г. К вопросу оценки ресурса рельсов в зоне сварных стыков / О. Г. Краснов // Сборник научных докладов по материалам 135-го заседания НП «Рельсовая комиссия». – Екатеринбург: АО «УИМ», 2020. – С. 127–134.

39 Краснов, О. Г. Методика определения контактно-усталостной долговечности рельсов / О. Г. Краснов // Сборник научных докладов по материалам 136-го заседания НП «Рельсовая комиссия». – Екатеринбург: АО «УИМ», 2021. – С. 129–139.

40 Краснов, О. Г. Воздействие на путь разных типов подвижного состава в условиях горно-перевального участка /О. Г. Краснов, М.Г. Акашев, В. Ю. Колтунов // Сборник трудов I международной научно-практической конференции «Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт». – М.: АО «ВНИИЖТ», 2021. – С. 110–115.

Краснов Олег Геннадьевич

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА
И КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ РЕЛЬСОВ
ДЛЯ УСЛОВИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГРУЗОВОГО ДВИЖЕНИЯ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание, проектирование железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать Заказ Формат 60×90/16
Объем 2,5 усл. п. л. Тираж 100 экз.
127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ)