

На правах рукописи



Кузнецова Наталья Владимировна

**ВЛИЯНИЕ ТИПА И СОСТОЯНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ
СКРЕПЛЕНИЙ НА РАЗВИТИЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ
ДЕФЕКТОВ РЕЛЬСОВ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Сычев Вячеслав Петрович

Официальные оппоненты: **Бельтюков Владимир Петрович**
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I», кафедра «Железнодорожный
путь», профессор,
Третьяков Василий Владимирович
кандидат технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
«Центр инновационного развития СТМ»,
технический эксперт.

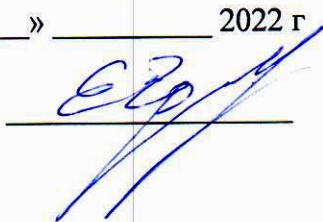
Ведущая организация: Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
железнодорожного транспорта»

Защита состоится 15 декабря 2022 г. в 13.30 на заседании диссертационного совета 40.2.002.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 125315, г. Москва, ул. Часовая, д. 22/2, стр. 1, ауд. 329.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miiit.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гринь Елена Николаевна

Актуальность темы исследования. Актуальность работы определяется Стратегией научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга), утвержденной распоряжением от 17 апреля 2018 г. № 769/р в части реализации основных задач инновационного развития путевого комплекса: развитием тяжеловесного и высокоскоростного движения; планируемым увеличением срока службы верхнего строения пути до 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа, что в разы больше существующих нормативных показателей: 700, 900 и 1400 млн т брутто; сокращением эксплуатационных затрат; расширением полигона укладки бесстыкового пути с рельсами мирового уровня качества на железобетонных шпалах с упругими рельсовыми скреплениями.

Промежуточные рельсовые скрепления являются одним из важнейших компонентов конструкции верхнего строения пути (далее – ВСП), определяющим ее безопасность и надежность, в том числе геометрию и пространственную жесткость рельсовой колеи, влияющую на характер взаимодействия пути и подвижного состава, а также на затраты владельца инфраструктуры в течение основных этапов жизненного цикла конструкции пути.

Протяженность пути с упругими рельсовыми скреплениями на железобетонных шпалах составляет порядка 40 % от общей протяженности главных путей, при этом при реконструкции пути и капитальных ремонтах 1 уровня (с использованием новых материалов) укладывается рельсошпальная решетка только с упругими скреплениями.

Снижение влияния конструкции пути на интенсивность развития дефектов на рабочей поверхности головки рельсов, снижение текущей дефектности рельсов и повышение их долговечности возможно за счет рационального применения промежуточных рельсовых скреплений.

Степень разработанности темы исследования.

На безотказную работу рельсов, помимо собственно их свойств, оказывают не меньшее влияние эксплуатационные факторы: климатические условия, величина радиуса пути в плане и длина кривых, особенности подвижного состава и режимы вождения, а также конструкция и состояние промежуточных рельсовых скреплений.

Научные положения диссертации формировались на основе исследований российских и зарубежных ученых ведущих научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений: ВНИИЖТ, НИИАС, РУТ (МИИТ), ПГУПС, СГУПС, РГУПС, ДВГУПС. Вопросам оценки надежности, экономической эффективности, стоимости жизненного цикла железнодорожного пути посвящены работы А.Ю. Абдурашитова, В.Г. Альбрехта, Е. С. Ашпиза, Л. С. Блажко, М. Ф. Вериги, Э. В. Воробьева, Б. Э. Глюзберга, В. М. Ермакова, А. В. Замуховского, А. М. Замышляева, В.Б. Каменского, Н.И. Карпущенко, Н.И. Коваленко, Н.П. Кондакова, А.А. Локтева, В.С. Лысюка, В.И. Новаковича, В.О. Певзнера, Е.Н. Розенберга, А.В. Савина, В.П. Сычева, О.А. Сулова, В.И. Тихомирова, М.Ю. Хвостика, Г.М. Шахунянца, В.Я.Шульги, Г.К. Щепотина, В.Ф. Яковлева. Из зарубежных ученых отмечается вклад С.Guangxiong, N.A. Koorn, U. Kurze, Y.A. Naglor, J.Stage, R. Weltschrek. В работах указанных авторов решались задачи оценки надежности ВСП с целью совершенствования конструкции, обеспечения ее эффективной работы под поездной нагрузкой в изменяющихся условиях эксплуатации.

В настоящее время при расширении модельного ряда промежуточных рельсовых скреплений, применяемых на сети железных дорог ОАО «РЖД», возникла необходимость актуализировать результаты этих исследований обоснованием влияния типа и состояния рельсовых скреплений на повышение долговечности рельсов.

Цель и задачи работы. Целью данной работы является обоснование применения промежуточных рельсовых скреплений для различных условий эксплуатации на основе оценки влияния типа и состояния скреплений на интенсивность развития контактно – усталостных дефектов на рабочей поверхности головки рельсов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить сравнительный анализ эксплуатационной стойкости скреплений;
2. Оценить напряженно-деформируемое состояние элементов конструкции пути;
3. Построить и обосновать аналитические зависимости развития дефектов контактно – усталостного происхождения в рельсах от типа и состояния скреплений;
4. Определить эффективность применения скреплений при различных эксплуатационных условиях;
5. Разработать рекомендации для расширения сфер применения скреплений.

Объектами исследования являются: промежуточные рельсовые скрепления, рельсы железнодорожные, конструкция верхнего строения железнодорожного пути, долговечность рельсов, математические модели.

Предмет исследования. Влияние типа и состояния промежуточных рельсовых скреплений на эксплуатационную стойкость рельсов. Повышение долговечности рельсов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Рассчитано влияние пространственной жесткости промежуточных рельсовых скреплений на интенсивность накопления контактно – усталостных поверхностных повреждений головки рельсов на базе программного комплекса «Универсальный Механизм» с применением имеющихся моделей силового воздействия подвижного состава на путь и использованием фактических (по результатам стендовых испытаний) значений вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости скреплений и влияния крутильной жесткости и демпфирования скреплений различных типов.
2. Разработаны аналитические зависимости для определения интенсивности развития поверхностных контактно-усталостных дефектов в головке рельсов в зависимости от типа и состояния промежуточных рельсовых скреплений;
3. Разработана и реализована методика технико-экономической оценки конструкции ВСП при различных типах рельсовых скреплений;
4. Предложены научно-обоснованные рекомендации по расширению существующих сфер рационального применения скреплений различных типов.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в формировании научно-обоснованных расчетно-аналитических зависимостей влияния жесткости промежуточных рельсовых скреплений различных типов на интенсивность развития дефектов контактно-усталостного происхождения на рабочей поверхности головки рельсов в процессе эксплуатации.

Разработана методика эффективности функционирования альтернативных конструкций верхнего строения железнодорожного пути, содержащая математическую

модель расчета стоимости жизненного цикла по расширенному перечню критериев (с учетом производительности труда и фондоотдачи) в зависимости от условий эксплуатации.

Полученные результаты

были использованы:

– при подготовке рекомендаций для ОАО РЖД о мероприятиях по повышению долговечности рельсов в различных эксплуатационных условиях совместно с АО «ВНИИЖТ»;

– при разработке методики оценки эффективности функционирования альтернативных конструкций верхнего строения железнодорожного пути.

позволяют:

– снизить текущую дефектность и повысить долговечность рельсов в эксплуатации за счет рационального применения промежуточных рельсовых скреплений различных типов и обеспечения их работоспособного состояния.

могут быть использованы:

- при корректировке ГОСТ Р 59482-2021 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Общие технические условия»;

– при сравнении альтернативных вариантов конструкций верхнего строения пути;

– при разработке проектов участков пути, решении вопросов закупки скреплений при планировании реконструкции и капитальных ремонтов железнодорожного пути.

Методология и методы исследования, примененные в диссертационной работе следующие: систематизация, методы математической статистики, анализ, оценка применимости статистических и вероятностных методов, математическое моделирование, адаптивное прогнозирование, классификация сложных объектов; оценивание статистических величин с неопределенной функцией распределения по цензурированным (структурированным) выборкам.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты расчетов влияния пространственной жесткости промежуточных рельсовых скреплений на интенсивность накопления контактно – усталостных поверхностных повреждений головки рельсов на основе фактических, по результатам стендовых испытаний, значений вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости, с учетом влияния крутильной жесткости и демпфирования скреплений различных типов;

2. Аналитические зависимости интенсивности развития контактно-усталостных дефектов в рельсах от типа и состояния промежуточных рельсовых скреплений;

3. Результаты расчетов по оценке эффективности функционирования в заданных эксплуатационных условиях участков пути, сформированных с использованием различных промежуточных рельсовых скреплений;

4. Научно-обоснованные рекомендации по расширению сфер рационального применения скреплений различных типов.

Степень достоверности и апробация результатов:

Степень достоверности результатов подтверждена сопоставлением результатов многофакторного расчета на базе программного комплекса «Универсальный Механизм» с результатами статистических исследований влияния жесткости промежуточных рельсовых скреплений на интенсивность накопления контактно – усталостных поверхностных повреждений головки рельсов.

Основные положения диссертации докладывались и получили одобрение на ежегодных научно-практических конференциях с международным участием «Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство» в 2017–2021 гг. РУТ (МИИТ), на ежегодных всероссийских научно-технических конференциях «Транспортное строительство» в 2020–2021 гг.

Результаты проведенных исследований были использованы при выполнении хозяйственных тем с АО «ВНИИЖТ»: договор № о.п.10.03.250/17 от 30 мая 2017 г.; договор 2857545 (1.РСТМ.10.04391/18) от 30.03.2018 г. (шифр 5.364); договор № 0.РСТМ.10.04725/18 от 12 июля 2018 г.

В рамках работ АО «ВНИИЖТ» для АО «РЖД» выполнен сравнительный анализ эксплуатационной стойкости рельсов, подготовлены рекомендации о мероприятиях по повышению долговечности рельсов в различных эксплуатационных условиях.

Объем и структура работы. Данная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 122 страницах печатного текста, имеет 12 таблиц, 31 рисунок. Список использованных источников содержит 152 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, аргументированы научная новизна, достоверность научных положений и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ особенностей промежуточных рельсовых скреплений различных типов, указаны их основные характеристики, преимущества и недостатки в эксплуатации, которые определяют сферы рационального применения промежуточных рельсовых скреплений, утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 28 июня 2018 г. №1362/р.

Выявлены основные факторы, ограничивающие срок службы рельсовых скреплений:

- интенсивность снижения усилия продольного сдвига рельса в узле скрепления;
- не полное соответствие вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости скрепления условиям эксплуатации;
- интенсивность снижения удерживающей способности в поперечном направлении, определяемая как относительное изменение остаточного поперечного перемещения головки и подошвы рельса в узле скрепления.

Увеличение протяженности полигона бесстыковой конструкции пути на железобетонных шпалах, в том числе за счет укладки рельсовых плетей в кривых малого радиуса, рост осевых нагрузок и объемов тяжеловесного движения определяет необходимость усиления эксплуатационной стойкости промежуточных рельсовых скреплений, в первую очередь за счет совершенствования технических требований к ним, обеспечивающих повышение технических характеристик скреплений.

Исходя из условий применения при капитальных ремонтах пути 1-го уровня (КРН), к рассмотрению приняты нераздельные скрепления с упругими клеммами типа: ЖБР-65Ш и его модификации с подкладкой, АРС-4, W-30 и ПФК-350.

Во второй главе определялась степень влияния контактно-усталостных повреждений рабочей поверхности головки рельсов на долговечность рельсов.

Появление и развитие контактно-усталостных дефектов в головке рельса больше характерно для участков, на которых интенсивность износа, в первую очередь бокового, незначительна – в прямых и пологих кривых. Кроме того, в кривых малого радиуса по упорной нити при интенсивном боковом износе по внутренней нити наблюдаются КУД, при которых рельс становится контроленепригодным.

Интенсивный износ головки рельса снижает вероятность образования поверхностных усталостных трещин, не давая им развиться и стать причиной изломов и изъятий рельсов при сверхнормативных размерах трещин и выкрашиваний в головке рельса.

От воздействия колес в головке рельса в месте контакта возникают значительные знакопеременные напряжения, которые в зонах концентрации превышают предел выносливости рельсовой стали. После определенной наработки в этих зонах от поверхности катания возникают трещины контактной усталости, приводящие к изломам и отказам рельсов.

Анализ причин изъятий рельсов проводился по разработанной с участием диссертанта «Программе и методике эксплуатационных испытаний рельсов» с использованием методов математической статистики по результатам выборок из электронных баз данных, которые группировались в совокупности по определенным характеристикам: полигон укладки, категория рельсов, код дефекта, наработка тоннажа, тип скрепления и прочие параметры.

При сравнительном анализе наиболее объективные результаты достигаются при комплексном использовании нескольких показателей:

1. Удельный выход рельсов (n_y), характеризует количество изъятий рельсов на единицу протяженности их укладки за единицу времени, шт./100 км в год и является одной из наиболее показательных характеристик эксплуатационной стойкости рельсов при выборках больших объемов.

2. Процентное отношение изъятий рельсов по определенным кодам (группе кодов) дефектов к общему количеству изъятий ($d\%$) является сравнительным показателем, характеризующим степень соответствия свойств рельсов условиям эксплуатации.

Для установления степени влияния дефектов контактно-усталостного характера на долговечность рельсов и, в дальнейшем, разработки математической модели определения влияния типа и состояния скрепления на возникновение в рельсах дефектов контактно-усталостного происхождения сформирована отдельная группа (КУД), включающая одиночное изъятие рельсов по кодам дефектов: 10, 12 (11), 19, 22 (21).

На основании содержащихся в электронных базах данных сформированы совокупности одиночных изъятий по группам дефектов объемно (ОТ) и дифференцированно (ДТ) термоупрочненных рельсов типа Р65, в том числе контактно-усталостного происхождения, на сети железных дорог ОАО «РЖД».

Совокупное изъятие рельсов по рассматриваемым кодам дефектов составляет от 20 до 40% от общего количества изъятий, что свидетельствует о высокой значимости результатов научно-технических решений, способных уменьшить удельный выход рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения (рисунок 1).

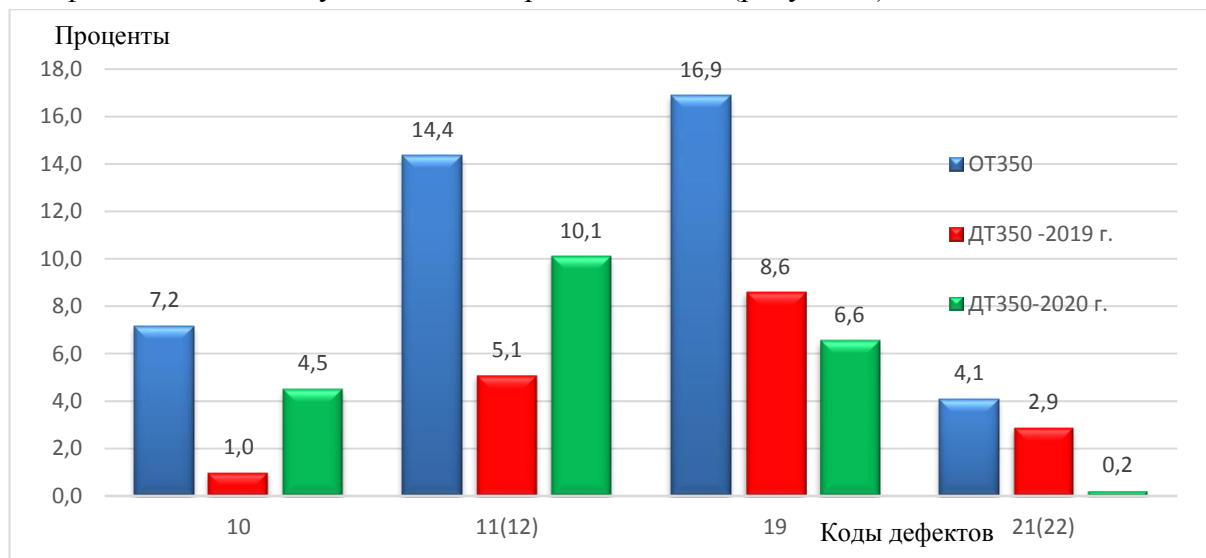


Рисунок 1 – Доля изъятий рельсов по контактно-усталостным видам дефектов в зависимости от общего количества изъятий

Данные, получаемые по одному году, не в полной мере характеризуют фактическое состояние по одиночному изъятию рельсов. На рисунке 2 представлены графики, иллюстрирующие различие в результатах при рассмотрении данных по рельсам ДТ за один и три года. Итоговые графики (данные усреднены по трем годам выборки) доли изъятий (d) по отдельным кодам дефектов от общего количества изъятий рельсов наглядно демонстрируют, что наиболее интенсивно изъятия рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения происходят на ранней стадии эксплуатации при наработке до 150 млн т брутто с последующим всплеском при наработке порядка 600 млн т брутто.

Если в начале эксплуатации, при приработке, эти изъятия рельсов следует относить, как правило, к металлургическим недостаткам самих рельсов, то при наработке 500 – 600 млн т брутто эти дефекты возникают от отступлений в содержании, в том числе при изменении вертикальной и горизонтальной жесткости конструкции верхнего строения пути.

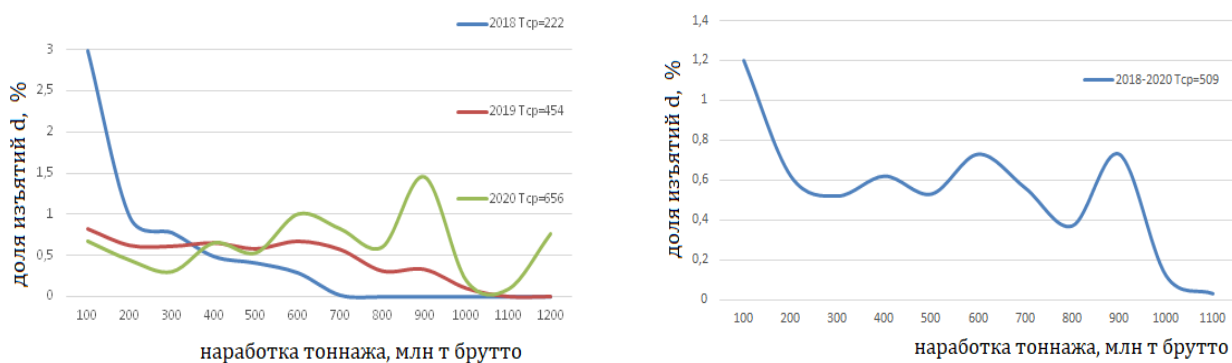
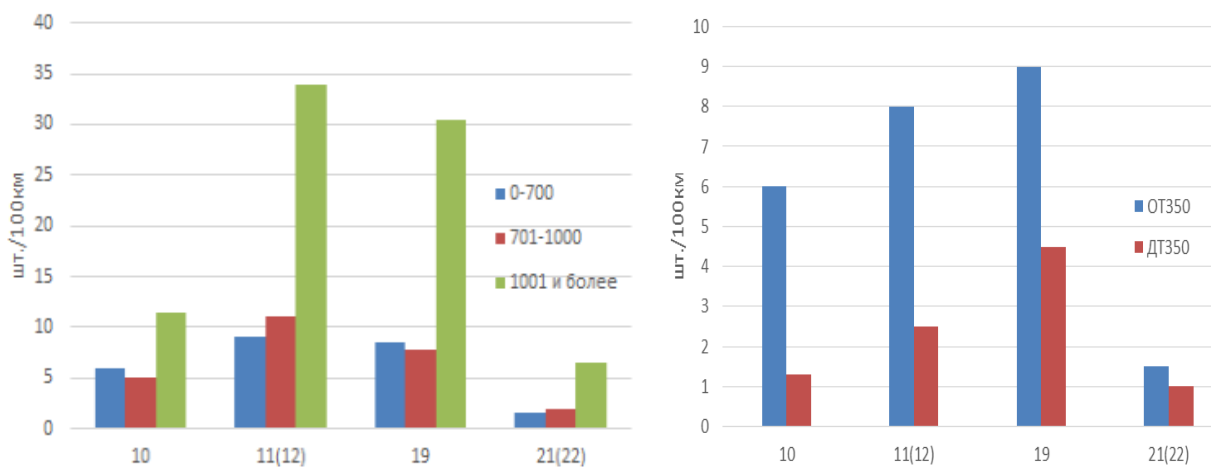


Рисунок 2 - Изъятие рельсов ДТ350 по дефектам кода 11 и 12

С целью получения результатов, характеризующих изменение эксплуатационной стойкости рельсов в зависимости от наработки тоннажа, и, в дальнейшем, расчета стоимости жизненного цикла конструкции верхнего строения пути - LCC, был определен удельный выход рельсов по рассматриваемым дефектам рельсов ОТ и ДТ в интервале наработки 0-700, 701-1000, более 1000 млн т брутто (рисунок 3 а) и выполнено сопоставление изъятий ОТ и ДТ рельсов при близких значениях наработки - до 700 млн т брутто (рисунок 3 б)



а) рельсы категории ОТ и ДТ рельсов в интервале наработки 0-700,701-1000, более 1000 млн т брутто

б) рельсы категорий ОТ и ДТ при наработке до 700 млн т брутто

Рисунок 3– Распределение удельного выхода рельсов по дефектам в зависимости от наработки тоннажа

При анализе величин удельного выхода рельсов установлено, что при наработке, превышающей нормативную, определяемую периодичностью проведения капитальных ремонтов, значительно увеличивается удельный выход рельсов по контактно-усталостным видам дефектов, образующимся на поверхности катания.

На возникновение и развитие дефектов рельсов контактно-усталостного характера оказывает значительное влияние изменяющееся и практически не прогнозируемое состояние подрельсовых элементов ВСП: увеличенная вертикальная жесткость скреплений за счет применения прокладок-амортизаторов с номинальной вертикальной жесткостью свыше 150 МН/м; увеличение модуля упругости пути в зимнее время при снижении эластичных свойств прокладок-амортизаторов промежуточных скреплений и замерзании балласта.

Сокращение срока службы рельсов по причине интенсивного развития дефектов контактно-усталостного происхождения приводит к неполному использованию ресурса их работоспособности.

В третьей главе по результатам статистических исследований выполнен анализ влияния рельсовых скреплений различных типов на изъятие рельсов по контактно-усталостным видам дефектов; представлены результаты исследований изменения жесткости промежуточных рельсовых скреплений в зависимости от наработки тоннажа и увеличения осевых нагрузок.

Основной характеристикой упругих свойств конструкции пути при расчетах пути на прочность является модуль упругости пути, представляющий погонный упругий отпор подрельсового основания, отнесенный к единице прогиба.

Модуль упругости пути и жесткость подрельсового основания связаны соотношением:

$$U = \mathcal{J}/l \quad (1)$$

где: U – модуль упругости пути, МПа;
 \mathcal{J} – жесткость подрельсового основания, МН/м;
 l – расстояние между осями соседних шпал, м.

В свою очередь жесткость подрельсового основания и жесткость его отдельных элементов связаны соотношением:

$$1/\mathcal{J} = \sum 1/\mathcal{J}_i \quad (2)$$

где: \mathcal{J}_i – жесткость отдельных элементов конструкции пути, МН/м;

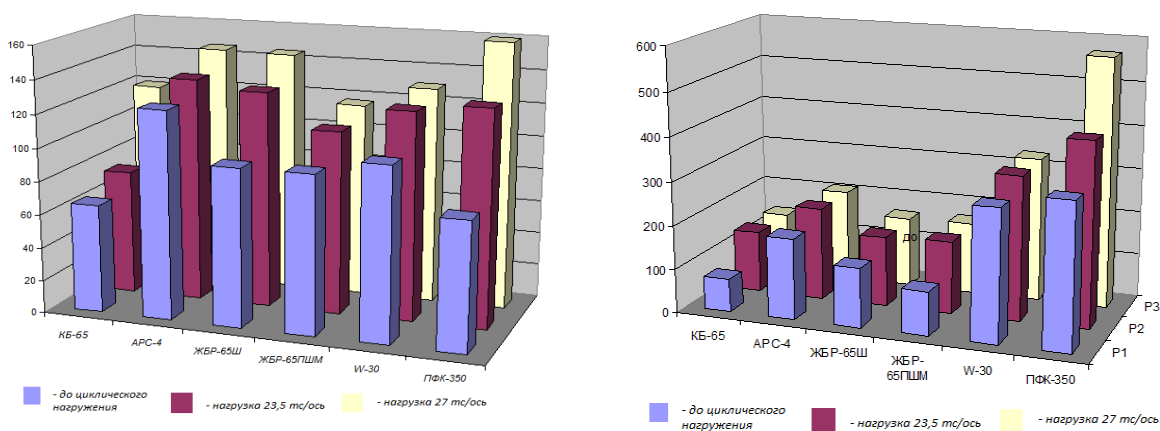
Модуль упругости пути на железобетонных шпалах при неизменных характеристиках шпал и подшпального основания не является постоянной величиной, а зависит от жесткости промежуточных креплений и уровня колесных нагрузок.

Повышение модуля упругости пути влияет на рост сил динамического контакта в системе «колесо — рельс — рельсовое основание» и приводит к росту напряжений в пятне контакта с вытекающими последствиями в части интенсивности развития контактно-усталостных дефектов.

Пространственная жесткость упругих креплений определяется жесткостью клеммных соединений, а также соотношением жесткости клемм и подрельсовых прокладок.

При закреплении рельса под действием статической нагрузки в виде клеммного нажатия упругая прокладка и пружинная клемма деформируются. При динамическом воздействии от колес подвижных единиц происходит дальнейшее сжатие прокладки с одновременным ослаблением клеммного нажатия.

На рисунке 4 представлены обобщенные результаты проведенных исследований, в том числе стендовых испытаний выполненных в АО «ВНИИЖТ», по определению вертикальной и поперечной жесткости различных типов креплений до и после их циклического нагружения на базе 5 млн циклов.



а) изменение вертикальной жесткости креплений б) изменение горизонтальной жесткости креплений

Рисунок 4 – Изменение жесткости креплений при их циклическом нагружении

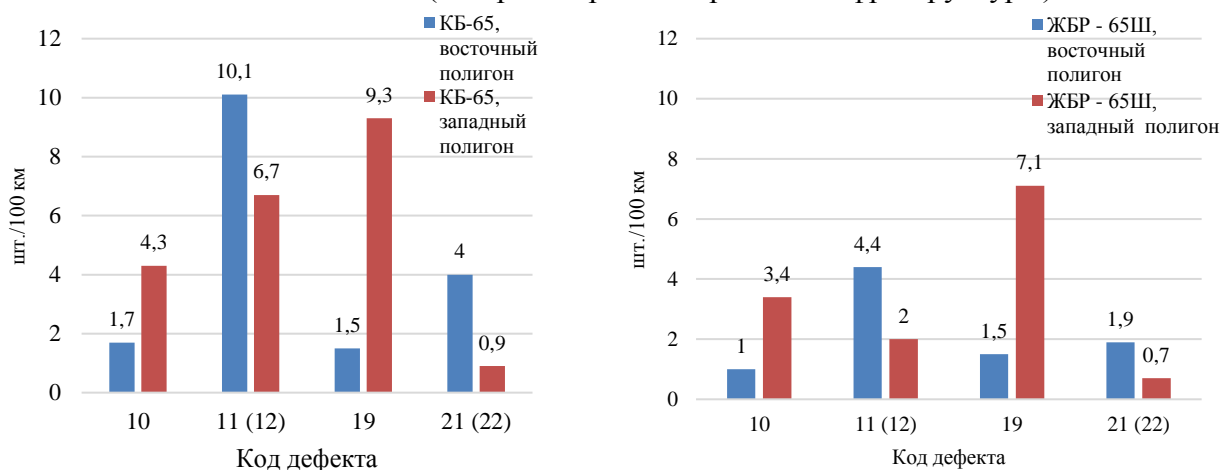
Нормируемый ГОСТ 32698-2014 диапазон значений вертикальной жесткости узла промежуточного рельсового скрепления составляет 50 – 150 МН/м, поперечной – не менее 30 МН/м.

Приложение циклической нагрузки повышает значения вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости в большей степени для бесподкладочных конструкций за счет значительной остаточной деформации – смятие и истирание прокладки-амортизатора, и релаксация клеммы.

Наименьшие изменения зафиксированы у скрепления W-30 – увеличение вертикальной жесткости после циклического нагружения составляет 1,26 раза, горизонтальной в 1,20 раза, что обусловлено конструктивными особенностями клеммы торсионного типа и скрепления в целом.

Влияние типа и состояния скреплений, в том числе за счет изменения его жесткости (см. рисунок 4) на интенсивность образования в рельсах дефектов контактно-усталостного происхождения проиллюстрировано гистограммами, приведенными на рисунке 5.

Скрепления КБ-65 и ЖБР-65Ш укладываются без ограничений по условиям эксплуатации, что минимизирует влияние радиуса пути и прочих эксплуатационных факторов. Для снижения влияния климатического фактора и особенностей эксплуатационных условий (повышенная грузонапряженность, большая доля протяженности пути в кривых, сложный профиль пути) массив данных был разделен на полигоны Западный и Восточный (от Красноярской дирекции инфраструктуры)



а) на скреплении типа КБ-65

б) на скреплении типа ЖБР-65Ш

Рисунок 5 - Удельный выход рельсов по контактно-усталостным видам дефектов на скреплениях различных типов

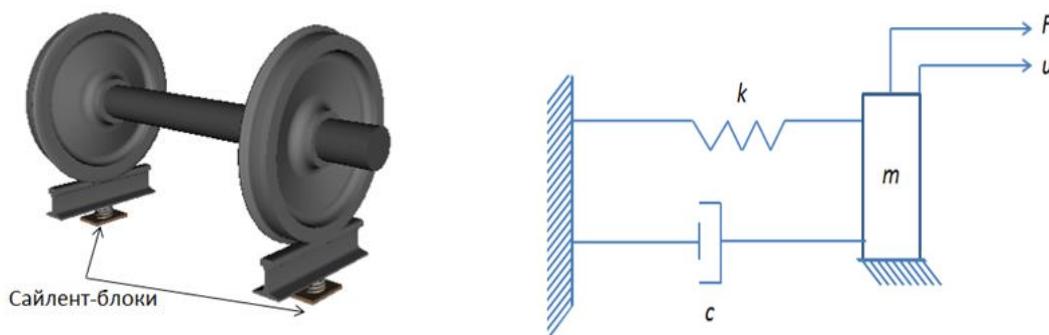
В четвертой главе выполнен расчет влияния пространственной жесткости промежуточных рельсовых скреплений различных типов на накопление контактно – усталостных повреждений в на рабочей поверхности головки рельса на базе программного комплекса «Универсальный Механизм» с применением методики расчета рельсов на прочность как балки, лежащей на сплошном упругом основании и допущением, что прогиб рельса меняется в зависимости от вертикальной жесткости узла промежуточного рельсового скрепления при прочих равных условиях.

Работа с моделью велась в подпрограммах: UM INPUT – для подготовки модели и UM SIMULATION – для интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих движение модели. В рамках выполнения данной работы использовались два модуля программного комплекса: RAIL PROFILE WEAR EVOLUTION (модуль прогнозирования износа рельсов) и UM RCF RAIL (модуль расчета контактно-усталостных повреждений рельсов).

Расчет производился в несколько этапов: подготовка модели, построение изношенных профилей рельса в процессе пропуска тоннажа, расчет накопления контактно-усталостных повреждений.

Железнодорожный путь задавался моделью «Инерционного рельса», в которой рельсы представлены как твердые тела под каждым колесом колесной пары. Рельс рассматривается в бесстыковой зоне.

Промежуточные рельсовые скрепления описывались в модели силовыми элементами – сайлент-блоками (рисунок 6 а).



а) Общий вид модели

б) Поточечная модель сайлент-блока

Рисунок 6 - Схема модели «Инерционного рельса» при демпфировании с одной степенью свободы

Для исследования были выбраны четыре типа промежуточных рельсовых скреплений: АРС-4, ЖБР65-Ш, ЖБР-65ПШР, W-30.

При расчете исходными данными являлись результаты стендовых испытаний по определению вертикальной и поперечной жесткости различных конструкций рельсовых скреплений (рисунок 4), имитирующих поездную нагрузку, крутильная жесткость в расчете задавалась постоянной – 5 МН·м/рад.

Условия эксплуатации имитировались динамической нагрузкой от грузового вагона с осевой нагрузкой 23,5 тс при движении со скоростью 60 км/час с непогашенным ускорением близким к 0,0 м/с², возвышение наружного рельса в кривой составляло 70 мм.

Жесткости скреплений задавались линейными функциями, описанными графически.

Поточечная модель сайлент-блока показана на рисунке 6б и описывается выражением:

$$f(t) = M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku, \quad (3)$$

где: $M\ddot{u}$ – матрица масс;
 $C\dot{u}$ – матрица вязкого демпфирования;
 Ku – матрица жесткости.

Уравнение (3) представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка. Принимая $x = e^{st}$ и решая характеристическое уравнение данной системы, получим решение:

$$x = e^{-\frac{c}{2m}t} \cdot \left(A e^{t\sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} + B e^{-t\sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}} \right), \quad (4)$$

где: A и B – постоянные, зависящие от начальных условий.

В полученном выражении (4) значение под знаком квадратного корня характеризует поведение системы с демпфированием. При обращении выражения под знаком корня в ноль, можно получить критическое демпфирование c_c .

$$\left(\frac{c_c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0,$$

Следовательно,

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (5)$$

Учитывая, что собственная частота системы равна:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

Выражение (5) представлено в следующем виде:

$$c_c = 2m\omega_n.$$

Отношение демпфирования к величине критического демпфирования представляет собой степень демпфирования:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2m\omega_n}. \quad (6)$$

В работе учитывалось различие в колебательных процессах, происходящих в рельсовых скреплениях в вертикальной и горизонтальной поперечных плоскостях. По этой причине значение степени демпфирования в вертикальной плоскости принималось равным $\zeta_z = 0,05$, а в горизонтальной поперечной плоскости – $\zeta_y = 0,3$. Это различие обусловлено тем, что в вертикальной плоскости на характер колебаний в большей степени влияют прокладки-амортизаторы скреплений, а в горизонтальной поперечной плоскости – характеристики прижимных элементов.

Рассчитанные значения вертикального и поперечного демпфирования по результатам стеновых циклических испытаний скреплений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные величины демпфирования скреплений

Тип скрепления	Время определения	Вертикальное демпфирование, кН·с/м	Поперечное демпфирование, кН·с/м
АРС-4	до испытаний	8,87	53,2
	после испытаний	9,37	69,9
ЖБР-65Ш	до испытаний	7,77	57,2
	после испытаний	9,26	61,0
ЖБР-65 ПШР	до испытаний	7,77	47,6
	после испытаний	8,38	62,3
W-30	до испытаний	8,22	83,2
	после испытаний	9,09	98,7

Расчет накопленных повреждений осуществляется в узлах конечно-элементной сетки фрагмента рельса. При этом принимается, что в каждый момент времени приращение поврежденности не зависит от накопленной поврежденности. Тогда контактно-усталостная

поврежденность, накопленная в i -м узле конечно-элементной сетки, определяется по формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i(j)}, \quad (7)$$

где: $N_i(j)$ – число циклов до появления выкрашивания усталостного характера;
 n – число циклов нагружения.

При этом в случае $Q = 1$ наступает начало поверхностного разрушения рельса (выкрашивания).

Число циклов до появления выкрашивания усталостного характера определялось из выражения

$$N = C \sigma_{eq}^{-m}, \quad (8)$$

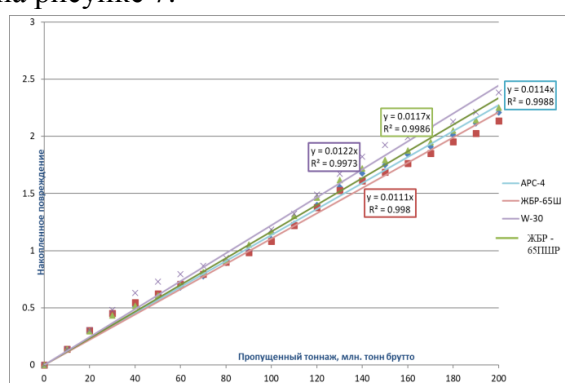
где: σ_{eq} – критерий контактной прочности, характеризующий напряженное состояние в области контакта;

C и m – константы материала, определяемые экспериментально.

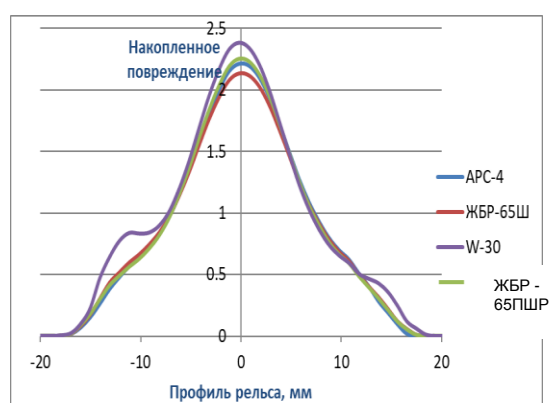
При расчетах использовался комбинированный критерий контактно-усталостного разрушения.

Таким образом, в результате моделирования были рассчитаны контактно-усталостные поврежденности (Q) для рельсов, в конструкции пути с различными типами промежуточных креплений.

При выполнении расчетов накопления повреждений в рельсах учитывалось изменение свойств рельсовых креплений в процессе эксплуатации изменением жесткостных, по результатам стендовых испытаний до и после циклического нагружения на базе 5 млн циклов, принятых в расчёте по количеству циклов нагружения и величинам осевой нагрузки эквивалентным поездной нагрузке порядка 100 млн т брутто, и демпфирующих (полученных расчетом) свойств креплений. Условно – «новых» и «с наработкой». Результаты расчета накопления поверхностных повреждений рельсов при скреплениях различных типов в прямом участке пути до начала разрушения представлены на рисунке 7.



а) Зависимость накопленной повреждаемости рельсов от пропущенного тоннажа



б) Эпюры повреждений при пропущенном тоннаже 200 млн т брутто

Рисунок 7 - Накопление поверхностных повреждений рельсов различных типов в прямой

При использовании в расчете данных, соответствующих нагрузкам, возникающим при движении экипажа в кривой радиусом 650 м, интенсивность накопления

поверхностных повреждений в рельсах с различными типами креплений возрастает (рисунок 8).

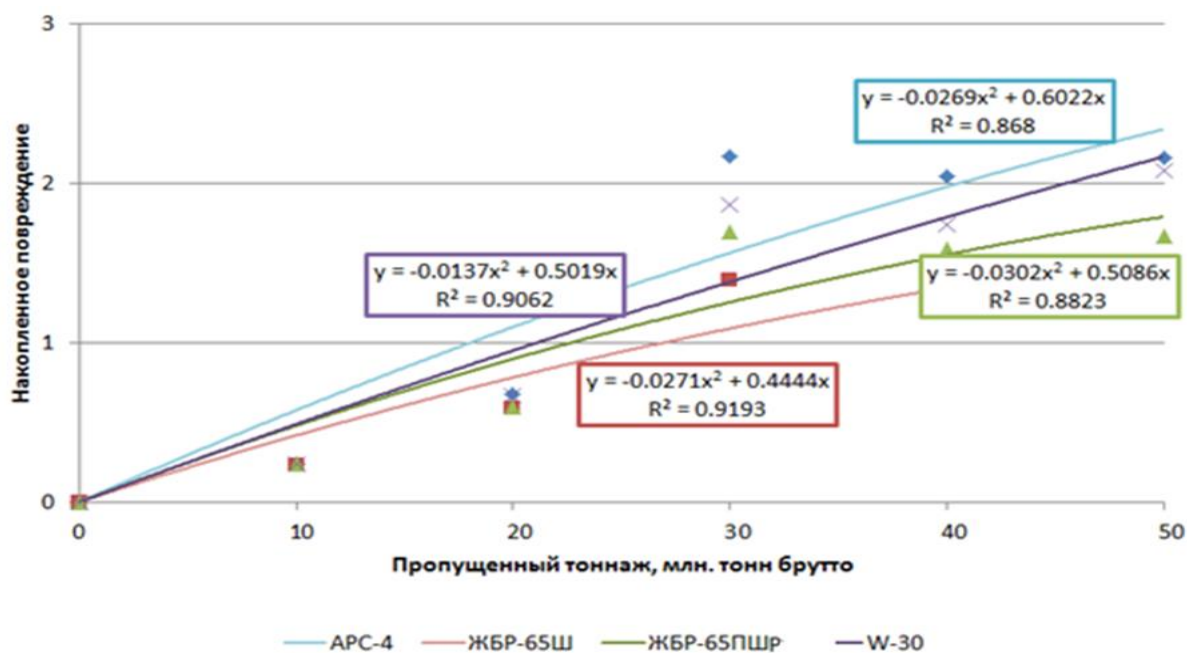


Рисунок 8 - Накопление поверхностных повреждений рельсов при креплениях различных типов в кривой радиусом пути в плане 650 м на начальной стадии эксплуатации.

Построенные по результатам расчета эпюры повреждений в рельсах, характеризующие глубину выкрашивания на поверхности рельса и расстояние от оси рельса до дефекта с высокой степенью точности соотносятся с КУД, зафиксированными в эксплуатации (рисунок 9).

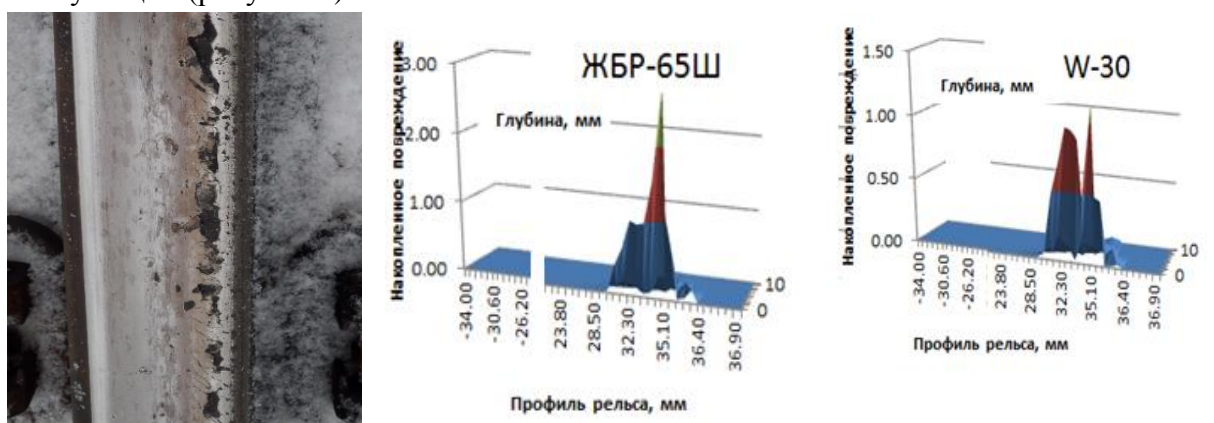


Рисунок 9 - Накопление поверхностных повреждений рельсов в кривой радиусом пути в плане 650 м со креплением ЖБР-65Ш.

Производимая методами имитационного моделирования оценка накопления повреждений в рельсах носит в большей мере качественный характер. Это обусловлено принятыми допущениями в моделях накопления повреждений и моделях, описывающих характеристики креплений. Однако, такая оценка позволяет судить о зависимости

интенсивности накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах от типа промежуточных рельсовых креплений.

Влияние типа крепления на развитие поверхностных повреждений представлено в виде гистограммы на рисунке 10. За базовое значение принята величина поверхностных повреждений при креплении APC-4, относительно которой были пересчитаны величины повреждений для других рассматриваемых типов креплений.

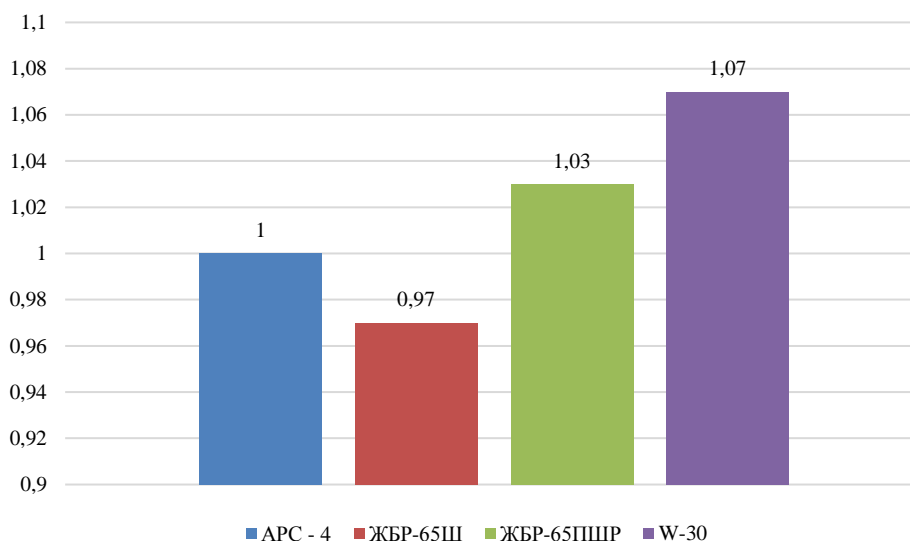


Рисунок 10 – Относительные поверхностные повреждения рельсов при пропущенном тоннаже 700 млн т брутто при различных типах креплении в прямой

В кривой радиусом 650 м при наработке 700 млн т брутто для заданных условий эксплуатации при соотношении расчетных значений контактно-усталостных повреждений рельсов на шурупно-дюбельных креплениях и на APC-4, наибольшее преимущество установлено для креплений типа W-30.

Полученный расчетным путем результат является следствием большей стабильности вертикальной жесткости крепления W-30 относительно других типов креплений.

Таким образом, результаты расчетов определяют возможность расширения применения креплений W-30 в кривых радиусом менее 650 м, наряду со креплением ЖБР-65Ш.

Проведенные расчеты показали, что установление оптимальных величин вертикальной жесткости рельсовых креплений для различных осевых нагрузок и минимизация ее изменения при долговременной эксплуатации, позволяет уменьшить интенсивность накопления поверхностных повреждений в головке рельса при одинаковом пропущенном тоннаже.

Этот вывод имеет особенное значение в современных условиях повышения жесткости промежуточных рельсовых креплений для увеличения долговечности подрельсовых прокладок-амортизаторов. В дальнейшем необходимо определить рациональные границы повышения вертикальной жесткости креплений при переработке действующих нормативных документов.

Кроме того, при анализе результатов расчета выявлено влияние соотношения вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости на интенсивность накопления

контактно-усталостных повреждений в рельсах. Расчетная оценка влияния соотношения величины вертикальной и горизонтальной жесткости представлена на рисунке 11.

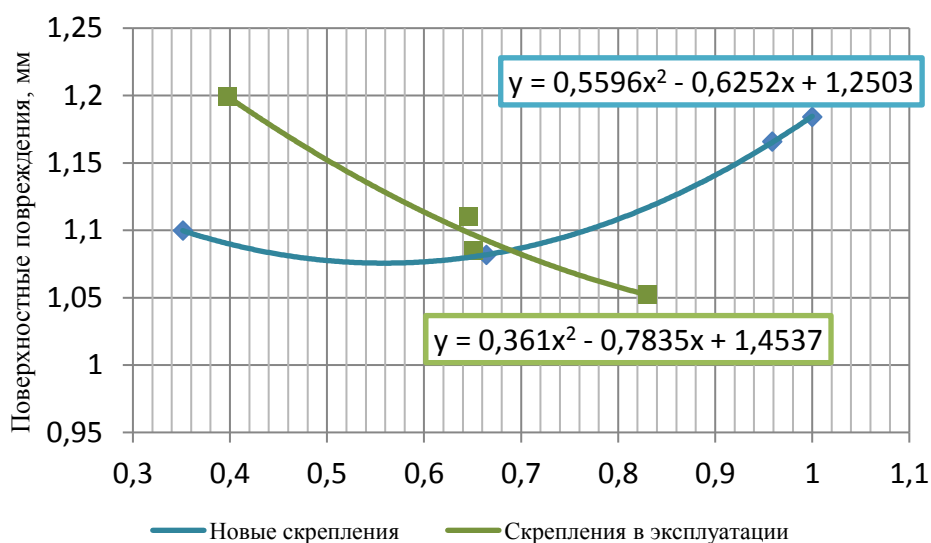


Рисунок 11 - Зависимость накопления контактно-усталостной повреждений рельсов от отношения вертикальной жесткости к горизонтальной поперечной жесткости скреплений

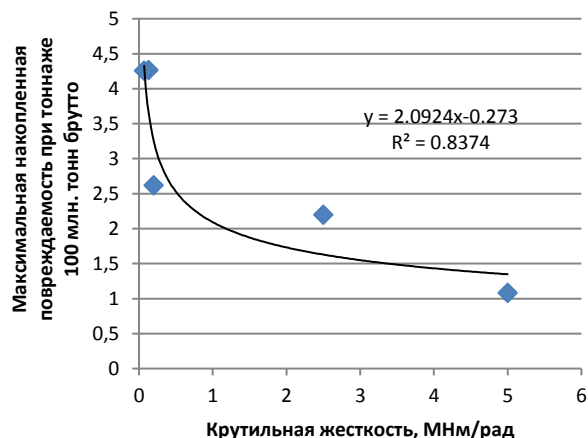
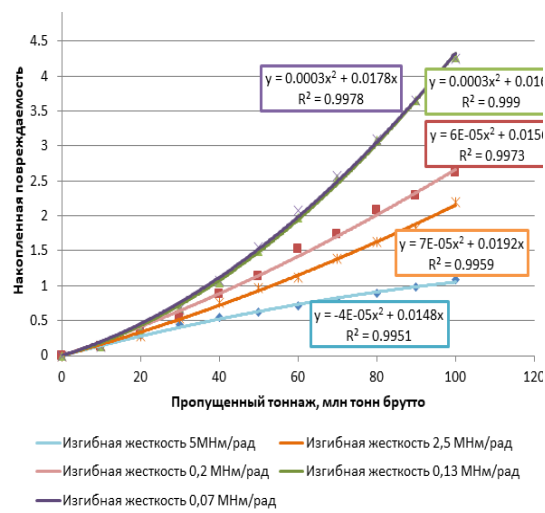
С позиции сохранения долговременного работоспособного состояния рельсов в рассматриваемых при расчете условиях эксплуатации, наиболее рациональным соотношением значений вертикальной и горизонтальной поперечной жесткостей промежуточных рельсовых скреплений является величина 0,65. при вертикальной жесткости, лежащей в диапазоне от 90 до 140 МН/м, и при горизонтальной поперечной жесткости – в диапазоне от 100 до 320 МН/м.

Современные отечественные нормативные документы не нормируют крутильную жесткость скреплений (сопротивление смещению рельса относительно его вертикальной оси), хотя в зарубежной практике этот параметр имеет свои нормативные значения.

В рамках диссертационной работы были проведены расчеты по определению влияния на интенсивность развития поверхностных контактно-усталостных повреждений головки рельсов изменения крутильной жесткости скреплений и определению ее оптимальных величин. Влияние крутильной жесткости скреплений на накопление контактно-усталостных повреждений в головке рельса при наработке тоннажа 100 млн т брутто на примере скрепления ЖБР-65Ш представлено на рисунке 12.

Расчеты показывают, что снижение крутильной жесткости ведет к заметному росту контактно-усталостных повреждений в головке рельсов.

Наибольшая интенсивность развития контактно-усталостных повреждений получена при крутильной жесткости 0,07 и 0,13 МНм/рад. Такая величина крутильной жесткости соответствует ослаблению затяжки шурупов скрепления ЖБР-65Ш более 50%.



а) Влияние крутильной жесткости скреплений на накопление контактно-усталостных повреждений

б) Зависимость максимальной накопленной контактно-усталостной повреждаемости рельсов от изгибной жесткости рельсовых скреплений при пропущенном тоннаже 100 млн т брутто

Рисунок 12 - Зависимость накопления поверхностных контактно-усталостных повреждений головки рельсов от величины крутильной жесткости скрепления

Согласно расчетам, при уменьшении крутильной жесткости скреплений, контактно-усталостные повреждения в рельсах увеличиваются, причем интенсивность их роста возрастает после снижения крутильной жесткости менее 1 МНм/рад.

В пятой главе выполнен расчет экономической эффективности применения скреплений различных типов в зависимости от условий эксплуатации.

Сочетание многообразия категорий рельсов с различными типами скреплений позволяет создавать множество вариантов конструкций верхнего строения пути, обеспечивающих выполнение установленного объема перевозок и их безопасности. Эти варианты отличаются стоимостью материалов и эксплуатационными затратам.

Расчеты выполнены по разработанной Методике оценки эффективности функционирования альтернативных конструкций верхнего строения железнодорожного пути (далее – Методики), которая содержит математическую модель расчета стоимости жизненного цикла, позволяющую учесть все затраты, связанные с приобретением, владением и утилизацией материалов верхнего строения участка железнодорожного пути, а стоимостные показатели этапов жизненного цикла приведены к ценности начального периода с использованием соответствующих коэффициентов дисконтирования.

С учетом дисконтирования формула для расчета стоимости жизненного цикла приобретает вид:

$$СЖЦ_{\text{вариант } i} = C_{\text{рек.}} + \sum_{i=1}^T (З_{\text{рем.}} + З_{\text{тек.код.}} + З_{\text{доп.}} + З_{\text{ут.}}) * \alpha_i \quad (9)$$

где: $СЖЦ$ – стоимость жизненного цикла рассматриваемого варианта участка железнодорожного пути;

$C_{\text{рек.}}$ - проектная стоимость вновь возводимого, реконструируемого или капитально отремонтированного участка железнодорожного пути;

$З_{\text{рем.}}$ - затраты на выполнение различных видов ремонта участка железнодорожного пути на протяжении всего жизненного цикла;

$Z_{тек.код.}$ – затраты на текущее содержание участка железнодорожного пути на протяжении всего жизненного цикла;

$Z_{доп.}$ - дополнительные затраты, учитывающие затраты на преодоление сопротивления движения поездов, затраты, возникающие из-за задержек поездов в связи с предоставлением «окон» для выполнения путевых работ, затраты на выплату налога на имущество и его страхование;

$Z_{ут.}$ – затраты на утилизацию, связанные с фазой утилизации участка железнодорожного пути после выработки установленного ресурса.

t – шаг расчетного периода, составляющий 1 год ($t \in [1, T]$);

T - горизонт расчета (продолжительность жизненного цикла), лет;

α_i - коэффициент дисконтирования.

При оценке альтернативных вариантов конструкции верхнего строения участка пути, с учетом дисконтирования, в качестве критерия принимаются удельные затраты СЖЦ (LCC_{уд.}) на 1 т· км брутто, образующиеся за весь жизненный цикл, которые можно определить по формуле:

$$LCC_{уд.i} = СЖЦ_{\text{вариант } i} / (T_{\text{норм. } i} * L) \quad (10)$$

где: $СЖЦ_{\text{вариант } i}$ – стоимость жизненного цикла i -го варианта верхнего строения пути с учетом дисконтирования, рублей;

$T_{\text{норм. } i}$ - нормативная периодичность выполнения капитального ремонта пути i -го варианта конструкции пути, млн. т брутто;

L – протяженность участка, км.

В качестве дополнительных критериев оценки эффективности рассматриваемых вариантов в расчет были введены показатели, характеризующие производительность труда и уровень фондоотдачи

Производительность труда определяется по формуле:

$$Bi = \frac{Грi * Li}{Ч_{тci}} \quad (11)$$

где: $Грi$ – грузонапряженность участка железнодорожного пути, млн. т· км брутто/км в год;

Li – протяженность участка, км;

$Ч_{тci}$ - затраты труда на текущее содержание пути i -го варианта конструкции верхнего строения пути, чел. в год;

i - индекс варианта рассматриваемого типа конструкции верхнего строения пути.

Фондоотдача определяется по формуле:

$$ФO_i = \frac{T_{\text{норм. } i}}{С_{рек.i}} \quad (12)$$

где: $T_{\text{норм. } i}$ нормативная периодичность выполнения капитального ремонта i -го варианта конструкции верхнего строения пути рассматриваемого участка пути, млн. т брутто;

$С_{рек.i}$ - балансовая стоимость i -го варианта реконструкции (капитального ремонта) участка железнодорожного пути, рублей.

Данные о стоимости этапов жизненного цикла рассматриваемых участков железнодорожного пути в зависимости от варианта реализации систематизированы и в результате их анализа получено, что наиболее эффективным вариантом конструкции верхнего строения пути признается вариант, имеющий наименьшее значение удельных затрат СЖЦ (LCC_{уд.}) на 1 т· км брутто, образующихся за весь жизненный цикл

функционирования участка пути.

По разработанной Методике была выполнена сравнительная оценка эффективности использования различных рельсовых скреплений на условном 12-ти километровом участке железнодорожного бесстыкового пути в прямой с грузонапряженностью 78 млн т · км брутто/км пути в год, со средневзвешенной скоростью движения поездов 100 км/ч, класс пути II. Объектами исследования и оценки являлись 4 смоделированных участка железнодорожного пути с рельсами типа R65 категории ДТ350, на щебеночном балласте и железобетонными шпалами, соответствующими типу скрепления: участок № 1 со скреплениями типа ЖБР-65ППР; участок № 2 со скреплениями типа ЖБР-65Ш; участок № 3 со скреплениями типа АРС-4; участок № 4 со скреплениями типа W-30.

Каждый из вариантов конструкции верхнего строения пути позволяет обеспечивать безопасное движение пассажирских и грузовых поездов со скоростями, установленными для конкретного участка железнодорожного пути. В то же время, экономическая эффективность реализации рассматриваемых вариантов отличны друг от друга и зависят от эксплуатационных свойств материалов верхнего строения пути, формирующих конструкцию железнодорожного пути. Последовательно, в соответствии с Методикой, выполнены расчеты стоимости этапов жизненного цикла рассматриваемых участков железнодорожного пути.

Стоимость реконструкции (капитального ремонта) каждого рассматриваемого участка пути и стоимости промежуточных видов ремонта определены в соответствии с приведенной ремонтной схемой для бесстыкового пути с дифференцированно термоупрочненными рельсами, с периодичностью выполнения капитального ремонта 1 400 млн т брутто: КРН-В-С-В-РС-В-П-КРН (приказ Минтранса №54 от 9 февраля 2018 г). В прямом участке пути наиболее эффективным является применение рельсовых скреплений АРС-4, так как среднегодовая (удельная) прогнозная стоимость функционирования 1 км участка пути, сформированного с применением скрепления АРС-4, является наименьшей и составляет 3 782,68 тыс. рублей. Так же этот участок имеет наименьшие удельные затраты СЖЦ ($LCC_{уд.}$) на 1 т · км брутто - 26 803, 80 тыс. рублей.

Таким образом, разработанная Методика оценки эффективности функционирования альтернативных конструкций верхнего строения железнодорожного пути позволяет выполнить оценку эффективности функционирования различных конструкций верхнего строения пути и выбрать оптимальную для заданных условий эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ действующих нормативных требований к промежуточным рельсовым скреплениям. Установлено, что нормативная жесткость скреплений не в полной мере соответствует многообразию современных эксплуатационных условий: высокоскоростное движение, осевые нагрузки до 270 кН, укладка рельсовых плетей в кривые малого радиуса.

2. Выполнен сравнительный анализ результатов испытаний скреплений различных типов до и после циклического нагружения. Выявлено повышение до 2-х раз значений вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости, за счет значительной остаточной деформации – смятие и истирание прокладки-амортизатора и релаксация клеммы. Наименьшие изменения зафиксированы у скрепления W-30 – увеличение вертикальной жесткости после циклического нагружения составляет 1,26 раза, горизонтальной 1,20 раза,

что обусловлено конструкционными особенностями клеммы торсионного типа и скрепления в целом.

3. Проведены статистические исследования изъятия рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения на рабочей поверхности головки рельсов за три года наблюдений на участках с различными эксплуатационными и техническими характеристиками.

Установлено:

– доля контактно-усталостных дефектов на поверхности катания от продольных и поперечных трещин, коды дефектов: 10, 11(12), 19, 21(22) достигает 40 % относительно общего количества одиночных изъятий рельсов;

– с увеличением пропущенного тоннажа (при наработке более 1000 млн т брутто) более чем в 2 раза увеличивается удельный выход рельсов по рассматриваемым кодам дефектов;

– влияние типа скрепления на частоту изъятия рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения, наименьшее изъятие – на скреплениях, имеющих наименьшее изменение жесткости в эксплуатации.

4. Рассчитано влияние пространственной жесткости промежуточных рельсовых скреплений на интенсивность накопления контактно – усталостных поверхностных повреждений головки рельсов на базе программного комплекса «Универсальный Механизм» с применением имеющихся моделей силового воздействия подвижного состава на путь и использованием фактических (по результатам стендовых испытаний) значений вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости с учетом влияния крутильной жесткости и степени демпфирования скреплений различных типов.

5. Установлено по результатам моделирования, что наименьшая интенсивность накопления контактно-усталостных повреждений рельсов в кривой 650 м отмечается при скреплениях W-30, на прямом участке пути - при скреплениях ЖБР-65Ш и АРС-4.

6. Установлена возможность расширения сферы рационального применения скреплений W-30 за счет укладки в кривых радиусом от 350 до 650 м.

7. Доказано значительное влияние изменения жесткости рельсовых скреплений при наработке тоннажа более 100 млн т брутто, в том числе за счет ослабления монтажной затяжки крепежных элементов, на интенсивность развития контактно-усталостных повреждений головки рельсов.

8. Оценено напряженно-деформируемое состояние взаимодействующих элементов конструкции пути и определены рациональные границы повышения жесткости скреплений и оптимального соотношения вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости.

9. Установлена степень влияния крутильной жесткости скреплений на интенсивность развития контактно-усталостных повреждений в рельсах.

10. Предложено внести соответствующие изменения по расширению полигона укладки скреплений типа W-30 в распоряжение ОАО «РЖД» от 28.06.2018 г. №1362/р «О сферах рационального применения промежуточных рельсовых скреплений и унификации вариантов комплектации ими железобетонных шпал».

11. Предложено внести в действующие нормативные документы на узел скрепления (ГОСТ 32698-2014 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного

пути. Требования безопасности и методы контроля», ГОСТ Р 59428-2021 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Общие технические условия») коэффициентов оптимального соотношения вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости узла скрепления в зависимости от сочетания величин вертикальной и боковой сил, а также ввести дополнительный контролируемый параметр – крутильная жесткость узла скрепления

12. Разработана Методика оценки эффективности функционирования конструкций верхнего строения железнодорожного пути, позволяющая определить оптимальное сочетание элементов ВСП для обеспечения эффективного функционирования конструкции железнодорожного пути в заданных условиях эксплуатации.

13. Установлено по результатам расчета, что наименьшую величину среднегодовой стоимости функционирования 1 км в прямом участке пути имеет участок со скреплением APC-4, чем подтверждена целесообразность применения этого типа скреплений в дальнейшем.

14. Целесообразно продолжить исследования по оценке влияния типа скреплений на развитие дефектов в шейке и подошве рельса в том числе для рельсов типа Р 75 на участках повышенной грузонапряженности и обращения тяжеловесных поездов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

а) в рецензируемых научных изданиях

1. Ефимова, Е.Н. Методические подходы к оценке эффективности функционирования современных конструкций верхнего строения железнодорожного пути / Е.Н. Ефимова, Н.П. Виногоров, А.А. Шиладжян, В.М. Кошелев, Д.А. Валов, Н.В. Кузнецова // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – №1. – С. 80 – 88.

2. Кузнецова, Н. В. Особенности влияния промежуточных рельсовых скреплений на эксплуатационную стойкость рельсов / Н.В. Кузнецова, Е.А. Сидорова // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – №4. – С. 201 – 208.

3. Абдурашитов, А.Ю. Определение величин интегральных спектров распределения вертикальных и боковых сил от воздействия подвижного состава на железнодорожный путь / А.Ю. Абдурашитов, А.В. Сычева, Н.В. Кузнецова, П.В. Сычев // Вестник транспорта Поволжья. –2020. – № 1. – С. 42-47.

б) патент на изобретение

4. Пат. 2746554 Российская Федерация, МПК E01B 3/00, E01B 3/20, E01B 3/46. Подрельсовое устройство железнодорожного пути и способ укладки по меньшей мере одного подрельсового устройства железнодорожного пути/ Сычев В.П., Локтев А.А., Сычева А.В., Кузнецова Н.В., Сычев П.В.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Вагонпутьмашпроект». – No 2020124286; заявл. 22.07.2020; опубл. 15.04.2021, Бюл. No 11. – 2 с.: ил

в) в других изданиях и материалах конференций

5. Кузнецова, Н.В. Оценка контактно усталостной дефектности рельсов в зависимости от типов скреплений / Н.В. Кузнецова //Современные проблемы

совершенствования работы железнодорожного транспорта. Межвузовский сборник научных трудов. – 2021. – С. 252–258.

6. Кузнецова, Н.В. Статистический анализ изъятий дефектов рельсов с контактно – усталостными видами дефектов / Н.В. Кузнецова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2021. – № 17. – С. 41 – 47.

7. Кузнецова, Н.В. Анализ основных причин изъятий рельсов Западно – Сибирской дирекции инфраструктуры / Н.В. Кузнецова // Транспортное строительство. Сборник статей всероссийской научно-технической конференции. - Москва, – 2020. – С. 102 – 108.

8. Сычева, А.В. Способ оценки дефектности элементов железнодорожного пути локализацией волновых процессов взаимодействия «колесо – рельс» / А.В. Сычева, Н.В. Кузнецова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2020. – №16. – С. 114 – 121.

9. Абдурашитов, А.Ю. Варианты усиления конструкции железнодорожного пути при обращении поездов с повышенными нагрузками / А.Ю. Абдурашитов, А.В. Сычева, Н.В. Кузнецова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2020. – № 16. – С. 35 – 42.

10. Сычев, В.П. Регрессионные модели изменения состояния рельсовой колеи с оценкой точности прогнозирования по построенным моделям /В.П. Сычев, В.В. Дудник, Н.В. Кузнецова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2019. – № 14. – С. 187 – 198.

11. Хвостик, М.Ю. Анализ основных причин изъятия термоупрочненных рельсов на сети железных дорог ОАО «РЖД»/ М.Ю. Хвостик, Г.А. Берестень, А.В. Сычева, Н.В. Кузнецова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2019. – № 15. – С. 40 – 49.

12. Сычева, А. В. Оценка качества ремонтов пут на основе прогнозирования упругой осадки пути и минимизации затрат на после ремонтное текущее содержание / А.В. Сычева, А.Ю. Абдурашитов, П.В. Сычев, Н.В. Кузнецова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – № 13. – С. 89 – 93.

Кузнецова Наталья Владимировна

**ВЛИЯНИЕ ТИПА И СОСТОЯНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ
СКРЕПЛЕНИЙ НА РАЗВИТИЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ
ДЕФЕКТОВ РЕЛЬСОВ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати _____.____. 2022 г. Заказ № _____ Формат 60×90/16
Усл. п.л. – 1,5 Тираж 80 экз.
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ)