

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Сычев Вячеслав Петрович

Москва - 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ	10
1.1 Основные требования к узлу скрепления	10
1.2. Классификация основных типов скреплений на железобетонных шпалах.....	14
1.2.1 Анализ конструкций скреплений	14
1.3 Выводы по главе 1	19
2 АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РЕЛЬСОВ И ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НЕЕ.....	20
2.1 Эксплуатационная стойкость рельсов, ее составляющие.....	20
2.2. Изъятие рельсов по контактно-усталостным видам дефектов	27
2.3. Выводы по главе 2	35
3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ И СОСТОЯНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СКРЕПЛЕНИЙ НА СОСТОЯНИЕ РЕЛЬСОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	36
3.1 Общие положения.....	36
3.2. Анализ влияния особенностей конструкции и состояния промежуточных рельсовых скреплений на долговечность рельсов	40
3.3. Выводы по главе 3	46
4 РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО РЕЛЬСОВОГО СКРЕПЛЕНИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ	47
4.1 Существующая методика расчета рельсов на прочность.....	47
4.2 Описание и подготовка модели для расчета накопления контактно-усталостных напряжений.....	49
4.3 Расчет накопления контактно-усталостных напряжений в рельсах	54

4.4 Результаты расчета накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах на прямом участке пути	54
4.5 Результаты расчета накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах в кривой	65
4.6 Влияние крутильной жесткости узла скрепления на контактно-усталостные повреждения рельсов	70
4.7 Выводы по главе 4	72
5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ	74
5.1 Общие положения.....	74
5.2 Методика оценки эффективности функционирования альтернативных конструкций верхнего строения железнодорожного пути.....	76
5.3 Тестовый расчет оценки эффективности функционирования участков железнодорожного пути, сформированных с использованием различных конструкций рельсовых скреплений.....	89
5.4 Выводы по главе 5	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	104

ВВЕДЕНИЕ

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. Также актуальность работы вызвана развитием тяжеловесного движения грузовых поездов и высокоскоростного движения пассажирских поездов; увеличением сроков 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. [2]

Промежуточные рельсовые скрепления являются одним из важнейших компонентов конструкции верхнего строения пути (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 35 % от общей протяженности, 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, уменьшение количества дефектных и острodefектных рельсов возможно за счет рационального применения промежуточных рельсовых скреплений.

Степень разработанности темы исследования.

На безотказную работу рельсов, помимо собственно их характеристик, оказывают влияние климатические условия, радиусы пути в плане и длина кривых, подвижной состав и режимы вождения, в том числе вертикальная и горизонтальная поперечная жесткость конструкции пути, а также ряд прочих эксплуатационных факторов

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. Kyrze, 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 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 креплений на интенсивность развития контактно – усталостных дефектов в головке рельсов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. выполнить сравнительный анализ эксплуатационной стойкости промежуточных рельсовых креплений различных типов;
2. провести оценку напряженно-деформируемого состояния взаимодействующих элементов конструкции пути с использованием имеющихся моделей силового воздействия подвижного состава на путь;
3. на основании полученных результатов сформировать и обосновать аналитические зависимости влияния типа и состояния рельсовых креплений на развитие дефектов контактно-усталостного происхождения в рельсах;
4. определить эффективность применения креплений различных типов в зависимости от эксплуатационных условий;
5. разработать практические рекомендации для уточнения существующих сфер применения промежуточных рельсовых креплений.

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

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

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Рассчитано влияние пространственной жесткости промежуточных рельсовых креплений 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 демпфирования креплений различных типов.

2. разработаны аналитические зависимости для определения интенсивности развития контактно-усталостных дефектов в рельсах в зависимости от типа и состояния промежуточных рельсовых креплений;

3. разработана и реализована методика технико-экономической оценки конструкции ВСП;

4. предложены научно-обоснованные рекомендации оптимизации существующих сфер применения креплений различных типов с целью снижения интенсивности развития контактно усталостных дефектов рельсов.

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

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

– даны предложения по корректировке ГОСТ Р 59482-2021 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Общие технические условия»;

позволяют:

– снизить интенсивность развития дефектов рельсов в эксплуатации за

счет рационального применения промежуточных рельсовых скреплений различных типов и обеспечения их работоспособного состояния.

могут быть использованы:

– 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 в предложениях по корректировке ГОСТ Р 59482-2021, а также при выполнении хоздоговорных 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, 32 рисунка. Список использованных источников содержит 152 наименования.

1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ

1.1 Основные требования к узлу скрепления

Увеличение протяженности полигона бесстыковой конструкции пути на железобетонных шпалах, в том числе за счет укладки рельсовых плетей в кривых малого радиуса, повышение осевых нагрузок и рост объемов тяжеловесного движения определяет повышенные технические требования к промежуточным рельсовым скреплениям[9], а именно:

- обеспечение неизменности ширины колеи;
- закрепление рельсов от угона относительно шпал;
- обеспечение оптимальной пространственной упругости пути;
- виброгашение;
- возможность (или отсутствие) регулировки рельсовых нитей по высоте и в плане (ширине колеи);
- минимизация деталей;
- малообслуживаемость;
- минимальные затраты за период жизненного цикла[3,10].

• На обеспечение стабильности ширины колеи при воздействии подвижного состава влияют:

а) количество деталей в узле скрепления. Каждая деталь имеет допуски на изготовление. Чем больше деталей, тем больше суммарный разброс допусков, а также зазоров, которые необходимо предусмотреть, чтобы в случае неблагоприятного их сочетания обеспечить собираемость конструкции. Например, для наиболее массового отечественного скрепления типа КБ-65, характеризующегося многодетальностью, при изготовлении всех элементов по номинальным размерам только за счет выбора необходимых для обеспечения собираемости зазоров ширина колеи может изменяться до 10 мм;

б) качество деталей в части минимизации размеров допусков. При современном уровне требований к деталям скрепления типа КБ-65, теоретически разброс ширины колеи может составлять порядка 50 мм;

в) качество деталей в части минимизации интенсивности их износа в процессе эксплуатации. Это определяется качеством применяемых материалов, в первую очередь полимерных;

г) величина пространственной упругости (или жесткости) рельсовой нити в данной конструкции скрепления. Чем больше вертикальная и горизонтальная поперечная жесткость, тем большая доля сил, действующих от колеса на рельс, передается на один узел скрепления.

- На железных дорогах Российской Федерации эксплуатируется температурно-напряженная конструкция бесстыкового пути. Основное отличие работы бесстыкового пути от обычного звеньевого состоит в том, что в рельсовых плетях действуют значительные продольные усилия, вызываемые изменениями температуры. При повышении температуры рельсовых плетей по сравнению с температурой закрепления в них возникают продольные силы сжатия, которые могут создать опасность выброса пути. При понижении температуры - появляются растягивающие силы, которые могут вызвать излом плети и образование большого зазора, опасного для прохода поезда, или разрыв рельсового стыка из-за среза болтов. Дополнительное воздействие на бесстыковой путь оказывают силы, создаваемые при выправке, рихтовке, очистке щебня и других ремонтных путевых работах [133].

Промежуточные рельсовые скрепления, применяющиеся на бесстыковом пути, должны обеспечивать нагрузки, действующие на узел скрепления:

- горизонтальных продольных сил – 14 кН;
- боковых сил в прямых и в кривых радиусами 500 м и более – не менее 50 кН, в кривых радиусами менее 500 м – не менее 100 кН [1].

Невыполнение этих требований может привести к подвижкам рельсов относительно шпал на отдельных участках, например, при одновременном

действии сил угона и температурных сил без возврата на место после прекращения сил угона (сил сопротивления будет достаточно, чтобы не допустить подвижку только от действия температурных сил)[122].

Необходимые силы сопротивления перемещению рельсов относительно шпал обеспечиваются за счет соответствующих:

- величины давления клеммы на подошву рельса;
- коэффициента трения подошвы по прокладке;
- эшюры шпал.

- При обеспечении оптимальной пространственной упругости пути, под которой понимается сочетание вертикальной, поперечной и продольной упругости (или ее обратной величины - жесткости) рельсовой нити. Уменьшение вертикальной жесткости пути в целом обеспечивает снижение жесткости на контакте колеса и рельса и, соответственно, меньшие силы их динамического взаимодействия. Кроме того, при уменьшении вертикальной жесткости пути за счет более упругих прокладок скрепления снижается доля давления рельса на одну шпалу. С другой стороны, заниженная вертикальная жесткость приводит к росту сил сопротивления движению поезда, а также к повышенным требованиям к сочетаниям материалов и конструкций клемм и прокладок-амортизаторов.

Сегодняшние отечественные скрепления для железобетонных шпал имеют вертикальную статическую жесткость 50-150 МН/м [2]. Эти нормативы были разработаны в 70-х годах прошлого века, на первом этапе внедрения железобетонных шпал и бесстыкового пути.

Требования к динамической жесткости узла скрепления отсутствуют.

Степень виброгашения скрепления оказывает влияние как на состояние подвижных единиц, так на состояние подрельсового основания. Действующие нормативные документы, содержащие требования к узлу скрепления, не содержат требований к параметрам виброгашения. Этот параметр отсутствует в перечне действующих в настоящее время технических требований к промежуточным рельсовым скреплениям. В зарубежных

нормативах этот показатель является одним из важнейших, определяющих потребительские характеристики креплений, особенно для высокоскоростных линий[130].

- Возможность регулировки положения рельсовых нитей по высоте и в плане необходима, так как позволяет исправлять локальные отступления положения рельсовых нитей от нормативного.

На принятие решения о возможности регулировки положения рельсовых нитей в узле крепления влияют:

- состояние подшпального основания, которое планируется обеспечить после ремонта участка пути;

- принятая технология выправки локальных отступлений;

- интенсивность бокового износа рельсов.

- Крепление, состоящее из большого количества деталей, имеет два системных недостатка.

- повышенная интенсивность расстройств узла из-за того, что каждая деталь изготавливается с допусками и накопление этих допусков приводит к появлению люфтов, тем более, по мере износа.

- необходимость увеличенных затрат на его сборку при монтаже, введении в эксплуатацию и демонтаже.

За рубежом применяют специальный термин, который в дословном переводе звучит как «установил и забыл». Это означает, что после монтажа крепление не требует какого-либо штатного обслуживания.

Применение таких конструкций крайне важно. Ключевые признаки малообслуживаемых креплений:

- отсутствие соединений, требующих периодического обслуживания;

- в качестве крепежного элемента должны использоваться анкеры, замоноличенные в шпалу или шурупы, вворачиваемые в замоноличенный полимерный дюбель;

- упругая клемма.

• Основными слагаемыми стоимости жизненного цикла скрепления являются:

- первоначальная стоимость;
- затраты на монтаж скрепления;
- затраты на содержание в период межремонтного срока;
- остаточная стоимость скреплений.

1.2. Классификация основных типов скреплений на железобетонных шпалах

1.2.1 Анализ конструкций скреплений

На рисунке 1.1 представлены конструкции промежуточных рельсовых скреплений, эксплуатируемых на сети железных дорог ОАО «РЖД» [10].



Рисунок 1.1 – Основные конструкции скреплений для Российских железных дорог

Следует отметить на российском рынке успехи зарубежных фирм, которые являются лидерами мирового рынка сбыта рельсовых скреплений. Это, в первую очередь, фирмы Vossloh и Pandrol. Они десятилетиями работают в этом направлении, имеют собственные конструкторские, научно-исследовательские подразделения, испытательную базу. Их изделия

применяются почти во всех климатических поясах, при всех реализуемых скоростях, грузонапряженности и осевых нагрузках.

На железных дорогах развитых зарубежных стран применяется несколько основных типов промежуточных рельсовых скреплений, представленных в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Мировая практика применения рельсовых скреплений для скоростного и тяжеловесного движения

Страна	Конструкция скрепления	Условия эксплуатации
Великобритания, Бельгия, Франция, Корея, Китай, Япония	Pandrol (SFC)	Скорость движения до 350 км/ч, нагрузка на ось 150... 180 кН
Великобритания, Китай, Россия	Pandrol (FC)	Скорость движения до 250 км/ч, нагрузка на ось 200...320 кН
Германия, Испания, Италия, Китай	Vossloh System 300	Скорость движения 160...300 км/ч, нагрузка на ось 150...225 кН
Германия, Испания, Италия, Казахстан, Китай, Россия	Vossloh W14, W21, W30, W40	Скорость движения до 250 км/ч, нагрузка на ось 150...390 кН
Франция, Бельгия	Nabla	Скорость движения 140...330 км/ч нагрузки на ось 150...225 кН
США	Safelock III	Скорость движения до 120 км/ч, нагрузки на ось 350 кН

Например, в Финляндии, Литве, Латвии, Казахстане, странах сходных с Россией по климату, и, что крайне важно, где обращаются российские грузовые вагоны с соответствующим уровнем динамики воздействия на путь, также применяют скрепления типа Pandrol, Vossloh различных модификаций.

Применяемые на сети железных дорог ОАО «РЖД» промежуточные рельсовые скрепления были сгруппированы по ряду ключевых признаков.

1) вид прикрепления:

– нераздельное прикрепление, при котором подкладку к опоре и рельс к подкладке прикрепляют одними и теми же крепежителями, например ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ;

– раздельное прикрепление, при котором подкладки к опоре и рельс к подкладке прикрепляют различными крепежителями, например КБ-65;

– смешанное прикрепление, при котором рельс через подкладки крепят к опорам, кроме того, подкладки дополнительно крепят к опорам, например Д-0;

2) наличие подкладки:

– бесподкладочное (ЖБР-65, АРС);

– подкладочное (ЖБР-65ПШМ, КД, КБ-65);

3) тип крепежителя к опоре:

– шурупно-дюбельное (ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, W-30);

– анкерное (АРС-4, ПФК-350);;

– болтовое (ЖБР-65, КБ-65).

На рисунке 1.2 представлена схема классифицирования промежуточных рельсовых креплений в зависимости от конструкции

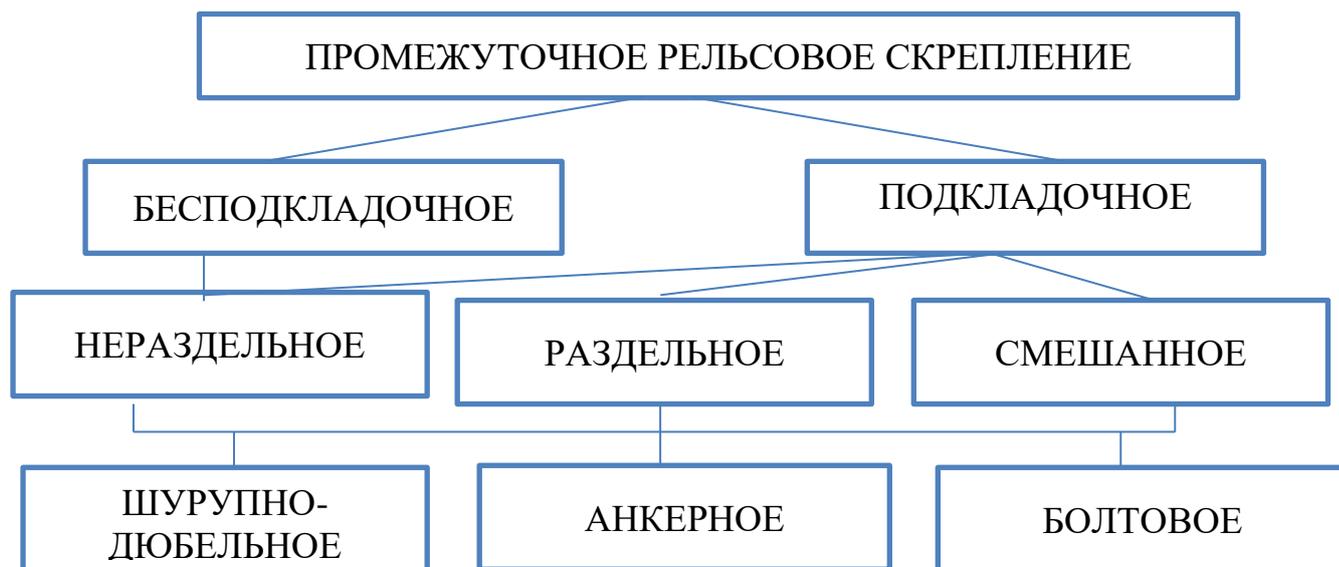


Рисунок 1.2 – Схематическая классификация промежуточных рельсовых креплений

1.2.2 Анализ опыта эксплуатации креплений

На рисунке 1.3 представлено распределение, характеризующее протяженность пути с различными типами промежуточных рельсовых креплений на железобетонных шпалах.

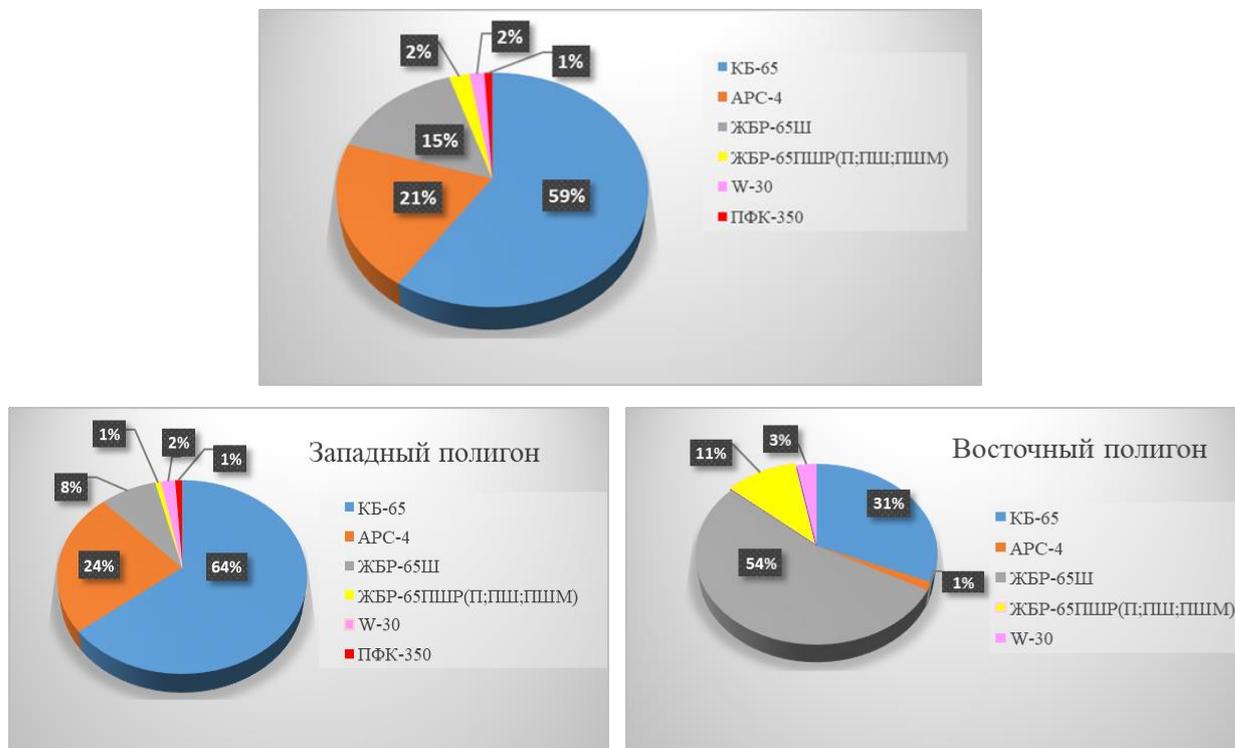


Рисунок 1.3 - Протяженность участков пути с различными типами промежуточных рельсовых креплений на железобетонных шпалах на главных путях, км

Рельсовые крепления при износе и старении прокладок, изломах подкладок, коррозии и ослаблении резьбовых соединений не обеспечивают стабильности ширины колеи, ухудшается динамика взаимодействия пути и подвижного состава, не обеспечивают требуемое усилие прижатия рельса к шпале и сопротивление продольному угону плети, крепления не обеспечивают поперечную удерживающую способность, что приводит к сверхнормативному уширению рельсовой колеи. В таких случаях дальнейшая эксплуатация недопустима по условиям безопасности движения. Указанные расстройства креплений приводят к снижению их срока службы.

С учетом того, что грузонапряженность на ряде направлений значительно возрастает, возрастают и требования к креплениям по долговечности и технологичности обслуживания.

При капитальных ремонтах пути на новых материалах, капитальных ремонтах 1 уровня (КРН), рельсошпальная решетка укладывается с железобетонными шпалами и нераздельными креплениями с упругими клеммами: ЖБР-65Ш и его модификациями с подкладкой (ЖБР-65ПШМ и ЖБР-65ПШР), АРС-4, W-30 и ПФК-350. Именно эти типы креплений приняты к рассмотрению.

Сферы рационального применения промежуточных рельсовых креплений на сети железных дорог ОАО «РЖД», представленные в таблице 1.2, установлены распоряжением ОАО «РЖД» от 28.06.2018 г. №1362/р [4,67].

Таблица 1.2 – Сферы рационального применения промежуточных рельсовых креплений на сети дорог ОАО «РЖД»

№ п/п	Тип крепления	Радиус пути в плане, м	Специализация линий*
1	ЖБР-65Ш	от 351 до 650	М; П
		более 650	без ограничений
2	ЖБР-65ПШМ	350 и менее	М; П; Г; О; Т
		от 351 до 650	Г; О; Т
		более 650	без ограничений
3	ЖБР-65ПШР	350 и менее	М; П; Г; О; Т
		от 351 до 650	Г; О; Т
		более 650	без ограничений
4	АРС-4	от 351 до 650	М; П
		более 650	без ограничений
5	W 30	от 351 до 650	М; П
		более 650	без ограничений**
6	ПФК-350	от 351 до 650	М; П
		более 650	без ограничений
Примечания			
* Специализация железнодорожных линий в соответствии с таблицей 3.2 распоряжения ОАО «РЖД» от 31 декабря 2015 г. № 3212р.			
** Применение на линиях «В» допускается только при условии получения сертификата соответствия требованиям технического регламента ТС «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» (ТР ТС 002/2011) [5].			

1.3 Выводы по главе 1

Выявлены основные факторы, ограничивающими срок службы рельсовых креплений:

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

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 креплений, в первую очередь за счет совершенствования технических требований к ним, обеспечивающих повышение технических характеристик креплений.

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

2 АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РЕЛЬСОВ И ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НЕЕ

2.1 Эксплуатационная стойкость рельсов, ее составляющие

В рельсах в процессе эксплуатации по мере наработки тоннажа, измеряемого в млн т брутто, происходят процессы износа, смятия, коррозии и усталости, в том числе контактной, крутильной и коррозионной усталости. В результате протекания этих процессов в рельсах образуются различные повреждения и дефекты[9]. Дефект рельса характеризуется отклонениями от установленных норм его геометрических параметров или прочности, соблюдение которых обеспечивает работоспособное состояние рельса в установленных условиях эксплуатации. К дефектам рельсов относятся: выкрашивания, выколы, трещины, изломы, все виды износа, пластические деформации в виде смятия, сплывов металла головки рельса, коррозия, механические повреждения, величины которых превышают нормированные значения.

Отказ рельса вызывается дефектом, при котором исключается пропуск поездов (полный отказ, например, при изломе рельса) или возникает необходимость в ограничении скоростей движения поездов (частичный отказ, например, образование волнообразных неровностей сверх нормируемых значений на поверхности катания головки рельса и т.п.)[31].

Повреждаемость рельсов контактно-усталостными дефектами и износом зависит от совокупности факторов: конструкции пути, радиуса кривой, уклона пути, режима торможения подвижного состава, нагрузок от колесной пары на рельс, скоростей движения и т.д.

Интенсификация условий эксплуатации конструкции верхнего строения пути сопровождается повышенным одиночным изъятием рельсов. При этом увеличивается не только удельный выход рельсов, но и изменяется характер преобладающих причин их повреждений. Так, если в прямых и пологих кривых основным видом повреждений рельсов являются дефекты контактно-

усталостного происхождения, то в кривых малого радиуса – боковой износ по упорной нити и вертикальный – по внутренней нити[33].

Наиболее значимыми факторами, определяющим эксплуатационную стойкость рельсов, являются их контактно-усталостная долговечность и износостойкость.

В общем виде величина наработки тоннажа рельсов до изъятия может быть представлена зависимостью:

$$T = J_B \cdot P_{И} + D_{КУД} \cdot P_D + Q \cdot P_Q \quad (2.1)$$

где T – наработка тоннажа до образования предельного износа (бокового)

J_B – наработка тоннажа на один метр рельсов;

$D_{КУД}$ – наработка тоннажа до образования дефектов контактно-усталостного происхождения (КУД);

Q – наработка тоннажа, до образования дефектов, не связанных с физико-механическими свойствами и качеством производства рельсов (дефекты от ударов, дефекты сварки и пр.)

$P_{И}$ – доля отказов, приходящаяся на износ;

P_D – доля отказов, приходящаяся на КУД.

P_Q – доля отказов, приходящаяся на прочие дефекты, при этом

$$P_{И} + P_D + P_Q = 1$$

Появление и развитие контактно-усталостных дефектов в головке рельса больше характерно для участков, на которых интенсивность износа, и, в первую очередь бокового, незначительна.

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.

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

К учету приняты изъятия рельсов по кодам дефектов [6]:

1. код дефекта 10 – Трещины и выкрашивания металла на поверхности катания головки из-за нарушений технологии изготовления рельсов (закатов, волосовин, плен и т.п.), развивающиеся на ранних стадиях эксплуатации. После пропуска более 150-250 млн т брутто продольные горизонтальные трещины и выкрашивания образуются при глубине залегания до 8 мм в результате воздействий высоких контактных напряжений;
2. код дефекта 12/11 – Трещины и выкрашивания металла на боковой рабочей выкружке или на средней части головки, возникшие изнутри от местных скоплений неметаллических включений, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек или возникшие от наружной поверхности рельса при глубине залегания до 8 мм из-за недостаточной контактно-усталостной прочности рельсового металла;
- 1 код дефекта 19 – Контроленепригодность из-за наличия выкрашиваний, трещин на поверхности катания, и других образований, мешающих обнаружению внутренних дефектов при ультразвуковом контроле рельса.
- 2 код дефекта 22/21 – Поперечные усталостные трещины в головке в виде светлого или темного пятна, возникшие от внутренней или наружной продольной трещины, образовавшейся вследствие недостаточной контактно-усталостной прочности металла. Поперечные усталостные трещины могут образовываться от поверхностной продольной трещины (код дефекта 11).

Для сравнительного анализа эксплуатационной стойкости рельсов и выявления участков с интенсивным изъятием рельсов по контактно-усталостным видам дефектов использована система статистических показателей:

1. Удельное одиночное изъятие рельсов, снятых по отдельной группе дефектов или по всем дефектам вместе за отчетный год (n), представляющая собой отношение суммарного числа одиночно изъятых рельсов (N) к общему протяжению путей с рельсами соответствующих типов и качественных категорий, выраженному в километрах (L) [шт./100км].

$$n = \frac{N}{L \cdot 0,01} \quad (2.2)$$

Отказы рельсов, выбранные из учетной документации, группировались в соответствии со следующим алгоритмом:

- полигон (Западный или Восточный);
- категория качества рельсов;
- конструкция пути: бесстыковой и звеньевой;
- тип скрепления на железобетонных шпалах
- код дефекта в соответствии с Инструкцией «Дефекты рельсов» [6].

2. Накопленный удельный выход - n_y . Определяется как сумма количества изъятий рельсов в зависимости от наработки.

$$n_y = \sum_{T_1}^{T(i)} n_{yi} \quad (2.3)$$

3. Средневзвешенная величина наработки тоннажа, пропущенного по одиночно изъятым рельсам за весь их срок службы (T_{cp}). Этот вспомогательный показатель определяется для рельсов каждого типа или качественной категории по формуле:

$$T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{N_1}^{N(i)} N_i T_i \quad (2.4)$$

N – количество рельсов, рассматриваемых типов или качественных категорий, вышедших из эксплуатации по дефектам в отчетном году при определенной наработке T_i .

Для установления закономерностей возникновения и развития дефектов контактно-усталостного характера (КУД) и, в дальнейшем, разработки математической модели определения влияния конструкции 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) [6].

Для оценки эксплуатационной надежности верхнего строения пути в целом и его элементов используются вероятностные характеристики случайной величины – наработки пути или его элементов от начала его эксплуатации до первого отказа.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ – это вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа, определяется по формуле

$$P(t) = P(T > t) \quad (2.5)$$

где t - время или наработка, в течение которой определяется вероятность безотказной работы;

T - время или наработка от начала до первого отказа.

Вероятность безотказной работы по данным статистики об отказах оценивается по формуле [7].

$$P(t) = \frac{N(t_i)}{N_0} \quad (2.6)$$

где N_0 - число объектов в начале испытаний;

$N(t_i)$ - число безотказно проработавших элементов к моменту времени t_i

Несмотря на то, что интенсивная укладка дифференцированно термоупрочненных рельсов (далее –ДТ) типа Р65 производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и ПАО «ЧМК» в последние годы обеспечила протяженность пути с рельсами ДТ порядка 22 650 км, в первую очередь на участках грузового и тяжеловесного движения, основная часть находящихся в эксплуатации рельсов является объемно термоупрочненными (далее - ОТ) производства до 2014 года – порядка 60 тыс. км пути[154].

Одной из показательных характеристик эксплуатационной стойкости рельсов является их удельный выход - количество изъятий рельсов в год относительно 100 км пути.

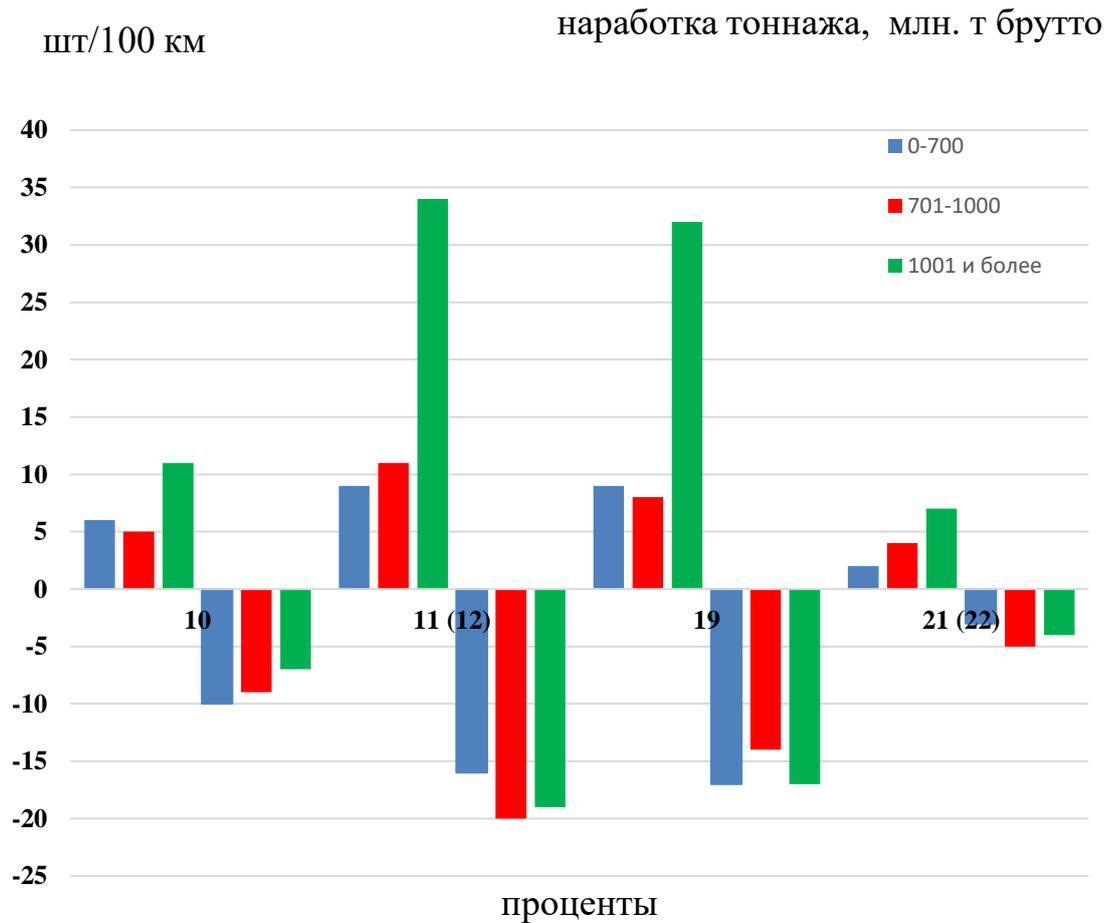
В 2020 году в конструкции бесстыкового пути для ОТ рельсов производства АО «ЕВРАЗ НТМК» эта величина составляет 53,1 шт./100 км, для ОТ рельсов производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» - 66,0 шт./100 км.

Превышение удельного выхода ОТ рельсов производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» над ОТ рельсами производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК», которые изготавливались по ГОСТ Р 51685-2000 [8], объясняется различием условий их эксплуатации: полигон укладки рельсов АО «ЕВРАЗ ЗСМК» характеризуется более низкими температурами, большей грузонапряженностью, осевыми нагрузками, сложным планом и профилем пути по сравнению с европейской частью РФ – полигоном укладки рельсов АО «ЕВРАЗ НТМК».

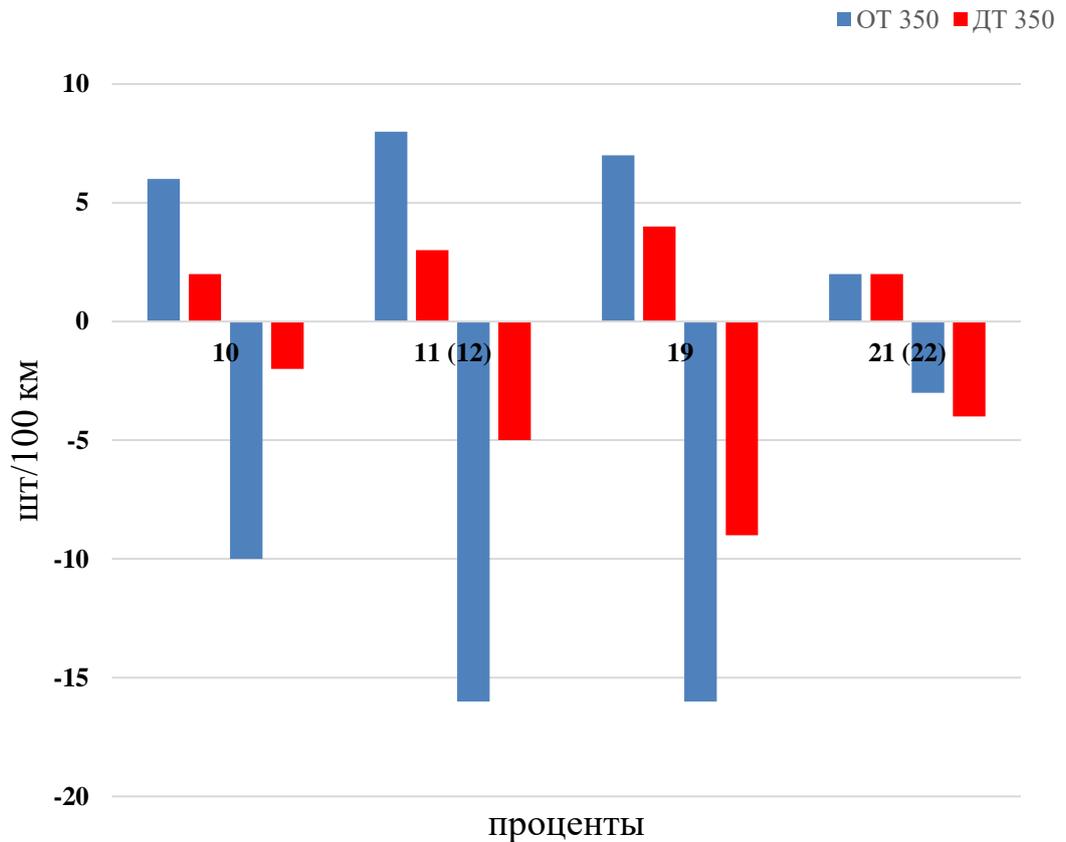
С целью получения результатов, характеризующих изменение эксплуатационной стойкости рельсов в зависимости от наработки тоннажа, и, в дальнейшем, расчета жизненного цикла рельса - LLC, был определен удельный выход и выявлены основные виды дефектов ОТ и ДТ рельсов производства ЕВРАЗа в интервале наработки 0-700, 701-1000, более 1000 (млн т брутто) по данным 2019 г (рисунок 2.1 а) и выполнено сопоставление изъятий ОТ и ДТ рельсов при близких значениях наработки - до 700 млн т брутто (рисунок 2.1. б) [11]

При анализе величин удельного выхода ОТ рельсов установлено, что с увеличением пропущенного тоннажа (при наработке более 1000 млн т брутто) значительно (более 2-х раз) увеличивается удельный выход рельсов по контактно-усталостным видам дефектов, образующимся на поверхности катания от продольных и поперечных трещин.

а)



б)



а – ОТ рельсы, б – ОТ рельсы при наработке до 700 млн т брутто и ДТ рельсы

Рисунок 2.1– Распределение удельного выхода рельсов производства ЕВРАЗ по дефектам в зависимости от наработки тоннажа

Сокращение срока службы рельсов приводит к неполному использованию ресурса их работоспособности в отношении прочности против образования дефектов контактно-усталостного происхождения.

2.2. Изъятие рельсов по контактно-усталостным видам дефектов

Одним из важнейший показателей работоспособности рельсов является уровень их прочности против образования внутренних дефектов, наиболее распространенными из которых являются дефекты контактно-усталостного происхождения.

Контактно-усталостные дефекты изучены достаточно глубоко. В общем случае трещины от усталостных повреждений в местах качения колеса по рельсу возникают из-за чрезмерного воздействия колеса на рельс при недостаточной контактно-усталостной прочности рельсового металла[152].

Силы трения в зоне контакта «колесо – рельс» (в продольном и поперечном направлениях) на поверхности вызывают сжатие и растяжение кристаллической решетки металла. Микротрещины головки образуются и развиваются прежде всего там, где явно выражено основное направление движения (двухпутные линии) или на участках тяги (крутые подъемы и места разгона).

Образование микротрещин, перерастающее впоследствии в выкрашивания, возникает в первую очередь при несоответствии возвышения рельсов скорости движения. При недостатке возвышения - на упорной нити (если интенсивность бокового износа меньше рекомендуемых величин) и при завышенном положении наружного рельса - по внутренней нити.

Высокие контактные напряжения между колесом и рельсом способствуют возникновению микротрещин, и главной причиной в их развитии считается сдвиг между контактирующими поверхностями колеса и рельса. Это происходит и на линиях с преимущественным грузовым движением с большой грузонапряженностью при курсировании современных локомотивов с увеличенной осевой нагрузкой, развивающих большие тяговые усилия.

С уменьшением радиуса кривой точка контакта и, следовательно, место возникновения микротрещин, перемещается в сторону рабочей грани рельса[151].

Микротрещины возникают как на новых рельсах, лежащих в пути менее одного года, так и на эксплуатирующихся более 10 лет.

Микротрещины могут быть одиночными, но более характерно их распространение на длинном участке. Зона трещиноватости образуется как ряд параллельно и близко расположенных трещин, расстояние между

которыми составляет 2-3 мм, а более длинные размещаются на расстоянии друг от друга 10...20 мм (см. рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 - Образование микротрещин на поверхности катания рельса

Контактно-усталостные дефекты возникают в первую очередь на участках, где имеются большие касательные напряжения колеса и рельса, сопровождающиеся проскальзыванием в сухих, с большим трением условиях, в то же время рост трещин предполагает наличие жидкости (вода, смазка)[106,107]. На пути вода появляется после осадков и может остаться в трещинах головки рельса, тогда как поверхность рельса кажется сухой. Смазка попадает на рельс из лубрикаторов или из двигателей локомотивов.

Если вследствие высоких контактных напряжений сдвига уже появились микротрещины, присутствие жидкости при прохождении поездов будет провоцировать их рост. Закрытая в трещинах жидкость обуславливает очень высокие местные растягивающее напряжения[105].

По результатам анализа данных выхода термоупрочненных рельсов на сети ж.д. ОАО «РЖД» составлена выборка (см. таблицу 2.1), характеризующая процент изъятия рельсов по контактно-усталостным видам дефектов от общего количества изъятий в 2018 - 2020 гг. в конструкции бесстыкового и звеньевого пути.

Таблица 2.1 - Изъятие термоупрочненных рельсов, %

Года	Код дефект а	ОТ (ЕНТМК)	ОТ (ЕЗСМК)	ДТ (ЕЗСМК)
2018	10	9.5	5.3	1.6
	11 (12)	21.8	17.6	6
	19	16.3	6.4	9
	21 (22)	4.5	8.2	6.9
	Итого	52.1	37.5	23.5
2019	10	11.5	7.4	2.8
	11 (12)	20.2	15.8	5.3
	19	18.6	14.5	8.4
	21 (22)	2.1	5.1	2.9
	Итого	52.4	42.8	19.4
2020	10	9.3	8.7	2.8
	11 (12)	19.8	14	7.6
	19	12.8	9.5	7
	21 (22)	3.1	4.9	2.9
	Итого	45	37.1	20.3

Изъятие рельсов по пяти кодам дефектов составляет от 20 до 50% от общего количества изъятий, что свидетельствует о высокой значимости результатов научно-технических решений, способных уменьшить удельный выход рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения.

Трещины и выкрашивание металла на рабочей поверхности головки и боковой износ являются основной причиной изъятия и дифференцированно термоупрочненных рельсов (Помимо рассмотренных дефектов, отмечается высокий удельный выход рельсов ОТ и ДТ рельсов по причине отклонений в технологии сварки – более 30%).

При сравнительной оценке удельного количества изъятий по дефектам рельсов категорий ОТ350 (категории Т1) и ДТ350, имеющих близкий средний пропущенный тоннаж (до 500 млн т брутто), удельный выход рельсов ДТ350 составляет 0,35 шт./км, а удельный выход рельсов ОТ350 (категории Т1) – 0,54 шт./км, что в 1,5 раза больше, чем для рельсов категории ДТ350.

Наибольший выход рельсов отмечается по дефектам 11.2 (12.2) и 19.0-1-2 из-за недостаточной контактно-усталостной прочности рельсового металла в условиях повышенных нагрузок от составов на участках грузового тяжеловесного движения на участках Восточного полигона.

При сравнительном анализе наиболее объективные результаты достигаются при комплексном использовании нескольких показателей[7]:

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.

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 контактно-усталостного происхождения на сети железных дорог ОАО «РЖД».

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, что показано на рисунке 2.3

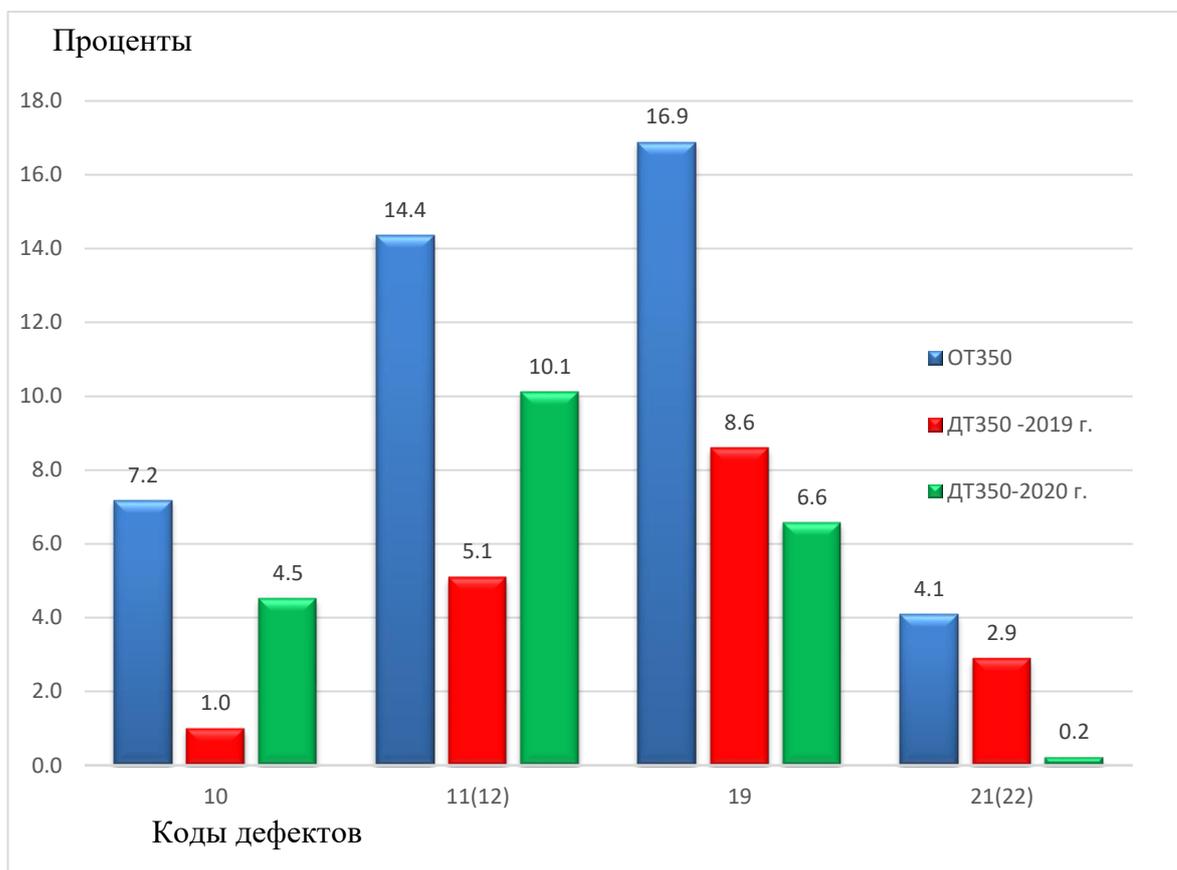
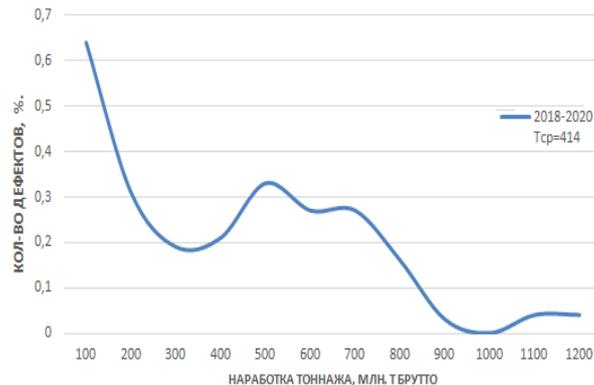
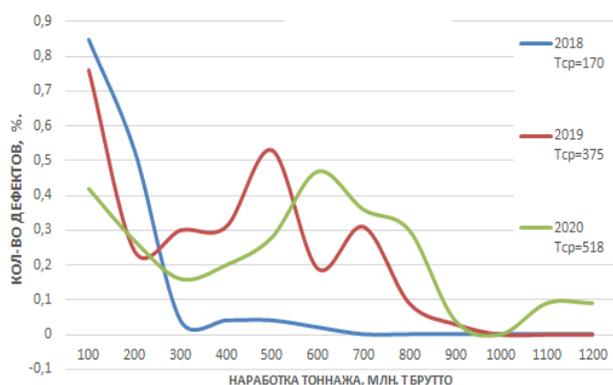


Рисунок 2.3 - Доля изъятий рельсов по контактно-усталостным видам дефектов в зависимости от общего количества изъятий

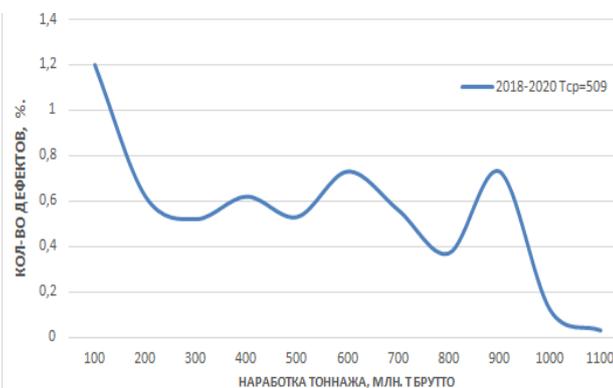
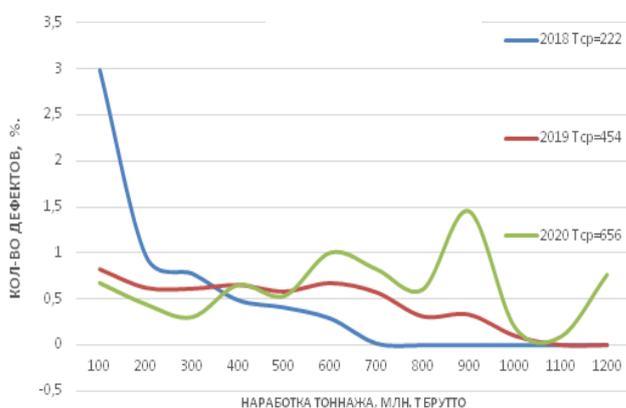
Данные, получаемые по одному году, не в полной мере характеризуют фактическое состояние по одиночному изъятию рельсов. На рисунке 2.4 представлены графики, иллюстрирующие различие в результатах при рассмотрении данных по рельсам ДТ за один и три года. Итоговые графики (данные усреднены по трем годам выборки) изъятий ДТ рельсов наглядно демонстрируют, что наиболее интенсивно изъятия рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения происходят на ранней стадии

эксплуатации при наработке до 100 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.



а) Изъятие рельсов ДТ350 по дефектам кода 10

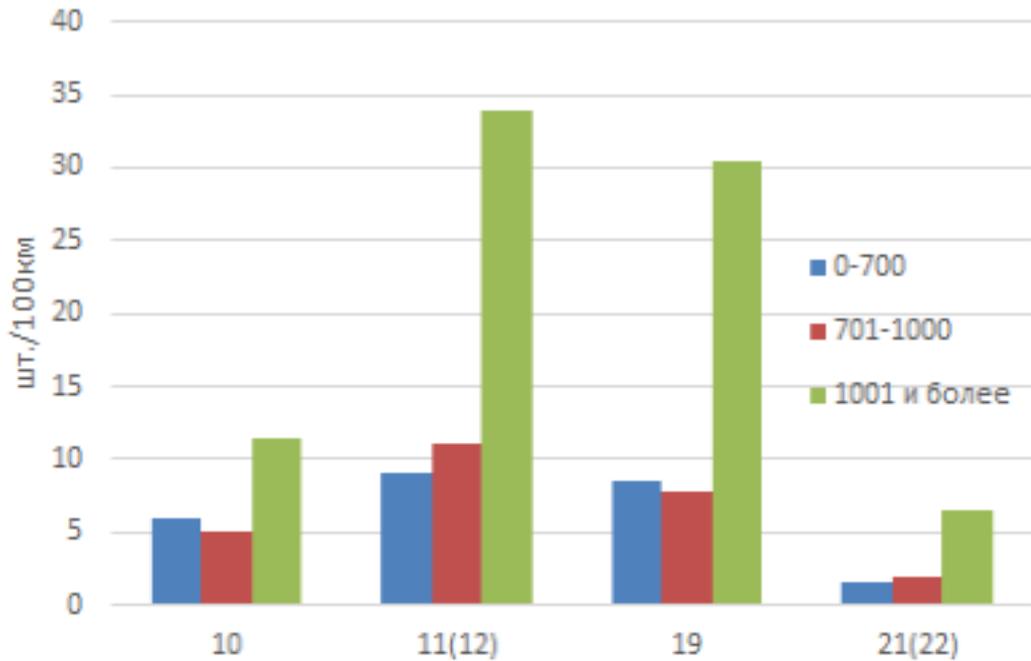


б) Изъятие рельсов ДТ350 по дефектам кода 12 (11)

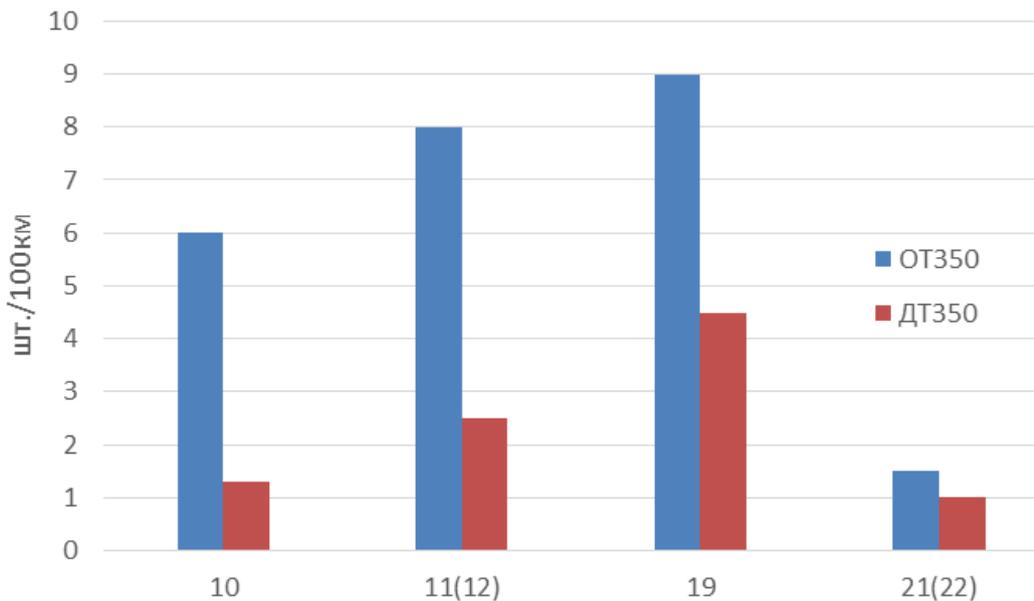
Рисунок 2.4 - Изъятие рельсов ДТ350 по отдельным дефектам

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 - ЛСС, был определен удельный выход и выявлены основные виды дефектов ОТ и ДТ рельсов в интервале наработки 0-700, 701-1000, более

1000 млн т брутто (рисунок 2.5 а) и выполнено сопоставление изъятий ОТ и ДТ рельсов при близких значениях наработки - до 700 млн т брутто (рисунок 2.5 б).



а) рельсы категории ОТ и ДТ 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 2.5 – Распределение удельного выхода рельсов по дефектам в зависимости от наработки тоннажа

2.3. Выводы по главе 2

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.

Наибольший выход рельсов по дефектам кодов 11 и 19 отмечается в условиях повышенных нагрузок от составов на участках грузового тяжеловесного движения на участках Восточного полигона, где в основном применяются скрепления типа ЖБР-65Ш и его подкладочные модификации.

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.

3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ И СОСТОЯНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СКРЕПЛЕНИЙ НА СОСТОЯНИЕ РЕЛЬСОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

3.1 Общие положения

В системе «колесо – рельс – рельсовое основание» узел промежуточного рельсового скрепления воспринимает значительные вертикальные и горизонтальные (продольные и поперечные) нагрузки (см. рисунок 3.1).

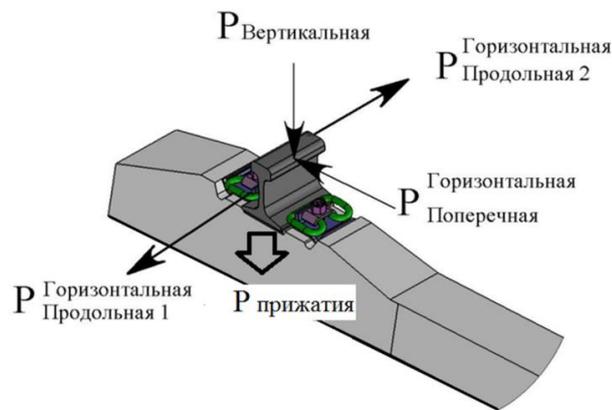


Рисунок 3.1 – Основные силы, действующие на узел промежуточного скрепления

Параметры упругих скреплений в значительной мере определяются 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 силой (P_y) происходит дальнейшее сжатие прокладки с одновременным ослаблением клеммного нажатия.

Вертикальная статическая жесткость узла скрепления определяется из выражения:

$$C_y = C_{\Pi} + C_{K^1} + C_{K^2} \quad (3.1)$$

Соотношение между C_p и C_k определяют рядом условий. По условию недопущения размыкания системы «рельс – скрепление - прокладка» (т.е. для того, чтобы под колесом не происходило полного ослабления клеммного нажатия) должны быть выдержаны определенные соотношения. При колесной нагрузке 60 – 80 кН жесткость двух клемм ($C_k^1 + C_k^2$) должна быть в 3 – 4 раза больше, чем жесткость прокладки C_p . Однако для предотвращения формирования сил угона необходимо, чтобы клеммы были еще менее жесткими и обеспечивали нажим на подошву рельса в момент реализации наибольшего давления колеса, достаточный для недопущения местного проскальзывания подошвы рельса по основанию.

При проектировании узла скрепления в целях недопущения значительного ослабления клеммного нажатия соотношение между вертикальной статической жесткостью двух клемм и жесткостью упругой прокладки должна составлять от 1:10 до 1:20.

Жесткость рельсовой нити поперек колеи определяется параметром

$$C_z = \frac{Pz}{z} \quad (3.2)$$

где: P_z – горизонтальная поперечная сила, приложенная к рельсу,
 z – деформация.

Жесткость по подошве всегда оказывается большей, чем по головке и зависят от конструкции и состояния скрепления, его собственной горизонтальной поперечной жесткости.

Продольная горизонтальная жесткость узла скрепления C_x определяется выражением:

$$C_x = C_x^0 + k * P_v \quad (3.3)$$

где: C_x^0 – продольная горизонтальная жесткость при $P_v = 0$

k – коэффициент, зависящий от материала и размера прокладок;

P_v – вертикальное давление рельса.

Рельсовый путь - конструкция не равноупругая и различные сочетания ее имеют разные величины модуля упругости U в вертикальной, поперечной и продольной плоскостях, что является, в том числе, следствием неодинаковой степени износа элементов промежуточных креплений и различной величиной прижатия подошвы рельса к основанию за счет ослабления монтажного усилия прижатия.

Влияние креплений в системе «колесо – рельс – рельсовое основание» следует рассматривать на фоне других, системных аспектов, имеющих зачастую взаимоисключающие решения, а именно:

- увеличение поперечной жесткости рельсового крепления ведет к повышению жесткости конструкции пути в целом и к увеличению критической скорости движения, что влияет на ходовую устойчивость вагонов;

- в кривых малого радиуса основной проблемой динамики взаимодействия пути и подвижного состава являются значительные боковые силы. Во избежание серьезных деформаций конструкции пути поперечную жесткость пути следует увеличить (см. рисунок.3.2). Однако недостатком такого решения является то, что его реализация может оказать вредное воздействие на поперечное динамическое взаимодействие колеса и рельса и безопасность прохождения кривых[9].

- при коротких неровностях на поверхности рельса возникают ударные нагрузки с высокой (сила P_1) и низкой (сила P_2) частотой. Относительно малая жесткость рельсового крепления способствует смягчению ударных нагрузок (см. рисунок 3.3) [9].

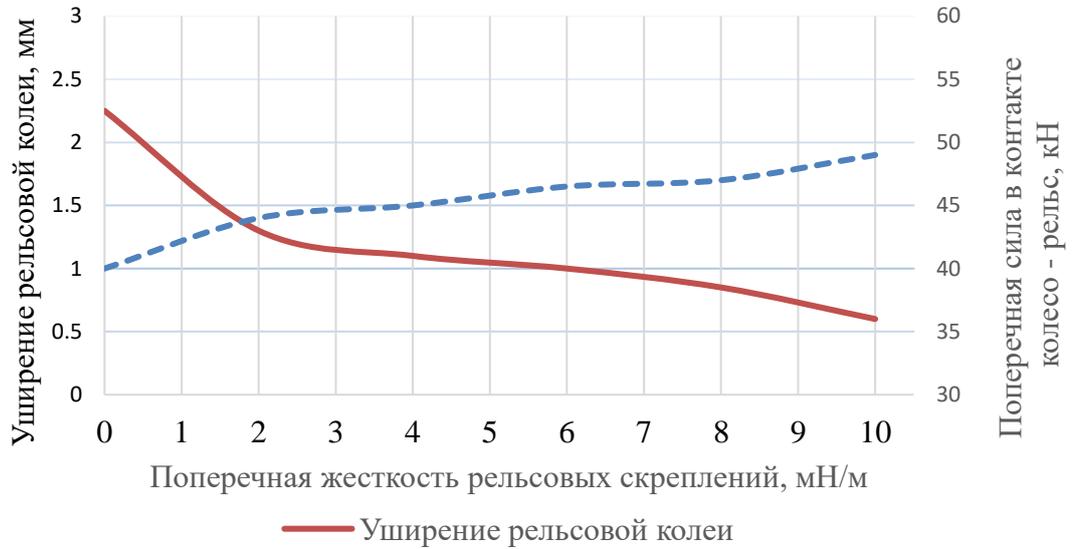


Рисунок 3.2 – Влияние поперечной жесткости рельсовых креплений на поперечную силу и ширину колеи в контакте колесо – рельс

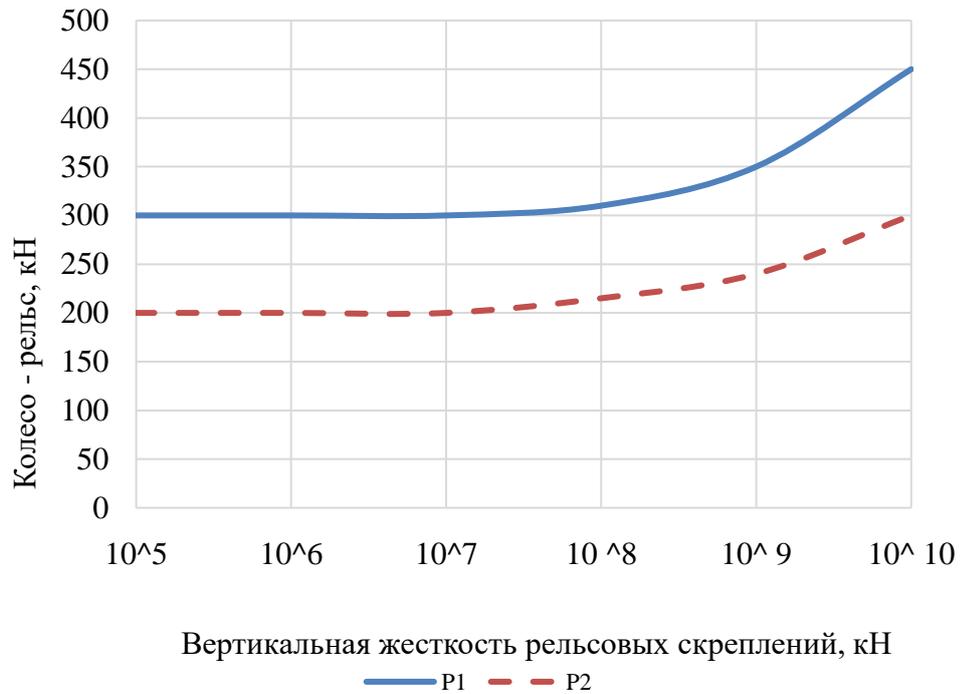


Рисунок 3.3 – Влияние вертикальной жесткости рельсовых креплений на вертикальные ударные силы, действующие в контакте колесо – рельс

3.2. Анализ влияния особенностей конструкции и состояния промежуточных рельсовых скреплений на долговечность рельсов

Конструкционная жесткость узла скрепления определяется жесткостью прокладки-амортизатора (вертикальная) и жесткостью клеммы на контакте с рельсом (горизонтальная поперечная)[12].

Согласно ГОСТ 34078-2017 [12], вертикальная статическая жесткость подрельсовых прокладок-амортизаторов различного исполнения для одной и той же конструкции скрепления находится в диапазоне от 50 до 150 МН/м и при климатическом старении (долговременной эксплуатации) может изменяться до 30 %, т.е достигать 195 МН/м. При температуре минус 40 °С коэффициент изменения статической жесткости может достигать 4.

Согласно ГОСТ 33186-2014 [13] жесткость клеммы в зоне давления на рельс при номинальном усилии прижатия – не более 1,1 кН/мм.

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[34].

Модуль упругости пути и жесткость подрельсового основания связаны соотношением:

$$U = Ж/l \quad (3.4)$$

где: U – модуль упругости пути, МПа;

$Ж$ – 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:

$$1/Ж = \sum 1/Ж_i \quad (3.5)$$

где: $Ж_i$ – жесткость отдельных элементов конструкции пути, МН/м;

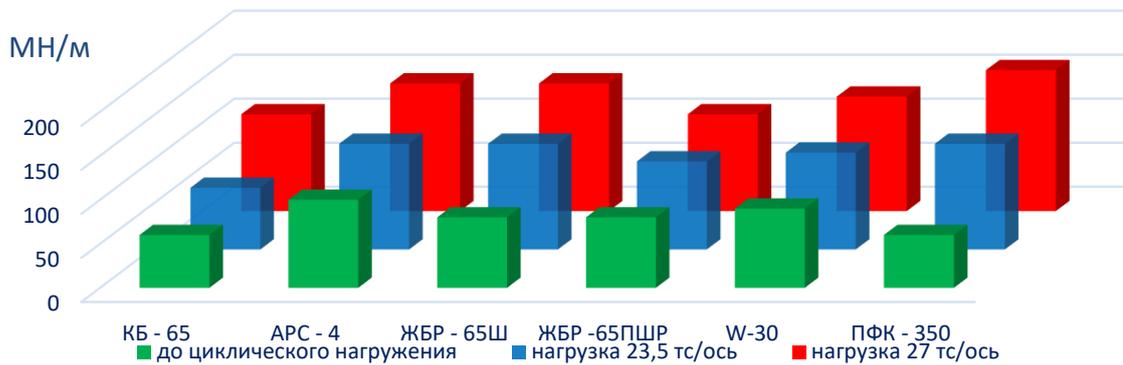
Модуль упругости пути на железобетонных шпалах при неизменных характеристиках шпал и подшпального основания не является постоянной величиной, а зависит от жесткости промежуточных креплений и уровня колесных нагрузок.

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.

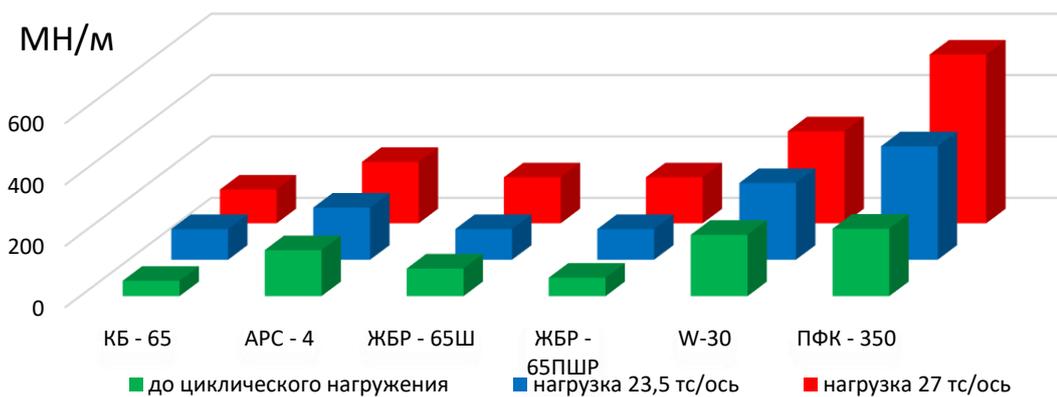
Пространственная жесткость упругих креплений определяется жесткостью клеммных соединений, а также соотношением жесткости клемм и подрельсовых прокладок.

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 3.4 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, имитирующих поездную нагрузку при наработке тоннажа 100 млн т брутто



а) изменение вертикальной жесткости креплений при их циклическом нагружении



б) изменение горизонтальной жесткости креплений при их циклическом нагружении

Рисунок 3.4 – Изменение жесткости креплений при их циклическом нагружении

Диапазон вертикальной жесткости узла крепления колеблется в пределах от 50 до 300 МН/м, а соотношение жесткостей клеммы на контакте с рельсом и амортизирующей прокладкой составляет от 1/7 до 1/20. Нормируемый ГОСТ 32698-2014 диапазон значений вертикальной жесткости узла промежуточного рельсового крепления составляет 50 – 150 МН/м, поперечной – не менее 30 МН/м.

Наименьшую вертикальную жесткость имеет крепление КБ-65 за счет двух прокладок – подрельсовой и нащпальной, при этом конструкция КБ значительно подвержена влиянию динамического нагружения (увеличение вертикальной жесткости в 1,7 раза при $P = 27$ тс).

Приложение циклической нагрузки повышает значения вертикальной жесткости, в большей степени для бесподкладочных российских конструкций, за счет больших остаточных деформаций (смятие и истирание) прокладки-амортизатора и релаксации клеммы соответственно в 1,4 и 1,2 для креплений ЖБР-65Ш и ЖБР-65ППР при нагрузке $P = 23,5$ тс и в 1,5 и 1,2 при нагрузке $P = 27,0$ тс[144].

Для крепления W-30 увеличение вертикальной жесткости после циклического нагружения составляет 1,2 раза, что обусловлено конструктивными особенностями клеммы торсионного типа, имеющей лучшие упругие характеристики по сравнению с клеммами ЖБР и АРС.

Для крепления ПФК-350 относительное увеличение вертикальной жесткости достигает 2,1 раза.

В целом повышение вертикальной жесткости после циклических испытаний указанных креплений обусловлено старением и потерей упруго-эластических свойств материала подрельсовых прокладок-амортизаторов.

Наименьшую вертикальную жесткость имеет крепление КБ-65 за счет двух прокладок – подрельсовой и нащпальной, при этом конструкция КБ наиболее подвержена влиянию динамического нагружения (увеличение вертикальной жесткости в 1,7 раза при $P = 27$ тс).

Наименьшее влияние циклическое динамическое нагружение оказывает на конструкцию крепления ЖБР-65Ш – относительное увеличение в 1,2 раза; у подкладочных конструкции креплений и АРС-4, имеющего жесткие упорные выступы анкера, - до 1,7 – 1,9 раза. Наибольшая поперечная жесткость отмечается у анкерных конструкций крепления АРС-4 до 200 МН/м и ПФК-350 – до 576 МН/м, а также крепления W-30 - 332 МН/м.

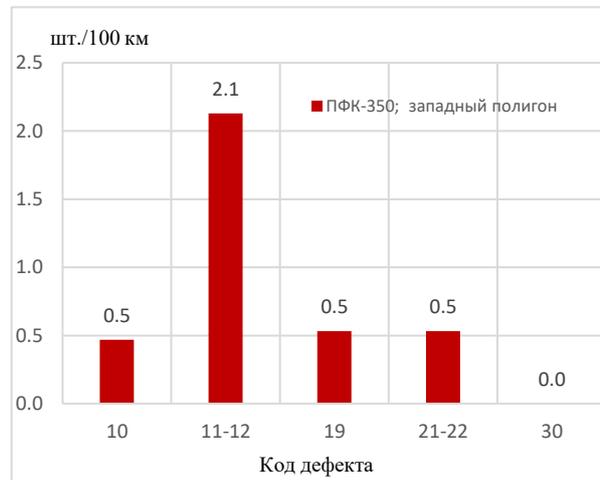
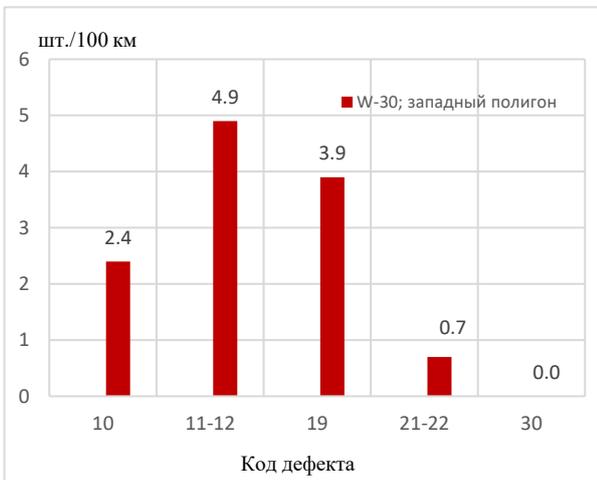
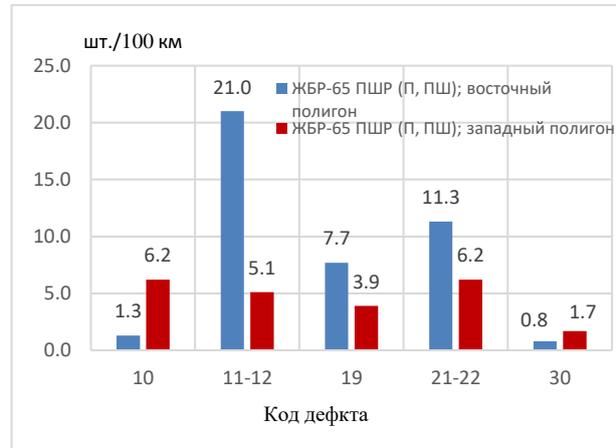
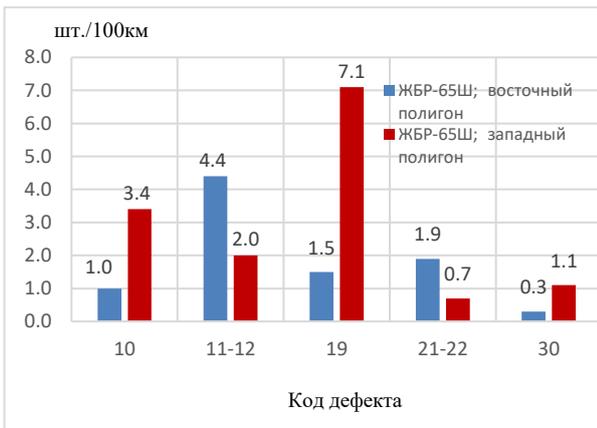
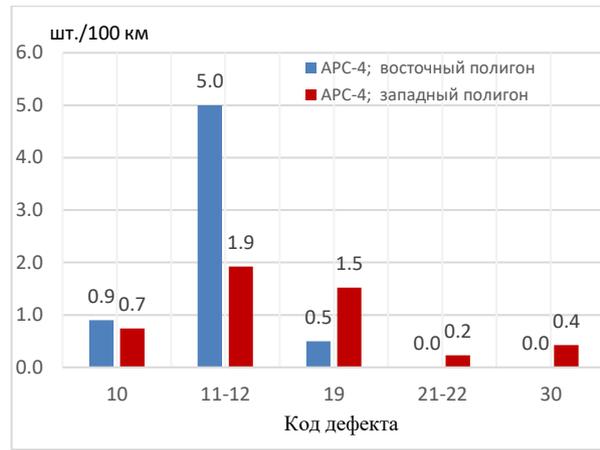
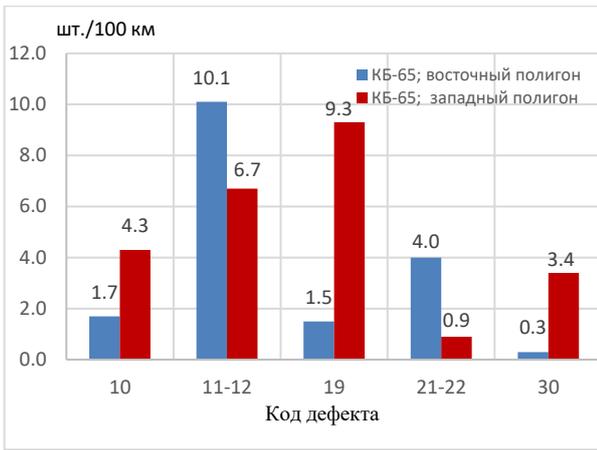
Приложение циклической нагрузки повышает значения вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости в большей степени для бесподкладочных конструкций за счет значительной остаточной деформации – смятие и истирание прокладки-амортизатора и релаксация клеммы.

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

Сформированные по результатам выборок из электронной базы данных ЕКАСУИ РК ОАО «РЖД», представленные на рисунке 3.6 являются основанием для заключения о влиянии конструкции узла крепления на интенсивность образования в рельсах дефектов контактно-усталостного происхождения.

Процентное отношение изъятий рельсов по определенным кодам (группе кодов) дефектов к общему количеству изъятий является условным показателем, характеризующим степень соответствия свойств рельсов условиям эксплуатации. При сравнении процентного соотношения изъятий рельсов в зависимости от типа крепления выявляется степень их соответствия условиям эксплуатации в которых они находятся. При этом, существенные различия в условиях эксплуатации определяют разницу между полученными величинами для одного типа крепления.

Представленный материал еще раз свидетельствует о необходимости рассматривать путь в комплексе, а не по отдельным элементам его конструкции, находя оптимальное сочетание величин их параметров. Повышенная жесткость рельсового основания приводит к более интенсивному образованию поверхностных дефектов контактно-усталостного происхождения в рельсах, которые, в свою очередь, при отсутствии шлифования рельсов, развиваются до предельно допустимых и впоследствии являются причиной изъятия рельсов.



Примечание.

Западный полигон: Октябрьская, Калининградская, Северная, Московская, Свердловская, Южно-Уральская, Западно-Сибирская дирекции инфраструктуры – структурные подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД»;

Восточный полигон – Красноярская, Восточно-Сибирская, Забайкальская и Дальневосточная дирекции инфраструктуры – структурные подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД»

Рисунок 3.5 - Удельный выход рельсов на скреплениях различных конструкций

3.3. Выводы по главе 3

- Результаты стендовых испытаний показывают значительные отличия в изменении величин контролируемых характеристик креплений различных конструкций в зависимости от величины динамической нагрузки.

- Жесткость узла крепления влияет на интенсивность образования и развития повреждений контактно-усталостного характера в рельсах.

- Повышение вертикальной жесткости после циклических испытаний креплений обусловлено старением и потерей упруго-эластических свойств материала подрельсовых прокладок-амортизаторов.

- Результаты анализа изъятий рельсов в эксплуатационных условиях, показывают, что повышенная жесткость рельсового основания приводит к более интенсивному образованию поверхностных дефектов контактно-усталостного происхождения в рельсах, которые развиваются до предельно допустимых размеров и являются причиной изъятия рельсов.

4 РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО РЕЛЬСОВОГО СКРЕПЛЕНИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ КОНТАКТНО- УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

4.1 Существующая методика расчета рельсов на прочность

Методики расчета железнодорожного пути на прочность как балки, лежащей на сплошном упругом основании, определяют напряжения в рельсе по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\sum P_{\mu}}{4kW}, \quad (4.1)$$

где P_{μ} - эквивалентная сила, заменяющая совокупность сил при работе на кручение;

W - момент сопротивления рельса;

$k = \sqrt[4]{(U/4EI)}$ – коэффициент относительной жесткости основания рельса.

где U - модуль упругости основания рельса, т.е. сила, приходящаяся на единицу длины рельсового пути, вызвавшая его осадку на 1 мм, (МПа).

E - модуль упругости рельсовой стали, равный $2,1 \times 10^5$ МПа;

I - момент инерции рельса.

Модуль упругости основания рельса не является первичным коэффициентом, величина которого зависит от показателей взаимодействия экипажа и пути, в том числе величину воздействия на путь экипажей с различными осевыми и погонными нагрузками, скоростей движения нового и модернизированного подвижного состава, интенсивности накопления остаточных деформаций и т.д.

Статический модуль упругости подрельсового основания U определяют в интервале нагрузок от 4 до 8 тс по следующей формуле:

$$U = \frac{1}{\sqrt[3]{64EI}} \sqrt[3]{\left(\frac{\Delta P}{\Delta y}\right)^4}, \quad (4.2)$$

где ΔP – интервал нагрузок на рельс;

Δu – прогиб рельса, соответствующий интервалу нагрузок;

EJ - крутильная жесткость рельса.

В настоящее время нет общей теории, достаточно полно объясняющей физическую сущность процесса накопления деформаций подрельсового основания с учетом всего многообразия факторов, влияющих на этот процесс. Имеется ряд гипотез и теорий, позволяющих объяснить влияние отдельных факторов на накопление деформаций при прочих неизменных или мало изменяющихся условиях[21].

Однако, определенно, прогиб рельса будет меняться в зависимости от вертикальной жесткости узла промежуточного рельсового скрепления при прочих равных условиях[41,89].

Для исследования влияния жесткости промежуточных рельсовых скреплений на возникновение контактно-усталостных повреждений в рельсах использовались методы моделирования, реализованные на базе программного комплекса «Универсальный механизм»[87, 88].

«Универсальный механизм» – это программный комплекс, разработанный Брянским государственным университетом (лаборатория вычислительной механики). Он может использоваться для моделирования динамики пространственных систем, состоящих из твердых тел (графических объектов с присвоенными им массами и матрицами инерции), шарниров (элементов, задающих положение твердых тел в пространстве и шарнирные силы) и силовых элементов (специальных элементов, определяющих характер взаимодействия между твердыми телами системы).

4.2 Описание и подготовка модели для расчета накопления контактно-усталостных напряжений

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.

В основу создания моделей легли результаты стендовых испытаний по определению вертикальной и поперечной жесткости различных конструкций рельсовых скреплений. Для исследования были выбраны 4 типа скреплений APC-4, ЖБР65-Ш, ЖБР-65ПШР, W-30.

В процессе моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм» железнодорожный путь задавался моделью «Инерционного рельса», в которой рельсы представлены как твердые тела под каждым колесом колесной пары. При этом, следует отметить, что в модели рельс рассматривается в бесстыковой зоне. Разработчики программного комплекса рекомендуют использовать эту модель пути для исследования влияния подвижного состава на состояние железнодорожного пути. Промежуточные рельсовые скрепления описывались в модели силовыми элементами – сайлент-блоками (рисунок 4.1).

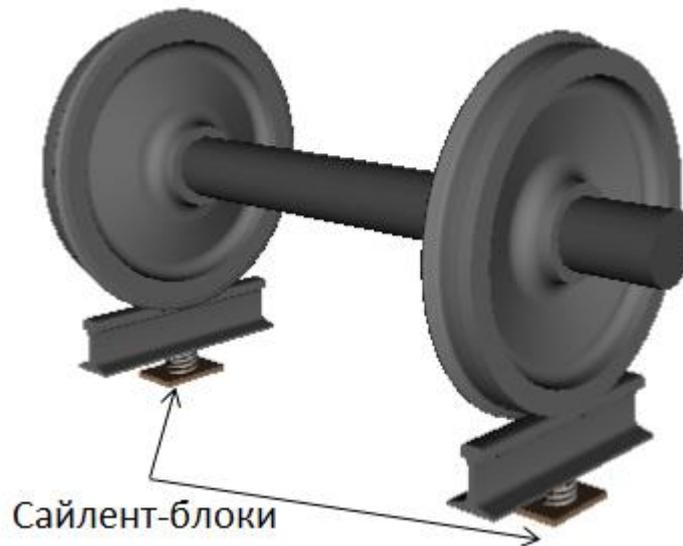


Рисунок 4.1 - Схема модели «Инерционного рельса»

Характеристики сайлент-блоков в программном комплексе могут задаваться различным образом, но всегда включают в себя жесткости и демпфирование связей между двумя телами.

В данном случае жесткость сайлент-блоков задавалась по значениям, полученным в результате стендовых испытаний. Эти данные использовались для задания вертикальной (по оси Z) и поперечной (по оси Y) жесткостей. Крутильная жесткость в данном расчете задавалась постоянной – равной 5 МН·м/рад. Жесткости креплений задавались линейными функциями, описанными графически. Примеры задания жесткостей приведены на рисунках 4.2 и 4.3 (для крепления W-30 до проведения испытаний).

При этом при моделировании новых креплений выбирались значения жесткости до проведения циклических испытаний. Для моделирования креплений, находящихся в эксплуатации, значения жесткости выбирались после циклических испытаний, что соответствует пропущенному тоннажу около 100 млн т брутто.

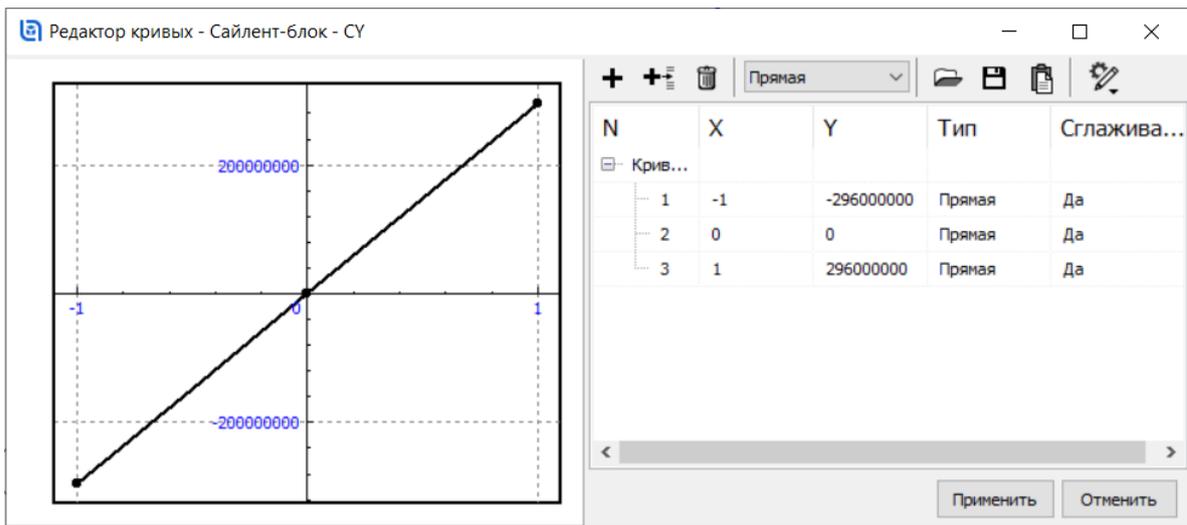


Рисунок 4.2 - Пример задания поперечной жесткости скрепления W-30

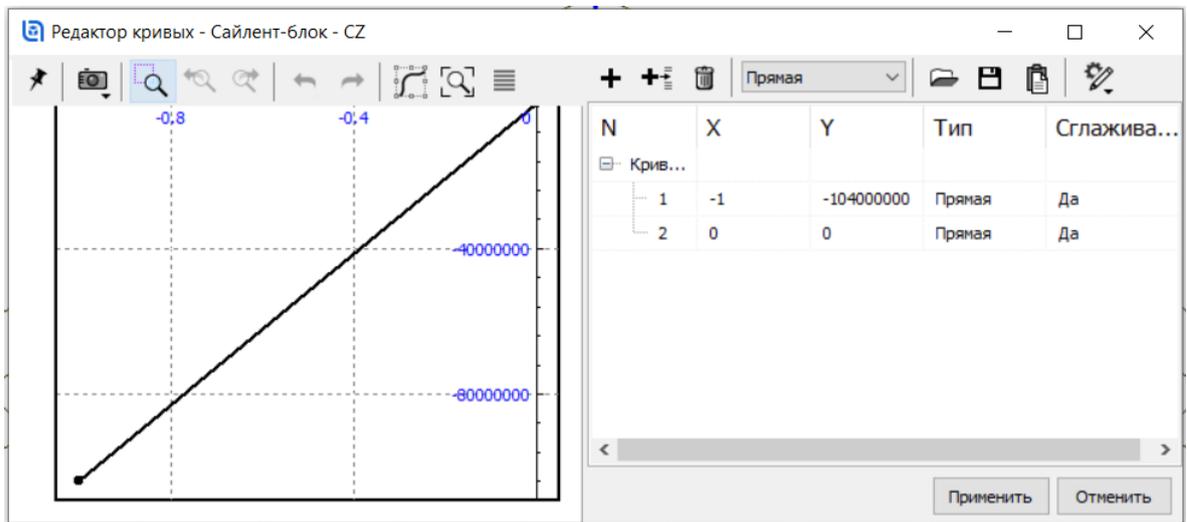


Рисунок 4.3 - Пример задания вертикальной жесткости скрепления W-30

Такую поточечную модель сайлент-блока можно описать следующим выражением:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t), \quad (4.3)$$

где

$M\ddot{u}$ – матрица масс;

$C\dot{u}$ – матрица вязкого демпфирования;

Ku – матрица жесткости.

Физический смысл выражения 4.3 представлен на рисунке 4.4. На рисунке изображена схема, описывающая вынужденные демпфированные колебания с одной степенью свободы.

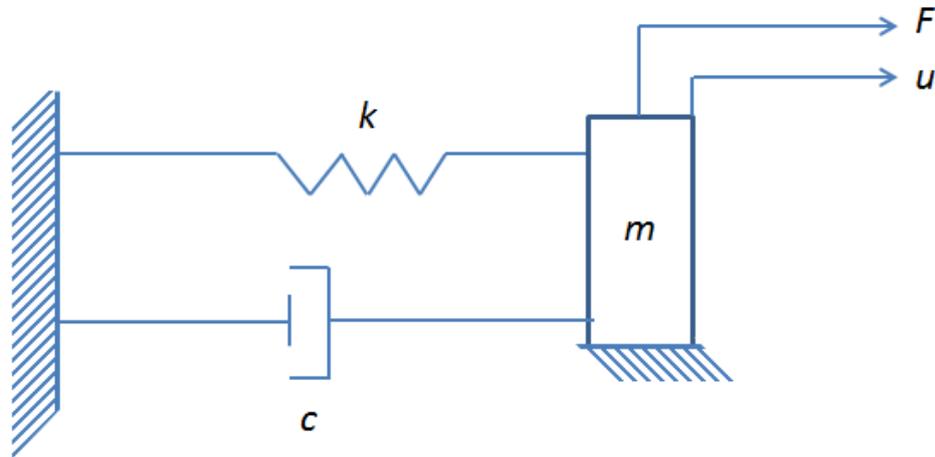


Рисунок 4.4 - Схема, описывающая демпфирование с одной степенью свободы

Уравнение (4.3) представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка. Принимая $x = e^{st}$ и решая характеристическое уравнение данной системы, получим решение [17]:

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

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

В полученном выражении 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,

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (4.4)$$

Учитывая, что собственная частота системы равна:

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

Запишем выражение (4.4) в следующем виде:

$$c_c = 2m\omega_n.$$

Отношение демпфирования к величине критического демпфирования представляет собой степень демпфирования:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2m\omega_n}.$$

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 резиновые подкладки скреплений, а в горизонтальной поперечной плоскости – характеристики прижимных устройств.

В таблице 4.1 приведены рассчитанные значения вертикального и поперечного демпфирования для различных типов скреплений.

Таблица 4.1 - 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-65ПШР	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

4.3 Расчет накопления контактно-усталостных напряжений в рельсах

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 [18]:

$$Q = \sum_{j=1}^n \frac{1}{N_i(j)}, \quad (4.5)$$

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

При этом в случае $Q = 1$ наступает начало разрушения рельса, другими словами возникновение выкрашивания рельсов.

Число циклов до появления выкрашивания усталостного характера можно определить, как [19], [20]:

$$N = C \sigma_{eq}^{-m}, \quad (4.6)$$

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 [21, 22].

Таким образом, в результате моделирования были рассчитаны контактно-усталостные поврежденности (Q) для рельсов, уложенных в пути с различными промежуточными рельсовыми скреплениями.

4.4 Результаты расчета накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах на прямом участке пути

При выполнении расчетов накопления повреждений в рельсах учитывалось изменение свойств рельсовых скреплений в процессе

эксплуатации. Это учитывалось изменением жесткостных и демпфирующих свойств креплений после пропуска тоннажа 100 млн т брутто.

До величины пропущенного тоннажа 100 млн т брутто вертикальные и поперечные жесткости и демпфирование принимались по данным стендовых испытаний и по таблицам 4.1 – 4.2 как значения до испытаний. Проведенные циклические испытания соответствовали величине наработки тоннажа 100 млн т брутто, и дальнейший расчет накопления повреждений проводился с использованием моделей с жесткостными и демпфирующими характеристиками для значений после испытаний. Таким образом, были учтены жесткости креплений, находящихся в эксплуатации.

Результаты расчета накопленной контактно-усталостной поврежденности для рельсов с различными промежуточными рельсовыми креплениями на прямом участке пути при суммарном пропуске тоннажа 200 млн т брутто представлены на рисунке 4.5.

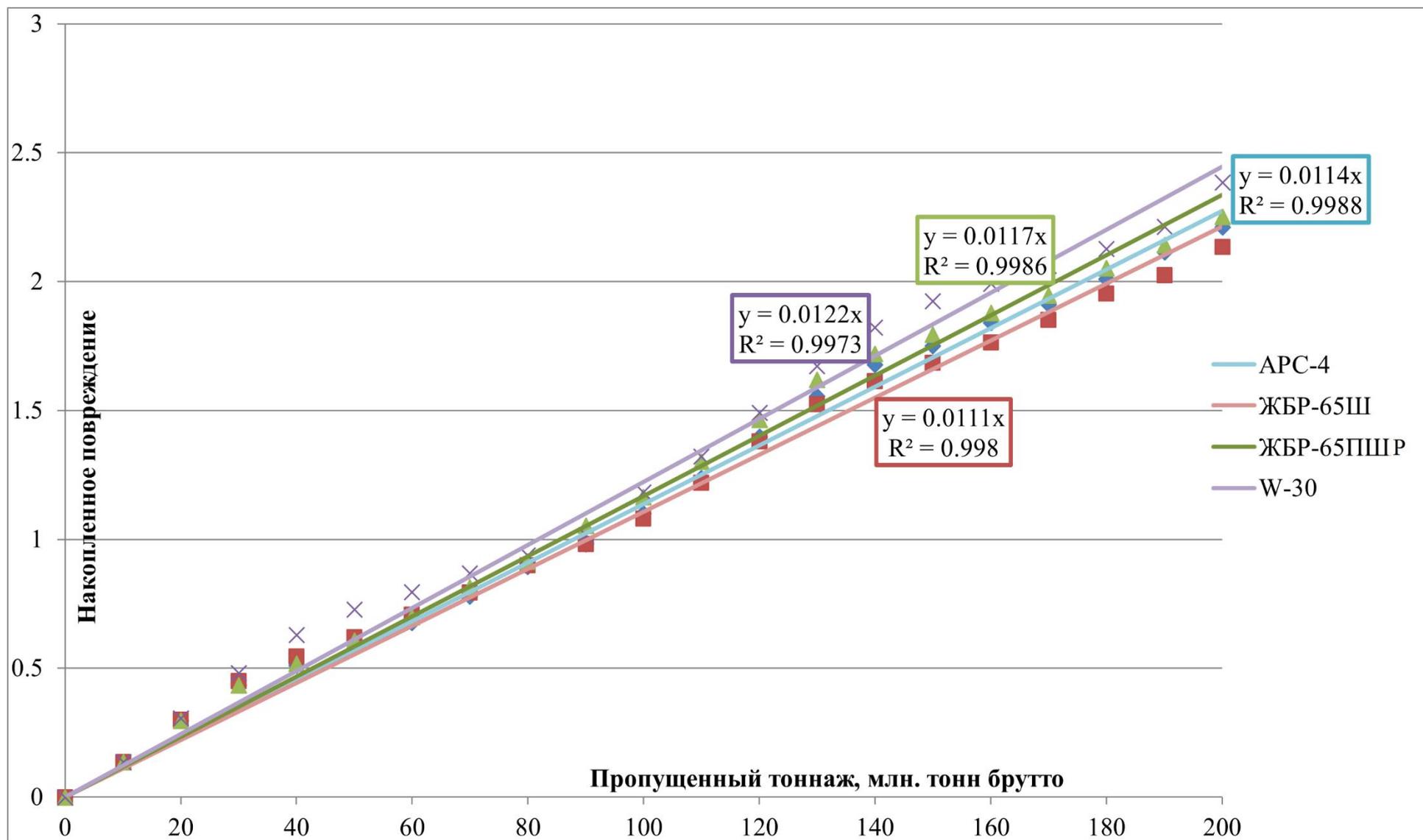


Рисунок 4.5 - Зависимость накопленной повреждаемости рельсов от пропущенного тоннажа

Исходя из полученных функциональных зависимостей могут быть экстраполированы значения повреждений для пропущенного тоннажа 700 млн т брутто. Эти значения представлены на диаграмме на рисунке 4.6.

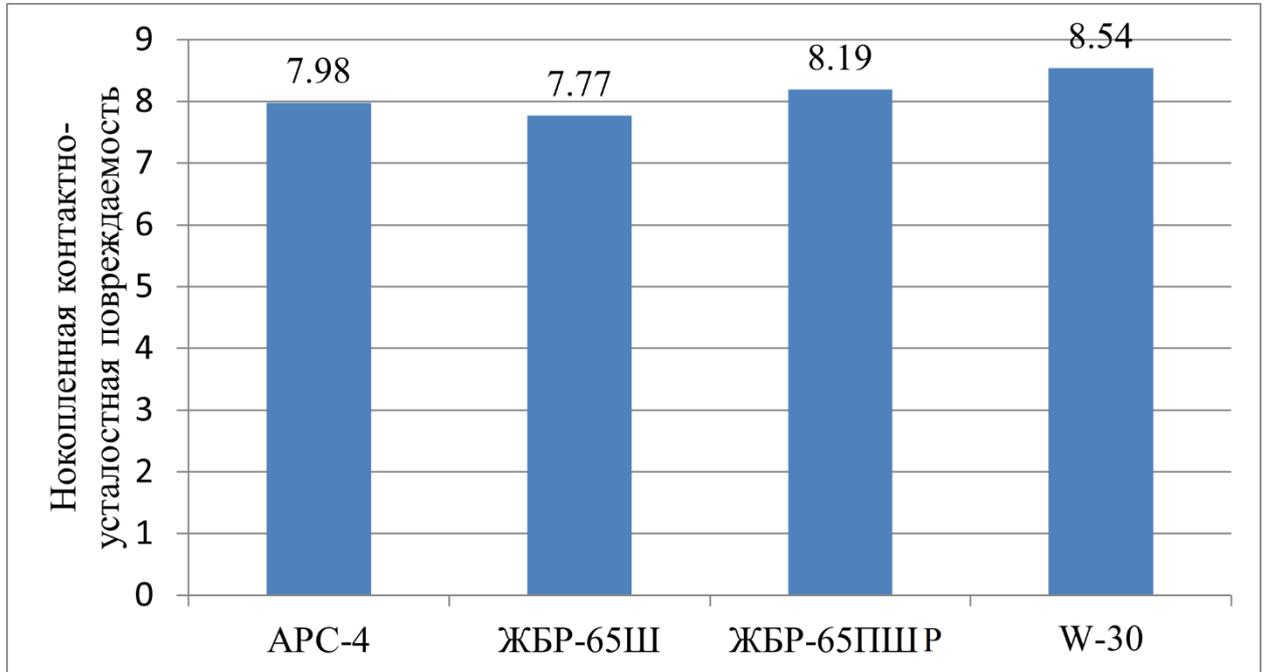


Рисунок 4.6 - Накопленное повреждение после пропуска 700 млн т брутто

Надо отметить, что производимая методами имитационного моделирования оценка накопления повреждений в рельсах носит по большей части качественный характер[42]. Это обусловлено принятыми допущениями в моделях накопления повреждений и моделях, описывающих характеристики креплений. Однако, такая оценка позволяет судить о качественной зависимости накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах от жесткости промежуточных рельсовых креплений.

Для сравнения контактно-усталостных повреждений в рельсах при различных креплениях величина контактно-усталостных повреждений рельсов на креплениях АРС-4 при пропущенном тоннаже 700 млн т брутто было принято за 1, расчетные величины контактно-усталостных повреждений рельсов на креплениях ЖБР-65Ш составили 0,97, на креплениях ЖБР-65ПШР – 1,03, на креплениях W-30 – 1,07[28].

Из рисунка 4.6 видно, что за период пропущенного тоннажа 200 млн т брутто меньшее количество повреждений было накоплено на рельсах, лежащих в пути с промежуточными рельсовыми скреплениями ЖБР-65Ш. Наибольшее количество повреждений накоплено на рельсах со скреплениями W-30. В целом результаты расчетов показывают, что начало контактно-усталостных повреждений рельсов начинается до уровня пропущенного тоннажа 100 млн т брутто.

На рисунке 4.7 приведены эпюры повреждений рельсов с различными промежуточными рельсовыми скреплениями на прямом участке пути при суммарном пропуске тоннажа 200 млн т брутто

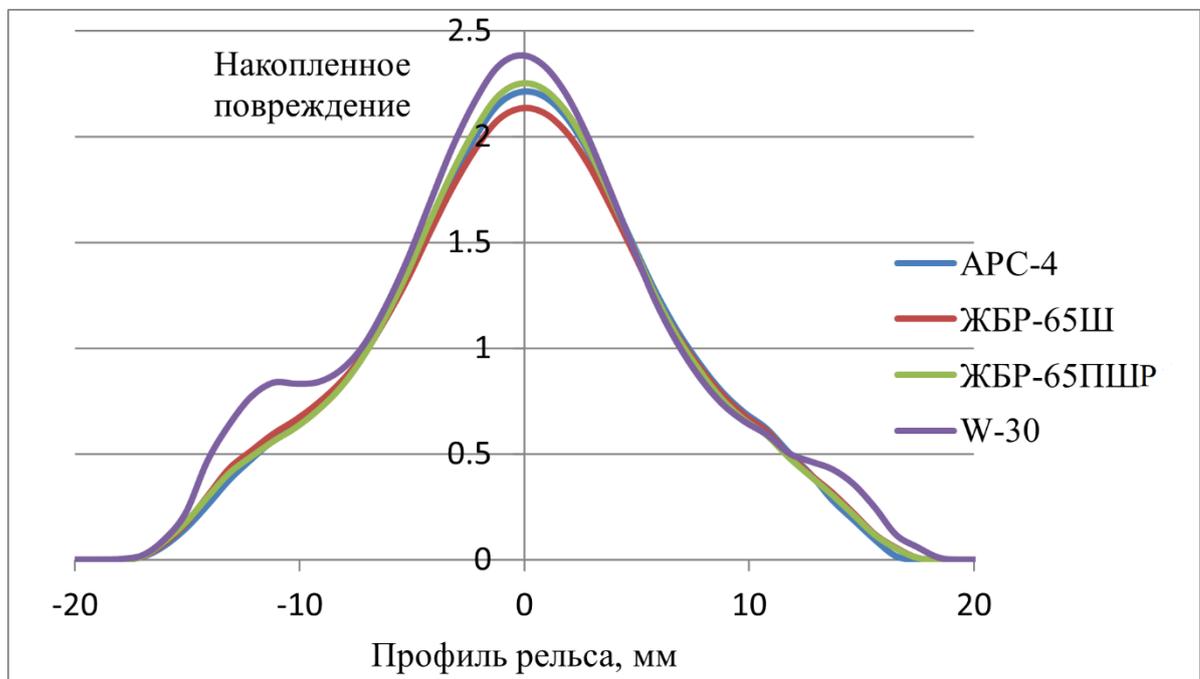


Рисунок 4.7 - Эпюры повреждений при пропущенном тоннаже 200 млн т брутто

Другой важной характеристикой контактно-усталостной повреждаемости рельсов является момент начала возникновения выкрашивания. На рисунке 4.8 представлен процесс накопления повреждений до первого разрушения рельсов (начала возникновения выкрашивания), лежащих в пути на прямом участке с различными новыми промежуточными рельсовыми скреплениями. Из рисунка видно, что первое повреждение наступает раньше для скреплений W-30, а позже – для скреплений ЖБР-65Ш.

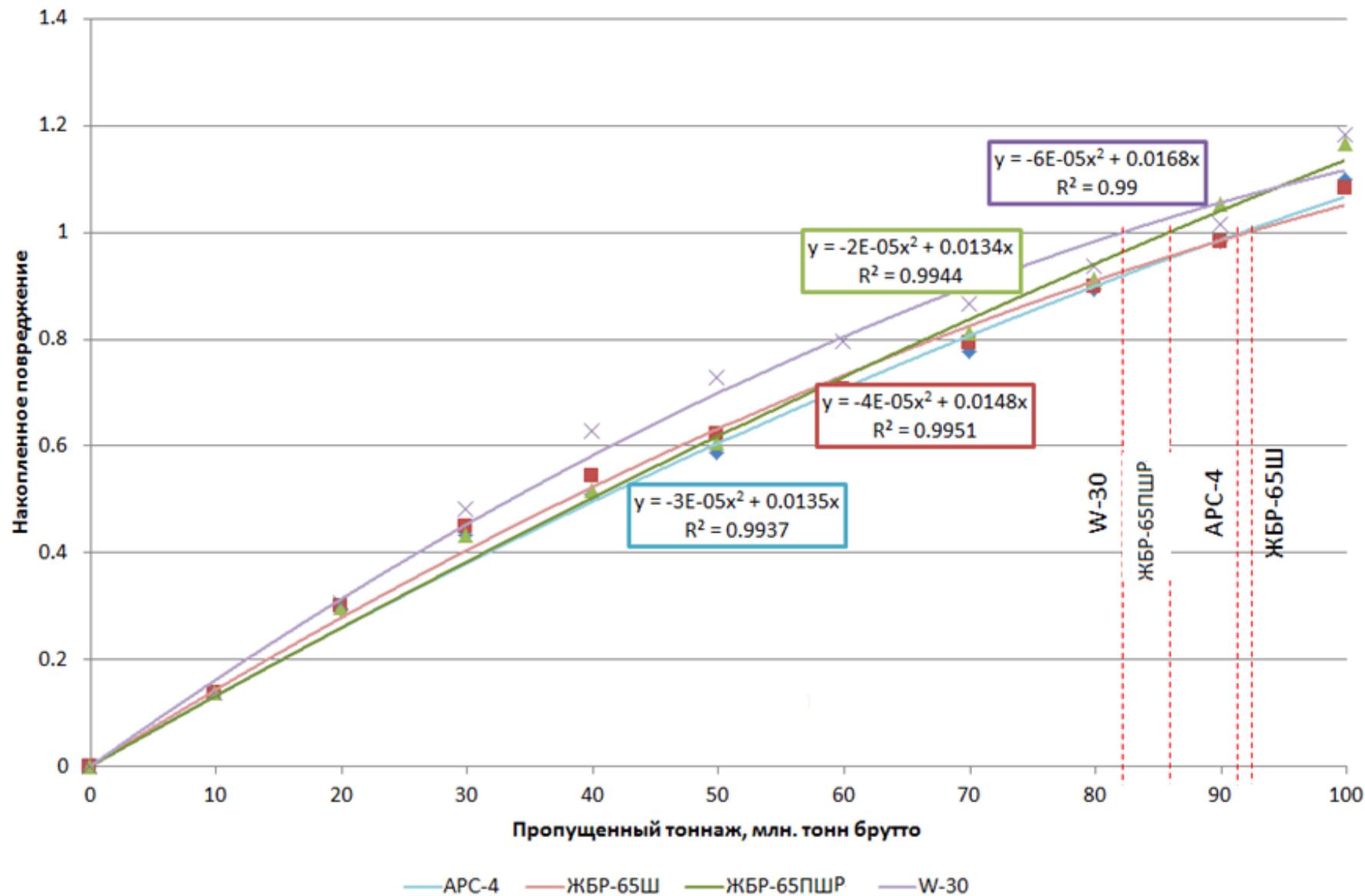


Рисунок 4.8 - Накопление повреждений до начала разрушения

На рисунке 4.9 приведены эпюры накопленных повреждений при пропуске тоннажа 100 млн т брутто, другими словами до начала разрушения рельсов. Из рисунка видно, что рельсы на креплениях APC-4 и ЖБР-65Ш на этом этапе эксплуатации накапливают меньше повреждений, чем рельсы с промежуточными креплениями ЖБР-65ПШР и W-30.

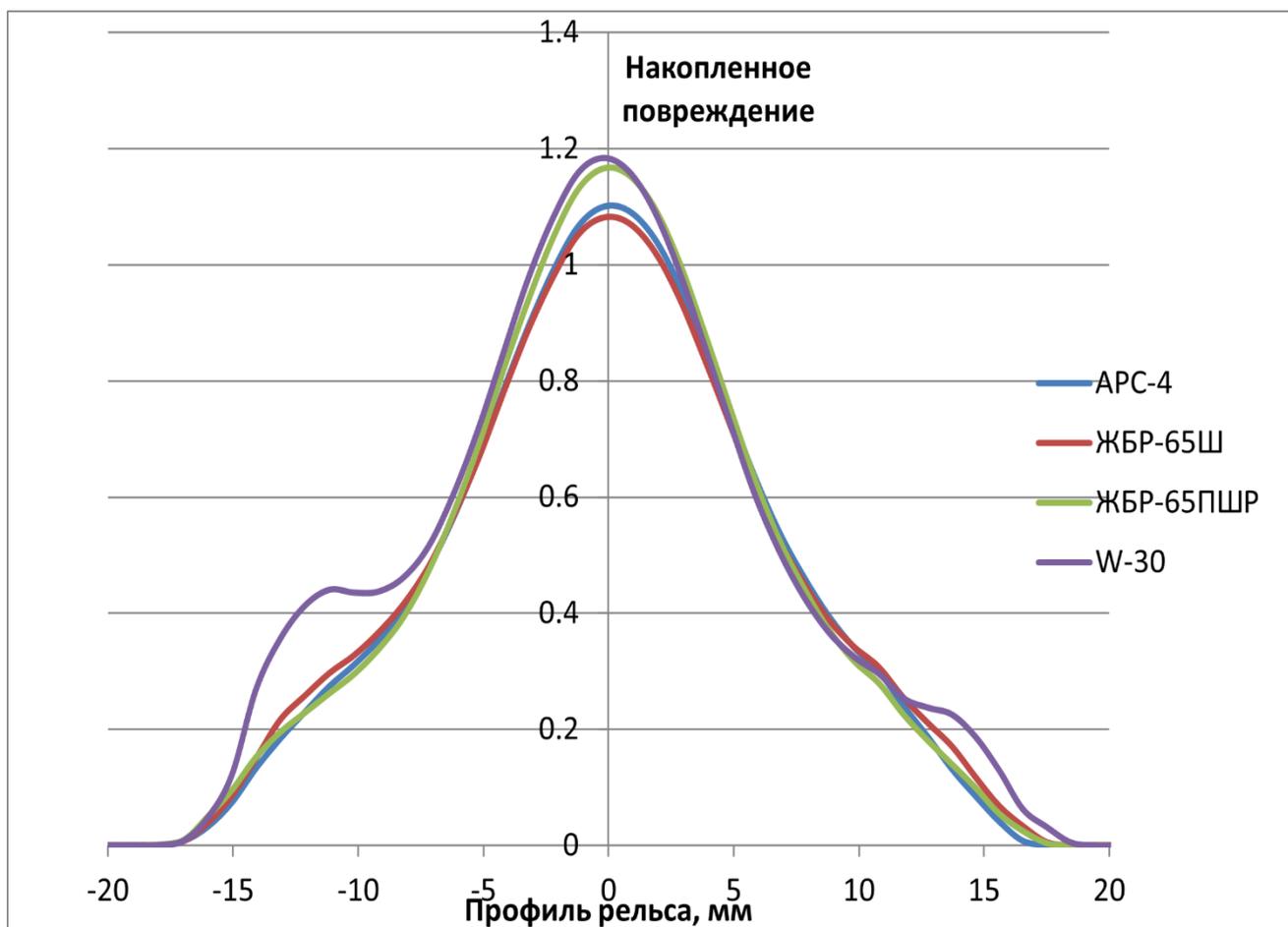


Рисунок 4.9 - Эпюры повреждений при пропущенном тоннаже 100 млн т брутто

На рисунке 4.10 приведены пространственные эпюры повреждений рельсов с различными промежуточными рельсовыми креплениями, лежащими на прямом участке пути при пропущенном тоннаже 100 млн т брутто.

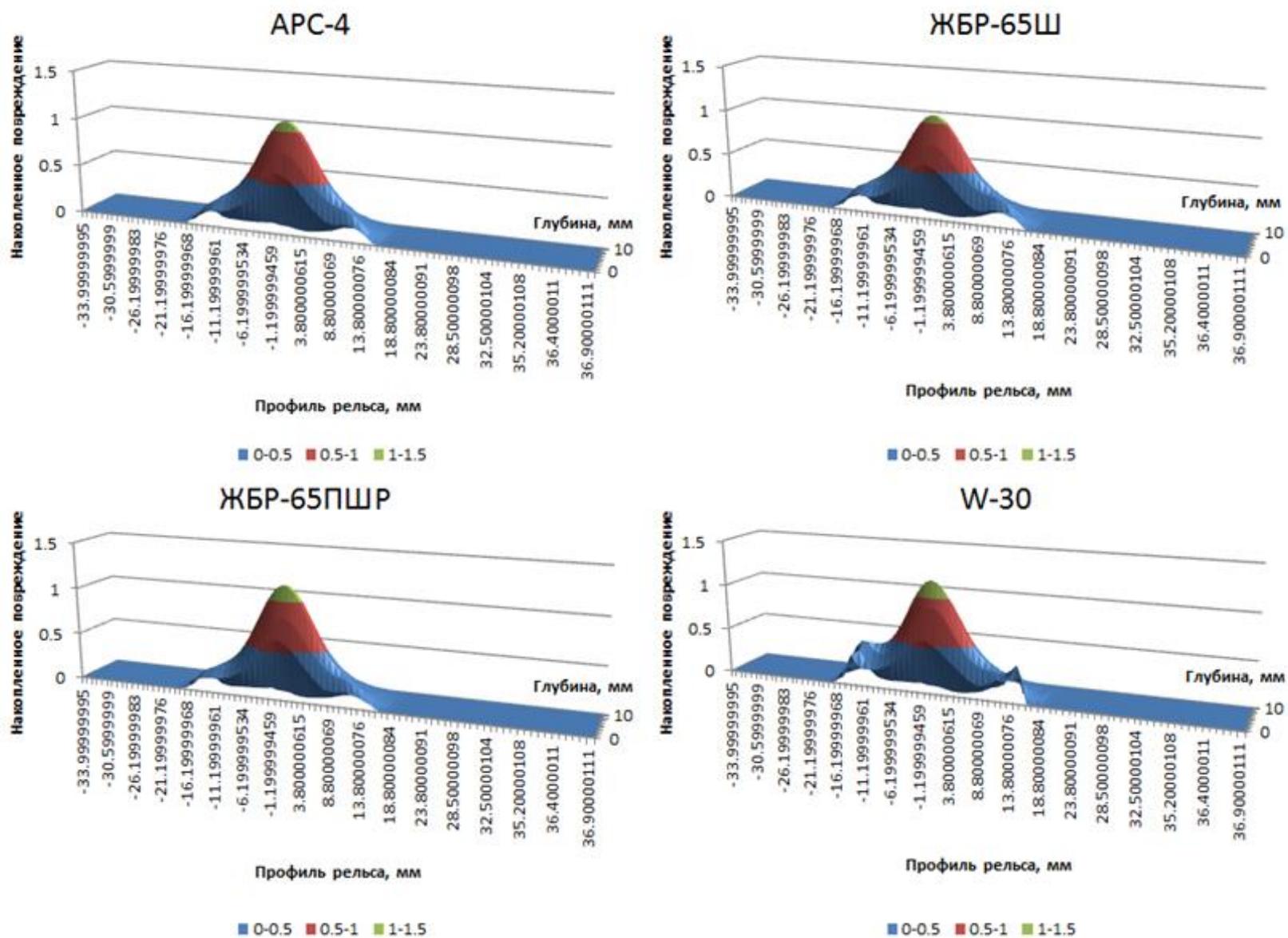


Рисунок 4.10 - Эпюры накопления повреждений при тоннаже 100 млн т брутто

Для того чтобы сравнить характер накопления повреждений для новых креплений и креплений, находящихся в эксплуатации после пропуска 100 млн т брутто, по данным расчетов были построены зависимости накопления повреждений от пропущенного тоннажа для обоих случаев. На рисунке 4.11 представлены эти зависимости для различных видов промежуточных рельсовых креплений.

Приведенные рисунки демонстрируют следующие особенности работы новых и лежащих в пути рельсовых креплений:

- Рельсы на новых креплениях АРС-4 на прямом участке пути медленнее накапливают повреждения, чем на креплениях АРС-4 после пропуска тоннажа 100 млн т брутто;

- Рельсы на новых креплениях ЖБР-65Ш и ЖБР-65ПШР на прямом участке пути, наоборот, быстрее накапливают повреждения, чем на креплениях того же типа, но после пропуска тоннажа 100 млн т брутто. Это может быть связано с повышением вертикальной жесткости этих креплений с пропуском тоннажа с 93 МН/м до 132 и 108 МН/м для креплений ЖБР-65Ш и ЖБР-65 ПШР соответственно;

Рельсы на креплениях W-30 на прямом участке пути изнашиваются практически одинаково, как в случае новых креплений, так и в случае креплений после пропуска тоннажа 100 млн т брутто.

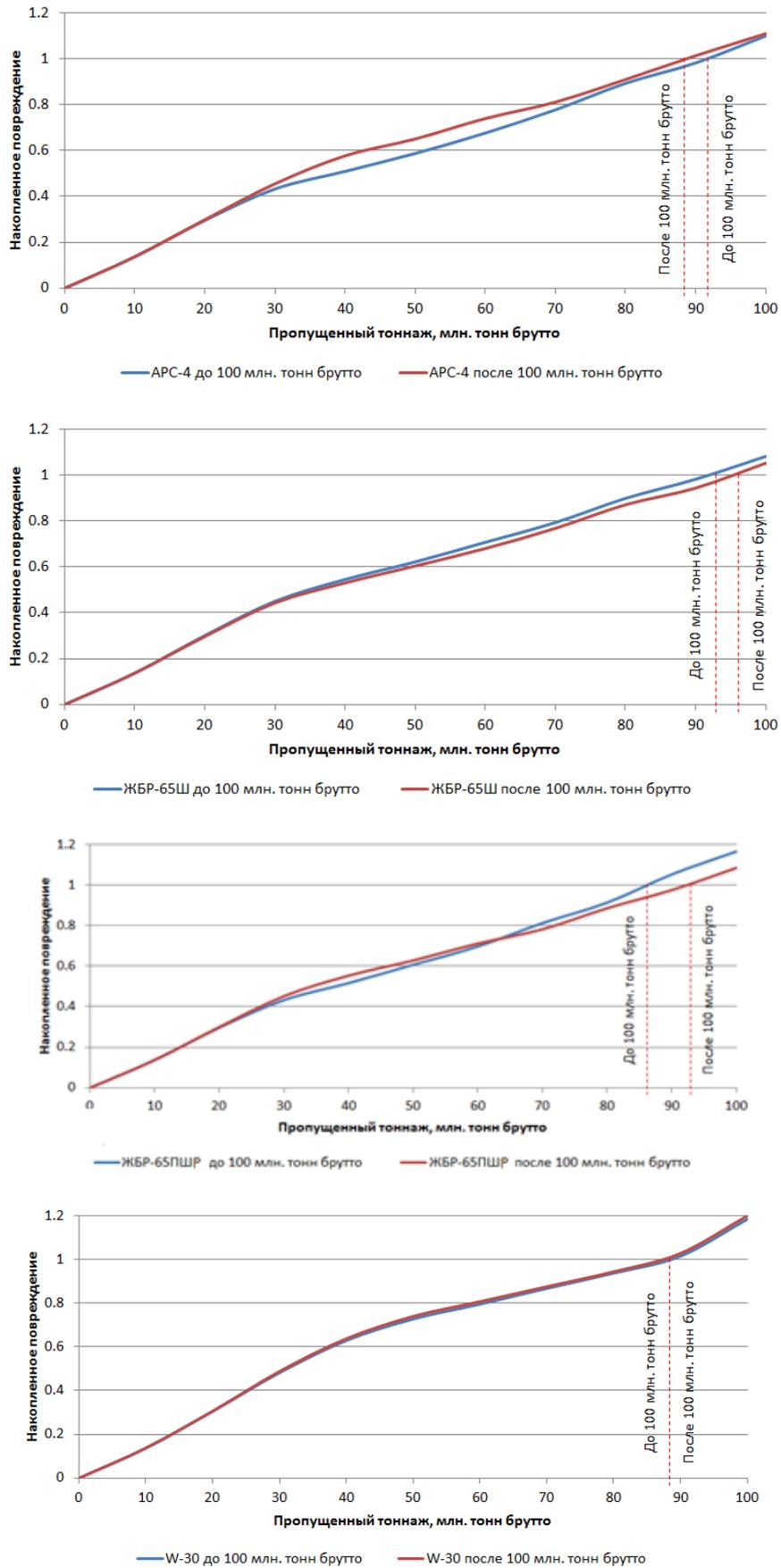


Рисунок 4.11 - Зависимость накопления повреждений от пропущенного тоннажа на прямом участке пути

Существующие исследования указывают на наличие связи между вертикальной жесткостью рельсовых скреплений и накоплением контактно-усталостных деформаций, «the influence of railpad stiffness on wheelset/track interaction and corrugation growth», «investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system» [22,23]. Проведенные расчеты также показали, что снижение вертикальной жесткости рельсовых скреплений позволяет несколько снизить количество накопленных повреждений при одинаковом пропущенном тоннаже.

Этот вывод имеет особенное значение в современных условиях повышения жесткости промежуточных рельсовых скреплений для увеличения их долговечности. Вероятно, при решении данного вопроса необходимо определить рациональные границы повышения вертикальной жесткости скреплений.

Однако, анализ результатов расчета показал также наличие влияния горизонтальной жесткости на интенсивность накопления контактно-усталостных повреждений. В связи с этим, предлагается оценить отношение вертикальной жесткости рельсовых скреплений к горизонтальной жесткости. Результаты такой оценки приведены на рисунке 4.12.

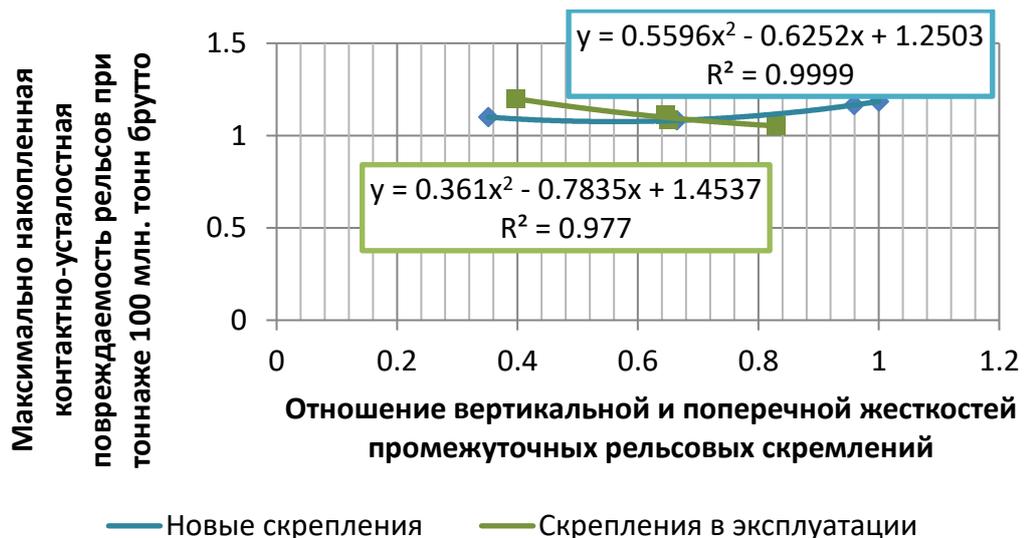


Рисунок 4.12 - Зависимость накопления контактно-усталостной повреждаемости рельсов от отношения вертикальной и поперечной жесткостей промежуточных рельсовых скреплений

Зависимости, представленные на рисунке 4.12, позволяют предположить, что наиболее рациональным отношением вертикальной и поперечной жесткостей промежуточных рельсовых скреплений является соотношение 0,65, при вертикальной жесткости, лежащей в диапазоне от 90 до 140 МН/м, и при поперечной жесткости – в диапазоне от 100 до 320 МН/м.

4.5 Результаты расчета накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах в кривой

В рамках выполнения диссертационной работы были также проведены расчеты накопления контактно-усталостных повреждений рельсов на участке пути, содержащем кривую, радиусом 650 м. Геометрия кривой обеспечивала движение грузового вагона с нагрузкой 23,5 тс и скоростью 60 км/час с непогашенным ускорением близким к 0 м/с^2 (возвышение наружного рельса в кривой составляло 70 мм).

Отдельно рассматривалось начало возникновения контактно-усталостных повреждений (выкрашивания) для рельсов, лежащих в кривой, на новых промежуточных рельсовых скреплениях и скреплениях, находящихся в эксплуатации.

Для рельсов на новых рельсовых скреплениях, уложенных в кривой 650 м, первые повреждения согласно результатам расчетов наступают уже при 30 млн т брутто (рисунок 4.13), причем на скреплениях ЖБР-65Ш позже, чем на других типах скреплений.

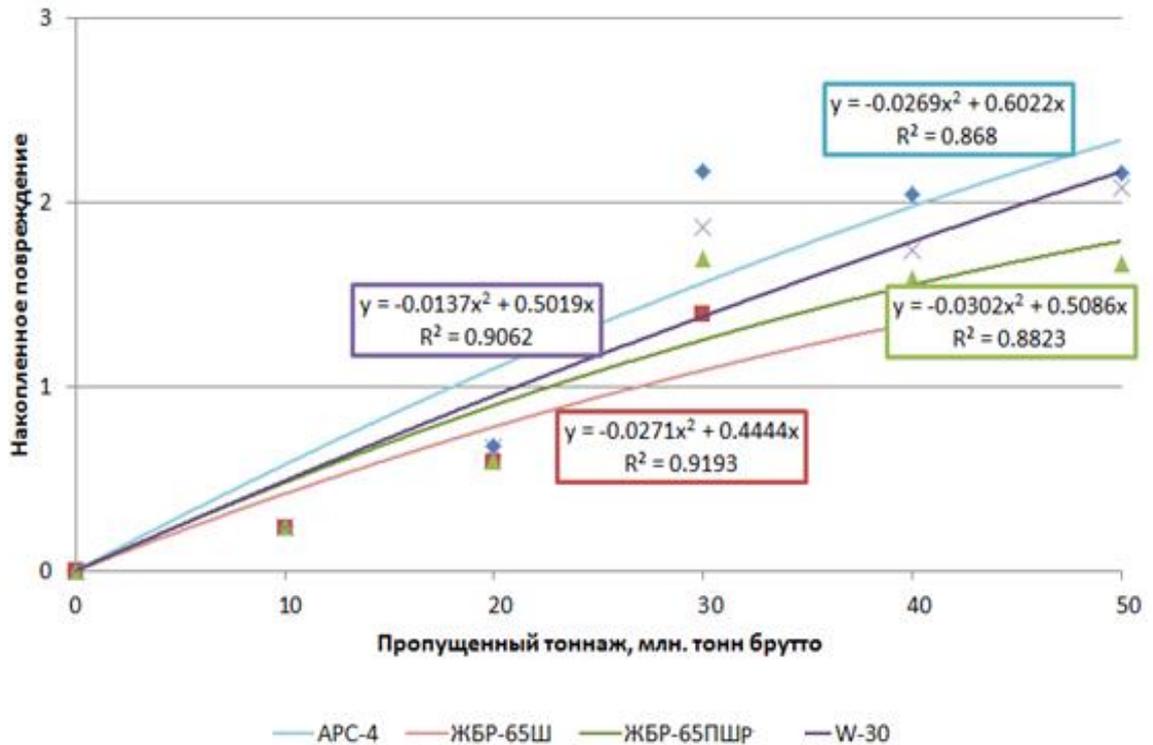


Рисунок 4.13 - Накопление повреждений рельсов в кривой 650 м

Наибольшее накопленное повреждение были зарегистрированы на рельсах, лежащих в кривой на креплениях APC-4. Причем при анализе результатов расчетов накопления контактно-усталостных повреждений рельсов в кривой 650 м на креплениях, находящихся в эксплуатации, значения накопленных повреждений для креплений APC-4 демонстрировали гораздо более интенсивный рост, чем для других креплений (рисунки 4.14 и 4.15). Такой результат может свидетельствовать о наличии рисков роста контактно-усталостных повреждений в рельсах, лежащих в кривых 650 м и менее, на грузовых линиях, на креплениях APC-4 после пропуска тоннажа 100 млн т брутто.

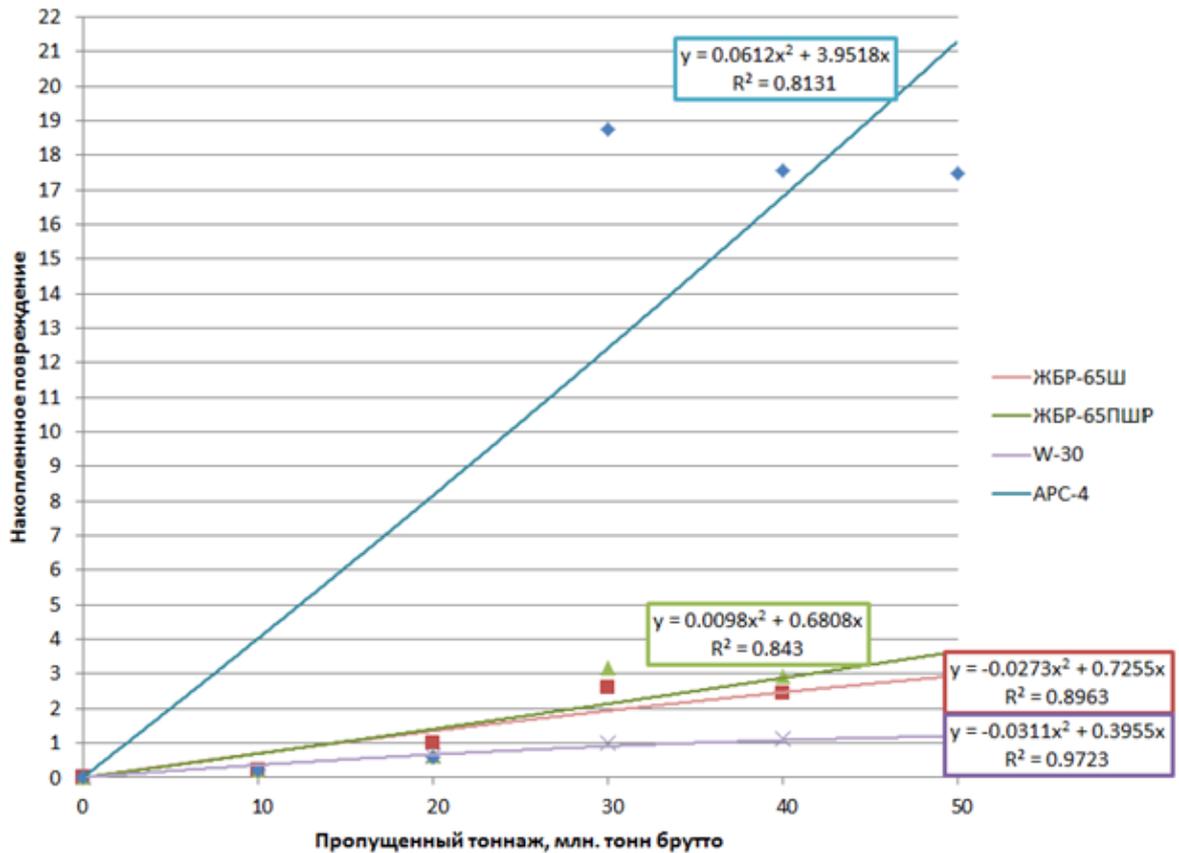


Рисунок 4.14 - Накопление повреждения рельсов в кривой 650 м на креплениях, находящихся в эксплуатации

При этом из рисунка 4.14 видно, что накопление повреждений рельсов в кривых 650 м после пропуска 100 млн т брутто начинается позже всего на креплениях W-30.

Таким образом, результаты расчетов подтверждают целесообразность существующей сферы применения креплений APC-4 и позволяют предположить возможность расширения сферы рационального применения креплений W-30.

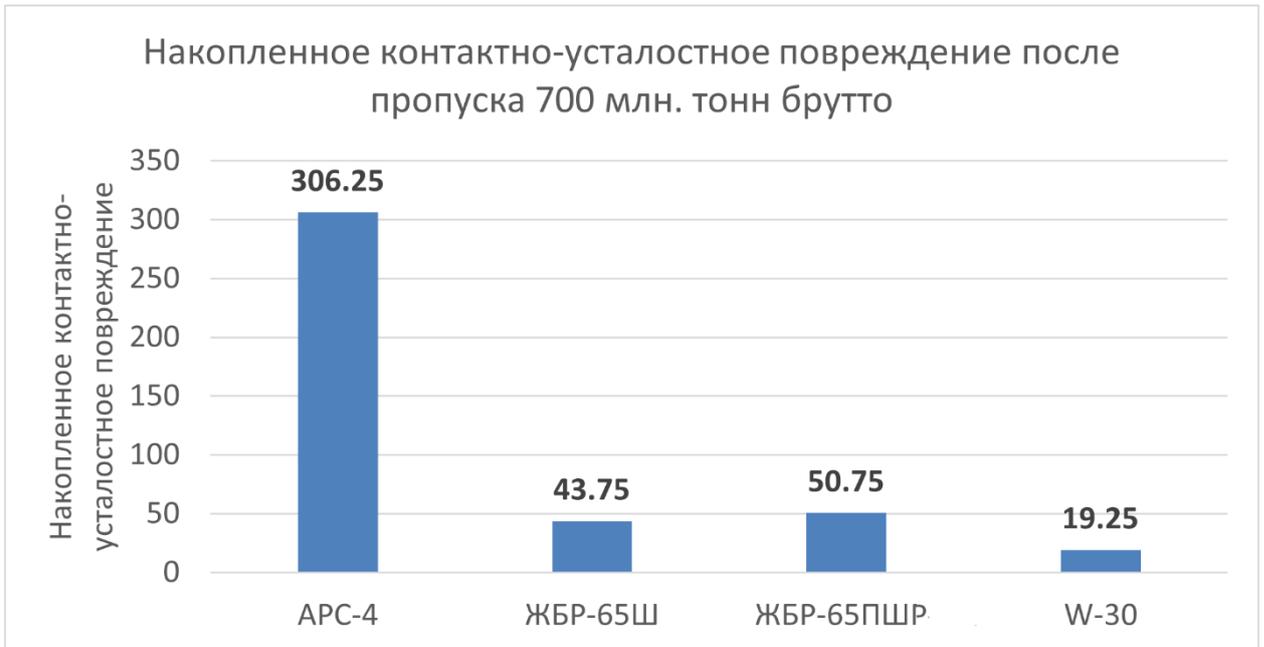


Рисунок 4.15 - Накопленное повреждение рельсов в кривой радиусом 650 м после пропуска 700 млн т брутто

Исходя из полученных функциональных зависимостей накопления контактно-усталостных повреждений рельсов от пропущенного тоннажа могут быть экстраполированы значения повреждений для пропущенного тоннажа 700 млн т брутто. Эти значения представлены на диаграмме на рисунке 4.15.

Аналогично рассмотренному случаю для прямого участка пути, контактно-усталостные повреждения рельсов в кривой радиусом 650 м на креплениях APC-4 при пропущенном тоннаже 700 млн т брутто приняты условно за 1, расчетные коэффициенты контактно-усталостных повреждений рельсов на креплениях ЖБР-65Ш составили 0,14, на креплениях ЖБР-65ПШР – 0,17, на креплениях W-30 – 0,06.

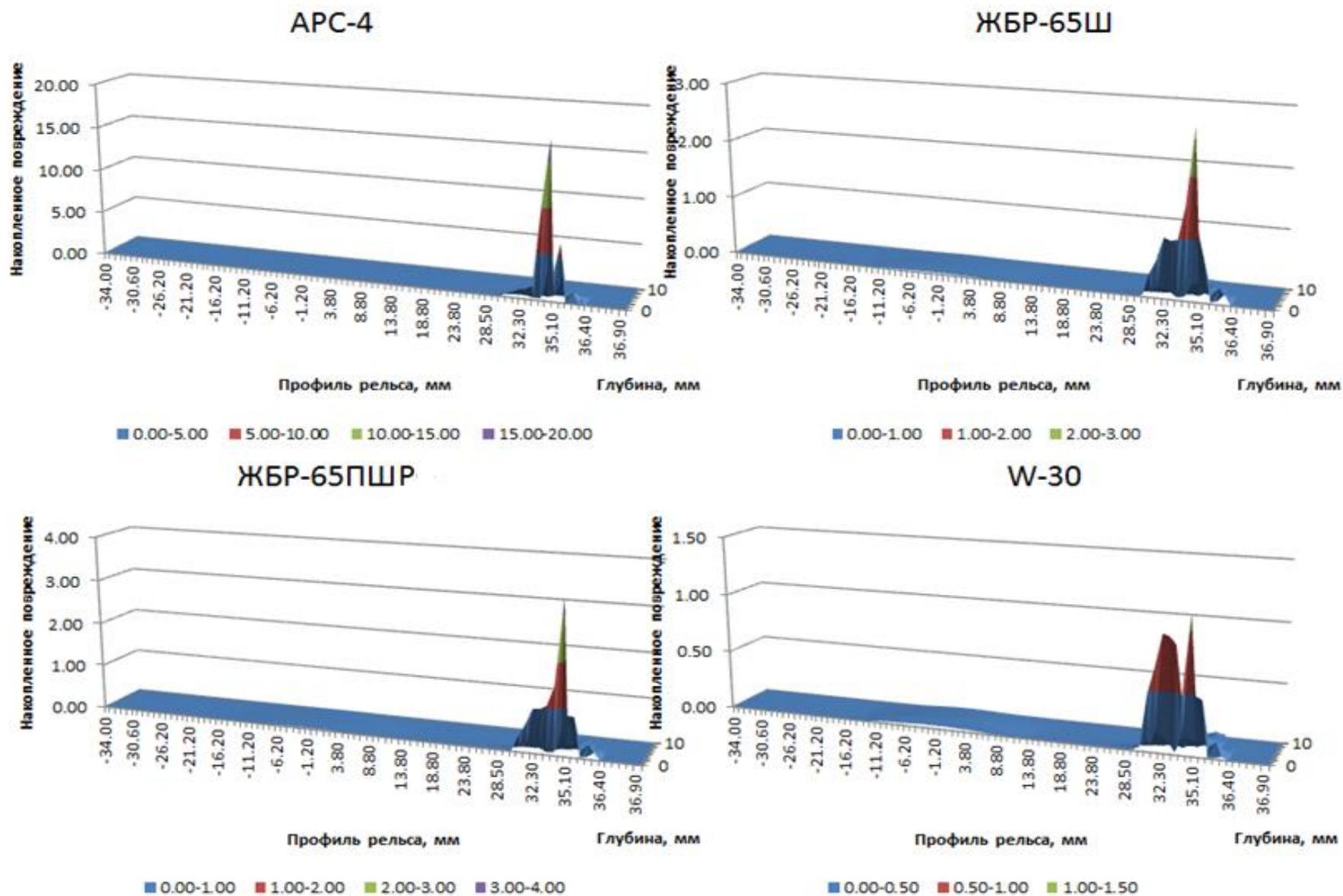


Рисунок 4.16 - Эпюры накопления повреждений при тоннаже свыше 100 млн т брутто в кривой 650 м

4.6 Влияние крутильной жесткости узла крепления на контактно-усталостные повреждения рельсов

В предыдущих расчетах не рассматривалось влияние на контактно-усталостные повреждения рельсов жесткости промежуточных рельсовых креплений на кручение вокруг продольной оси.

Современные отечественные нормативные документы не нормируют крутильную жесткость креплений, хотя в зарубежной практике этот параметр имеет свои нормативные значения.

В рамках диссертационной работы были проведены расчеты по установлению влияния на контактно-усталостные повреждения рельсов изменения крутильной жесткости креплений.

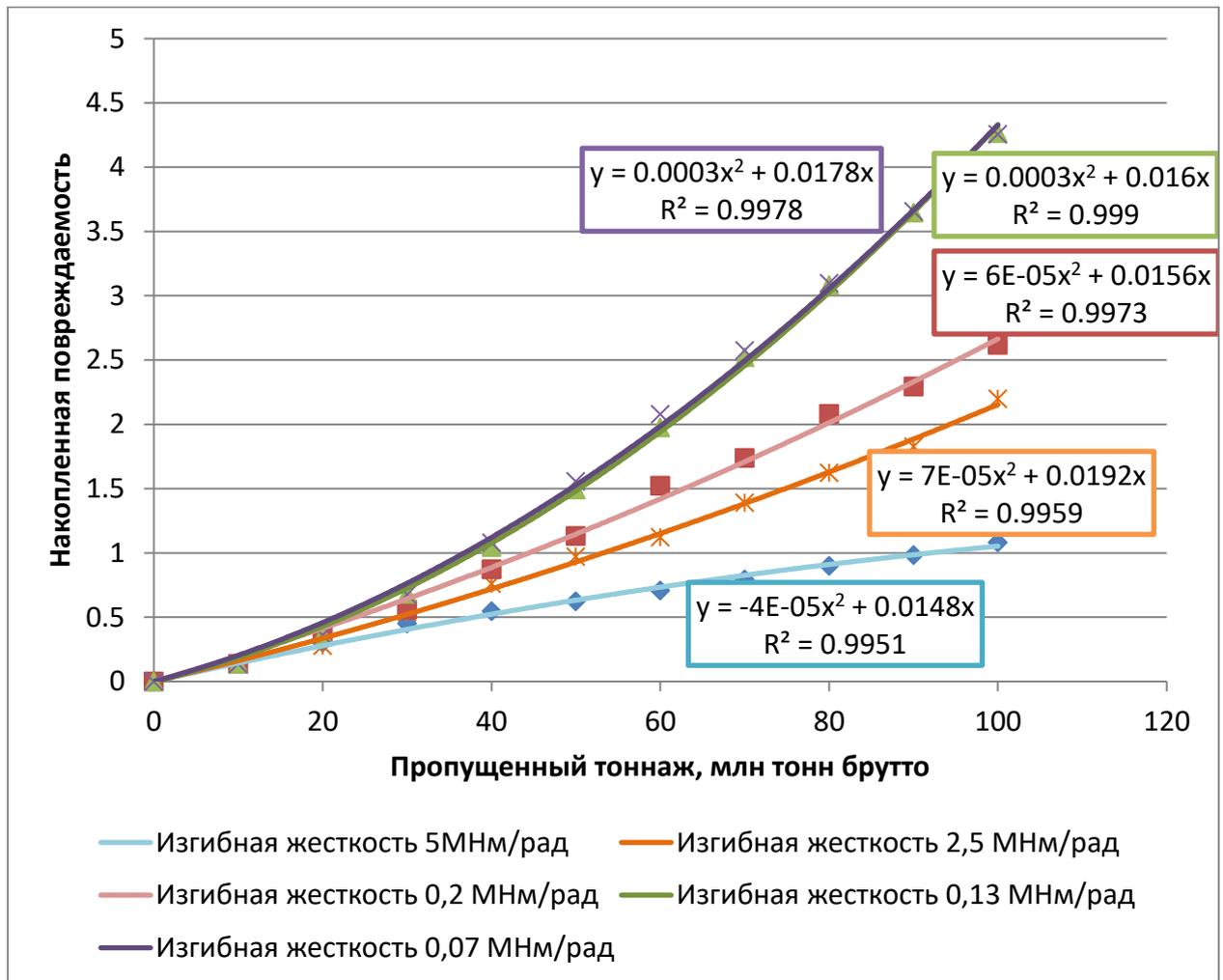


Рисунок 4.17 - Влияние крутильной жесткости креплений на накопление контактно-усталостных повреждений

На рисунке 4.17 представлены зависимости накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах от пропущенного тоннажа при различной крутильной жесткости креплений ЖБР-65Ш. Расчеты показывают, что снижение крутильной жесткости ведет к заметному росту контактно-усталостных повреждений в рельсах.

Наибольший рост контактно-усталостных повреждений был зарегистрирован при крутильной жесткости равной 0,13 и 0,07 МНм/рад. В «зависимость устойчивости бесстыкового пути от типов промежуточных рельсовых креплений и условий их эксплуатации» [24] указано, что такая крутильная жесткость соответствует затяжке клеммных болтов крепления ЖБР-65Ш до 50-100 Нм.

Зависимость максимальной накопленной контактно-усталостной повреждаемости рельсов от крутильной жесткости рельсовых креплений ЖБР-65Ш при пропущенном тоннаже 100 млн т брутто представлена на рисунке 4.18.

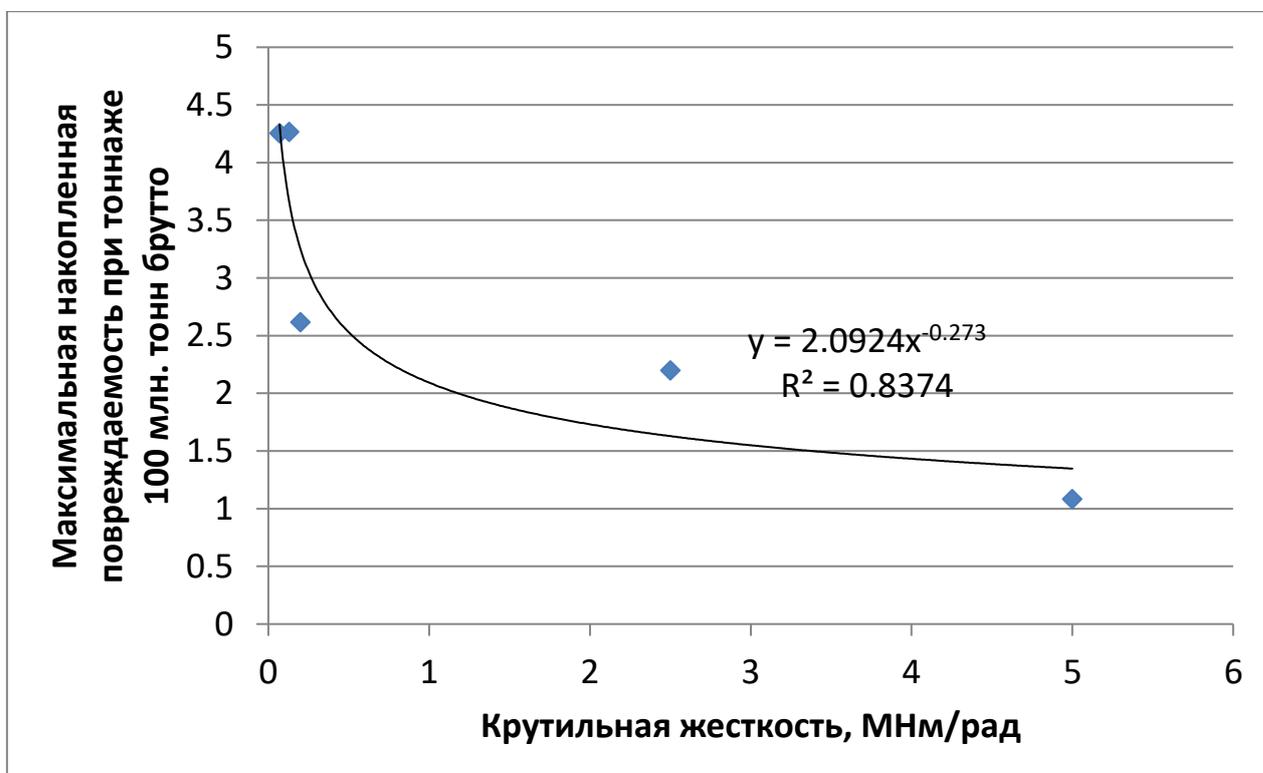


Рисунок 4.18 - Зависимость максимальной накопленной контактно-усталостной повреждаемости рельсов от крутильной жесткости рельсовых креплений при пропущенном тоннаже 100 млн т брутто

Из рисунка видно, что величина крутильной жесткости промежуточных рельсовых скреплений существенно влияет на интенсивность накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах. Согласно расчетам, при уменьшении крутильной жесткости скреплений, контактно-усталостные повреждения в рельсах увеличиваются, причем интенсивность их роста становится больше после повышения крутильной жесткости более 1 МНм/рад.

4.7 Выводы по главе 4

В результате расчетов влияния жесткости промежуточных рельсовых скреплений на накопление контактно-усталостных повреждений в рельсах можно сделать следующие выводы:

- Результаты расчетов в целом хорошо согласуются с результатами ранее проведенных исследований.

- Повышение вертикальной жесткости рельсовых скреплений может приводить к росту контактно-усталостных повреждений в рельсах. Это обуславливает необходимость определения рациональных границ повышения вертикальной жесткости скреплений поскольку необходим поиск оптимального сочетания срока службы рельсов и долговечности рельсовых скреплений (равноресурсность конструкции верхнего строения пути) .

- На накопление контактно-усталостных повреждений в рельсах влияет соотношение вертикальной и поперечной жесткостей рельсового скрепления.

- Наименьшие значения накопления контактно-усталостных повреждений рельсов на прямом участке пути были получены при скреплениях ЖБР-65Ш и АРС-4.

- Влияние на эксплуатационные причины возникновения и развития дефектов в рельсах и снижение количества ДР и ОДР возможно за счет рационального использования промежуточных рельсовых скреплений и оптимизации значений их основных характеристик.

– В результате моделирования было установлено, что наименьшие значения накопления контактно-усталостных повреждений рельсов в кривой 650 м были получены при скреплениях ЖБР-65Ш и W-30.

– Результатами расчетов подтверждена существующая сфера применения скреплений АРС-4 и отмечена возможность расширения сферы рационального применения скреплений W-30 за счет применения в кривых радиусом от 350 до 650 м.

– Влияние на накопление контактно-усталостных повреждений в рельсах крутильной жесткости рельсовых скреплений является значительным, по этой причине целесообразно дополнить нормативную базу рельсовых скреплений параметром их крутильной жесткости. В целом, развитие стандартов в области промежуточных рельсовых скреплений должно учитывать жесткость скреплений на кручение и динамическую жесткость, как это реализовано в Европейских стандартах и было установлено техническими требованиями к промежуточным рельсовым скреплениям ЦП 1-86 [17].

– Необходима актуализация действующих «Сфер рационального применения промежуточных рельсовых скреплений на сети дорог ОАО «РЖД», установленных распоряжением ОАО «РЖД» 28.06.2018 г №1362/р на основании результатов расчетов, а также стендовых и эксплуатационных испытаний скреплений различных конструкций, проведенных в последние пять лет.

5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ

5.1 Общие положения

В ОАО «РЖД» при подготовке к закупке новой, в том числе инновационной, высокотехнологичной продукции используется Методология проведения оценки стоимости жизненного цикла, которая разработана и приведена в Методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта [53] и Стандарте ОАО «РЖД» Управление ресурсами, рискам и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН) [14, 17,9].

Затраты жизненного цикла технического средства включают все затраты потребителя, связанные с его приобретением и владением им, то есть цену приобретения, сопутствующие единовременные расходы, а также эксплуатационные издержки за весь срок службы и расходы на утилизацию [26].

Методологию оценки стоимости жизненного цикла можно использовать не только для подготовки и обоснованию закупки новой высокотехнологичной продукции, но и для оценки эффективности функционирования уже используемых и существующих технических систем. Так, в путевом хозяйстве была предпринята попытка провести сравнительную эффективность функционирования различных конструкций рельсовых скреплений, применяемых на сети железных дорог [55,56]. При этом представленная Методика [55] расчета стоимости жизненного цикла основана на использовании калькуляции фактических произведенных затрат. Методика [55] не позволяет оценить и смоделировать изменения затрат на текущее содержание пути в зависимости от пропущенного тоннажа, скорости движения грузовых поездов, типа используемых рельсов и особенностей климатических условий функционирования железнодорожного пути.

Методика [55] не учитывает затраты на налоговые и страховые платежи, кроме того, не учитывается фактор времени, то есть стоимостные показатели не приводятся к ценности начального периода жизненного цикла.

В рамках диссертационной работы разработана Методика оценки эффективности функционирования альтернативных конструкций верхнего строения железнодорожного пути (далее – Методика), которая содержит математическую модель расчета стоимости жизненного цикла, позволяющую учесть все затраты, связанные с приобретением, владением и утилизацией участка железнодорожного пути. При расчете стоимости жизненного цикла учитываются и изменения затрат на текущее содержание в пути в зависимости от условий функционирования пути, учтены налоговые и страховые платежи, а стоимостные показатели этапов жизненного цикла приведены к ценности начального периода с использованием соответствующих коэффициентов дисконтирования.

Для оценки эффективности инновационных мероприятий (проектов), в том числе на железнодорожном транспорте, используется показатель - затраты жизненного цикла (Life Cycle Cost – LCC Методология). LCC Методология проведения оценки стоимости жизненного цикла разработана и приведена в Методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта [53] и Стандарте ОАО «РЖД» Управление ресурсами, рискам и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН) [54, 110]. Указанные документы устанавливают основные принципы определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта при оценке эффективности инновационных мероприятий [117, 121].

В Методике автором адаптирована LCC Методология применительно к оценке эффективности функционирования различных конструкций верхнего строения пути, работающих в задаваемых и существующих условиях эксплуатации.

Разработанная Методика может быть использована для сравнения альтернативных вариантов конструкций верхнего строения пути, в которых реализованы одинаковые требования по обеспечению функционирования объекта в задаваемых условиях, но проекты отличаются конструктивно и соотношением начальных и эксплуатационных затрат. Наиболее эффективный вариант реализации может быть определен по результатам расчета и анализа стоимости жизненного цикла рассматриваемых конструкций верхнего строения пути.

5.2 Методика оценки эффективности функционирования альтернативных конструкций верхнего строения железнодорожного пути

5.2.1 Алгоритм расчета стоимости жизненного цикла участка железнодорожного пути

Под стоимостью жизненного цикла понимается процесс экономического анализа оценки затрат на проектирование, строительство, эксплуатацию, в том числе техническое обслуживание и ремонт и утилизацию объектов путевого хозяйства с целью оптимизации эксплуатационных затрат на обеспечение грузовых перевозок железнодорожным транспортом при условии соблюдения установленных норм безопасности и надежности процесса [53].

Применительно к оценке стоимости жизненного цикла участка железнодорожного пути модель стоимости жизненного цикла может быть представлена выражением:

$$СЖЦ = С_{рек.} + З_{рем.} + З_{тек.сод.} + З_{доп.} + З_{ут.}, \quad (5.1)$$

где СЖЦ – стоимость жизненного цикла участка железнодорожного пути за весь срок службы;

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

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

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

$Z_{\text{доп.}}$ - 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;

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

В качестве продолжительности жизненного цикла (расчетный период) целесообразно принять период времени между капитальными ремонтами или реконструкциями верхнего строения участка пути.

5.2.2 Определение затрат, связанных с реконструкцией (капитальным ремонтом) участка железнодорожного пути

При выполнении анализа и расчета стоимости жизненного цикла действующих участков железнодорожного пути стоимость реконструкции (капитального ремонта) $C_{\text{рек}}$ рассматриваемых участков определяется как сумма фактических стоимостей реконструкций (капитального ремонта) каждого километра пути, входящего в участок.

В случае расчета и проведения анализа стоимости жизненного цикла альтернативных участков железнодорожного пути, которые только планируется к проведению реконструкции (капитальному ремонту), используются данные калькуляций стоимости работ, которые должны быть разработаны специализированными проектными организациями.

5.2.3 Определение стоимости промежуточных ремонтов участка железнодорожного пути

Стоимость промежуточных ремонтов для рассматриваемого участка железнодорожного пути определяется как сумма стоимости всех видов

промежуточных ремонтов за ремонтный цикл и может быть рассчитана по формуле:

$$Z_{\text{рем.}} = \sum_{i=1}^T Z_{\text{рем.}j} * n_j, \quad (5.2)$$

где $Z_{\text{рем.}j}$ - стоимость j -го вида ремонта, рублей;

n_j - количество j - тых видов ремонтов за межремонтный цикл;

T – расчетный период времени, длительность жизненного цикла, лет.

Количество и виды промежуточных ремонтов определяются для рассматриваемых участков индивидуально, исходя из классификации участка пути и предложенной конструкции верхнего строения пути в соответствии с приказом Минтранса России от 9 февраля 2018 г. № 54 [57].

5.2.4 Определение стоимости текущего содержания участка железнодорожного пути

Стоимость затрат на текущее содержание рассматриваемого участка железнодорожного пути складывается из затрат на оплату труда монтеров пути с учетом всех отчислений, стоимости материалов верхнего строения пути, использованных при выполнении работ текущего содержания пути, и накладных расходов[118].

Стоимость затрат на текущее содержание пути может быть рассчитана по формуле:

$$Z_{\text{тек.сод.}} = Z_{\text{опл.тр.}} + Z_{\text{матер.}} + Z_{\text{накл.расх.}}, \quad (5.3)$$

где $Z_{\text{тек.сод.}}$ – затраты на текущее содержание участка железнодорожного пути, рублей;

$Z_{\text{опл.тр.}}$ – затраты на оплату труда монтеров пути, выполняющих работы по текущему содержанию пути, рублей;

$Z_{\text{матер.}}$ – стоимость материалов, использованных при выполнении работ по текущему содержанию пути, рублей;

$Z_{\text{накл.расх.}}$ - величина накладных расходов, рублей.

Расходы на оплату труда монтеров пути.

Расходы на оплату труда монтеров пути, выполняющих работы по текущему содержанию участка пути, могут быть рассчитаны по формуле [58]:

$$Z_{\text{опл.тр.}} = 12 * C * K_{\text{н}} * K_{\text{р}} * Ч_{\text{тс}} , \quad (5.4)$$

где 12 – число месяцев в году;

C – среднемесячная тарифная ставка монтера пути, рублей;

$K_{\text{н}}$ - коэффициент, учитывающий начисления к фонду заработной платы;

$K_{\text{р}}$ - поясной коэффициент к заработной плате;

$Ч_{\text{тс}}$ - табличное (нормативное) значение затрат труда на текущее содержание пути.

Для определения нормативной численности работников, которые могут быть привлечены к выполнению работ по текущему содержанию железнодорожного пути, разработаны Нормативы численности работников, занятых на текущем содержании железнодорожного пути [58].

Расходы на материалы, использованные при выполнении работ по текущему содержанию пути.

В расходы по одиночной смене материалов верхнего строения пути входят затраты на новые материалы и отремонтированные элементы верхнего строения пути, используемые при одиночной смене, а также затраты на пополнение и замену балласта[150]. Расходы по одиночной смене материалов верхнего строения пути исчисляются по нормам, установленным на 1 км развернутой длины главного и станционного путей, и действующим ценам. При определении потребности в материалах из развернутой длины пути исключают те участки, на которых в планируемом году предусматриваются работы по капитальному, среднему или подъемочному ремонту, а также сплошная замена рельсов новыми и старогодными.

Затраты на материалы при одиночной смене материалов верхнего строения рассматриваемого участка пути могут быть рассчитаны по формуле:

$$Z_{\text{матер}} = L * \sum_{i=1}^N m_t * E_t , \quad (5.5)$$

где L - развернутая длина участка пути, для которого производится расчет, км;

m_t – норма расхода на текущее содержание на 1 км пути, соответственно рельсов, креплений, шпал, балласта;

E_t - стоимость единицы материала верхнего строения пути.

Затраты на материалы по одиночной смене материалов верхнего строения рассматриваемого участка пути рассчитываются на протяжении всего жизненного цикла с шагом 1 год.

Накладные расходы

Накладные расходы определяются процентным соотношением к фонду оплаты труда и устанавливаются директивно для эксплуатационных (линейных) участков дистанций пути.

5.2.5 Определение стоимости дополнительных затрат за жизненный цикл участка железнодорожного пути

5.2.5.1 Затраты на преодоление сопротивления движения поездов в части, зависящей от конструкции пути

Расходы, обусловленные влиянием конструкции пути на сопротивление движению поезда, определяются по формуле [59]:

$$Z_{\text{сопр.}} = P_{\text{усл.}} (W_y + W_c) C_T T_0 (1 + \alpha) \quad (5.6)$$

где $Z_{\text{сопр.}}$ – расходы, связанные с необходимостью преодоления сопротивления движению поезда, обусловленные особенностями конструкции пути, руб./ км в год;

$P_{\text{усл.}}$ – расход условного топлива или электроэнергии на 1 ткм механической работы;

W_y - удельное сопротивление движению поезда в зависимости от упругости пути, кг/т;

W_c - удельное сопротивление движению поезда в зависимости от наличия стыков в пути, кг/т, значения указанных величин W_y , W_c приведены в таблице 5.1 (для бесстыкового пути W_c не учитывается);

C_T – стоимость топлива или электроэнергии, руб/т, руб/кВт.ч;

T_0 - грузонапряженность, млн.ткм брутто на 1 км в год;

α – отношение расходов на топливо или электроэнергию к расходам на ремонт подвижного состава ($\alpha=2-3$ – для тепловозной тяги и $\alpha =1,5-2,0$ – для электрической).

Затраты на преодоление сопротивления движения поездов в части, зависящей от конструкции пути рассматриваемого участка пути, рассчитываются на протяжении всего жизненного цикла с шагом 1 год.

Таблица 5.1 - Удельное сопротивление движению поезда, в части, зависящей от конструкции пути

Конструкция пути	Рельсы	Среднее сопротивление, кг/т	
		от упругости пути, W_y	от стыков в рельсах, W_c
Щебень, железобетонные шпалы	Р65	0,16	0,09

Затраты из-за задержек поездов в связи с предоставлением «окон» для выполнения неотложных путевых работ

Затраты, связанные с предоставлением технологических «окон» для выполнения неотложных работ на рассматриваемом участке, могут быть рассчитаны по формуле:

$$Z_{\text{предост.окон}} = \sum N t_i n_{\text{окі}} \cdot e_{\text{пч}} + \sum M t_i \cdot n_{\text{окі}} \cdot e_{\text{лчоб}}, \quad (5.7)$$

где i – вид ремонта;

N_{ti} - поездо-часы простоя в связи с предоставлением «окна» при i -ом виде ремонта, поездо-часы;

M_{ti} - локомотиво-часы простоя в оборотном депо в связи с предоставлением «окна», локомотиво-часы;

$n_{оки}$ - число «окон» при i -ом виде ремонта за жизненный цикл;

$e_{пч}$ - укрупненная расходная ставка на 1 поездо-час простоя поезда, руб.;

$e_{лчоб}$ - укрупненная расходная ставка на 1 локомотиво-час простоя локомотива в оборотном депо, руб.

Затраты по налогу на имущество

Расчет затрат по налогу на имущество производится на основании распоряжения ОАО «РЖД» от 13 марта 2017 г. № 395 «Об утверждении Указателя инвентарных объектов основных средств ОАО «РЖД» (В редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 30.11.2017 г. №2468р) для VIII группы со сроком полезного использования 300 месяц.

Ставка налога на имущество ОАО «РЖД» определяется законами Российской Федерации.

Согласно статье 385.3 НК РФ в отношении железнодорожных путей общего пользования и сооружений, являющихся их неотъемлемой технологической частью, соответствующих требованиям, установленным Правительством Российской Федерации, впервые принятых на учет в качестве объектов основных средств начиная с 1 января 2017 года, сумма налога исчисляется с применением коэффициента $K_{жд}$, значение которого определяется в соответствии с пунктом 2 статьи 385.3 НК РФ.

Ежегодный налог на имущество определяется умножением ставки налога на среднегодовую стоимость имущества:

$$Z_{\text{налог им.}} = C_{\text{ср.}} * \alpha, \quad (5.8)$$

где $Z_{\text{им}}$ - затраты на уплату налога на имущество, рублей;

$C_{\text{ср.}}$ - среднегодовая стоимость имущества рублей;

α - ставка налога на имущество ОАО «РЖД».

Затраты на страхование

Размер страховых платежей определяется умножением остаточной стоимости имущества на величину установленного страхового тарифа.

Размер страховых платежей рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{стр. пл.}} = C_{\text{ост. ст.}} * \beta, \quad (5.9)$$

где $Z_{\text{стр.пл.}}$ - затраты на уплату страховых взносов, рублей;

$C_{\text{ост.ст.}}$ - среднегодовая стоимость имущества, рублей;

β - страховой тариф.

Размер страховых платежей, рассчитываются на протяжении всего жизненного цикла с шагом 1 год.

Расходы на оплату налога на прибыль

Расчет налога производится равномерно в течение всего срока эксплуатации пути.

Расчёт затрат по налогу на прибыль производится по формуле:

$$Z_{\text{налог на приб.}} = C_{\text{кап.}} * \alpha, \quad (5.10)$$

где $C_{\text{кап.}}$ - стоимость капитальных вложений, учитываемых при определении налогооблагаемой базы в текущем году, тыс. рублей;

α - ставка налога на прибыль.

Затраты на по уплате налога на прибыль вводятся в формулу для расчета со знаком минус, так проведение ремонтов КРН и РС относится к капитальным вложениям и приводит к уменьшению налогооблагаемой базы, что в свою очередь приводит к уменьшению суммы уплаченного налога на прибыль в бюджет, а при расчете стоимости жизненного цикла затраты учитываются со знаком плюс.

5.2.6 Затраты на утилизацию рельсошпальной решетки, снимаемой при реконструкции (капитальном ремонте) участка железнодорожного пути

Материалы верхнего строения пути (далее МВСП), изымаемые при реконструкции, модернизации, капитальном ремонте, в зависимости от технического состояния, реализуются как материалы повторного использования или металлолом.

Затраты на утилизацию материалов верхнего строения участка железнодорожного пути складываются из затрат на разборку рельсошпальной решетки, утилизации металлических элементов материалов верхнего строения пути, утилизации шпал и могут быть рассчитаны по формуле:

$$Z_{\text{ут.}} = Z_{\text{ршп}} + Z_{\text{ут.мет.}} + Z_{\text{ш}} , \quad (5.11)$$

где $Z_{\text{ут.}}$ - затраты на утилизацию участка железнодорожного пути, рублей;

$Z_{\text{ршп}}$ - стоимость разборки 1 км рельсошпальной решетки, рублей;

$Z_{\text{ут.мет.}}$ - затраты на утилизацию металлических частей материалов верхнего строения пути, рублей;

$Z_{\text{ш}}$ - затраты на утилизацию шпал, рублей.

Стоимость разборки рельсошпальной решетки участка железнодорожного пути определяется по формуле:

$$Z_{\text{ршп}} = L * Ц_{\text{ршп}} , \quad (5.12)$$

где L - протяженность участка пути, км;

$Ц_{\text{ршп}}$ - стоимость разборки 1 км рельсошпальной решетки, рублей.

Затраты на утилизацию металлических элементов материалов верхнего строения пути рассчитываются исходя из: протяженности участка, эпюры шпал, веса рельса, веса металлических частей промежуточных креплений, стоимости заготовки 1 тонны металлолома, стоимости реализации 1 тонны металлолома.

Затраты на утилизацию металлических частей материалов верхнего строения пути могут быть рассчитаны по формуле:

$$Z_{\text{ут.мет.}} = ((2 * L * 1000 * g_{\text{рельс.}} + L * \text{Э} * 2 * g_{\text{скр.}}) / 1000) * (C_{\text{лома}} - C_{\text{загот.}}) \quad (5.13)$$

где $Z_{\text{ут.мет.}}$ - затраты на утилизацию металлических частей, рублей;

2 - количество рельсовых плетей;

L – протяженность участка пути, км;

1000 – количество метров в километре;

$g_{\text{рельс.}}$ - вес 1 кг рельса;

Э – эпюра шпал, количество шпал на 1 км пути;

$g_{\text{скр.}}$ - вес одного узла скрепления, кг;

2 – количество узлов скрепления на одной шпале;

1000 - количество килограммов в тонне;

$C_{\text{лома}}$ - цена реализации 1 тонны лома, рублей;

$C_{\text{загот.}}$ - стоимость заготовки 1 тонны лома, рублей.

Стоимость утилизации шпал. Затраты на утилизацию шпал рассчитываются путем перемножения количества перерабатываемых шпал на затраты по утилизации одной шпалы и определяются по формуле:

$$Z_{\text{ш}} = L * \text{Э} * C_{\text{ут.ш.}} \quad (5.14)$$

где $Z_{\text{ш}}$ - затраты на утилизацию шпал, рублей;

L – протяженность участка пути, км;

Э – эпюра шпал, количество шпал на 1 км пути;

$C_{\text{загот.}}$ – стоимость утилизации 1 шпалы, рублей.

5.2.7 Использование методологии оценки стоимости жизненного цикла для определения наиболее эффективного участка железнодорожного пути с учетом фактора времени

Методология оценки стоимости жизненного цикла может быть использована при выборе для реализации альтернативных вариантов конструкции верхнего строения пути для определенного заданного участка

железнодорожного пути.

Поскольку СЖЦ рассчитывается за определенный временной период, то должны учитываться различные аспекты фактора времени [53]:

- несопоставимость во времени одних и тех же затрат;
- инфляция;
- неопределенность и риск.

Учет фактора времени производится путем приведения стоимостных показателей к ценности начального периода, то есть путем дисконтирования.

Дисконтирование осуществляется посредством введения в расчеты коэффициента дисконтирования α_i .

Коэффициент дисконтирования для постоянной нормы дисконта определяется из выражения:

$$\alpha_i = (1 + E)^{-t} = \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (5.15)$$

где t – шаг расчетного периода (1,2,3,...Т);

T - горизонт расчета (продолжительность жизненного цикла),

E – норма дисконта (ставка дисконтирования).

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

$$СЖЦ_{\text{вариант } n} = C_{\text{рек.}} + \sum_{i=1}^T (З_{\text{рем.}} + З_{\text{тек.код.}} + З_{\text{доп.}} + З_{\text{ут.}}) * \alpha_i, \quad (5.16)$$

где t – шаг расчетного периода (1,2,3,...Т);

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 ($LCC_{\text{уд.}}$) на 1 ткм брутто, образующиеся за весь жизненный цикл, которые можно определить по формуле:

$$LCC_{\text{уд.}i} = СЖЦ_i / (T_{\text{норм.}i} * L) \quad (5.17)$$

где $CЖЦ_i$ – стоимость жизненного цикла i -го варианта верхнего строения пути с учетом дисконтирования, рублей;

$T_{норм.i}$ - 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 целесообразно использовать производительность труда и уровень фондоотдачи.

Производительность труда определяется по формуле:

$$B_i = \frac{\Gamma_i * L_i}{\text{Ч}_{тci}} \quad (5.18)$$

где Γ_i – грузонапряженность участка железнодорожного пути, млн. ткм брутто/км в год;

L_i – протяженность участка, км;

$\text{Ч}_{тci}$ - 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[125]:

$$\Phi O_i = \frac{T_{норм.i}}{C_{рек.i}}, \quad (5.19)$$

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

$C_{рек.i}$ - 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 систематизируются и вносятся по форме таблицы 5.2.

Таблица 5.2 - Сводная стоимость этапов жизненного цикла рассматриваемых конкурирующих вариантов участков железнодорожного пути

№ п/п	Наименование затрат	Участок 1	Участок 2
1.	I. Капитальные вложения		
2.	II. Эксплуатационные расходы за жизненный цикл:		
	1) по заработной плате		
	2) по накладным расходам		
	3) по материалам		
	а) рельсов		
	б) промежуточных рельсовых скреплений		
	в) шпалы		
	г) балласт		
	4) планово-предупредительный ремонт пути		
	5) на средний ремонт		
	6) на подъемочный ремонт		
	7) на сопротивления движению поездов		
	8) на задержку поездов		
	9) на страхование имущество		
	10) на налог на имущество		
	11) на налог на прибыль		
	12) затраты на утилизацию		
	13) утилизация материалов ВСП		
3.	СЖЦ (всего затрат, п1+п2)		
4.	Условно-расчетный период службы рельсов в годах ($N_{\text{усл.расч.год}}$)		
5.	Среднегодовая стоимость эксплуатации участка пути ($Z_{\text{средн.годов.экспл}}$), п.2/п.4		
6.	Среднегодовая прогнозная стоимость эксплуатации 1 км участка (п.5/L участка)		
7.	Среднегодовая (удельная) стоимость функционирования участка, п.3/п.4		
8.	Среднегодовая (удельная) прогнозная стоимость функционирования 1 км участка (П.7/L участка)		
9	Удельные затраты СЖЦ ($LCC_{\text{уд.}}$) на 1 ткм брутто (формула 5.17)		
10	Дополнительный критерий, производительность труда (формула 5.18), млн.ткм/чел.		
11	Дополнительный критерий, фондоотдача млн.т/стоимость кап.вложений (формула 5.19)		

Наиболее эффективным вариантом конструкции верхнего строения пути признается вариант, имеющий наименьшее значение удельных затрат СЖЦ ($LCC_{\text{уд.}}$) на 1 ткм брутто, образующихся за весь жизненный цикл

функционирования участка пути.

5.3 Тестовый расчет оценки эффективности функционирования участков железнодорожного пути, сформированных с использованием различных конструкций рельсовых скреплений

По разработанной Методике была выполнена сравнительная оценка эффективности использования различных рельсовых скреплений на виртуальном 12 километровом участке железнодорожного бесстыкового пути, с грузонапряженностью 110 млн.т брутто на км в год, со средневзвешенной скоростью движения поездов 100 км/ч, класс пути 1О.

Объектами исследования и оценки являются 4 смоделированных участка железнодорожного пути.

Первый участок (участок №1 (ЖБР-65ПШР)) сформирован с использованием рельсов типа Р65, категория рельсов ДТ 350, и промежуточных скреплений ЖБР-65ПШР, на щебеночном основании и железобетонных шпалах.

Второй участок железнодорожного пути (участок №2 (ЖБР-65Ш)) сформирован с использованием рельсов типа Р65, категория рельсов ДТ 350, и промежуточных скреплений ЖБР-65Ш, на щебеночном основании и железобетонных шпалах.

Третий участок железнодорожного пути (участок №3 (АРС-4)) сформирован с использованием рельсов типа Р65, категория рельсов ДТ 350, и промежуточных скреплений АРС-4, на щебеночном основании и железобетонных шпалах.

Четвертый участок железнодорожного пути (участок №4 (W-30)) сформирован с использованием рельсов типа Р65, категория рельсов ДТ 350, и промежуточных скреплений W-30, на щебеночном основании и железобетонных шпалах.

Основные параметры рассматриваемых участков железнодорожного

пути приведены в таблице 5.3.

Каждый из предложенных вариантов конструкции верхнего строения пути позволяет обеспечивать безопасное движение пассажирских и грузовых поездов со скоростями, установленными для конкретного участка железнодорожного пути [129]. 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.

Применительно к оценке стоимости жизненного цикла рассматриваемых участков железнодорожного пути использована разработанная диссертантом математическая модель оценки стоимости жизненного цикла участка железнодорожного пути (формула 5.1 Методики):

$$СЖЦ = С_{рек.} + З_{рем.} + З_{тек.сод.} + З_{доп.} + З_{ут.}$$

где СЖЦ – стоимость жизненного цикла участка железнодорожного пути за весь срок службы;

$С_{рек.}$ - проектная стоимость вновь возводимого или реконструируемого железнодорожного пути;

$З_{рем.}$ - затраты на различные виды ремонта участка железнодорожного пути на протяжении всего жизненного цикла;

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

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

$З_{ут.}$ - затраты, связанные с фазой утилизации участка железнодорожного пути после выработки установленного ресурса.

Таблица 5.3 - Характеристика параметров рассматриваемых участков железнодорожного пути

Параметры участка железнодорожного пути	Значения параметров
Протяженность участка, км	12
Установленная скорость пассажирских поездов, км/ч	125
Установленная скорость грузовых поездов, км/ч	100
Грузонапряженность, млн.ткм брутто/ км в год	110
Количество поездов в сутки	42
Группа железнодорожного пути (код группы), класс пути	10
План линии (радиусы кривых, м)	650 и более
Вес грузового поезда, тс (максимум/средний)	6300 и более/4500
Средняя осевая нагрузка, тс/ось	17,05
Уклоны подъема и спуска на участке, ‰	Менее 15
Продолжительность зимы, мес.	5

Последовательно, в соответствии с Методикой, выполнены расчеты стоимости этапов жизненного цикла рассматриваемых участков железнодорожного пути[132].

5.3.1. 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. тонн: КРН-В-С-В-РС-В-П-КРН (приказ Минтранса №54).

Результаты расчетов стоимости работ за жизненный цикл приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Стоимость капитального и промежуточных видов ремонта рассматриваемых участков пути за жизненный цикл

Вид ремонта	Количество ремонтов за ЖЦ	Стоимость ремонта 1 км пути, тыс. руб.	Протяженность ремонтируемого участка пути, км	Стоимость работ за ЖЦ, тыс. руб.
Планово-предупредительный ремонт пути с применением механизированных комплексов (код – В):				
ЖБР65ПШР	3	732,88	12	26 383,54
ЖБР-65Ш	3	732,88		26 383,54
АРС-4	3	732,88		26 383,54
W-30	3	732,88		26 383,54
Средний ремонт пути (код – С):				
ЖБР65ПШР	1	4 120,00	12	49 440,00
ЖБР-65Ш	1	4 155,33		49 863,98
АРС-4	1	4 130,19		49 562,23
W-30	1	4 121,85		49 462,26
Подъемочный ремонт пути (П):				
ЖБР65ПШР	1	2 347,00	12	28 164,00
ЖБР-65Ш	1	2 389,34		28 672,05
АРС-4	1	2 360,90		28 330,81
W-30	1	2 349,91		28 198,92
Сплошная замена рельсов в период между капитальными ремонтами пути, (код – РС):				
ЖБР65ПШР	1	9 470,65	12	11 3647,84
ЖБР-65Ш	1	9 505,99		11 4071,82
АРС-4	1	9 480,84		11 3770,07
W-30	1	9 472,51		11 3670,10
Капитальный ремонт (КРН):				
ЖБР65ПШР	1	26 828,76	12	321 945,12
ЖБР-65Ш	1	27 070,47		324 845,68
АРС-4	1	25 263,59		303 163,12
W-30	1	26 345,65		316 147,76
Шлифование (Ш):				
ЖБР65ПШР	24	94,28	12	27 152,64
ЖБР-65Ш	24	94,28		27 152,64
АРС-4	24	94,28		27 152,64
W-30	24	94,28		27 152,64
Итого: Срек.(КРН) + Зрем. Для креплений ЖБР65ПШР Для креплений ЖБР-65Ш Для креплений АРС-4 Для креплений W-30				566 733,14 570 989,71 548 362,41 561 015,21

5.3.2 Стоимость текущего содержания ($Z_{\text{тек.сод.}}$) рассматриваемых участков железнодорожного пути рассчитана в соответствии с Методикой по формуле (5.3):

$$Z_{\text{тек.сод.}} = Z_{\text{опл.тр.}} + Z_{\text{матер.}} + Z_{\text{накл.расх.}}$$

где $Z_{\text{тек.сод.}}$ — затраты на текущее содержание участка железнодорожного пути, рублей, формула 5.4 Методики;

$Z_{\text{опл.тр.}}$ — затраты на оплату труда монтеров пути, выполняющих работы по текущему содержанию пути, рублей, формула 5.5 Методики;

$Z_{\text{матер.}}$ — затраты на оплату материалов, используемых при текущем содержании пути, рублей, формула 5.5 Методики;

$Z_{\text{накл.расх.}}$ — затраты по накладным расходам, рублей, принимаются равными затратам на оплату труда монтеров пути.

Результаты расчетов на текущее содержание пути по каждому рассматриваемому участку пути приведены в таблице 5.5.

5.3.3 Определение стоимости дополнительных затрат за жизненный цикл рассматриваемых участков железнодорожного пути. Стоимость дополнительных затрат функционирования участков пути определяется по формуле:

$$Z_{\text{доп. затрат}} = Z_{\text{сопр. дв.}} + Z_{\text{предост.окон}} + Z_{\text{налог на им.}} + Z_{\text{стр.пл.}} + Z_{\text{налог на приб.}}$$

Затраты на сопротивление движению поездов, затраты на имущественный налог, налог на прибыль и затраты на страхование имущества определялись для каждого участка пути по формулам 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 Методики, соответственно. Результаты расчетов по каждому участку приведены в таблице 5.6.

5.3.4 Затраты на утилизацию рельсошпальной решетки, снимаемой при реконструкции (капитальном ремонте) участка железнодорожного пути. Изымаемые из пути при всех видах ремонтно-путевых работ и текущем содержании железнодорожные рельсы и металлические элементы материалов верхнего строения пути обладают остаточным ресурсом и могут быть

использованы для повторной укладки в путь на сети железных дорог ОАО "РЖД". В тестовом расчете принято, что 80% рельсошпальной решетки повторно используется на путях более низкого класса, 20% рельсошпальной решетки разбирается, а материалы верхнего строения пути утилизируются, металлические части креплений и рельсы сдаются в металлолом. При оценке затрат на утилизацию необходимо учесть и доходы, получаемые при утилизации рельсов, снятых при их сплошной смене. Итоговые значения величины затрат или доходов, т.к. поступления от реализации металлолома и оприходования МВСП, пригодных для повторного использования, превышают расходы, связанные с утилизацией дефектных материалов приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.5 – Ежегодные затраты на текущее содержание рассматриваемых участков пути, тыс.рублей

Год	Участок №1				Участок №2				Участок №3				Участок №4			
	Годовые затраты на оплату труда, тыс. руб.	Годовые затраты на материалы, тыс. руб.	Накладные расходы, 100% от ФОТ, тыс. руб.	Ежегодные затраты на текущее содержание пути, тыс. руб.	Годовые затраты на оплату труда, тыс. руб.	Годовые затраты на материалы, тыс. руб.	Накладные расходы, 100% от ФОТ, тыс. руб.	Ежегодные затраты на текущее содержание пути, тыс. руб.	Годовые затраты на оплату труда, тыс. руб.	Годовые затраты на материалы, тыс. руб.	Накладные расходы, 100% от ФОТ, тыс. руб.	Ежегодные затраты на текущее содержание пути, тыс. руб.	Годовые затраты на оплату труда, тыс. руб.	Годовые затраты на материалы, тыс. руб.	Накладные расходы, 100% от ФОТ, тыс. руб.	Ежегодные затраты на текущее содержание пути, тыс. руб.
1	572,38	0,00	572,38	572,38	495,41	0,00	495,41	495,41	431,15	0,00	431,15	431,15	495,41	0,00	495,41	495,41
2	773,27	1453,80	773,27	773,27	669,29	1562,68	669,29	669,29	582,47	1644,23	582,47	582,47	669,29	1313,16	669,29	669,29
3	922,06	1453,80	922,06	922,06	798,06	1562,68	798,06	798,06	694,55	1644,23	694,55	694,55	798,06	1313,16	798,06	798,06
4	1044,67	1453,80	1044,67	1044,67	904,19	1562,68	904,19	904,19	786,91	1644,23	786,91	786,91	904,19	1313,16	904,19	904,19
5	1150,91	0,00	1150,91	1150,91	996,13	0,00	996,13	996,13	866,93	0,00	866,93	866,93	996,13	0,00	996,13	996,13
6	1245,67	1453,80	1245,67	1245,67	1078,16	1562,68	1078,16	1078,16	938,31	1644,23	938,31	938,31	1078,16	1313,16	1078,16	1078,16
7	1275,25	0,00	1275,25	1275,25	1103,76	0,00	1103,76	1103,76	960,59	0,00	960,59	960,59	1103,76	0,00	1103,76	1103,76
8	714,45	1453,80	714,45	714,45	618,37	1562,68	618,37	618,37	538,16	1644,23	538,16	538,16	618,37	1313,16	618,37	618,37
9	876,11	1453,80	876,11	876,11	758,29	1562,68	758,29	758,29	659,93	1644,23	659,93	659,93	758,29	1313,16	758,29	758,29
10	1005,96	1453,80	1005,96	1005,96	870,68	1562,68	870,68	870,68	757,75	1644,23	757,75	757,75	870,68	1313,16	870,68	870,68
11	1116,95	0,00	1116,95	1116,95	966,75	0,00	966,75	966,75	841,35	0,00	841,35	841,35	966,75	0,00	966,75	966,75
12	1215,15	1453,80	1215,15	1215,15	1051,74	1562,68	1051,74	1051,74	915,32	1644,23	915,32	915,32	1051,74	1313,16	1051,74	1051,74
13	850,17	1061,28	850,17	850,17	1103,76	1140,76	1103,76	1103,76	960,59	1200,29	960,59	960,59	1103,76	958,60	1103,76	1103,76
Итого	12763,00	12691,70	12763,00	12763,00	11414,58	13642,21	11414,58	11414,58	9934,02	14354,15	9934,02	9934,02	11414,58	11463,86	11414,58	11414,58

Таблица 5.6 – Ежегодные дополнительные затраты, идущие на обеспечение функционирования рассматриваемых участков, тыс. рублей

Год	Участок №1				Участок №2				Участок №3				Участок №4			
	Затраты на сопроивление движению поездов, (З _{сопр.дв.})	Затраты на срахование имущества З _{страхов. имущ}	Затраты наоплату налога на имущество З _{налог на им.}	Затраты на оплату налога на прибыль З _{налог на приб}	Затраты на сопроивление движению поездов, (З _{сопр.дв.})	Затраты на срахование имущества З _{страхов. имущ}	Затраты на оплату налогана имущество З _{налог на им.}	Затраты на оплату налога на прибыль З _{налог на приб}	Затраты на сопроивление движению поездов, (З _{сопр.дв.})	Затраты на срахование имущества З _{страхов. имущ}	Затраты наоплату налога на имущество З _{налог на им.}	Затраты на оплату налога на прибыль З _{налог на приб}	Затраты на сопроивление движению поездов, (З _{сопр.дв.})	Затраты на срахование имущества З _{страхов. имущ}	Затраты наоплату налога на имущество З _{налог на им.}	Затраты на оплату налога на прибыль З _{налог на приб}
1	8471,20	61,35	0,00	-6068,12	8471,20	61,91	0,00	-6113,70	862,30	8471,20	57,75	0,00	8471,20	60,24	0,00	-5977,02
2	8471,20	55,29	608,16	-6068,12	8471,20	55,80	613,78	-6113,70	2809,18	8471,20	51,97	571,70	8471,20	54,26	596,90	-5977,02
3	8471,20	49,22	1082,81	-6068,12	8471,20	49,68	1093,07	-6113,70	3033,32	8471,20	46,20	1016,40	8471,20	48,29	1062,31	-5977,02
4	8471,20	43,15	1898,63	-6068,12	8471,20	43,57	1917,13	-6113,70	3218,05	8471,20	40,43	1778,80	8471,20	42,31	1861,64	-5977,02
5	8471,20	37,08	2447,44	-6068,12	8471,20	37,46	2472,19	-6113,70	1733,86	8471,20	34,65	2287,18	8471,20	36,33	2397,98	-5977,02
6	8471,20	31,01	2729,27	-6068,12	8471,20	31,34	2758,25	-6113,70	3520,86	8471,20	28,88	2541,55	8471,20	30,36	2671,32	-5977,02
7	8471,20	37,79	0,00	-6068,12	8471,20	38,07	0,00	-6113,70	1921,18	8471,20	35,95	0,00	8471,20	37,22	0,00	-5977,02
8	8471,20	31,72	348,92	-6068,12	8471,20	31,96	351,54	-6113,70	2720,55	8471,20	30,18	331,95	8471,20	31,24	343,68	-5977,02
9	8471,20	25,65	564,33	-6068,12	8471,20	25,84	568,57	-6113,70	2964,10	8471,20	24,40	536,89	8471,20	25,27	555,86	-5977,02
10	8471,20	19,58	861,67	-6068,12	8471,20	19,73	868,15	-6113,70	3159,72	8471,20	18,63	819,76	8471,20	19,29	848,74	-5977,02
11	8471,20	13,52	892,01	-6068,12	8471,20	13,62	898,71	-6113,70	1682,71	8471,20	12,86	848,63	8471,20	13,31	878,62	-5977,02
12	8471,20	7,45	655,36	-6068,12	8471,20	7,50	660,28	-6113,70	3474,88	8471,20	7,09	623,48	8471,20	7,34	645,52	-5977,02
13	6183,98	2,21	242,72	-4413,18	6183,98	2,22	244,55	-4446,33	3121,47	6183,98	2,10	230,92	6183,98	2,17	239,08	-4346,92
Итого	107838,38	415,02	12331,32	-77230,5	107838,38	418,72	12446,23	-77810,7	34222,19	107838,3	391,09	11587,26	107838,38	407,63	12101,66	-76071,12

Таблица 5.7 - Затраты, связанные с утилизацией элементов рельсошпальной решетки и утилизации рельсов при их сплошной смене

№ п/п	Наименование затрат	Участок №1	Участок №2	Участок №3	Участок №4
1.	Стоимость МВСП рельсошпальной решетки, пригодных для повторного применения (80% от общего количества), тыс.рублей.	32 176,3	32 617,2	29 321,5	31 295,1
2.	Стоимость затрат на разборку непригодной для повторного использования (20%) рельсошпальной решетки, тыс. рублей.	- 959, 6	- 959, 6	- 959, 6	- 959, 6
3.	Затраты (доходы) от утилизации металлических частей промежуточных скреплений (20% от общего числа), тыс.рублей.	6 023,9	6 092,2	5 201,9	4 692,5
4.	Затраты на утилизацию шпал (20% от общего числа) тыс.рублей.	- 606, 7	- 606, 7	- 606, 7	- 606, 7
	Всего затрат (доходов), от утилизации рельсошпальной решетки, тыс.рублей	36 633,9	37 143,1	32 957,1	34 424,4
5	Затраты (доходы) от утилизации рельсов при их сплошной смене тыс.рублей.	18 251,9	18 251,9	18 251,9	18 251,9
	Итого расходов (доходов), тыс.рублей.	54 885,86	55 395,02	51 209,07	52 673,30

5.3.5 Оценка стоимости жизненного цикла рассматриваемых участков пути. Результаты расчетов этапов жизненного цикла для четырех рассматриваемых участков пути систематизированы и приведены в таблице 5.7.

В заданных условиях эксплуатации наиболее эффективным является применение рельсовых скреплений APC-4 , так как среднегодовая (удельная) прогнозная стоимость функционирования 1 км участка пути, сформированного с применением скрепления APC-4, является наименьшей и составляет **3 782,68** тыс. рублей (стр.8, столбец 5 таб. 5.7). Так же этот участок имеет наименьшие удельные затраты СЖЦ (LCCуд.) на 1 ткм брутто - 26 803, 80 тыс. рублей (стр.9, столбец 5 таб.5.7).

Таблица 5.8- Сводная стоимость этапов жизненного цикла рассматриваемых участков железнодорожного пути
без учета дисконтирования (тыс. рублей)

№ п/п	Наименование затрат	Участок 1 ЖБР-65ПШР	Участок 2 ЖБР-65Ш	Участок 3 АРС-4	Участок 4 W-30
1	I. Капитальные вложения	435592,96	438917,51	416933,19	429817,86
2	II. Эксплуатационные расходы за жизненный цикл, в том числе:	157826,14	156041,17	160784,87	157093,62
	1) по заработной плате	12763,00	11414,58	9934,02	11414,58
	2) по накладным расходам	12763,00	11414,58	9934,02	11414,58
	3) по материалам	12691,70	13642,21	14354,15	11463,86
	4) на средний ремонт	49440,00	49863,98	49562,23	49462,26
	5) на выправку пути	26383,54	26383,54	26383,54	26383,54
	6) на шлифование	27152,64	27152,64	27152,64	27152,64
	7) на подъемочный ремонт	28164,00	28672,05	28330,81	28198,92
	8) на сопротивления движению поездов	107838,38	107838,38	107838,38	107838,38
	9) на страхование имущество	415,02	418,72	391,09	407,63
	10) на налог на имущество	12331,32	12446,23	11587,26	12101,66
	11) на налог на прибыль	-77230,59	-77810,71	-73474,19	-76071,12
	12) затраты на утилизацию	-54885,86	-55395,02	-51209,07	-52673,30
3	СЖЦ (всего затрат, п.1+п.2)	593419,10	594958,67	577718,06	586911,48
4	Условно-расчетный период службы рельсов в годах ($N_{\text{усл.расч.год}}$)	12,73	12,73	12,73	12,73
5	Среднегодовая прогнозная стоимость эксплуатации участка пути 12 км (п.2/п.4)	12400,63	12260,38	12633,10	12343,07
6	Среднегодовая прогнозная стоимость эксплуатации 1 км участка (п.5/12 км.)	1033,39	1021,70	1052,76	1028,59
7	Среднегодовая (удельная) прогнозная стоимость функционирования участка 12 км (п.3/п.4)	46625,79	46746,75	45392,13	46114,47
8	Среднегодовая (удельная) прогнозная стоимость функционирования участка 1 км (п.7/12 км.)	3885,48	3895,56	3782,68	3842,87
9	Удельные затраты СЖЦ ($LCC_{\text{уд.}}$) на 1 ткм брутто в рублях	35 322,57	35 414,21	26 803, 80	34 935,21
10	Дополнительный критерий, производительность труда (формула 5.18), млн ткм/чел.	814,43	814,43	814,43	814,43
11	Дополнительный критерий, фондоотдача стоимость кап.вложений, млн т брутто / рублей (формула 5.19).	38,57	38,28	40,29	39,09

5.4 Выводы по главе 5

1. В процессе выполнения исследования разработана Методика оценки эффективности функционирования альтернативных конструкций верхнего строения железнодорожного пути.

На основании положений разработанной Методики проведены экономические расчеты по оценке эффективности функционирования в заданных эксплуатационных условиях участков пути, сформированных с использованием различных промежуточных рельсовых креплений.

Рассмотрены 4 участка бесстыкового железнодорожного пути с рельсами типа Р65, категории ДТ 350, на щебеночном основании и железобетонных шпалах. Рассматриваемые участки отличаются типом использованного промежуточного рельсового крепления.

Первый участок сформирован с использованием промежуточных креплений ЖБР-65ППР, второй участок сформирован с использованием промежуточных креплений ЖБР-65Ш, третий участок сформирован с использованием промежуточных креплений АРС-4 и четвертый участок сформирован с использованием промежуточных креплений W-30.

Каждый из предложенных вариантов конструкции верхнего строения пути позволяет обеспечивать безопасное движение пассажирских и грузовых поездов со скоростями, установленными для рассматриваемых участков 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. Результаты расчетов этапов жизненного цикла рассматриваемых участков железнодорожного пути приведены в таблице 5.7.

2 Результаты расчета показали, что наименьшую величину среднегодовой стоимости функционирования 1 км участка пути имеет участок №3 (3 782,68 тыс. рублей) - сформированный с использованием промежуточного рельсового крепления АРС-4, это означает, что участок №3

в условиях эксплуатации, представленных в таблице 5.3 является наиболее эффективным.

3 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.

Разработанная Методика может быть использована в том числе для:

- обоснования выбора типов рельсов, креплений для различных климатических и эксплуатационных условий работы бесстыкового пути;
- оценки эффективных сфер применения рельсов различных типов в различных эксплуатационных и климатических условиях;
- принятия стратегических решений и выбора альтернативных вариантов конструкций верхнего строения пути при строительстве, модернизации, приобретении объектов инфраструктуры;
- подготовки коммерческо-эксплуатационных требований к объектам инфраструктуры и их модернизации;
- идентификации факторов, определяющих увеличение издержек, и улучшений, требующих затрат;
- оценки и сравнительного анализа различных способов замены, продления срока службы или утилизации выработавших срок службы материалов верхнего строения пути.

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 циклических испытаний, имитирующих поездную нагрузку. Установлено, что приложение циклической нагрузки повышает до 2-х раз 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 1,20 раза, что обусловлено конструктивными 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) и 30, 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 по контактно-усталостным дефектам;

– 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. Подтверждена существующая сфера применения скреплений АРС-4 и 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 креплений на интенсивность развития контактно-усталостных повреждений в рельсах.

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

11. Предложено внести в действующие нормативные документы на узел крепления (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 крепления в зависимости от сочетания величин вертикальной и боковой сил, а также ввести дополнительный контролируемый параметр – крутильная жесткость узла крепления

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 креплением АРС-4, чем подтверждена целесообразность применения этого типа креплений в дальнейшем.

14. Целесообразно продолжить исследования по оценке влияния типа креплений 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 59482-2021 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Общие технические условия» – Москва: Стандартинформ, - 2021. 12 с.
2. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544/р. – Москва, 2016. - 185 с.
3. ЦП 1-86 Технические требования к промежуточным рельсовым скреплениям, утверждены ЦП МПС 16.08.1987 г.
4. О сферах рационального применения промежуточных рельсовых скреплений и унификации вариантов комплектации ими железобетонных шпал: распоряжение ОАО «РЖД» от 28.06.2018 № 1362р.
5. ТР ТС 003/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта». Утвержден решением Комиссии Таможенного союза 15 июля 2011 г. № 710.
6. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов: инструкция: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 № 2499р.
7. ГОСТ Р 50779.10-2000 (ИСО 3534.1-93) Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2005. - 46 с.
8. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с изменением No 1). – Москва: Стандартинформ, 2014. – 95 с
9. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо – рельс. / пер. с англ. под. ред. С.М. Захарова – Москва: Интекст, 2017. - 420 с.
10. Купцов, В.В. Универсальное рельсовое скрепление БПУ/В.В. Купцов// Сб. трудов ВНИИЖТ Совершенствование конструкции и эксплуатация бесстыкового пути М. Транспорт., -1988, -С. 129-135 с.

11. 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
12. ГОСТ 34078-2017 Прокладки рельсовых скреплений железнодорожного пути. Технические условия. - Москва: Стандартинформ, 2019.- 30 с.
13. ГОСТ 33186-2014 Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия. - Москва: Стандартинформ, 2015. -8 с.
14. Розенберг, И. Н. Создание системы АС УРРАН / И. Н. Розенберг, А. М. Замышляев, С. В. Калинин // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 10. – С. 41 ГОСТ Р 55050–2012.
15. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
16. Погорелов, Д. Ю. Моделирование контактных взаимодействий в задачах динамики систем тел / Д. Ю. Погорелов, А. Э. Павлюков, Т. А. Юдакова, С. В. Котов // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: сборник научных трудов / Под ред. В. И. Сакало. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2001. – С. 11–23.
17. Гапанович, В. А. Система адаптивного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта (проект УРРАН) / В. А. Гапанович, И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг, А. М. Замышляев // Надежность. – 2015. – № 2. – С. 4
18. Sakalo, V. Computer modelling of process of accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels / V. Sakalo, A. Sakalo, S. Tomashevskiy, D. Kerentcev // International Journal of Fatigue. – 2018. – V.111. – P. 7-15.
19. Huang J., Su Q., Liu T., Wang W., Behavior and Control of the Ballastless Track-Subgrade Vibration Induced by High-Speed Trains Moving on the Subgrade Bed with Mud Pumping. Shock and Vibration, 2019, vol. 4, pp. 1-14. doi:10.1155/2019/9838952

20. Afferrante, L. A re-examination of rolling contact fatigue experiments by Clayton and Su with suggestions for surface durability calculations / L. Afferrante, M. Ciavarella, G. Demelio // *Wear*. – 2004. – Vol.256. – P. 329-334.
21. Sakalo, V. Computer modeling of processes of wear and accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels using combined criterion / V. Sakalo, A. Sakalo, A. Rodikov, S. Tomashevskiy // *Wear* 432–433 (2019) 102900. DOI: 10.1016/j.wear.2019.05.
22. H. Ilias, The influence of railpad stiffness on wheelset/track interaction and corrugation growth, *J. Sound Vib.* 227 (5) (1999) 935–948, <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2059>.
23. J.I. Egana, J. Vinolas, M. Seco, Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system, *Wear* 261 (2) (2006) 216–224, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.10.004>.
24. Гапанович, В.А. Инфраструктура в условиях интенсификации перевозок/ В.А. Гапанович, В.О. Певзнер, О.А. Суслов [и др.] // *Железнодорожный транспорт*. – 2016. – No. 3. – С. 16-20.
25. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов // Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от. – 28.02.2020. – N 436/р
26. Евдокимов Б. А. Техничко-экономическая эффективность снижения жёсткости пути с железобетонными шпалами/Б.А. Евдокимов // *Тр. ВЗИИТ: Совершенствование норм устройства рельсовой колеи*. – М., 1972. – Вып. 60. – С. 54–63.
27. UIC Code 518:2009. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour — Safety — Track fatigue — Running behaviour, 4th edition, International Union of Railways (UIC), – 2009.
28. Ашпиз, Е.С. Развитие системы мониторинга пути / Е.С. Ашпиз // *Путь и путевое хозяйство*. – No4. – 2015. – С.30-32
29. О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Приказ Министерства транспорта Российской

Федерации от 9 февраля 2018 № 54: утвержден Министерством транспорта Российской Федерации 21 декабря 2010 г. № 286

30. Инструкция о порядке комплексного контроля путеизмерительными средствами железнодорожного пути для информационного обеспечения решения задач путевого хозяйства ОАО «РЖД». Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 16 июля 2013 г. N 1566р;

31. Инструкция по текущему содержанию пути: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288р (взамен утратившей силу 2791р). – Москва, 2016. – 286 с.

32. Инструкция по шлифовке и фрезерованию рельсов в пути и стационарных условиях: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2014 № 3185р в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 03.06.2019 № 1088/р. – 72 с.

33. Савоськин, А.Н. Вертикальные и горизонтальные возмущения на рельсовом полотне / А.Н. Савоськин, В.В. Кочергин, А.И. Поляков // Мир транспорта – 04-2015. – С.4-14.

34. Фришман, М.А. Особенности определения изгибных напряжений в рельсах при высоких скоростях движения в зоне неровностей/ М.А. Фришман, В.И. Климов, Н.В. Иволга // Вестник ВНИИЖТ, – №3, – 1977, – С.32-35.

35. Коган, А. Я. Оценка интенсивности бокового и вертикального износов рельсов под проходящими поездами / А. Я. Коган // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76, № 3. – С. 138–145.

36. Золотарский, А. Ф. Термически упрочненные рельсы / А. Ф. Золотарский. – Москва: Транспорт, 1976. – 263 с.

37. Михалкин, И.К. Система диагностики железнодорожной инфраструктуры: тенденция развития / И.К. Михалкин // Евразия Вести. – 2017. – №12. С.15-16.

38. Коган, А. Я. Оценка потери материала рельсов и бандажей колесных пар при движении подвижного состава в кривых участках пути / А. Я. Коган

- // Повышение надежности и эффективности работы железнодорожного пути в усло-виях роста осевых нагрузок подвижного состава. – Новосибирск, 1989. – С. 15–20.
39. Коган А.Я., Левинзон М.А., Войтов И.О. и др. Воздействие экипажа на путь при пространственных колебаниях подвижного состава. Описание программы // Информационный бюллетень ВНИИЦентр ГОСФАП. 1985. №4/67.
40. Коган, А.Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь. //Труды ЦНИИ МПС, вып.402. – М.: Транспорт, – 1969, – 206 с.
41. Виноградов В. В., Никонов А. М., Яковлева Т. Г. и др. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. / В. В. Виноградов, А. М. Никонов // М.: Маршрут, - 2003.– 486 с.
42. Акимов В. А Надежность технических систем и техногенный риск:учебное пособие. / Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А.,Томаков В. И., Фалеев М. И. // Изд.: Финансовый издательский дом "Деловойэкспресс". – Москва. – 2002. – 368 с
43. Привалов С.В. Влияние жесткости подрельсового основания на взаимодействие экипажа и пути [Текст] дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.06 : ФГУП «ВНИИЖТ». – Москва. – 2004. – 118 с.
44. Вериго, М. Ф. Расчеты пути. Их прошлое, настоящее и будущее / М. Ф. Вериго // Путь и путевое хозяйство. – 1997. – № 8. – С. 25–30.
45. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины иопределения. – М. : Стандартиформ, 2016. – 28с.
46. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины иопределения. – М. : Стандартиформ, 2016. – 28с.
47. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» 22.12.2017 № 2706р.

48. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте (УРРАН) / Утв. ОАО «РЖД» 31.07.2010.
49. Методика оценки рисков функционирования верхнего строения железнодорожного пути, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 12.01.2018 № 27/р
50. Карпущенко, Н. И. Исследование бокового износа рельсов в кривых на перевальном участке / Н. И. Карпущенко, Е. С. Антерейкин, Д. Ю. Замелова, П. С. Труханов // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 9. – С. 35–40.
51. Соловатов, Р. О. Эксплуатация рельсов на грузонапряженных и горно-перевальных участках / Р. О. Соловатов // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – №5. – С. 24–27
52. Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность / МПС СССР, ВНИИЖТ. – Москва, 1954. – 60 с.
53. 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.
54. 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.
55. 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.
56. 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.

57. О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 9 февраля 2018 № 54: утвержден Министерством транспорта Российской Федерации 21 декабря 2010 г. № 286.

58. Способ оценки дефектности элементов 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.

59. Захаров, С. М. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения в области колес, рельсов и их взаимодействия / С. М. Захаров // Железные дороги мира. – 2002. – № 8. – С. 9–17.

60. Харгрове, М. Экономическая оценка повышения осевых нагрузок по результатам испытаний в Пуэбло / М. Харгрове // Железные дороги мира. – 1993. – № 9. – С. 56–58.

61. Головатенко, А. В. Работа «ЕВРАЗ ЗСМК» по инновационному развитию рельсовой продукции за счет технического перевооружения и освоения новых технологий / А. В. Головатенко // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г.). – Санкт-Петербург, 2015. – С. 43–47.

62. Капнин, В. В. Освоение технологии производства рельсов на ОАО «ЧМК» / В. В. Капнин, Д. В. Шабуров // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г.). – Санкт-Петербург, 2015. – С. 77–79

63. Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.: утверждены распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р.
64. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года. Утвержденные распоряжением правительства РФ от 19.03.2019. № 466 р.
65. Лисицын, А. И. О надежности рельсов в различных условиях эксплуатации и необходимых мероприятиях по ее повышению / А. И. Лисицын // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Анапа, 7–9 октября 2020 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2021. – С. 58–68.
66. Соколов, О. М. Оценка влияния типов конструкций рельсовых скреплений на износ рельсов разных категорий в кривых малого радиуса (менее 650 м) на участках с повышенными осевыми нагрузками для анализа возможности увеличения межремонтных сроков / О. М. Соколов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Анапа, 7–2829 октября 2020 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2021. – С. 101–128
67. Заграничек, К. Л. Сравнительная оценка сопротивления износу дифференцированно термоупрочненных рельсов общего и специального назначения в лабораторных условиях / К. Л. Заграничек, А. И. Борц, И. Е. Перков // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 26–27 сентября 2019 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2020. – С. 94–114.
68. Чечельницкий, А. И. Анализ дефектности и изломов рельсов / А. И. Чечельницкий, О. Н. Ваганова // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам

заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 26–27 сентября 2019 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2020. – С. 66–75

69. Чечельницкий, А. И. Влияние эксплуатационных, технических и технологических факторов на образование дефектов рельсов и мероприятия по снижению их воздействия / А. И. Чечельницкий // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Анапа, 7–9 октября 2020 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2021. – С. 55–57.

70. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности / ЦПТ52/14, МПС РФ, ЦП. – Москва, 2000. – 39 с.

71. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» 22.12.2017 № 2706р

72. Вериги, М. Ф. Расчеты пути. Их прошлое, настоящее и будущее / М. Ф. Вериги // Путь и путевое хозяйство. – 1997. – № 8. – С. 25–30

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

74. Гапанович, В. А. Какой должна быть поверхностная твердость рельсов / В. А. Гапанович, Л. А. Сосновский // Железнодорожный транспорт. – 2009. – №12. – С. 36–40

75. Махутов, Н. А. Усталостное разрушение рельсовой стали после эксплуатации / Н. А. Махутов, Ю. А. Демина, И. М. Петрова, И. В. Гадолина, Н. А. Жаркова, Е. А. Шур, А. И. Борц, И. В. Светозарова, Л. Р. Ботвина // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник материалов V международной конференции / ИМЕТ РАН. – Москва, 2013. – С. 87–88

76. Рейхарт, В. А. Основные результаты полигонных испытаний рельсов на экспериментальном кольце ВНИИЖТ / В. А. Рейхарт, Л. А. Джанполадова // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Калуга, 1–2 октября 2009 г.). – Екатеринбург: УИИМ, 2010. – С. 16–26
77. Шур, Е. А. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости / Е. А. Шур, А. И. Борц, А. В. Сухов, А. Ю. Абдурашитов, Л. В. Базанова, К. Л. Заграничек // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2015. – No 3 – С. 3–9.
78. Марков, Д. П. Контактная усталость колес и рельсов / Д. П. Марков // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2001. – No 6. – С. 8–14.
79. Юрьев, А. А. Эволюция структуры и свойств дифференцированно - закаленных рельсов в процессе длительной эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 / Юрьев Антон Алексеевич; Новокузнецкий государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2018. – 152 с
80. 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. – No 6. – С. 354–364.
81. 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. – No 3. – С. 65–66.
82. Desimone, E. L. On the application of Dang Van criterion to rolling contact fatigue / E. L. Desimone, A. Bernasconi, S. Berreta // Wear. – 2006. – No. 260. – P. 567–572
83. Ekberg, A. A fatigue life model for general rolling-contact with application to wheel/rail damage / A. Ekberg, H. Bjarnehed, R. Lunden // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 1995. – No 18. – P. 1189–1199.

84. Карпущенко, Н. И. Анализ факторов, определяющих износ рельсов в кривых малого радиуса / Н. И. Карпущенко, И. А. Котова / Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути: сборник докладов научно-практической конференции. – Москва, 2003. – С. 101–105.
85. Лисицын, А. И. Анализ факторов, влияющих на работу рельсов в различных условиях эксплуатации / А. И. Лисицын, А. Ю. Абдурашитов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 26–27 сентября 2019 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2020. – С. 45–75.
86. Универсальный механизм Программный комплекс для моделирования динамики механических систем. Загрузки. Универсальный механизм URL:<http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3> (дата обращения: 16.08.2020).
87. Универсальный механизм. Моделирование динамики железнодорожных экипажей. Руководство пользователя / Лаборатория вычислительной механики БГТУ. – URL: <http://www.umlabor.ru> (дата обращения 16.08.2020).
88. Карпущенко, Н. И. Математическая модель оценки интенсивности бокового износа рельсов / Н. И. Карпущенко // Путь и путевое хозяйство. – 1996. – № 11. – С. 14–17
89. Андриевский, С. М. Боковой износ рельсов на кривых / С. М. Андриевский // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 207. – Москва, 1961. – 128 с.
90. О сферах рационального применения промежуточных рельсовых скреплений и унификации вариантов комплектации ими железобетонных шпал: распоряжение ОАО «РЖД» от 28.06.2018 № 1362р.
91. Краснов, О. Г. Влияние промежуточных рельсовых скреплений на износ рельсов / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, Н. М. Никонова // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 19–21.

92. Инструкция по текущему содержанию пути: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 No 2288р (взамен утратившей силу 2791р). – Москва, 2016. – 286 с.
93. Певзнер, В. О. Результаты наблюдений по оценке влияния эксплуатационных факторов на боковой износ рельсов / В. О. Певзнер, О. Ю. Белоцветова, А. В. Потапов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – No 4. – С. 242–247.
94. Певзнер, В. О. Подуклонка рельсов и ее связь с безопасностью движения и боковым износом / В. О. Певзнер, О. Ю. Белоцветова, А. В. Потапов // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – No 2. – С. 30–33
95. Зензинов, Б. Н. Анализ изменения подуклонки и наклона поверхностикатания рельсов / Б. Н. Зензинов, Ю. Р. Трушина, К. В. Клементьев // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – No 1. – С. 15–19.
96. Шур, Е. А. О некоторых причинах повреждаемости рельсов на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ». Железнодорожный транспорт на современном этапе / Шур Е.А., Борц А.И., Сухов А.В., Рейхарт В.А., Абдурашитов А.Ю., Суслов О.А., Базанова Л.В. // Сборник трудов научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – Москва: ВМГ-Принт, 2014. – С. 259–267.
97. 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. – No 17. – С. 41 – 47.
98. Александров, А. И. Применение метода конечных элементов в задача о контакте колеса и рельса / А. И. Александров, В. Ф. Грачев // Труды Днепропетровского института инженеров транспорта. – Вып. 220/28. – 1981. – С. 116– 122.
99. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – Москва: Высшая школа, 1980. – 368 с.

100. Марков, Д. П. Контактная усталость колес и рельсов / Д. П. Марков // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2001. – № 6. – С. 8–14.
101. Коссов, В. С. Результаты экспериментальных и теоретических исследований воздействия подвижного состава на путь в перспективных условиях эксплуатации / В. С. Коссов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2013. – № 5. – С. 27–36
102. Ашпиз, Е. С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог / Е. С. Ашпиз. – Москва: Путь-экспресс, 2002. – 112 с.
103. Гузыкова, С. В. Метод экспертных оценок. Теория и практика / С. В. Гузыкова // Институт психологии РАН. – Москва, 2011. – 315 с.
104. Богданов, О. К. Анализ статистики ОДР с дефектами 21 / О. К. Богданов, Г. С. Ноздрачев // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 2. – С. 26–33.
105. Борц, А.И. Исследования инновационной рельсовой продукции и перспективы ее дальнейшего развития в условиях концепции импортозамещения / А.И. Борц // РСП ЭКСПЕРТ. – 2015. – № 12. – С. 20–22; 2016. – № 1. – С. 16–19.
106. Борц, А. И. Исследования инновационной рельсовой продукции и перспективы ее дальнейшего развития / А. И. Борц // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов о материалах 130 заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г.). – Санкт-Петербург, 2015. – С. 107–120.
107. ГОСТ 32192–2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ. – 2014. – 27 с.
108. ГОСТ Р 54505–2011. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 35 с
109. Когаев, В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В. П. Когаев. – Москва: Машиностроение, 1993. – 364 с.

110. Сосновский, Л. А. Контактно-механическая усталость: основные закономерности / Л. А. Сосновский, Н. А. Махутов, В. А. Шуринов // Вестник машиностроения. – 1992. – No 10. – С. 44–61
111. Гозбенко, В. Е. Анализ и пути снижения износа рельсов и колес подвижного состава / В. Е. Гозбенко, Б. Тувшинтур // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – No 3. – С. 191–197
112. Андриевский, С. М. Боковой износ рельсов на кривых /С. М. Андриевский // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 207. – М.: Трансжелдориздат,1961. – 128 с.
113. Певзнер, В.О. Организация технического обслуживания пути на особо грузонапряженных участках / В. О. Певзнер, А. И. Лисицын, Е. А. Сидорова[и др.] //Путь и путевое хозяйство. – 2021. – No. 9. – С. 18-21.
114. Стандарт С. Т. О. РЖД 08.005-2011 «Инновационная деятельность в ОАО «РЖД» //Порядок оценки эффективности инновационных проектов». Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от. – 2012. – No. 1267р.
115. Громова, Т.И. Окупаемость ремонтов пути / Т.И. Громова, В.О Певзнер //Путь и путевое хозяйство. – 2000. – No. 10. – С. 30-31.
116. Лаптев В.А. Система управления качеством эксплуатации пути / В.А Лаптев //Путь и путевое хозяйство. – 1980. - No 8. – С. 38-40.
117. Victor Pevzner, Uriy Romen, Kirill Shapetko. Control of energy aspects of track and rolling stock interaction // MATEC Web Conf. Volume 239, 2018 Siberian Transport Forum - TransSiberia 2018 MATEC Web of Conferences 239, 01044 (2018)<https://doi.org/10.1051/matecconf/201823901044>
118. Кантор, И.И. Изыскание и проектирование железных дорог. – М.; ИКЦ «Академкнига», – 2003. – 288 с.
119. Астахов, П. Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава / П.Н. Астахов //Труды ВНИИЖТ–М.: Транспорт. – 1966. – No.311. – 178с
120. Певзнер, В.О. Влияние состояние пути на энергетическое взаимодействие с подвижным составом / В.О. Певзнер, В.И. Рахманинов, И.Б.

Петропавловская [и др.] // Железнодорожный транспорт. – No2, – 1996. – С.46-49

121. Певзнер, В.О. Управление энергетическими аспектами взаимодействия пути и подвижного состава / В.О. Певзнер, Ю.С. Ромен, К.В. Шапетько //Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности: Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, – 2018. – С.167-173.

122. Виноградов, С.В. Цифровые технологии повышения энергетической эффективности железнодорожных перевозок/ С.А. Виноградов, К.М. Попов //Железнодорожный транспорт. – 2019. – No 9. – С. 42-45.

123. Певзнер, В.О. Влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения в процессе интенсификации перевозочного процесса / В.О.Певзнер, А.И. Чечельницкий, К.В. Шапетько [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2020;79(5): – С.271-275.

124. Певзнер, В.О. О влиянии длинных неровностей пути на безопасность движения / В.О. Певзнер, Е.А. Сидорова, К.В. Шапетько [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2021. – No 11. – С. 40-44.

125. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо – рельс / пер. с англ. под ред. С.М. Захарова. – М.:Интекст, – 2017. 420 с.

126. Путь и безопасность движения поездов /В.И. Болотин, В.А. Лаптев,В.С. Лысюк, В.Я. Шульга; Под ред. В.Я. Шульги. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.:Транспорт, – 1994. – 199 с

127. Высокоскоростное пассажирское движение (на железных дорогах).Под ред. Н.В. Колодяжного М., «Транспорт», – 1976, – 416 с.

128. Н. Takai. Maintenance of track with long-wave track irregularity onShinkansen. Quarterly Report of RTRI, – 1990, – No3, –pp.128-131.

129. Соколов, А.М. Осевая нагрузка 27 тс – новая веха развития вагоностроения / А.М. Соколов, А.М. Орлова // Вагоны и вагонное хозяйство. –2016. – №3 (47). – С.5-7.
130. Лысюк, В.С. Методика расчета эквивалентных поездных нагрузок на путь / В.С. Лысюк // Вестник ВНИИЖТ. – №5. – 1973. – С.17-21.
131. Сергеева, Н.Ю. Разработка требований к длинным неровностям продольного профиля скоростных участков пути / Н.Ю. Сергеева, В.О. Певзнер //Ж.-д. транспорт. Сер. «Путь и путевое хозяйство»: ЭИ/ЦНИИТЭИ МПС. – 1999. –Вып. 3. – С.51-56.
132. Ромен, Ю.С. Прогнозирование роста неровностей железнодорожного пути / Ю.С. Ромен, А.Н. Савоськин // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты Материалы XIII Международной научно-технической конференции. – 2018. – С. 181-184.
133. Бондаренко, И.А. Предложения по оценке деформативности железнодорожного пути / И.А. Бондаренко // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. –2008. – №23. – С.117-122
134. Варга, Э. Измерение неровностей рельсового пути инерциальным способом / Э. Варга // Вестник ВНИИЖТ. – №2. – 1991. – С.37-39.
135. Мишин, В.В. Комплексный показатель состояния геометрии пути / В.В.Мишин, В.О. Певзнер, Б.Н. Зензинов // Ж.-д. транспорт. Сер. «Путь и путевое хозяйство»: ЭИ/ ЦНИИТЭИ МПС. – 1999. – Вып. 3. – С.1-15
136. Малинский, С.В. Исследование спектральных свойств вертикальных неровностей железнодорожного пути / С.В. Малинский, В.О. Певзнер // Вопросы взаимодействия пути и подвижного состава в условиях интенсификации работы железнодорожного транспорта: межвузовский сборник научных трудов / ДИИТ. –1990. – С.15-20.
137. Лапина, Л. Г. Формирование расчетных входных возмущений по результатам спектрального анализа неровностей реальных участков

железнодорожного пути / Л.Г. Лапина, И.А. Машенко // Техническая механика. – 2010. – No. 2. – С. 10-18.

138. Шапетько, К.В. Исследования накопления деформаций железнодорожного пути на участке испытаний вагонов с осевой нагрузкой 27 тс / К.В. Шапетько // Вестник ВНИИЖТ. – 2017. – Т.76. – No4. – С.238-242.

139. Клименко, А.А. О путевой инфраструктуре Забайкалья / А.А. Клименко // Путь и путевое хозяйство. – No1. – 2018. – С.2-5

140. Колос, И.В. Проблемы повышения осевых нагрузок и скоростей движения поездов на участках распространения слабых грунтов / И.В. Колос, Е.С. Свинцов, Г.М. Стоянович [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – No. 4. – С.26-31.

141. Михалкин, И.К. Система диагностики железнодорожной инфраструктуры: тенденция развития / И.К. Михалкин // Евразия Вести. – 2017. – No12. С.15-16.

142. Коган, А.Я. Спектральный состав неровностей пути и напряженно-деформированное состояние его элементов / А.Я. Коган, М.А. Левинзон, С.В. Малинский [и др.] // Вестник ВНИИЖТа. М.: ВНИИЖТ. – 1991. – No1. – С.39-41.

143. Ромен, Ю.С. Оценка состояния пути на основе моделирования процессов взаимодействия в системе колесо-рельс / Ю.С. Ромен, Я.М. Клебанов, О.Б. Симаков [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2014. – No 5. – С.58-62.

144. Пегов, Д.В. Высокоскоростное движение: начало положено / Д.В. Пегов // Железнодорожный транспорт. – 2010. – No. 6. – С. 50-51.

145. Оценка контактно усталостной Статистический анализ изъятий 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.

146. Отчет о выполненной работе «Сравнительный анализ эксплуатационной стойкости дифференцированно и объемно –упрочненных рельсов различных производителей по данным 2015 – 2017 г.г. на сети железных дорог по результатам сравнительных эксплуатационных испытаний Утвержден АО ВНИИЖТ 12.07.2018

147. «Исследование дифференцированно – упрочненных рельсов с определением влияния качества рельсов и условий работы на их повреждаемость и интенсивность образования и развития дефектов при эксплуатации с расчетом ресурса по видам дефектов и внесением изменений в нормативную и техническую документацию», дог. 2857545 (1.РСТМ.10.04391/18) от 30.03.2018 г. (шифр 5.364). Программа и методика сбора и обработки информации об изъятии рельсов.

148. Отчет о научно – исследовательской работе «Исследование дифференцированно – упрочненных рельсов с определением влияния качества рельсов и условий работы на их повреждаемость и интенсивность образования и развития дефектов при эксплуатации с расчетом ресурса по видам дефектов и внесением изменений в нормативную и техническую документацию», дог. 2857545 (1.РСТМ.10.04391/18) от 30.03.2018 г. (шифр 5.364). Этап 2. «Проведение исследований эксплуатационной стойкости рельсов, уложенных на сети железных дорог, в зависимости от их назначения и категории, величины наработки и грузонапряженности, плана и профиля пути с определением наработки тоннажа до выхода рельсов по ряду дефектов»

149. Отчет о выполненной работе «Участие в анализе эксплуатационной стойкости рельсов ДТ 350 производства АО ЕВРАЗ «ЗСМК» в зависимости от условий эксплуатации. Утверждено АО ВНИИЖТ 20.09.2017

150. Мониторинг состояния инфраструктуры, оценка накопления расстройств верхнего строения пути и деформаций земляного полотна, с разработкой норм устройства, эксплуатации, технического обслуживания,

диагностики инфра- структуры, технологии вождения поездов для участков обращения составов, сформированных из вагонов с осевой нагрузкой 27 тс на участке Качканар – Смычка Свердловской железной дороги: отчет о НИР, этап 27 / А.В. Макаров, А.В. Портнов, О.А. Суслов; АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»). – Москва, 2018. – 320 с.

151. 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.

152. 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