

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



На правах рукописи

Петров Александр Владимирович

**ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЖЕСТКОСТЬ УЗЛОВ РЕЛЬСОВЫХ
СКРЕПЛЕНИЙ БЕЗБАЛЛАСТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ**

2.9.2. Железнодорожный путь,
изыскание и проектирование железных дорог

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Савин Александр Владимирович

Москва - 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 РЕЛЬСОВЫЕ СКРЕПЛЕНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ.....	12
1.1 Классификация рельсовых скреплений.....	12
1.2 Рельсовые скрепления на участках смешанного движения в условиях Российских железных дорог.....	18
1.3 Рельсовые скрепления на участках скоростного и высокоскоростного движения	32
1.4 Рельсовые скрепления для БКП.....	36
1.5 Регламентирующая документация к рельсовым скреплениям на территории ЕАЭС.....	43
ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ	45
2 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ.....	47
2.1 Отечественные методы расчета воздействия подвижного состава на железнодорожный путь	47
2.1.1 Основные положения статического расчета. Модуль упругости подрельсового основания.....	47
2.1.2 Оценка воздействия подвижного состава на путь	49
2.1.3 Методика расчёта безбалластного пути как многослойной балки на упругом основании.....	55
2.2 Зарубежные методы расчёта воздействия подвижного состава на железнодорожный путь	59
2.2.1 Метод Айзенманна.....	59
2.2.2 Метод DB	68
2.2.3 Метод SNCF.....	70
2.2.4 Метод AREMA	70
2.3 Предлагаемые автором положения расчёта.....	72

2.3.1	Предпосылки для выбора расчетной модели	72
2.3.2	Метод расчета упругого прогиба рельса БКП.....	73
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ		79
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	81
3.1	Лабораторные испытания	81
3.1.1	Испытания эластичных прокладок в лаборатории Мюнхенского технического университета	81
3.1.2	Испытания эластичных прокладок в лаборатории Шанхайского университета Тунцзи.....	85
3.1.3	Коэффициенты жёсткости эластичных прокладок в зависимости от температуры окружающей среды	86
3.2	Строительство опытных БКП на ЭК	90
3.2.1	Конструкция пути EBS	91
3.2.2	Конструкция пути NBT.....	93
3.2.3	Конструкция пути FFB	96
3.2.4	Конструкция пути LVT	98
3.3	Натурные измерения на ЭК	101
3.3.1	Измерения состояния рельсовой колеи.....	101
3.3.2	Измерения прогибов рельса под статической нагрузкой от подвижного состава	105
3.3.3	Измерения прогибов рельса под динамической нагрузкой от подвижного состава	106
3.3.4	Экономическая составляющая элементов рельсового скрепления System 300 в конструкции FFB	112
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ		117
4	ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ОБЛАСТИ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ	119
4.1	Отечественная нормативная база.....	119
4.1.1	Требования безопасности и методы контроля характеристик рельсовых скреплений	119

4.1.2	Технические нормы и требования к рельсовым скреплениям для участков ВСМ	121
4.1.3	Технические условия на прокладки рельсовых скреплений	124
4.2	Зарубежная нормативная база	125
4.2.1	Европейские нормы.....	125
4.2.2	Нормы AREMA	131
4.2.3	Отраслевой стандарт железных дорог КНР.....	136
4.3	Сравнение требований к рельсовым скреплениям для БВСП	139
4.3.1	Силовые характеристики узла и его элементов	140
4.3.2	Испытания с приложением продольной нагрузки	141
4.3.3	Циклические испытания	142
4.3.4	Упругие характеристики узла рельсового скрепления	142
4.3.5	Электрическое сопротивление	143
4.3.6	Дополнительные требования	143
4.4	Требования к упругим характеристикам узла рельсового скрепления БКП для российских условий эксплуатации	144
4.4.1	Жесткость узлов рельсовых скреплений	147
4.4.2	Коэффициенты жёсткости.....	152
4.4.3	Метод испытаний эластичной прокладки по определению статической жёсткости	156
4.4.4	Метод испытаний эластичной прокладки по определению динамической жёсткости.....	160
	ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ	164
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	166
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	168
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	169
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	187
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	191
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	208
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	210

ПРИЛОЖЕНИЕ Д	214
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	223

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие высокоскоростного железнодорожного сообщения в нашей стране предполагает строительство новых выделенных железнодорожных линий для высокоскоростного железнодорожного движения. Наиболее перспективной в настоящее время является высокоскоростная магистраль (далее ВСМ) «Москва – Санкт-Петербург» со скоростями движения до 400 км/ч. Также прорабатывались ещё две линии – ВСМ «Москва – Казань» и ВСМ «Урал», соединяющая Екатеринбург и Челябинск. Все проекты ВСМ предполагают применение новых технологических и инженерных решений, обеспечивающих высочайший уровень надежности и безопасности перевозок пассажиров и грузов, которые обеспечат необходимый комфорт для пассажиров.

Мировой опыт строительства и эксплуатации линий ВСМ подтвердил эффективность применения безбалластной конструкции пути (далее БКП). Например, проработка проекта ВСМ «Москва – Казань» подразумевала применение в качестве базовой безбалластную плитную конструкцию пути CRTS III RUS, адаптированную под российские условия эксплуатации. Известно, что в БКП рельсовые скрепления с промежуточным эластичным слоем являются главным элементом, упругие свойства которых формируют от 80 до 95% упругих свойств всей конструкции пути в целом. Это подтверждается натурными измерениями прогиба рельса под воздействием нагрузок от подвижного состава.

В отечественной документации по техническому регулированию недостаточно полно отражены требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений для БКП. Зарубежная нормативно-техническая документация регламентирует требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем для БКП, учитывая влияние низких температур. Нижние пороговые значения испытательных температур в немецких и китайских нормативах установлены, соответственно, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Согласно

требованиям предпроектной документация линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург», для российских условий эксплуатации необходимо учитывать минимальную температуру $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом актуальными становятся вопросы по усовершенствованию расчётной модели определения упругого прогиба рельса от воздействия подвижного состава на БКП с учётом влияния низких температур с последующим формированием требований к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем для БКП, работающих в условиях проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» при воздействии низких температур до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$; и по корректировке методов подтверждения соответствия этим требованиям.

Степень разработанности темы исследования. Многолетние исследования и опытно-производственные работы по решению вопросов работы промежуточных рельсовых скреплений в различных конструкциях пути и связанных с этим проблем посвящены труды отечественных ученых: Абдурашитова А.Ю., Альбрехта В.Г., Ананьева Н.И., Ашпиза Е.С., Барабошина В.Ф., Белькова В.М., Виноградова А.Г., Ермакова В.М., Жангабыловой А.М., Замуховского А.В., Каменского В.Б., Карпущенко Н.И., Когана А.Я., Козлова Д.В., Козлова И.С., Колоса А.Ф., Кочергина В.В., Кравченко Н.Д., Купцова В.В., Лебедева А.В., Лысюка В.С., Наумова Б.В., Овчинникова Д.В., Савина А.В., Певзнера В.О, Шахунянца Г.М. и других.

За рубежом аналогичными исследованиями занимались следующие учёные: E. Berggren, W. Boesterling, S. Chang, K. Cheng, Y. Chiang, D. Diederich, J. Eisenmann, C. Esveld, S. Freudenstein, K. Giannakos, S. Kaewunruen, B. Lechner, X. Lei, G. Leykauf, B. Lichtberger, J. Liu, G. Michas, O. Nigel, A. Remennikov, R. Schilder, K. Witt, S. Wu и другие.

Принцип определения упругого прогиба рельса в БКП от воздействия подвижного состава основан на гипотезе Фусса-Винклера, сформулированной в 1867 году. Однако исследований, направленных на изучение влияния низких температур на упругие характеристики рельсовых скреплений в БКП, явно недостаточно.

Цель диссертационной работы заключается в определении влияния низких температур на жёсткость узлов рельсовых скреплений БКП, работающих в условиях проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

Задачи исследования:

1) На основе обобщения и анализа отечественного и зарубежного опыта, выбрать математическую модель определения упругого прогиба рельса от воздействия подвижного состава на БКП и дополнить ее коэффициентами, позволяющими учитывать влияние низких температур на изменение жёсткости рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем в БКП;

2) Экспериментальным путем определить коэффициенты изменения статической и динамической жёсткостей эластичной прокладки узла рельсового скрепления для БКП в зависимости от воздействия низких температур;

3) Выполнить экспериментальную верификацию адекватности расчетов дополненной математической модели;

4) На основе расчетов и экспериментов сформировать требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем для БКП;

5) Разработать рекомендации по корректировке методов определения упругих характеристик узла рельсового скрепления с промежуточным эластичным слоем для БКП с учетом влияния низких температур с целью подтверждения соответствия заявленным требованиям.

Объектом исследования является упругое рельсовое скрепление с промежуточным эластичным слоем для БКП.

Предметом исследования является процесс изменения жесткости узла рельсового скрепления с промежуточным эластичным слоем в БКП с учётом влияния низких температур

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Усовершенствована математическая модель определения прогиба рельса БКП посредством введения коэффициентов, которые позволяют учитывать воздействие низких температур на изменение жёсткости рельсовых скреплений;

2) Установлены коэффициенты изменения статической и динамической жёсткостей эластичной прокладки узла рельсового скрепления для БКП в зависимости от воздействия низких температур;

3) Определён прогиб рельса БКП серией натуральных испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»;

4) Предложены методы определения статической и динамической жесткостей эластичной прокладки рельсового скрепления для БКП с уточнённым интервалом испытательных нагрузок и учётом влияния низких температур;

5) Сформированы дополнительные требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем БКП для условий проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

Теоретическая значимость работы состоит в уточнении расчётной математической модели определения прогиба рельса БКП коэффициентами, определяемыми полиномиальными функциями, полученными аппроксимацией зависимостей влияния низких температур на статическую и динамическую жёсткость эластичной прокладки рельсового скрепления.

Практическая значимость:

Предложенная математическая модель и результаты экспериментов использованы для:

– формирования предложений по изменению ГОСТ 32698-2014 Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля;

– разработки узла рельсового скрепления (заявки на патент №2022123430, №2022123431 от 01.09.2022).

Результаты данной работы могут быть использованы для:

– формирования требований к упругим характеристикам рельсовых скреплений с учетом влияния низких температур и методам их подтверждения в целях обязательного подтверждения соответствия при сертификации или декларировании;

- выбора наиболее подходящей конструкции безбалластного пути для конкретных условий эксплуатации;
- расчета стоимости жизненного цикла и прогнозирования технического обслуживания безбалластного пути.

Методология и методы исследования.

Поставленные задачи решены на основе анализа выполненных научно-исследовательских работ по данной тематике отечественными и зарубежными учеными, анализа отечественной и зарубежной нормативной базы в области технического регулирования рельсовых скреплений, проведения лабораторных испытаний и натурных экспериментов на действующем опытном участке пути на Экспериментальной кольце АО «ВНИИЖТ», а также математического моделирования, основанного на расчете пути согласно гипотезе Фусса-Винклера.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Уточнение расчётной модели определения упругого прогиба рельса от воздействия подвижного состава на БКП посредством введения коэффициентов, учитывающих влияние низких температур на изменение жесткости эластичной прокладки;
- 2) Коэффициенты соотношения динамической жёсткости к статической жесткости эластичных прокладок с учетом влияния низких температур до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 3) Дополнительные требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений БКП для условий эксплуатации проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» с учетом влияния температур до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$;

Степень достоверности.

Достоверность результатов исследования подтверждается сходимостью результатов математического моделирования с данными, полученными в ходе лабораторных и полигонных испытаний. Результаты лабораторных испытаний подтверждаются аккредитацией испытательного центра, использованием аттестованных методик и поверенных средств измерений.

Апробация результатов.

Результаты исследований использованы в Научно-техническом отчёте об испытаниях безбалластных конструкций пути четырех типов (Tines, Alstom, MaxBögl, LVT). Тема 6.049.РТП "Испытания элементов инфраструктуры для высокоскоростного движения на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ». Договор №1057/14/990 от 04.12.2014 г.

Основные положения и результаты работы были доложены и одобрены на XII международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» посвященной памяти профессора Г.М. Шахунянца (Москва, 1-2 апреля 2015 года); на XIII международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» посвященной памяти профессора Г.М. Шахунянца (Москва, 31 марта – 01 апреля 2016 года); на 14-й научно-практической конференции «Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. Транспортная инфраструктура промышленных предприятий» (Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, Москва, 2019 год); на международной интернет-конференции «Современные проблемы железнодорожного транспорта» (Москва, 21-22 марта 2019 года); на всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-Исследовательского Института Железнодорожного Транспорта «Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта» (Москва, 5 июня 2019 года).

1 РЕЛЬСОВЫЕ СКРЕПЛЕНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

1.1 Классификация рельсовых креплений

Рельсовые крепления работают в непосредственном контакте с рельсом и подрельсовым основанием. Основной задачей рельсовых креплений, с момента их применения в конструкции железнодорожного пути, является сохранение стабильности ширины рельсовой колеи на длительном промежутке времени под обращающимися поездами установленной массы с установленной скоростью [1]. Также рельсовые крепления являются связующим узлом рельсового пути, который передает разночастотную динамическую нагрузку от проходящего подвижного состава на нижние элементы конструкции пути [2]. Каждый узел рельсового крепления должен работать упруго в вертикальном направлении как при перемещении рельса под нагрузкой вниз, так и при его перемещении вверх в пределах обратной волны изгиба рельсов [3]. При этом имеет важное значение удерживающая способность крепления в вертикальном направлении, в частности классического пути на балластном основании, пара узлов рельсовых креплений должна выдерживать собственный вес подрельсового основания (железобетонной шпалы, блоков и т.п.) с учетом сопротивления вырыванию основания из балласта без деформации элементов крепления.

Обеспечение рациональной пространственной упругости рельсовых креплений необходимо для того, чтобы упруго перерабатывать динамические воздействия колес подвижного состава на рельсы, гасить высокочастотные вибрации, расстраивающие путь и особенно его болтовые соединения, а также для того, чтобы создавать равноупругость подрельсового основания [4].

Свойства рельсовых креплений также должны учитывать не только расчетные показатели, учитываемые при проектировании участка пути, но также и негативные воздействия транспортной нагрузки, передаваемой от проходящего

подвижного состава, при неравномерном распределении нагрузки на рельсовые нити при вписывании и прохода кривого участка пути.

Предлагается изменить систему проектирования скреплений [5], так как в настоящее время все немногочисленные усилия в области разработки скреплений направлены в основном на доработку существующих типов скреплений, что не может кардинально изменить ситуацию и создать конкурентоспособную конструкцию на мировом уровне.

Помимо сохранения стабильной ширины рельсовой колеи и передачи вертикальных сил, промежуточные рельсовые скрепления должны обеспечивать достаточное сопротивление продольному перемещению рельса – так называемому «угону пути». Необходимо отметить, что с учетом работы систем сигнализации и связи рельсовые скрепления должны обеспечивать надежную электроизоляцию рельсовых нитей друг от друга. Это необходимо для сведения к минимуму потерь сигналов рельсовых электрических цепей в дождливую и сырую погоду.

Таким образом, можно утверждать, что промежуточные скрепления, выполняя роль связующих элементов между рельсами и основанием, должны обеспечивать [6]:

- стабильность ширины колеи;
- прижатие рельсов к основанию, исключая отрыв и угон рельсов;
- оптимальные условия температурной работы рельсов;
- проведение регулировки положения рельсов по высоте и ширине колеи, замену деталей скреплений без перерывов в движения поездов;
- механизированную сборку и содержание узлов скреплений;
- рациональную пространственную упругость и вибростойкость узлов скреплений;
- электроизоляцию рельсов от основания;
- экономическую эффективность конструкции верхнего строения пути.

Тип и конструктив рельсового скрепления влияет на экономическую составляющую комплекса строительных либо ремонтно-путевых работ, а также последующую эксплуатацию железнодорожного участка [7].

В зависимости от типа подрельсового основания, на котором устанавливаются рельсовые скрепления, а также в зависимости от наличия различных крепежителей и подкладок, рельсовые скрепления в отечественной литературе подразделяют на следующие типы, представленные на Рисунке 1.1.

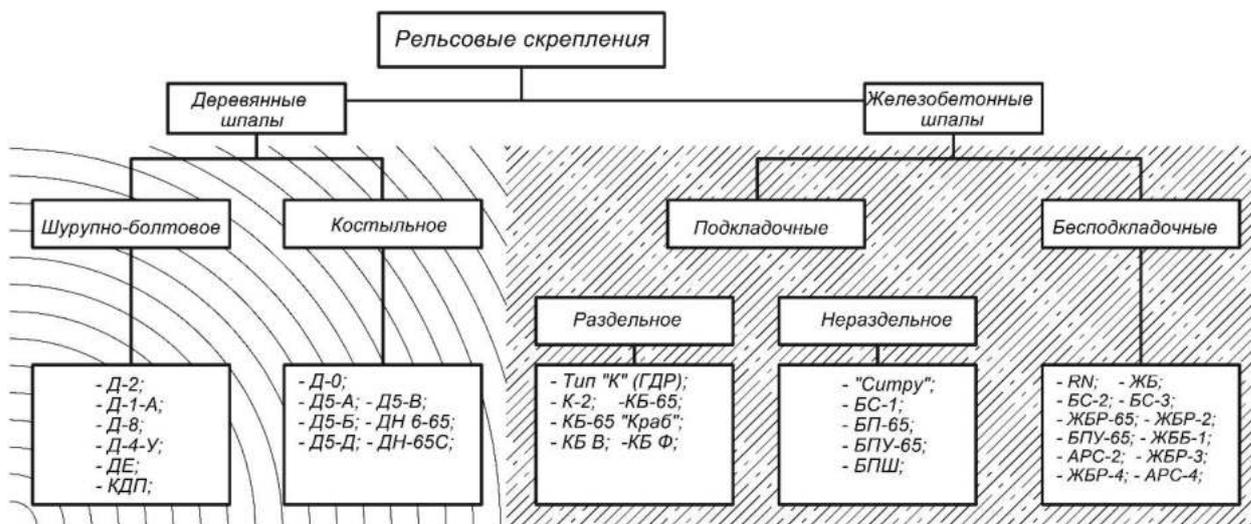


Рисунок 1.1 – Типы рельсовых скреплений в зависимости от подрельсового основания

Также в зависимости от различных физико-механических показателей, таких как способ компенсации угонной силы, наличие подкладки, способа прикрепления рельса к подрельсовому основанию и по виду передачи усилия от крепежителя встречается следующая классификация промежуточных рельсовых скреплений, представленная на Рисунке 1.2.

При всем своём многообразии промежуточные рельсовые скрепления делятся на основные две группы, представленные в Таблице 1.1. Первая группа – это конструкции, которые не создают нажатие на подошву рельса и тем самым не обеспечивают необходимой связи между рельсом и основанием. При использовании данных конструкций рельсовых скреплений необходимо

применение дополнительных элементов, препятствующих продольной сдвиге рельса – противоугонов.

К первой группе креплений относятся типовые жесткие костыльные крепления, а также те крепления, в которых наличие зазора между прикрепителем и подошвой рельса предусмотрено конструктивно.

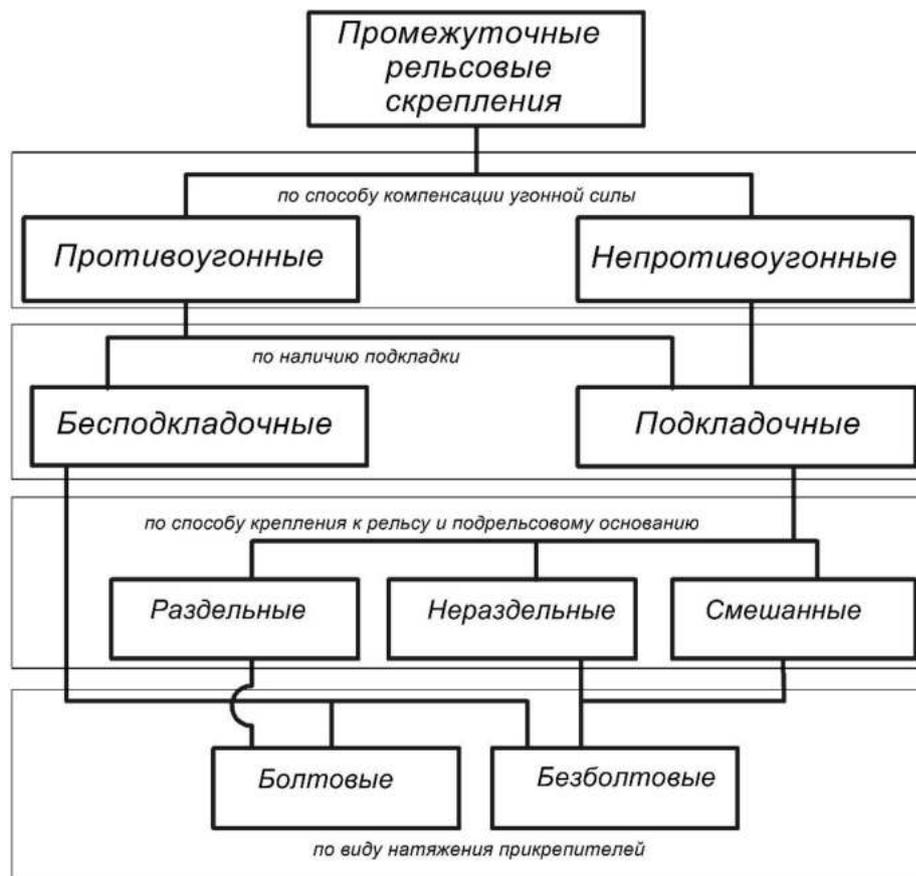


Рисунок 1.2 – Классификация промежуточных рельсовых креплений

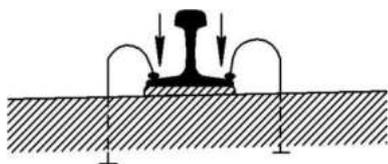
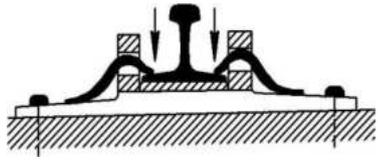
Ко второй группе креплений принадлежат конструкции, у которых с помощью упругих элементов осуществляется постоянное нажатие на подошву рельса. Распространенный вид – нажатие на подошву с помощью двух упругих клемм (от 8 до 20 кН на клемму), что при применении подрельсовых прокладок различной жесткости, позволяет исключить местное проскальзывание подошвы рельса по основанию, при изгибе последнего при движении колес подвижного состава, приводящего к угону пути.

Вторая группа креплений делится на две подгруппы А и Б в зависимости от того, можно или нет регулировать нажатие упругой клеммы на подошву рельса.

Таблица 1.1 – Классификация креплений по В.Г. Альбрехту и А.Я. Когану [8]

Группа креплений	Конструкция промежуточного крепления	Элемент, создающий нажим на подошву рельса	Схема прикрепителя	Типы применяемых конструкций креплений		
<i>Первая группа</i> Отсутствует нажатие на подошву рельса (требуется установка противоугольных приспособлений)	Костыльное с жесткими костылями	–		ДО (Россия, Канада, США), типовое костыльное		
	С ограничительной ребордой (фасонного типа) и штырем	–		«Метро» (Россия)		
	Клеммно-болтовое с укороченными жесткими клеммами (не достигающими до подошвы рельса)	–		КБ-М для металлических мостов (Россия)		
<i>Вторая группа</i> Имеется нажатие на подошву рельса (добавочных противоугольных приспособлений не требуется)	Костыльное с пружинными костылями	«Развитая головка»		DS-18, ES-18, «Рюпинг», «Макбет» (ФРГ, Англия, США)		
		Упругие, одно-, двух-, и трехвитковые шайбы		КБ, Д-2 (Россия), «Фоссло» (ФРГ, Италия)		
	А. Клеммно-болтовые с жесткими клеммами и добавочными упругими элементами	Резиновые прослойки «развитой» формы		«Вайскинг» (США) (для тяжелых условий эксплуатации)		
		Клеммно-болтовое с упругими клеммами: бесподкладочное	Плоские или торсионного действия упругие элементы, прижимаемые к подошве рельса болтовым соединением		ЖБ, ЖБР (Россия), НМ (ФРГ), RN, «Набла» (Франция), Синкансен – тип 702 и др. (Япония); SKL-1 (ФРГ), тип F (Финляндия)	
				подкладочное нераздельное (подкладки прикрепляются вместе с клеммами)		БПУ-65 (Россия); SB-11 (Япония)
				подкладочное раздельное (подкладки прикрепляются отдельно от клемм)		Д-4у (Россия); SKL-2, SKL-3, «Рэда», тип 1043 (ФРГ); тип 8 – Япония

Продолжение таблицы 1.1

Группа креплений	Конструкция промежуточного скрепления	Элемент, создающий нажим на подошву рельса	Схема прикрепителя	Типы применяемых конструкций креплений
	Б. Безболтовые	Упругие элементы, непосредственно прикрепляющие рельс к основанию		«Пендрол» (Англия), «Фист» с плоской клеммой
		Упругие элементы, прикрепляющие рельс к подкладке, которая отдельно крепится к основанию		Д-8 (Россия), «Пендрол» (деревянные шпалы); «Дельта» (ФРГ); «Хайбек» (Англия); «Эвэм» (Голландия и др. страны)

В зарубежных источниках литературы рельсовые скрепления классифицируются по признакам применения их в тех либо иных условиях эксплуатации, а также в зависимости от решения непосредственных задач. В соответствии с требованиями европейских норм, различают следующие категории рельсовых креплений, представленных в Таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Классификация креплений согласно европейских норм [9]

Категория	Назначение
А	Легкий городской и некоторые промышленные пути
В	Легкий городской и некоторые промышленные пути
С	Основные железнодорожные линии
Д	Линии с большими радиусами кривых для ВСМ
Е	Линии смешанного движения, пропускающие тяжеловесные грузовые поезда

Также необходимо выделить классификацию рельсовых креплений в зависимости от применяемого типа подрельсового основания по [9]:

- для деревянных и композитных шпал;
- для железобетонных шпал;
- для металлических шпал;
- для безбалластных конструкций;

- для стрелочных переводов;
- для мобильных (подвижных) точек прикрепления;
- для подкрановых и портовых путей.

В свою очередь, рельсовые скрепления для БВСП разделяются на следующие подкатегории:

- а) для шпальных конструкций;
- б) для блочных конструкций, предварительно изготовленных в заводских условиях;
- в) для плитных конструкций;
- г) для монолитных конструкций с дискретной точкой опирания.

1.2 Рельсовые скрепления на участках смешанного движения в условиях Российских железных дорог

Железнодорожный путь является основой железнодорожного транспорта Российской Федерации и представляет собой сложное комплексное инженерное сооружение, включающее в себя различные элементы. Требование обеспечения надежности железнодорожного пути становится самым важным в условиях роста скоростей движения, осевых и погонных нагрузок, а также массы движения поездов [8, 10, 11].

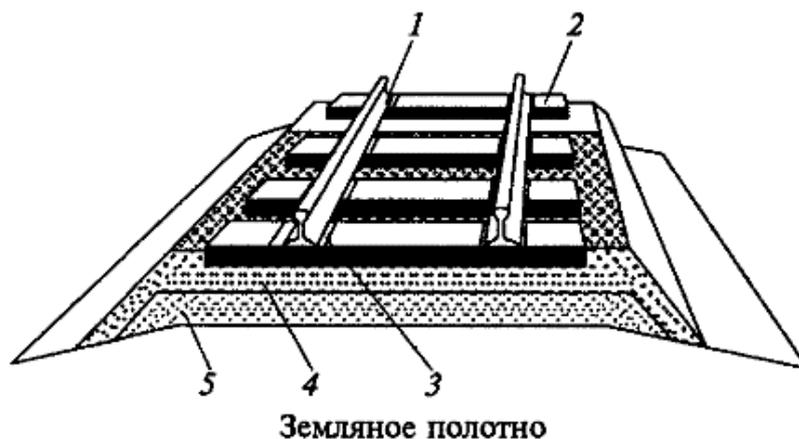
Россия входит в тройку стран мира по развернутой длине магистральных железнодорожных линий, уступая по этому показателю только США [12]. Для обеспечения бесперебойной и безотказной работы пути необходимо применять в конструкции верхнего строения пути материалы, соответствующие всем предъявляемым требованиям. Очевидно, что надежность железнодорожного пути будет определяться прочностью рельсов, рельсовых скреплений, шпал и прочностью несущего слоя подрельсового основания, состоящего из балластного слоя и земляного полотна [13, 14].

В практике ведения путевого хозяйства приходится постоянно решать задачи, относящиеся к области теории надежности. Среди них можно назвать такие, как определение межремонтных сроков с учетом влияния на них различных факторов (нагрузка на ось, скорости движения поездов, и т.п.), определение периодичности контроля состояния рельсов, рельсовых скрепления и т.д. посредством визуального контроля, средств дефектоскопии и устройств комбинированной оценки состояния пути [15, 16].

Принципиальной основой ведения путевого хозяйства является не ликвидация отказов элементов пути, а их предупреждение, т.е. выполнение профилактических работ в установленные сроки. Исходя из этого, основными показателями надежности элементов верхнего строения пути будут показатели надежности невосстанавливаемых объектов, работающих до первого отказа (например, упругие клеммы) [17].

За прошедшее десятилетие, посредством модернизации производственных мощностей предприятий, выпускающих элементы верхнего строения пути, а также применения современных как отечественных, так и зарубежных разработок удалось приспособить конструкцию пути к возрастающим скоростям и осевым нагрузкам [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24].

Основной конструкцией пути, применяемой на сети железных дорог ОАО «РЖД» является классический путь со шпалами на щебеночном балласте (Рисунок 1.3).



Элементы верхнего строения пути:

1 — рельс; *2* — шпала; *3* — промежуточное рельсовое скрепление; *4* — щебеночный балласт; *5* — песчаная подушка

Рисунок 1.3 – Схематическое изображение пути на щебеночном балласте

Как известно, путь на щебеночном балласте требует проведения через определенные промежутки времени работ по текущему содержанию, в основном связанному с выправочно-подбивочными работами [25]. На качество пути влияет, прежде всего, осадка балластного слоя. Как уже отмечалось, в результате воздействия вертикальных нагрузок от качения подвижного состава, особенно в начальный период эксплуатации пути, происходят значительные перемещения частиц щебня и их обкалывание, приводящие к относительно большой осадке балласта. В этой связи к щебеночному балласту предъявляется ряд особых требований, в частности на качество балласта большое влияние оказывает наличие загрязнений. Один из наиболее опасных загрязнителей – мелкие фракции, образующиеся в результате истирания частиц щебня [26, 27, 28, 29, 30]. Немаловажным фактором, влияющим на работу щебеночного слоя, является площадь контакта между шпалой и щебеночным слоем. Доказано, что чем больше площадь опирания шпалы на частицы балластного слоя, тем меньшие деформации возникают в балластном слое [31, 32, 33]. Если рассматривать балластный слой (Рисунок 1.4) в ракурсе его прочности, то необходимо отметить, что имеются только оценочные критерии [34, 35]. Эти критерии являются

достаточно осредненными величинами и не учитывают разнообразия условий, в которых работает балластная призма (влажность балластного слоя, прочностные свойства, геометрия конструкции).

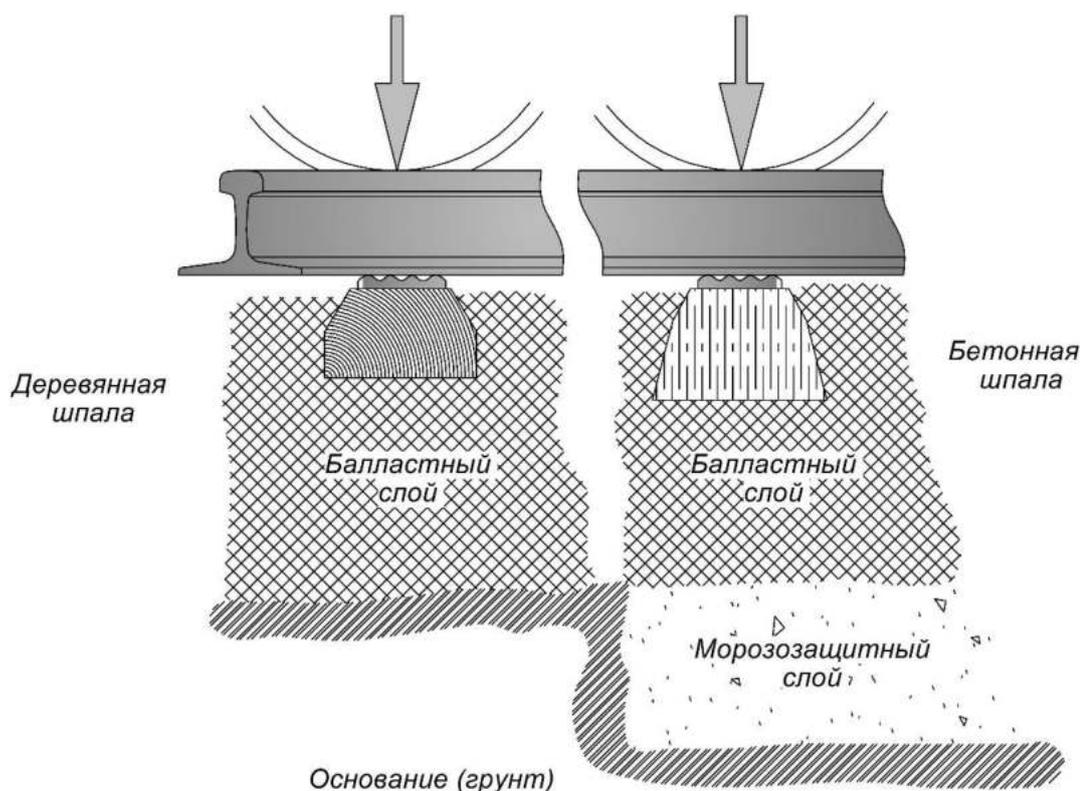


Рисунок 1.4 – Структура пути на щебеночном балласте

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что на пути с железобетонными шпалами динамические силы и соответствующие им вибрации увеличились. При современных конструкциях промежуточных рельсовых скреплений путь с железобетонными шпалами обладает жесткостью в несколько раз большей, чем путь с деревянными шпалами [36, 37, 38]. Также установлено, что расстройств пути на железобетонных шпалах накапливаются интенсивнее, чем в пути с деревянными шпалами, особенно при наличии неровностей на рельсах. Также на данный показатель влияют внутренние напряжения крепежителей [39].

Известно, что прочность железнодорожного пути оценивается, прежде всего, его жесткостью: чем выше жесткость, тем более прочный путь [40]. Таким образом под жесткостью пути понимается отношение силы P к упругому прогибу

y_0 под силой в направлении действия силы [41]. Средние процентные показатели несущих элементов пути в общей упругости балластного пути с деревянными и железобетонными шпалами изображены на Рисунок 1.5 [2].

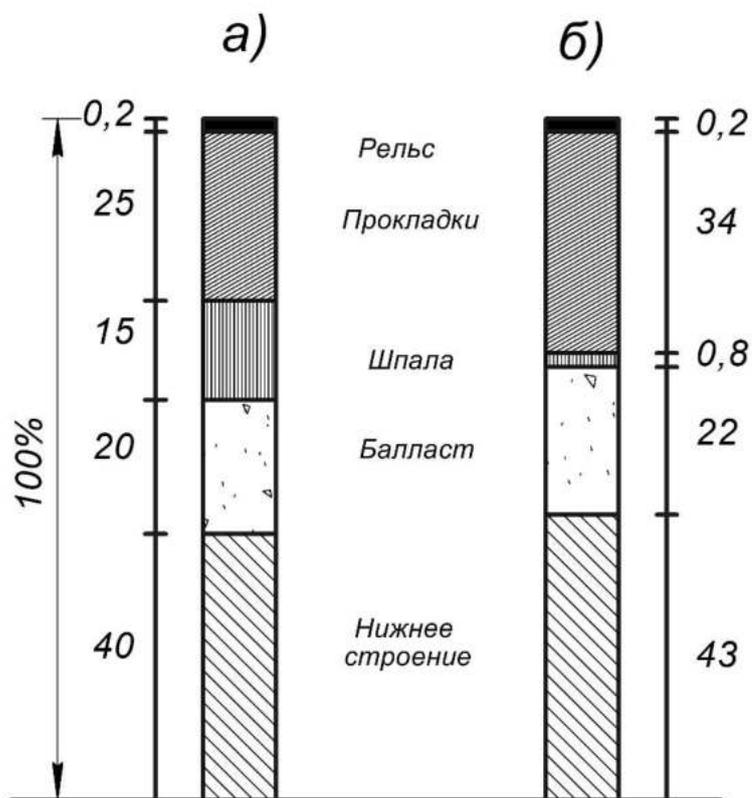


Рисунок 1.5 – Средние процентные составляющие несущих элементов верхнего строения в общей упругости пути: а – деревянные шпалы; б – железобетонные шпалы

Исходя из Рисунка 1.5 видно, что в конструкции пути на железобетонных шпалах основные упругие характеристики достигаются за счет применения в узле рельсового крепления упругих подрельсовых прокладок.

Для того чтобы упруго перерабатывать динамические воздействия колес подвижного состава на рельсы, гасить высокочастотные вибрации, расстраивающие путь и особенно его болтовые соединения, а также для того, чтобы создавать равноупругость подрельсового основания необходимо обеспечить требуемую для конкретных условий эксплуатации пространственную упругость рельсовых креплений [4].

Существует позиция, что в конструкции «связи рельс-шпала» ключевым элементом является подрельсовая прокладка, которая обеспечивает в балластном

пути на железобетонных шпалах упругость конструкции в диапазоне до 40 %. Одновременно подрельсовые прокладки являются лимитирующим элементом в конструкции промежуточных скреплений, от служебных свойств которого в значительной степени зависит уровень надежности бесстыкового пути и затраты на его содержание и ремонт [42, 43, 44, 45, 46, 47, 48].

Подрельсовая прокладка-амортизатор на Забайкальской или Восточно-Сибирской дорогах – это единственный элемент пути, который должен в течение шести-семи «зимних» месяцев облегчать взаимодействие колеса и рельса, так как смерзшиеся балласт и земляное полотно практически несжимаемы. То есть эта прокладка должна быть не только морозостойкой, но и достаточно упругой во время продолжительной работы при низких температурах. А вот требования к прокладке для Северо-Кавказской дороги необходимы другие. Предварительный анализ, проведенный ВНИИЖТом, свидетельствует, что выход рельсов за 6 месяцев, в течение которых путь находится в смерзшемся состоянии (ноябрь-апрель), на Забайкальской и Восточно-Сибирской магистралях почти в два раза больше в сравнении с шестью «летними» месяцами (май-октябрь). Несомненно, что на это существенно влияет повышенная жесткость пути зимой [49].

Одним из основных направлений повышения надежности и эффективности железнодорожного пути является расширение сферы применения бесстыкового пути. В процессе эксплуатации возникают как физико-механические, так и технологические отказы, снижающие эффективность конструкции пути. При этом ряд отказов имеет специфический характер, определяемый особенностями бесстыкового пути и условиями эксплуатации [50, 51, 52].

В настоящее время на сети железных дорог ОАО «РЖД» эксплуатируется две основных конструкции пути: звеньевой путь протяженностью 33,8 тыс. км (27,1% от суммарной длины главных путей) и бесстыковой путь температурно-напряженного типа - 91 тыс. км (72,9%) [53]. Основной задачей, стоящей перед руководством ОАО «РЖД», является увеличение протяженности бесстыкового пути (Рисунок 1.6), с целью повышения веса и длины грузовых поездов. Известно, что прирост объема перевозок на железнодорожном транспорте может быть

освоен путем увеличения размеров движения и массы поездов. Первый способ сводится преимущественно к усилению пропускной способности действующих линий, а также строительству новых. Второй способ предусматривает повышение массы поездов, реализуемое на основе усиления тяги, удлинения станционных путей и увеличения погонной нагрузки вагонов.

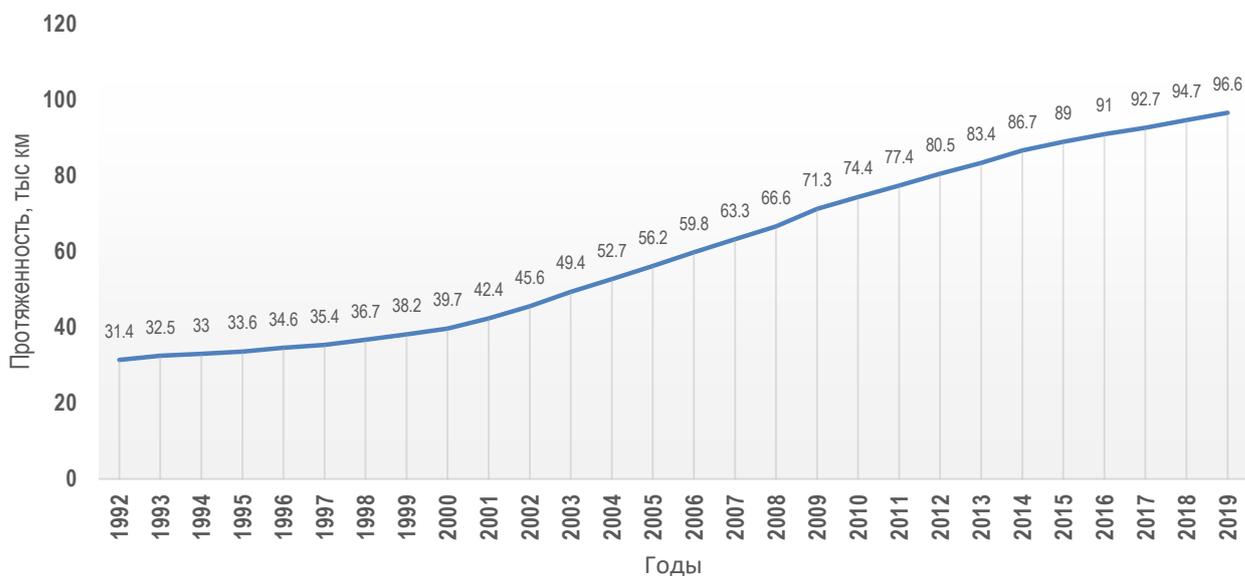


Рисунок 1.6 – Увеличение полигона укладки бесстыкового пути в период 1992-2019 г.г.

Для целей эксплуатационных наблюдений и сравнительного анализа на Куйбышевской железной дороге на участке с высокой грузонапряженностью 156 млн.т.бр/км в год в рамках проведения сравнительных эксплуатационных испытаний уложены различные современные конструкции верхнего строения пути с новыми рельсами и рельсовыми скреплениями с пружинными клеммами со сроком эксплуатации до 1500 млрд. т брутто пропущенного груза, результаты эксплуатации которой уже подтверждают возможность применения принятых технических решений для обеспечения движения тяжеловесных поездов [54].

В настоящее время на сети железных дорог ОАО «РЖД» в конструкции звеньев и бесстыкового пути, при проведении ремонтных работ, применяются следующие основные конструкции рельсовых скреплений: ЖБР-65Ш (Рисунок 1.7) с боковым полимерным упором (Рисунок 1.8), ЖБР-65ПШМ

(Рисунок 1.9), ЖБР-65ПШР (Рисунок 1.10), АРС-4 (Рисунок 1.11), Фоссло W30 (Рисунок 1.12), Пандрол-350 (Рисунок 1.13), которое является адаптированной версией скрепления Pandrol Fastclip под требования ОАО «РЖД» [55].

В соответствии с [56] начиная с 2012 года на сети железных дорог ОАО «РЖД» при проведении реконструкции железнодорожного пути производится замена рельсошпальной решетки на новую с применением прогрессивных конструкций пути. Что означает применение в конструкции пути только упругих рельсовых скреплений. Технические характеристики рельсовых скреплений представлены в Таблице 1.3.

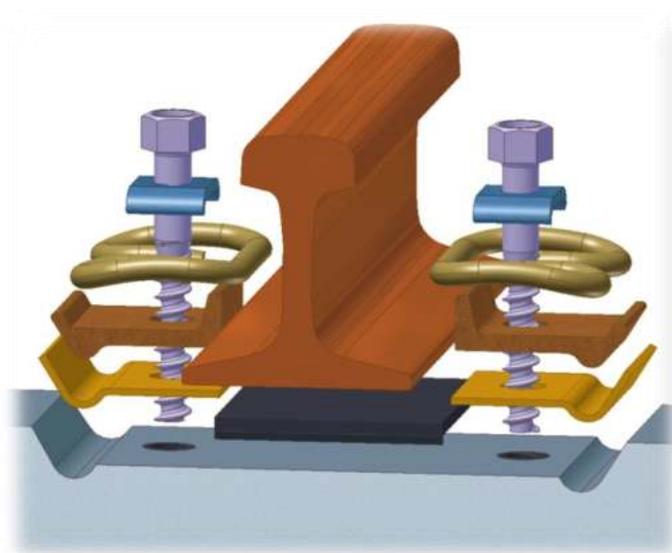


Рисунок 1.7 – Рельсовое скрепление типа ЖБР-65Ш

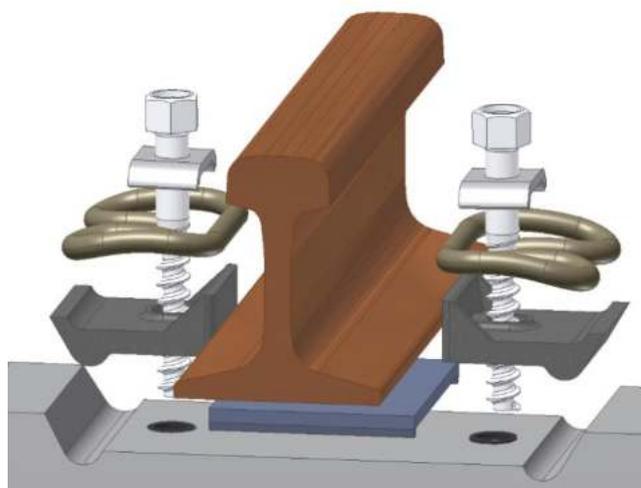


Рисунок 1.8 – Рельсовое скрепление типа ЖБР-65Ш (с боковым полимерным упором)



Рисунок 1.9 – Рельсовое крепление типа ЖБР-65ПШМ

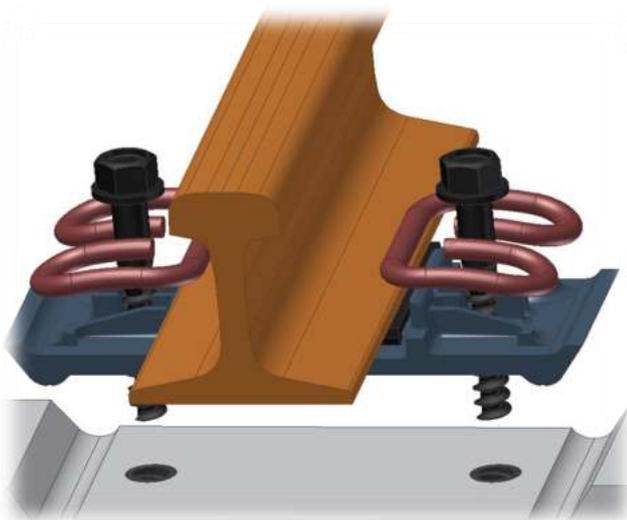


Рисунок 1.10 – Рельсовое крепление типа ЖБР-65ПШР

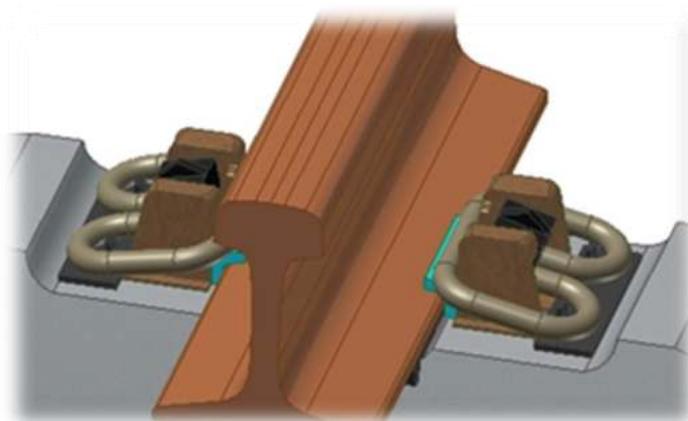


Рисунок 1.11 – Рельсовое крепление типа АРС-4

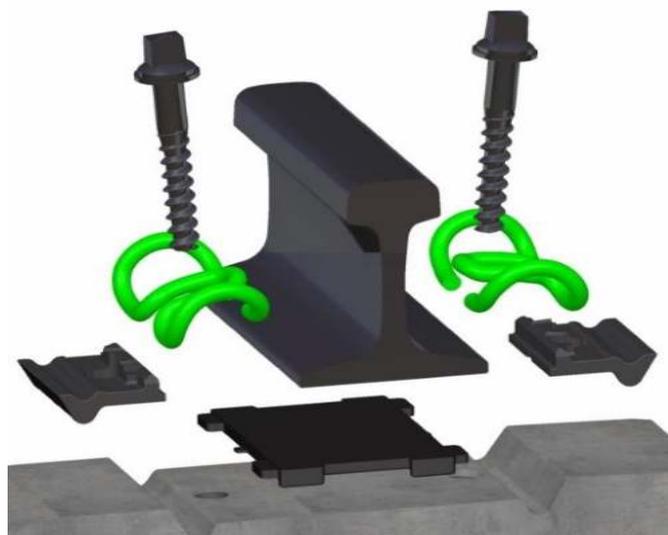


Рисунок 1.12 – Рельсовое крепление W30

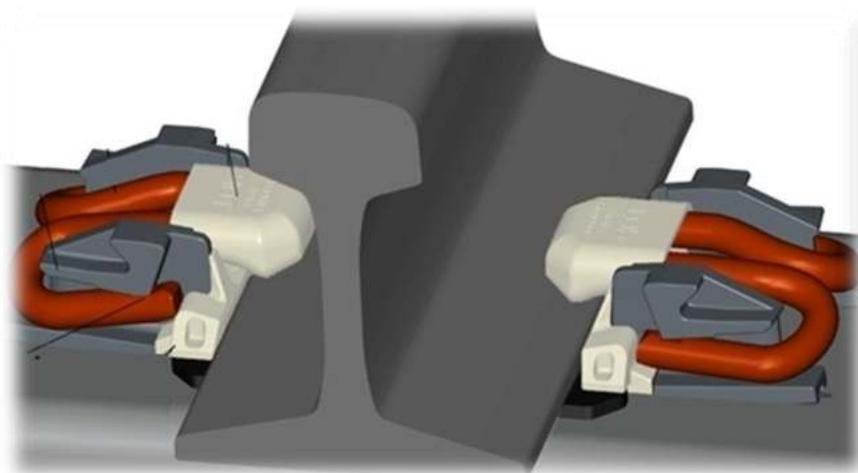


Рисунок 1.13 – Рельсовое крепление Пандрол-350 (Pandrol Fastclip)

Таблица 1.3 – Характеристики рельсовых креплений на сети ОАО "РЖД"

Тип крепления	Количество элементов в узле крепления, шт.	Масса узла в креплении, кг	Металлоемкость узла, кг	Масса одной шпалы со креплением, кг
КБ-65	23	12,94	11,3	294,8
ЖБР-65ПШМ	14	11,15	10,15	289,92
ЖБР-65Ш (скоба упорная)	13	7,28	6,36	284,24
ЖБР-65Ш (упор боковой полимерный)	11	4,46	3,62	278,92
ЖБР-65ПШР	12	5,12	3,3	278,8
АРС-4	10	8,4	7,7	284,1
W-30	9	3,47	2,72	286,82
Пандрол-350	9	4,64	4,14	283,34

По согласованию с Управлением пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» допускается применение рельсового скрепления КБ-65 (Рисунок 1.14). Внедрение данного типа рельсового скрепления в серийное производство его элементов началось в 1960-х годах. Основным аргументом в пользу использования данного типа скрепления было наличие в конструкции металлической подкладки, позволяющей надежно обеспечивать стабильность ширины рельсовой колеи. Научно обоснованных требований к конструкции рельсовых скреплений для железобетонных шпал не существовало. По этой причине серийная конструкция скрепления постоянно подвергалась изменениям и доработкам по факту опытной эксплуатации и исследований [57].

Необходимо отметить, что данный тип рельсовых скреплений и по настоящее время остаётся наиболее распространённой конструкцией на сети железных дорог стран СНГ. Одним из направлений деятельности железных дорог является работа по усилению конструкции ВСП с целью повышения стабильности и устойчивости конструкции пути под воздействием повышенных осевых нагрузок либо особонагруженных участков пути [54]. Таким образом, производится поэтапное усиление ВСП, с целью увеличения межремонтного ресурса для достижения наработки тоннажа до 2,5 млрд. тонн брутто пропущенного груза [58]. В этой связи, в настоящее время происходит увеличение полигона укладок упругих бесподкладочных рельсовых скреплений, что связано также со сферами применения рельсовых скреплений.

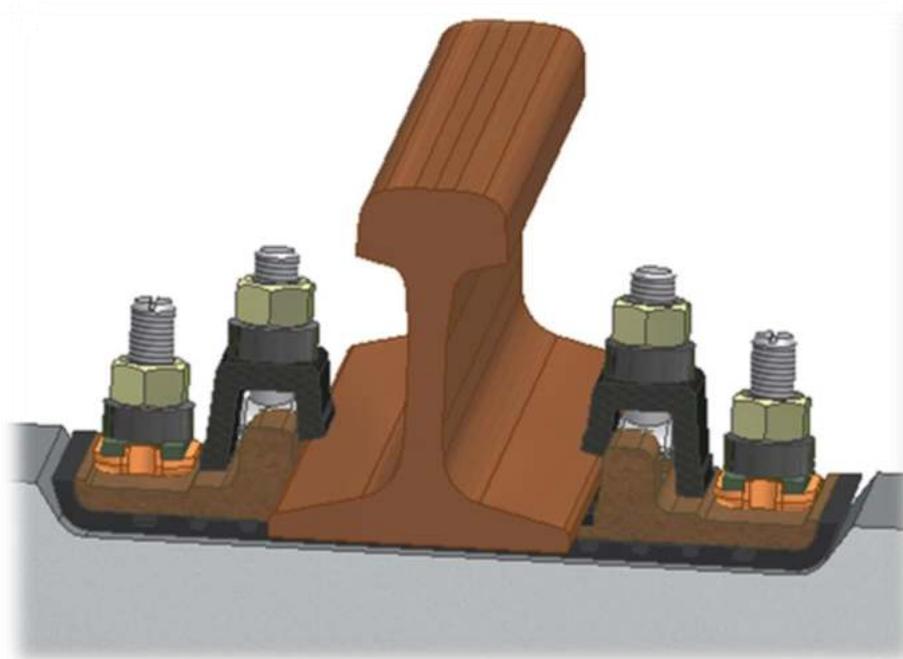


Рисунок 1.14 – Рельсовое крепление типа КБ-65

Также на сети железных дорог АО «НК «Казахстан Темир Жолы», Белорусской железной дороги, АО «Украинская железная дорога» и АО «Узбекистон темир йуллари» применяются и такие типы рельсовых креплений как СБ-3 (или КПП-5) (Рисунок 1.15), Pandrol Fastclip (Рисунок 1.13), Pandrol Fastclip FE (Рисунок 1.16), шурупно-дюбельное рельсовое крепление W14 (конструкция аналогична W30 - Рисунок 1.12) и KZF-07. Таким образом, наблюдается переход железных дорог на бесподкладочных типы рельсовых креплений с упругим клеммами.

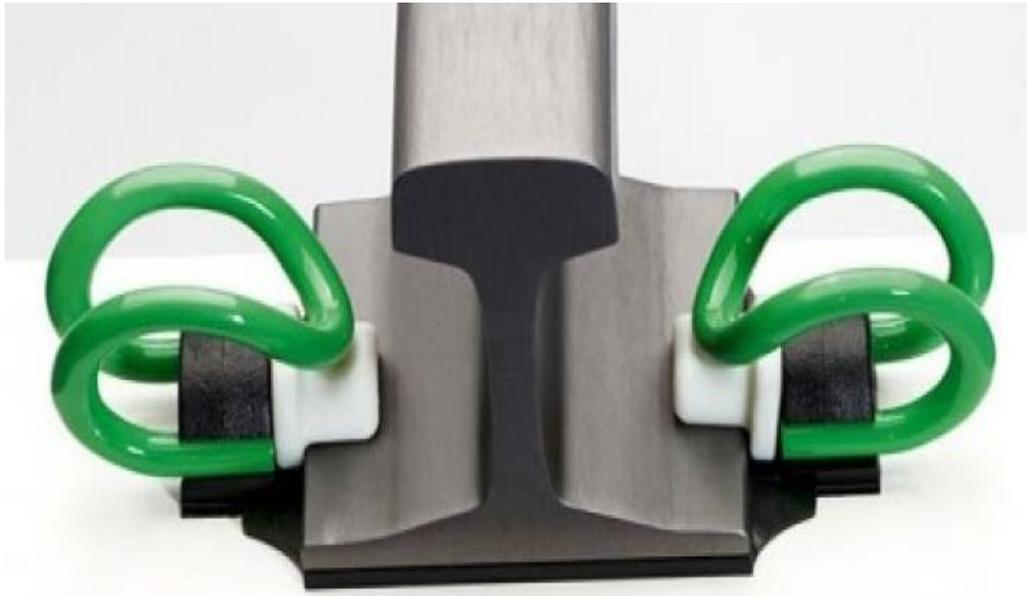


Рисунок 1.15 – Рельсовое крепление типа СБ-3 (КПП-5).

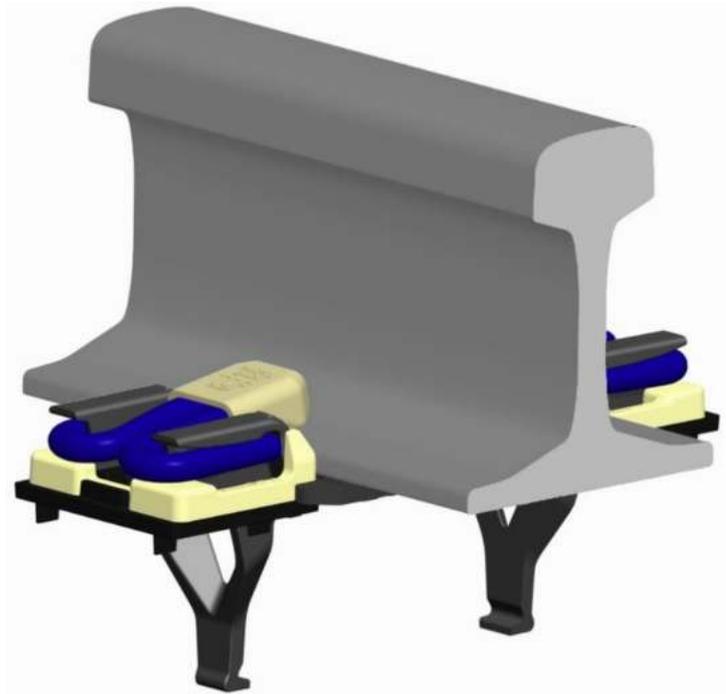


Рисунок 1.16 – Рельсовое крепление Pandrol Fastclip FE.

Основным показателем стабильной работы рельсовых креплений, который характеризует стабильность ширины рельсовой колеи, а также сопротивление так называемому «угону пути» - является сила усилия прижатия упругих клемм рельса к подрельсовому основанию.

Для этих целей, под руководством доктора технических наук Финк В.К, на заводе по выпуску железобетонных шпал ТОО «Магнетик» в г. Капчагай, был

разработан специальный прибор «Күш-20кН» (Рисунок 1.17) со специальными захватывающими приспособлениями. Данный прибор предназначен для определения фактического усилия прижатия упругими клеммами рельса к подрельсовому основанию в различных узлах промежуточных рельсовых скреплений.

В Таблице 1.4 представлены результаты испытаний по определению усилия прижатия упругих клемм в узлах рельсовых скреплений, применяемых на сети железных дорог Казахстана.



Рисунок 1.17 – Универсальный прибор для измерения усилия прижатия упругих клемм «Күш-20кН»

Таблица 1.4 – Усилие прижатия одиночных клемм в узлах рельсовых скреплений

№ п/п	Тип скрепления	Клемма	Диаметр прутка клеммы, мм	Заявленное усилие прижатия, кН	Фактическое усилие прижатия, кН
1	W 14	Sk1 14	13	10,0-12,5	11,2
2	КПП-5 (СБ-3)	КП-5.2	16	11,6-13,6	13,2
3	ЖБР-65	ЦП 369.102	17	10,2-13,4	13,6
4	Pandrol Fastclip	FC 1501	15	10,0-12,5	9,8
5	KZF-07	ОП 105	13	10,0-11,0	10,6

Значения вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости промежуточных рельсовых скреплений должны рассматриваться комплексно, т.к. установление оптимальной величины вертикальной статической и динамической

жесткости узла скрепления для определённых условий эксплуатации, а также оптимального соотношения жесткости подрельсовых прокладок и пружинных клемм, влияет на интенсивность образования и развития контактно-усталостных повреждений рельсов [59].

Одной из проблем перевозочного процесса является ограничение скорости движения поездов в условиях низких температур и многолетнемерзлых грунтов. Со стороны ОАО «РЖД» инициирована работа по созданию Центра низких температур с целью объединения компетенций всех отраслевых НИИ, ВУЗов и иных организаций. Направления деятельности данного центра предполагают оценку и исследования в области всех стадий жизненного цикла инфраструктуры и полностью совпадают с проблематикой Северного широтного хода [60].

1.3 Рельсовые скрепления на участках скоростного и высокоскоростного движения

Мировой опыт развития скоростного и высокоскоростного движения показывает необходимость применения в конструкции пути современных технических решений, обеспечивающих стабильность железнодорожного пути, необходимого для организации движения поездов на скоростях свыше 250 км/ч, а последнее десятилетие показывает необходимость организации движения на скоростях свыше 300 км/ч [61, 62, 63, 64]. С начала 21-го века прослеживается тенденция медленного, но уверенного перехода в конструкции железнодорожного пути к плитному основанию. Трендом в данной области является строительство ВСМ и специализированных пассажирских линий с применением безбалластных конструкций верхнего строения пути (далее – БВСП) [65, 66, 67]. Однако единого мнения по поводу бесспорных преимуществ такого пути еще нет [68]. В частности, китайский опыт строительства предусматривает строительство ВСМ преимущественно на эстакадах [69]. Таким образом, обеспечивается отсутствие

пересечений в одном уровне с магистральными железнодорожными линиями, автомобильными и прочими дорогами, а также труднодоступность для вандалов и диких животных. Данный опыт широко применяется в КНР, которая является мировым лидером по развитию ВСМ. По состоянию на декабрь 2018 года общая протяженность линий ВСМ превысила 20 000 км пути [70]. Вопрос о целесообразности широкого применения безбалластного пути для условий эксплуатации на территории Российской Федерации, в том числе для грузового движения, остается открытым [71, 72, 73, 74].

Также имеются различные трактования самого понятия – безбалластный путь. В зарубежных источниках литературы [75, 76, 77] безбалластный путь трактуется как путь, уложенный на непрерывно замоноличенное железобетонное либо асфальтированное основание, не имеющее в поддерживающем слое щебеночного балласта. Оба несущих слоя (монолитный либо асфальтный) укладываются на гидравлически связанный слой из тощего бетона [78, 79]. Следовательно, принимая во внимание тот факт, что в мировой практике известно более трех десятков различных конструкций безбалластного пути [65, 80], имеющих свои существенные различия, то можно утверждать, что безбалластная конструкция пути – это конструкция рельсового пути, в верхнем строении которой отсутствует щебеночный балластный слой.

Это сравнение действительно для безбалластных конструкций пути на земляном основании, так и для конструкций БВСП на эстакадах. Необходимо отметить, что при проектировании и строительстве БВСП на эстакадах, имеются конструктивные отличия от проектирования и строительства БВСП на земляном основании [81, 82].

В Таблице 1.5 показаны конструктивные различия верхнего строения пути и нижнего строения пути типовых конструкций балластного и безбалластного пути, сооруженных на земляном основании.

В рамках реализации Программы организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации до 2030 года предусмотрена реализация 20-ти проектов, что позволит организовать

более 50 скоростных маршрутов общей протяженностью более 7 тыс. км. Главные перспективные проекты ВСМ в России это линии Москва — Санкт-Петербург, Москва — Казань — Екатеринбург с подключением Уфы и Челябинска, и Москва — Сочи [83].

Для выполнения Стратегии развития транспорта в Российской Федерации, в частности развития высокоскоростного движения поездов, центральному аппарату ОАО «РЖД» предстоит определиться с конкретной конструкцией безбалластного пути и, соответственно, с типом рельсовых скреплений, от которых будет зависеть надежность и безопасность движения поездов.

Таблица 1.5 – Элементы балластной и безбалластной конструкций пути на земляном основании [84]

	Балластный путь	Безбалластный путь
Верхнее строение пути	– Рельсы.	– Рельсы.
	– Рельсовые скрепления.	– Рельсовые скрепления.
	– Рельсовая опора (шпала): – Стандартного поперечного сечения; – Инновационные решения в виде рам либо лежня в форме лестницы-стремянки.	– Рельсовая опора: – Дискретная на полушпале или точка опирания; – Опора непрерывного опирания: замоноличенный или зажатый рельс.
	– Балласт	– Бетонный или асфальтный поддерживающий (опорный) слой. – Гидравлически связанный слой.
Нижнее строение пути	– Верхний несвязанный опорный слой, возможно морозозащитный слой.	– Верхний несвязанный опорный слой: морозозащитный слой.
	– Нижний несвязанный опорный слой: производятся земляные работы с послойным уплотнением либо улучшаются качества насыпи или выемки.	– Нижний несвязанный опорный слой: производятся земляные работы с послойным уплотнением либо улучшаются качества насыпи или выемки.
	– Возможно уплотненное основание земляного полотна.	– Возможно уплотненное основание земляного полотна.

Обсуждаемый ранее проект ВСМ Москва – Казань [85] предусматривал строительство выделенной линии как на балласте, так и в безбалластном исполнении. Процентное соотношение 30 % и 70% соответственно. Для этих целей на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» организованы испытания четырех безбалластных конструкций пути LVT (РЖДстрой Россия), FFB (MaxBögl Германия), NBT Appitrack (Alstom Франция), EBS (Tines Польша) [86,

87, 88, 89]. Также в целях практического подтверждения и сравнения результатов испытаний с другими безбалластными конструкциями, компания «Эр Юань» совместно с АО «РЖДстрой» запланировала проведение полигонных испытаний запроектированной конструкции – CRTS III RUS на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ». В конце 2019 года был сдан в опытную эксплуатацию участок опытной конструкции пути «Временный железнодорожный путь безбалластной конструкции верхнего строения пути на участке 3-го пути (необщего пользования) Экспериментального кольца ст. Щербинка Московской железной дороги» [90].

Необходимо отметить, что в зависимости от особенностей технологии монтажно-строительных работ, а также учитывая дискретные точки опирания рельсов, связанные с многообразием безбалластных конструкций пути [84], БВСП можно классифицировать на несколько групп [81]. Данные конструкции безбалластного пути относятся по классификатору к следующим группам, указанным на Рисунке 1.18.

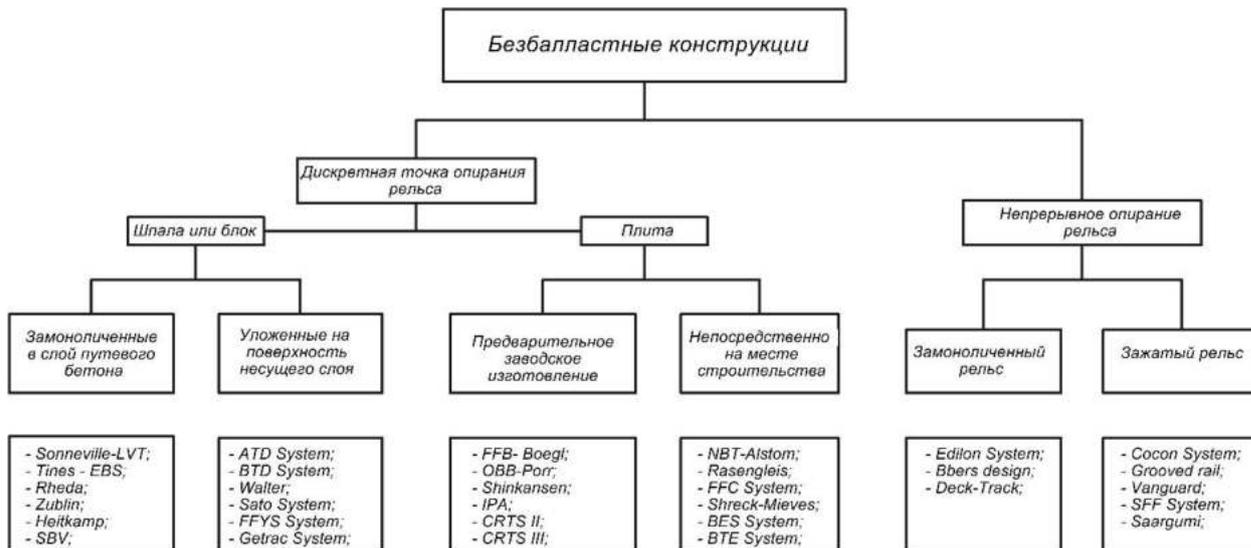


Рисунок 1.18 – Классификация безбалластных конструкций

1.4 Рельсовые крепления для БКП

В современных БКП (Рисунок 1.19) или пути на сплошном монолитном основании к верхнему строению относится бетонная плита или непрерывно армированный бетонный слой, являющееся аналогом жёсткого дорожного полотна. Бетонная плита опирается на многослойную подушку: бетонный опорный слой и под ней слой защиты от замерзания, затем фундамент или подготовленное основание. Эти три слоя под бетонной плитой и составляют опорную конструкцию пути на сплошном основании, причем необходимо отметить, что, как и в балластном пути, модуль упругости каждого последующего слоя уменьшается. Путь на сплошном основании обычно используется на высокоскоростных линиях ($V > 200$ км/ч) смешанного пассажирского и грузового сообщения с максимальной нагрузкой на ось 22,5 т.

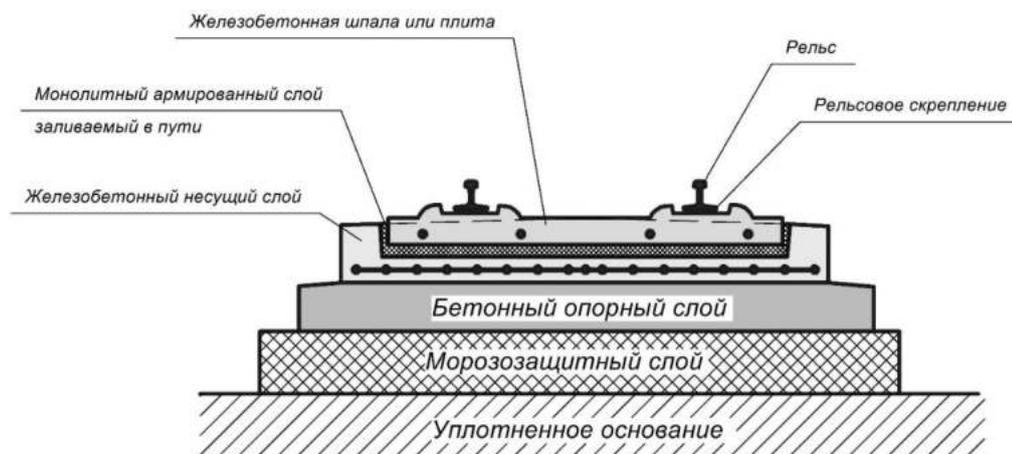


Рисунок 1.19 – Схематическое изображение БВСП

Другим типом безбалластного пути является утопленный путь, который похож на путь на сплошном основании и обычно используется на терминальных портовых станциях и в объектах технического обслуживания железнодорожных транспортных средств, чтобы минимизировать потребности в обслуживании пути. В этих случаях необходимо заменить балластный слой бетонным полом по функциональным причинам (например, если производится мойка транспортных средств и стекают сточные воды и масла, обустроены ремонтные ямы между двумя рельсами, по путям производится движение дорожных транспортных

средств, перемещения грузов и т. д.). Основным отличием от пути на сплошном монолитном основании является низкая скорость движения поездов и, следовательно, низкие динамические нагрузки. В обоих типах вышеуказанных безбалластных путей бетонная плита выполняет роль балластного и несущего слоев.

Эксплуатация участков пути на сплошном монолитном основании, помимо правильного расчета коэффициента жесткости на участках пути основных конструкций пути, требует обустройства переходных участков пути. Переходные зоны соединяют основную конструкцию безбалластного пути и классического балластного, где происходит значительное и резкое изменение жесткости. Переходные зоны гарантируют плавный переход жесткости между путями на сплошном основании и балластным слоем, что приводит к плавному изменению сил, действующих на путь.

В этой связи очень важным фактором становится правильный расчет нагрузок при проектировании несущего слоя безбалластной конструкции пути, также как и при его дальнейшей эксплуатации. Величина данной нагрузки в основном зависит от коэффициента жесткости пути. Однако в зарубежных публикациях отсутствуют данные о корреляции величины нагрузки на несущую конструкцию пути и коэффициента жесткости пути высокоскоростных линий в процессе эксплуатации.

В зарубежных методиках ключевую роль в распределении нагрузок играет коэффициент общей статической жесткости железнодорожного пути ρ_{total} , который зависит от жесткости отдельно взятого слоя ρ_i и скорости движения подвижного состава v . Этот коэффициент представлен как:

$$\frac{1}{\rho_{total}} = \sum_{i=1}^v \frac{1}{\rho_i}, \quad (1.1)$$

где i – каждый отдельный слой многослойной конструкции, которая представляет собой путь, согласно Рисунку 1.20.

Из-за случайного характера возникновения динамических нагрузок вероятностный подход больше подходит для расчета нагрузок, действующих на

каждую точку вдоль пути, итоговых воздействий на каждую шпалу, а также напряжений и деформаций на разных слоях пути. Согласно этому подходу увеличение среднего значения вертикальной нагрузки на колесо оценивается для статистически желаемого уровня безопасности.

Мировой опыт эксплуатации ВСМ показал надёжность плитных конструкций БВСП при работе на эстакадах и мостовых пролётах. Ранее широко обсуждаемый проект ВСМ Москва – Казань предусматривал в основе именно плитную конструкцию БВСП, предлагаемую нашими китайскими партнёрами – CRTS III RUS [85], которая является адаптированной под Российские условия эксплуатации китайской конструкции БВСП – CRTS III. В свою очередь, данный конструктив пути получил своё развитие от предшествующей конструкции CRTS II, за основу которой была взята плитная конструкция FFB немецкой компании Max Bögl [92]. В конструкции пути FFB применяются узлы рельсового скрепления System 300 (Рисунок 1.21), а в конструкции пути CRTS III применяется упругое шурупно-дюбельное рельсовое скрепление WJ-8C (Рисунок 1.22). За основу разработки скрепления WJ-8C взят конструктив упругого шурупно-дюбельного рельсового скрепления System 300.

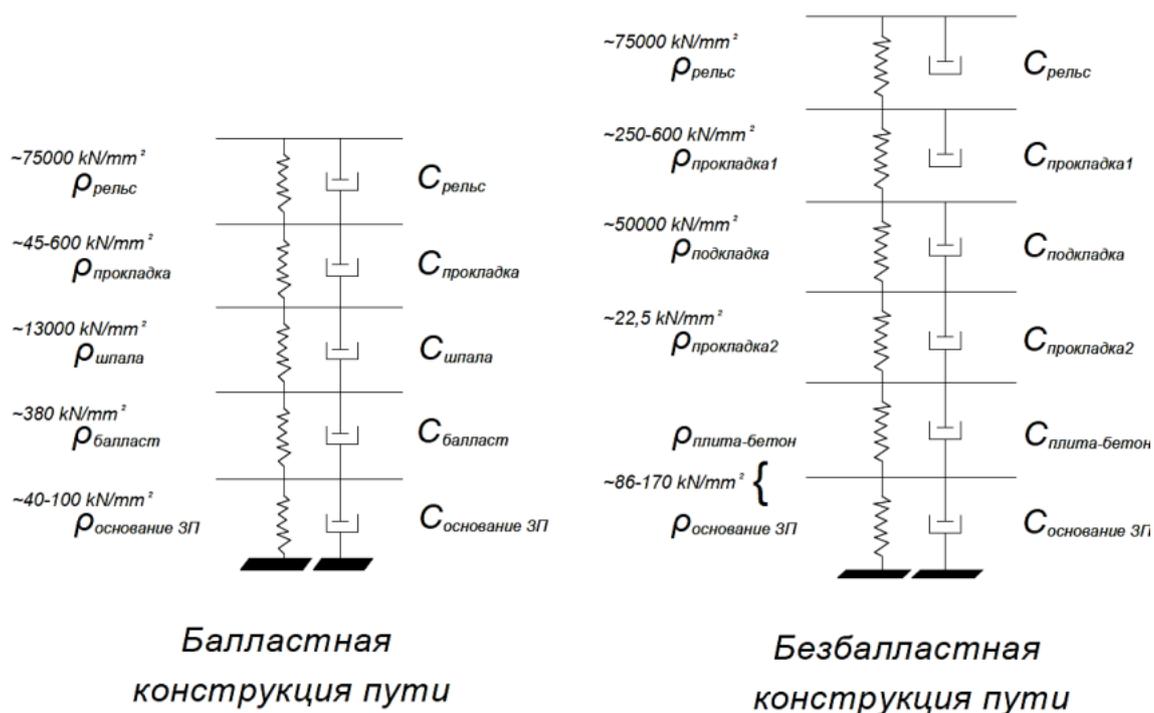


Рисунок 1.20 – Схема конструкции пути как системы пружин и демпферов

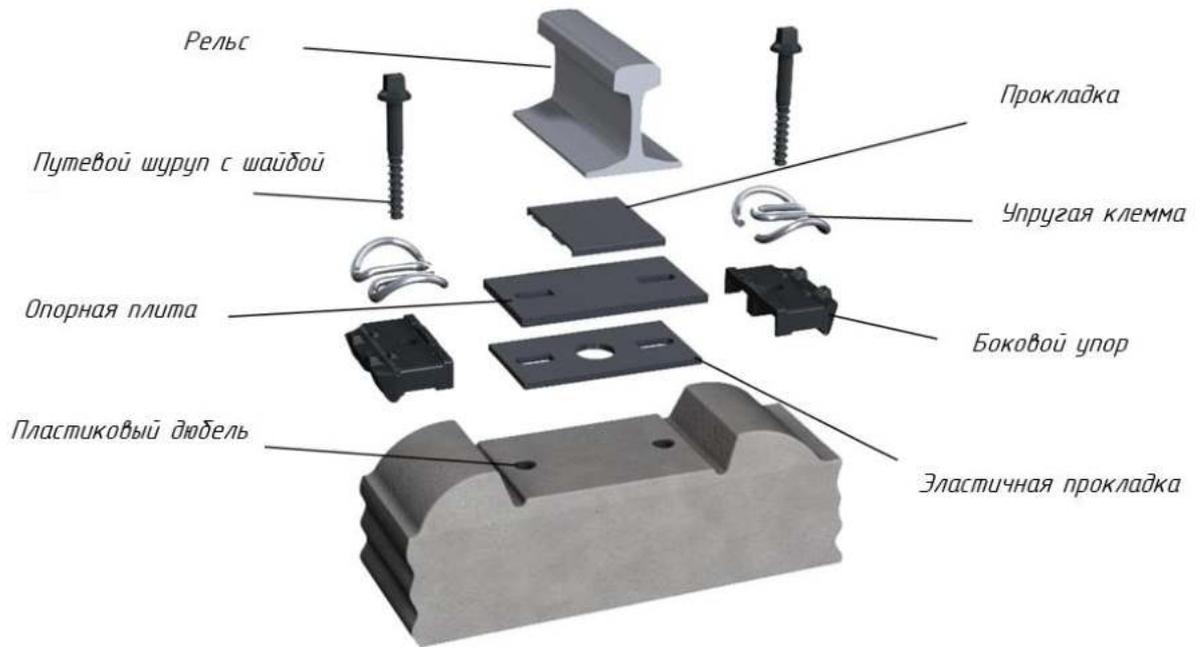


Рисунок 1.21 – Рельсовое крепление System 300

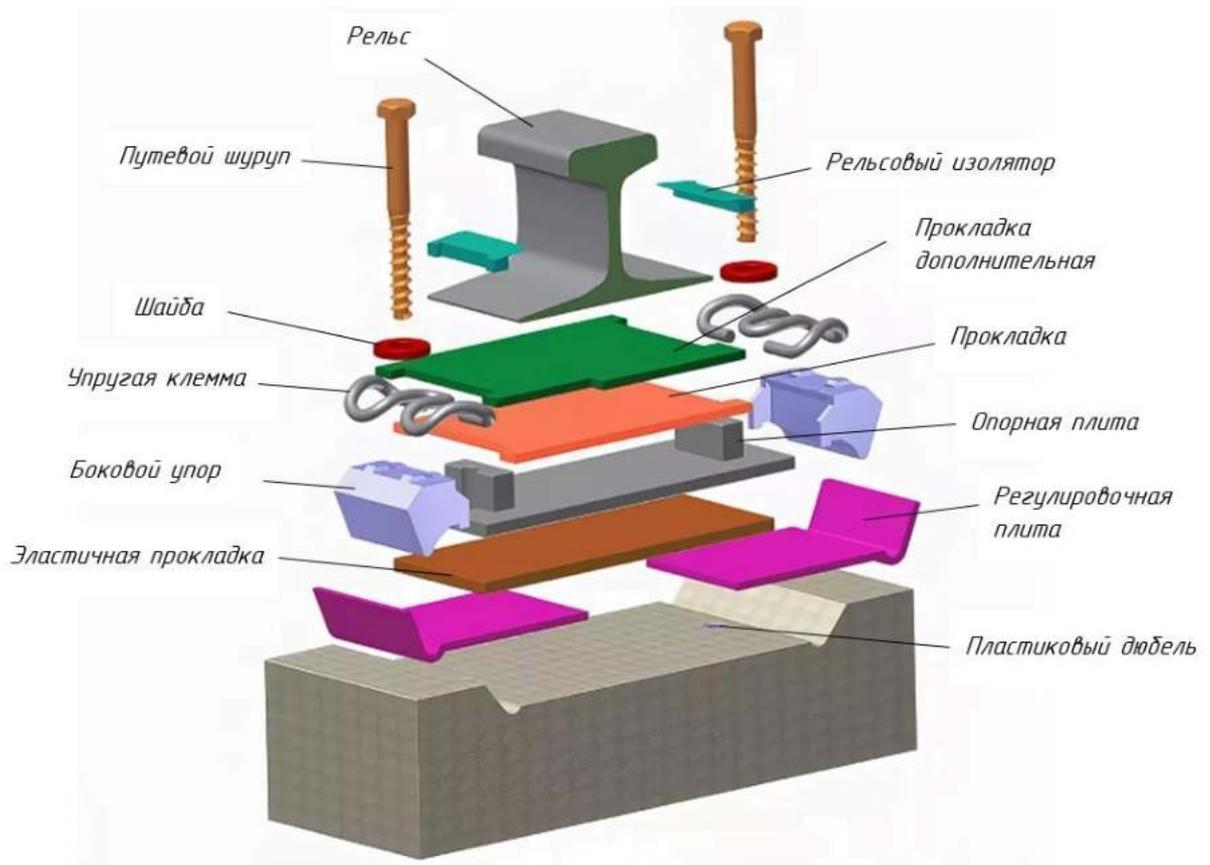


Рисунок 1.22 – Рельсовое крепление WJ-8C

Рельсовые крепления являются формирующими узлами, которые в большей степени влияют на упругие свойства всего плитного БКП в целом,

распределяя поездную нагрузку на нижние слои конструкции. Упругий прогиб внутри рельсового скрепления для БКП в 4,3-16 раз превышает аналогичный показатель внутри рельсового скрепления для балластной конструкции пути (Рисунок 1.23). Основным элементом данных рельсовых скреплений является эластичная промежуточная прокладка [91], которая в свою очередь выполняет следующие функции:

- распределяет давление и нагрузку от подвижного состава;
- снижает усталостно-контактный износ системы колесо-рельс;
- повышает упругие характеристики всей конструкции пути;
- снижает удельное давление, тем самым повышая жизненный цикл остальных элементов;
- снижает затраты на текущее содержание пути;
- повышает комфортность езды для пассажиров;
- повышает амортизирующие свойства и снижает воздействие от ударной нагрузки.

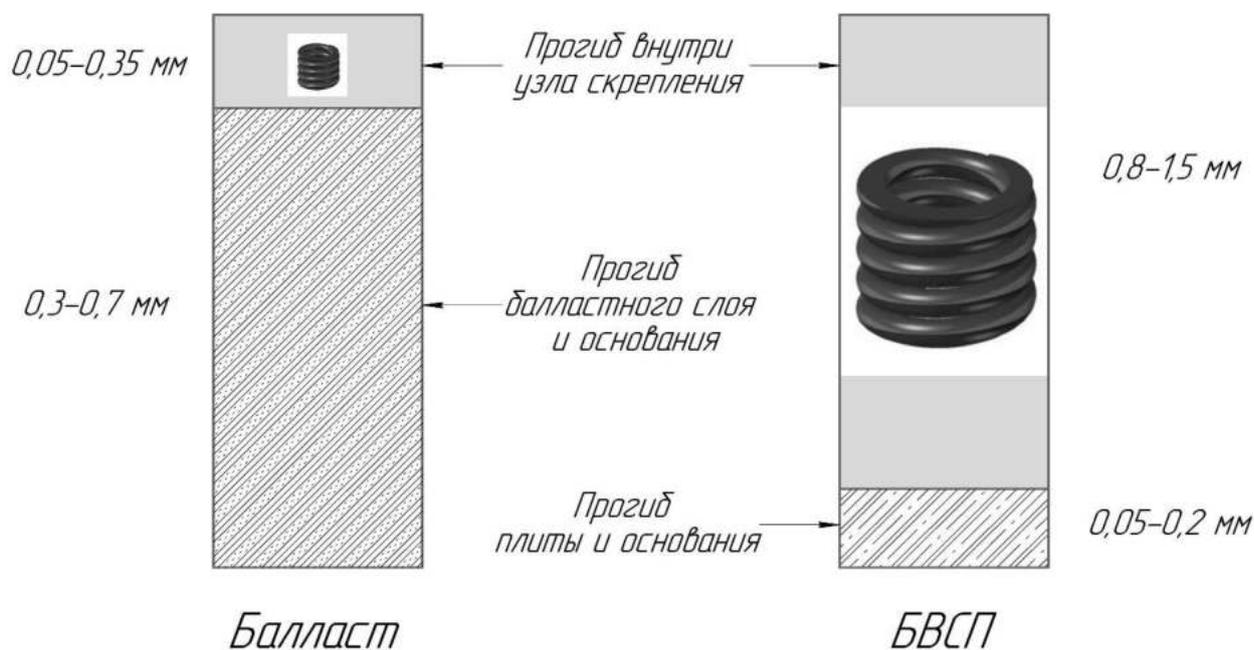


Рисунок 1.23 – Упругий прогиб в балластной конструкции и БКП

Согласно результатам измерений работы рельсовых скреплений на линии ВСМ Пекин – Тяньцзинь (Jingjin PDL) при воздействии на путь подвижного состава со скоростью движения 350 км/ч, установлено, что при прохождении

подвижного состава по переходным участкам, а также по пролётным строениям эстакад, возникают значительные подъёмные реактивные силы до 30 кН, а также значительные упругие прогибы рельса в узлах рельсового скрепления величиной до 3,5 мм.

С целью улучшения физико-механических показателей и работоспособности рельсовых скреплений в условиях низких температур, компании-производители ведут свои собственные исследования согласно своим внутренним требованиям. Данные требования зачастую являются конфиденциальными и защищаются как «ноу-хау». Так, например, компания Getzner производила испытания образца материала эластичной прокладки, которая предназначена для китайского рынка по внутренней методике. Испытаниям подвергался образец материала, вырубленный из эластичной прокладки, диаметром 11,8 мм и толщиной 10,1 мм. Образец в течение 45 минут находился в морозильной камере при температуре $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, которая установлена на сервогидравлической испытательной машине ZWICK HA100. Определялась динамическая жёсткость образца при среднем значении испытательной нагрузки в 45 кН и амплитуде колебаний 25 кН с частотой нагружения в 10 Гц. На графике (Рисунок 1.24) можно наблюдать диаграмму значений динамической жёсткости испытуемого образца, а также диаграмму значений тангенсоида значений, по которой прогнозируется изменение показателя жёсткости в зависимости от температуры. Чёткой взаимосвязи между показателями статической и динамической жёсткости эластичных прокладок при определённой температуре окружающего воздуха не прослеживается.

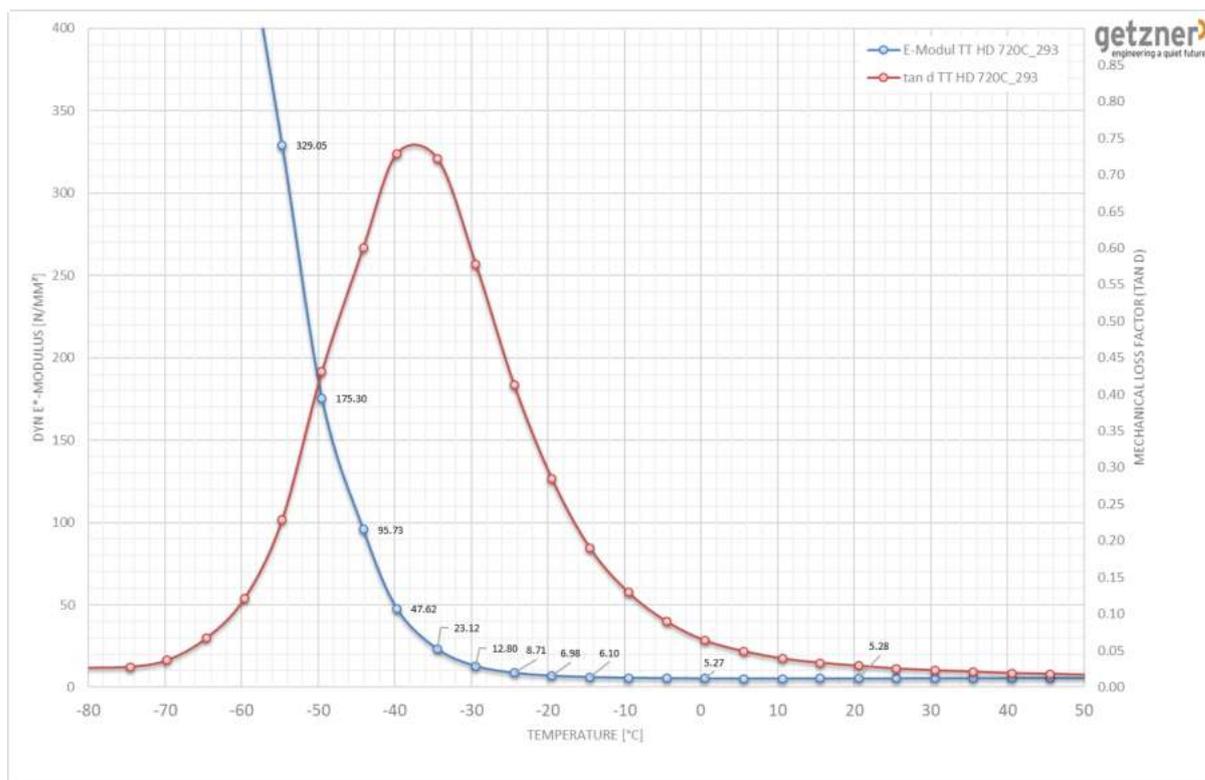


Рисунок 1.24 – Испытания образца материала в лаборатории компании Getzner

Проводимые европейскими и китайскими исследователями испытаний узлов рельсовых креплений при воздействии низких температур ограничиваются нижними пороговыми значениями в $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Рисунок 1.25) соответственно, что в первую очередь обусловлено регламентирующими документами железных дорог [93, 94], на сети ВСМ которых применяются и эксплуатируются массово рельсовые крепления в БКП.

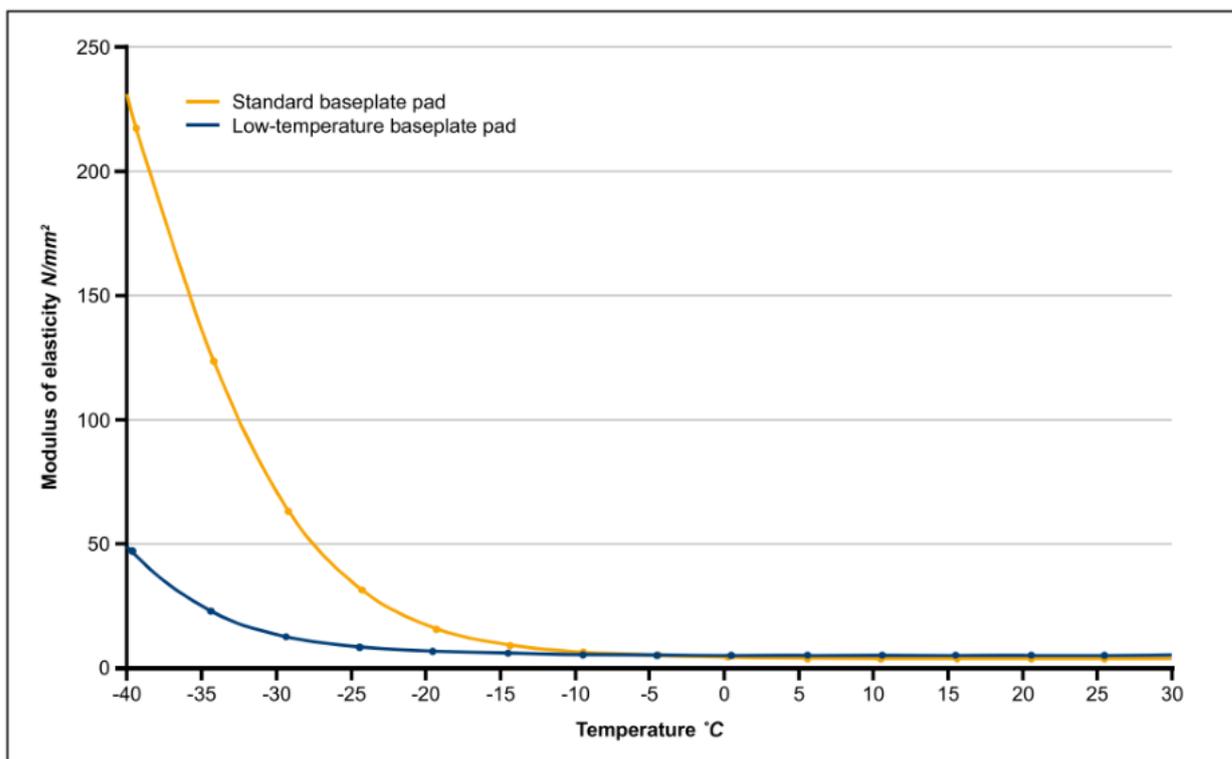


Рисунок 1.25 – Определение статической жёсткости эластичных прокладок в соответствии с требованиями китайских железных дорог

1.5 Регламентирующая документация к рельсовым скреплениям на территории ЕАЭС

Техническое регулирование – правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции или к связанным с ними процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также в области установления и применения на добровольной основе требований к продукции, процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ или оказанию услуг и правовое регулирование отношений в области оценки соответствия (в ред. Федерального закона от 01.05.2007 N 65-ФЗ).

Техническое регулирование, в международном понимании этого термина, включает деятельность по стандартизации, деятельность по разработке и применению технических регламентов и деятельность по оценке соответствия.

В настоящее время на территории ЕАЭС введены в действие Технические регламенты, в которых предъявлены требования о необходимости технического регулирования объектов инфраструктуры высокоскоростного и магистрального железнодорожного транспорта. Решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 года № 710 приняты технические регламенты:

- ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» [95];
- ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» [96].

Для соблюдения требований Технического регламента необходимо обеспечить допустимые значения безопасности продукции, предусмотренных стандартами, применяемыми на добровольной основе. Подтверждение соответствия осуществляется в следующих формах:

- сертификация;
- принятие декларации о соответствии.

В данном случае необходимо подтвердить в органе по сертификации соблюдение требований поддерживающих стандартов. Таковыми в настоящее время являются ГОСТ 32698 [97], ГОСТ 33186 [98], ГОСТ 34078 [99]. Стоит отметить, что внутреннее наполнение большинства действующих стандартов практически без изменений дублирует документы, действовавшие во времена МПС СССР. Например, принятый Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации ГОСТ 32698 определяет основные требования безопасности и методы контроля промежуточных рельсовых скреплений, копируя нормы безопасности [100].

Также, специально для участка ВСМ Москва – Казань, были разработаны специальные технические условия СТУ №2 [101], которые регламентируют требования к промежуточным рельсовым скреплениям для БВСП и к рельсовым

скреплениям для пути на балласте, а также рельсовым скреплениям для стрелочных переводов. Необходимо отметить, что в данных требованиях отсутствует чётко сформулированное требование к упругим характеристикам узла рельсового скрепления для БВП подвергающемуся воздействию низких температур.

Для проектирования, строительства и эксплуатации высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва – Санкт-Петербург» были разработаны специальные технические условия 960-СТУ [102], в которых указаны минимальные требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений для БВП, указанные в Таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Требования к упругим характеристикам узла скрепления для БВП согласно 960-СТУ

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Вертикальная жёсткость узла рельсового скрепления должна быть в пределах, МН/м	30-50
2	Промежуточные рельсовые скрепления должны иметь в своём составе упругие прокладки, соответствующие ГОСТ 34078: – по назначению – для железобетонного подрельсового основания; – по типу – подрельсовые и (или) напальные в зависимости от конструктивных особенностей промежуточного рельсового скрепления; – по исполнению – ПД; – по категории – П. Упругие свойства должны быть стабильны в диапазоне изменения расчётной температуры рельсов, в соответствии с требованиями настоящих СТУ.	Отсутствуют

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

1) Развитие высокоскоростного железнодорожного сообщения в России со скоростями движения до 400 км/ч предполагает применение БВП, что в свою очередь требует пересмотра оценки воздействия подвижного состава на путь и определения прогиба рельса с учётом влияния низких температур.

2) В отечественном техническом регулировании недостаточно полно отражены требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений с упругим промежуточным слоем для БКП, в этой связи возникает необходимость в формировании требований к упругим характеристикам рельсовых скреплений для БКП для условий проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

3) Работы отечественных и зарубежных учёных показывают на необходимость в проведении дополнительных исследований по определению влияния низких температур до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на жёсткость узлов рельсовых скреплений БКП с упругим промежуточным слоем.

4) В результате проведённого анализа исследовательских работ, а также нормативной документации в области технического регулирования рельсовых скреплений сформулирован ряд постановочных вопросов:

– какой расчётный метод позволяет определить упругий прогиб рельса при воздействии подвижного состава на БКП без учета влияния низких температур?

– каким образом влияет температура окружающего воздуха в диапазоне от $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на упругие характеристики узла рельсового скрепления, работающего в БКП?

– какими должны быть требования к промежуточным рельсовым скреплениям с промежуточным эластичным слоем БКП для условий проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург»?

– как проверить соответствие этим требованиям?

2 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ

2.1 Отечественные методы расчета воздействия подвижного состава на железнодорожный путь

2.1.1 Основные положения статического расчета. Модуль упругости подрельсового основания

Верхнее строение пути (ВСП) – это видимая часть железнодорожного пути, состоящая из рельсов, рельсовых скреплений, шпал, балласта, а также конструкций для соединения и пересечения путей. Железнодорожное ВСП выполняет функции аналогичные с автодорожным покрытием. Как и дорожные покрытия, существуют как упругие, так и жесткие конструкции ВСП. Основным различием между двумя типами инфраструктуры состоит в том, что на железных дорогах нагрузки возникают в двух фиксированных местах - вдоль рельсов, тогда как для автодорожных покрытий характерно беспорядочное распределение нагрузок – по всей ширине покрытия.

Обычно рельс рассматривается как балка бесконечно большой длины неизменного сечения, лежащая на сплошном упругом однородном основании с двусторонними реакциями [41].

Двусторонними упругими реакциями основания реальный путь не обладает, так как ни балласт, ни грунты на растяжение не работают; сопротивляется выгибу рельса лишь его верх и вес опор, если рельс к ним плотно не притянут. Принятое допущение не вносит, однако, существенных неточностей в определение расчетных значений воздействий нагрузок на путь, так как в зонах действия расчетных максимальных изгибающих рельс моментов, давление на опору и прогибов рельса происходит упругое сжатие основания.

Основной характеристикой для статического расчета является связь между упругим прогибом y в каждом сечении и погонным упругим отпором q в том же сечении. При нелинейной зависимости эта связь выражается в виде:

$$dq = -U dy. \quad (2.1)$$

В данном случае перед второй частью равенства поставлен знак минус по причине того, что направление упругого сопротивления давлению q всегда обратно упругому прогибу, его вызвавшему. В случае, когда можно рассмотреть модуль числа получим:

$$U = \frac{dq}{dy}. \quad (2.2)$$

Исходя из линейной зависимости, которая обычно принимается в практических расчетах получим:

$$q = -U y. \quad (2.3)$$

При этом без учета знака минус имеем:

$$U = \frac{q}{y}. \quad (2.4)$$

В отечественной практике параметр U – модуль упругости, определяется в большей части экспериментальным путем и данный параметр представляет собой погонный упругий отпор основания, отнесенный к единице прогиба. По мнению Г.М. Шахунянца [41] излишняя жесткость пути увеличивает динамические взаимодействия пути и подвижного состава.

Для получения оптимального модуля упругости подрельсового основания его необходимо проектировать, принимая во внимание тот факт, что подрельсовое основание является многослойной конструкцией, необходимо задавать необходимые характеристики каждому слою. В таком случае влияние каждого слоя (подрельсовые прокладки, шпалы, блоки, плиты, путевые маты, подшпальные прокладки и т.п) на общий модуль упругости может быть определено из следующего. Общий упругий прогиб всех слоев:

$$y = \sum_{i=1}^{i-1} y_i, \quad (2.5)$$

где y_i – линейная упругая деформация каждого слоя, находящегося под воздействием упругого отпора q .

Составляющая U_i модуля упругости подрельсового основания U :

$$U_i = \frac{q}{y_i}. \quad (2.6)$$

В соответствии с формулами (2.6) и (2.5), через составляющие отдельно взятых слоев U_i можем получить общий модуль упругости всего основания целиком:

$$\frac{1}{U} = \sum \frac{1}{U_i}. \quad (2.7)$$

2.1.2 Оценка воздействия подвижного состава на путь

Оценка воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности элементов верхнего строения.

Рассматриваемая оценка воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности элементов ВСП является подразделом действующей в РЖД «Методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям надежности» [103], вышедшего в дополнение к ЦПТ-52/14 [104].

В соответствии с [103], основной алгоритм расчетов пути на прочность основывается на следующих основных допущениях и предпосылках:

- рельс считается неразрезной балкой бесконечно большой длины неизменного сечения, лежащей на многих равноупругих точечных опорах или на сплошном равноупругом основании;
- вертикальные силы принимаются приложенными в плоскости симметрии рельсов. Рельсы обеих нитей колеи принимаются равнозагруженными;
- принимается, что колеса при движении не отрываются от рельсов и не создают ударных воздействий;

- в основе расчета лежит допущение о линейной зависимости между давлением на единицу площади основания и вызываемой им упругой осадкой основания;
- все характеристики пути, входящие в расчет, в том числе допускаемые напряжения, принимаются за неслучайные величины;
- при расчете рельса на изгиб за физическое допускаемое напряжение принимается минимально возможное значение условного предела текучести рельсовой стали;
- продольные температурные силы и силы угона непосредственно расчетом не учитываются, а учитываются только некоторым снижением физического допускаемого напряжения;
- горизонтальные поперечные силы и внецентренность приложения вертикальной нагрузки учитываются посредством специального коэффициента f_0 перехода от осевых напряжений в подошве рельса к напряжениям в его наружной кромке;
- статическая нагрузка, передаваемая через колесо на рельс, принимается за неслучайную величину;
- воздействия переменных сил рассматриваются как статические;
- воздействия всех видов колебаний надрессорного строения учитываются эмпирически устанавливаемой величиной z дополнительного сжатия рессорного комплекта и динамической жесткостью рессоры;
- учитываются влияния изолированных неровностей на пути и изолированных и непрерывных неровностей на колесах;
- равнодействующая всех вертикальных сил, учитываемых расчетом и передаваемых расчетным колесом на рельс, берется в ее наибольшем значении с вероятностью $\Phi=0,994$, что это значение не будет превышено;
- собственные напряжения в элементах верхнего строения не учитываются;

– расчет ведется для заданного сечения пути при движении по нему одноименных колес большого количества разных экипажей одного и того же типа. При этом расчетное сечение выбирают в месте наибольшего сжатия рессор.

Алгоритм определения критериев прочности для новых элементов ВСП основывается на кривой усталости Веллера (Рисунок 2.1).

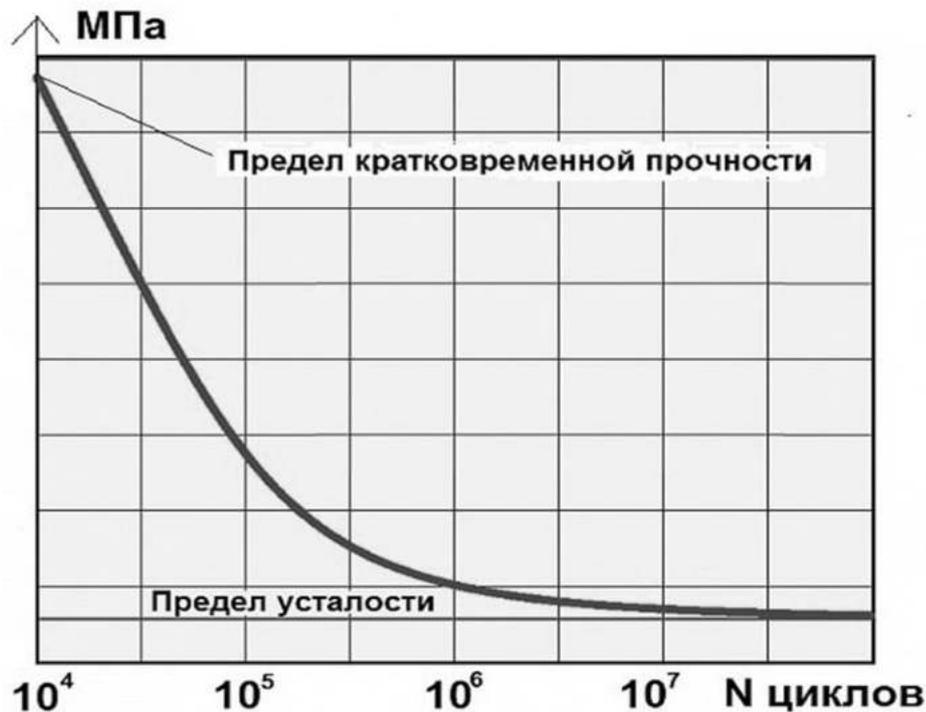


Рисунок 2.1 – Кривая Веллера для металлических материалов

Оценкой деформативности пути является модуль упругости пути U (МПа), который рассчитывается для всех современных конструкций пути. Основные расчётные формулы приняты в соответствии с [104, 105].

Модуль упругости определяется по формуле:

$$U = \left(\frac{P_{\text{факт}}}{y_{\text{абс}}} \right)^{\frac{4}{3}} \frac{1}{\sqrt[3]{64EI}}, \quad (2.8)$$

или

$$U = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{факт}}^4}{64y_{\text{абс}}^4 EI}}, \quad (2.9)$$

где $y_{\text{абс}}$ – абсолютные просадки рельса, м;

$P_{\text{факт}}$ – приложенная фактическая вертикальная сила, кг;

E – модуль упругости рельсовой стали, МПа;

I – момент инерции сечения рельса относительно его вертикальной оси симметрии, м⁴.

Оценка воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надёжности по [104].

Динамическая максимальная нагрузка на рельс:

$$P_{\text{дин}}^{\text{max}} = P_{\text{ср}} + \lambda S, \text{ кг} \quad (2.10)$$

где $P_{\text{ср}}$ – среднее значение вертикальной нагрузки колеса на рельс, кг;

S – среднее квадратическое отклонение динамической вертикальной нагрузки колеса на рельс, кг;

λ – нормирующий множитель, определяющий вероятность события, т.е. появления максимальной динамической вертикальной нагрузки.

Среднее значение вертикальной нагрузки колеса на рельс:

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{ст}} + P_p^{\text{ср}}, \text{ кг} \quad (2.11)$$

где $P_{\text{ст}}$ – статическая нагрузка колеса на рельс, кг;

$P_p^{\text{ср}}$ – среднее значение динамической нагрузки колеса на рельс от вертикальных колебаний наддресорного строения экипажа, кг.

$$P_p^{\text{ср}} = 0,75 P_p^{\text{max}}, \text{ кг} \quad (2.12)$$

где P_p^{max} – динамическая максимальная нагрузка колеса на рельс от вертикальных колебаний наддресорного строения экипажа, кг.

$$P_p^{\text{max}} = k_{\text{д}}(P_{\text{ст}} - q), \text{ кг} \quad (2.13)$$

где q – отнесённый к колесу вес необрессоренных частей, кг;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент динамических добавок от вертикальных колебаний наддресорного строения экипажа. Может быть получен экспериментальным путём, также рассчитывается:

$$k_{\text{д}} = 0,1 + 0,2 \frac{V}{f_{\text{ст}}}, \quad (2.14)$$

где V – скорость движения, км/ч;

$f_{ст}$ – статический прогиб рессорного подвешивания, мм.

При расчёте рельса, как балки на сплошном упругом основании система сосредоточенных колесных нагрузок (Рисунок 2.2) заменяется эквивалентными одиночными нагрузками, соответственно при определении изгибающих моментов и напряжений в рельсах с помощью функции μ и при определении нагрузок и прогибов с помощью функции η . Поскольку в силу случайной природы вероятный максимум динамической нагрузки расчётного колеса не совпадает с вероятным максимумом нагрузок соседних колёс, то при определении эквивалентных нагрузок принимается максимальная вероятная нагрузка расчётного колеса и среднее значение нагрузок соседних колёс.

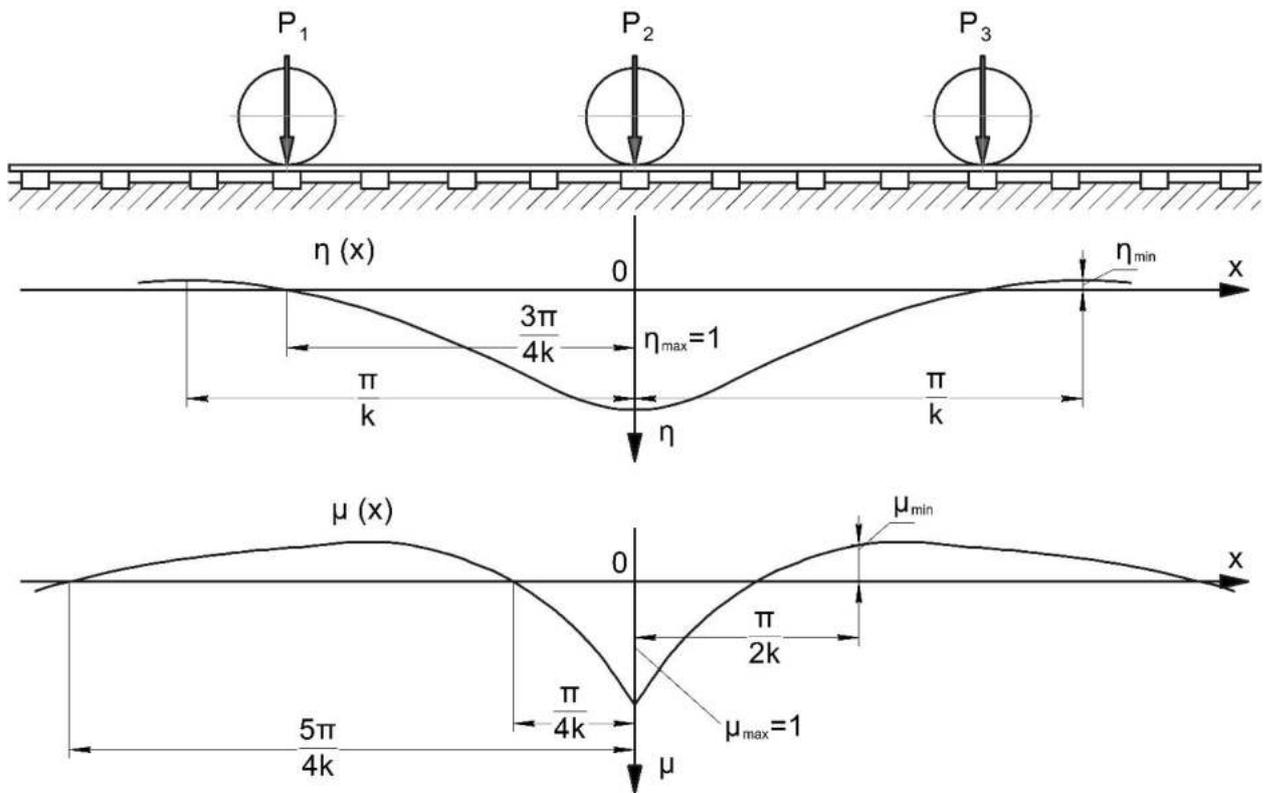


Рисунок 2.2 – Линии влияния прогибов и моментов от действия колёсной нагрузки

Максимальная эквивалентная нагрузка для расчётов напряжений в рельсах от изгиба и кручения определяется следующим образом:

$$P_{\text{ЭКВ}}^I = P_{\text{ДИН}}^{\text{max}} + \sum \mu_i P_{\text{СПИ}} \text{ , кг} \quad (2.15)$$

где μ_i – ординаты линии влияния изгибающих моментов рельса в сечениях пути, расположенных под колёсными нагрузками от осей экипажа, смежных с расчётной осью.

Величина ординаты μ_i может быть определена по формуле:

$$\mu_i = e^{-kl_i} (\cos kl_i - \sin kl_i), \quad (2.16)$$

где k – коэффициент относительной жёсткости рельсового основания и рельса, см^{-1} ;

l_i – расстояние между центром оси расчётного колеса и колеса i -той оси, смежной с расчётной;

e – основание натуральных логарифмов ($e = 2,72828\dots$).

Максимальная эквивалентная нагрузка для расчётов напряжений и сил в элементах подрельсового основания определяется по формуле:

$$P_{\text{ЭКВ}}^{II} = P_{\text{ДИН}}^{\text{max}} + \sum \eta_i P_{\text{СПИ}} \text{ , кг} \quad (2.17)$$

где η_i – ординаты линии влияния прогибов рельса в сечениях пути, расположенных под колёсными нагрузками от осей экипажа, смежных с расчётной осью;

$$\eta_i = e^{-kl_i} (\cos kl_i + \sin kl_i). \quad (2.18)$$

Изгибающий момент в рельсах от воздействия эквивалентной нагрузки:

$$M = \frac{P_{\text{ЭКВ}}^I}{4k} \text{ , кгсм} \quad (2.19)$$

Максимальная нагрузка на шпалу

$$Q = \frac{kl_{\text{ш}}}{2} P_{\text{ЭКВ}}^{II} \text{ , кг} \quad (2.20)$$

Максимальный прогиб рельса

$$y = \frac{k}{2U} P_{\text{ЭКВ}}^{II} \text{ , см} \quad (2.21)$$

Максимальные напряжения в элементах верхнего строения пути определяются по формулам:

- в подошве рельса от его изгиба под действием момента M :

$$\sigma_0 = \frac{M}{W} = \frac{P_{\text{ЭКВ}}^I}{4kW}, \text{ кг/см}^2 \quad (2.22)$$

- в кромках подошвы рельса:

$$\sigma_k = f\sigma_0, \text{ кг/см}^2 \quad (2.23)$$

- в шпале на смятие под подкладкой (при деревянной шпале) и в прокладке при железобетонной шпале:

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{Q}{\omega} = \frac{kl_{\text{ш}}}{2\omega} P_{\text{ЭКВ}}^{II}, \text{ кг/см}^2 \quad (2.24)$$

- в балласте под шпалой:

$$\sigma_6 = \frac{Q}{\Omega_a} = \frac{kl_{\text{ш}}}{2\Omega_a} P_{\text{ЭКВ}}^{II}, \text{ кг/см}^2 \quad (2.25)$$

где W – момент сопротивления рельса относительно его подошвы, см^3 ;

f – коэффициент перехода от осевых напряжений в подошве рельса к кромочным, учитывающий действие горизонтальных нагрузок на рельс и эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки;

ω – площадь рельсовой подкладки, см^2 ;

Ω_a – площадь полушпалы с учётом поправки на ее изгиб, см^2 .

2.1.3 Методика расчёта безбалластного пути как многослойной балки на упругом основании

Данная методика предполагает применение методологии прогнозирования ресурса безбалластных конструкций пути в реальных условиях эксплуатации, основанных на результатах испытаний БКП на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ», с использованием математического моделирования.

На основании предложенного сравнения безбалластного пути как многослойной балки, описанного А.Я. Коганом в ряде работ [106, 107, 108], предлагается следующая математическая модель.

В данной математической модели колебания пути рассматриваются как колебания конструкции, содержащей три бесконечно длинные балки, нижняя из которых лежит на модифицированном основании Винклера, а верхняя и средняя опираются на упругие прослойки, в основном имеющие характеристики основания Винклера. Для конкретной БКП (Рисунок 1.18) этими балками являются рельс, бетонная несущая плита (путевой бетон) и гидравлически связанный слой (тощий бетон).

На верхнюю балку действует переменная во времени динамическая нагрузка $Q(t)$, движущаяся с постоянной скоростью v . Колебания данной системы описываются следующей системой дифференциальных уравнений в неподвижной системе координат [107]:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1 I_1 \frac{\partial^4 z_1}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} + f_1 \left(\frac{\partial z_1}{\partial t} - \frac{\partial z_2}{\partial t} \right) + U_1 (z_1 - z_2) = 0; \\ E_2 I_2 \frac{\partial^4 z_2}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 z_2}{\partial t^2} + f_1 \left(\frac{\partial z_2}{\partial t} - \frac{\partial z_1}{\partial t} \right) + f_2 \left(\frac{\partial z_2}{\partial t} - \frac{\partial z_3}{\partial t} \right) + \\ + U_1 (z_2 - z_1) + U_2 (z_2 - z_3) = 0; \\ E_3 I_3 \frac{\partial^4 z_3}{\partial x^4} + m_3 \frac{\partial^2 z_3}{\partial t^2} + f_2 \left(\frac{\partial z_3}{\partial t} - \frac{\partial z_2}{\partial t} \right) + f_3 \frac{\partial z_3}{\partial t} + \\ + U_2 (z_3 - z_2) + U_3 z_3 = 0, \end{array} \right. , \quad (2.26)$$

где z_i – вертикальный прогиб i -го слоя в подрельсовом сечении;

E_i – модуль упругости материала i -го слоя;

I_i – момент инерции i -го слоя при его изгибе относительно поперечной горизонтальной оси, отнесённый к одной рельсовой нити;

m_i – распределённая приведенная масса i -го слоя, отнесённая к одной рельсовой нити;

f_i – распределённое приведенное демпфирование i -го слоя, отнесённое к одной рельсовой нити;

U_i – приведенный модуль упругости основания i -го слоя, отнесённый к одной рельсовой нити;

x – абсцисса текущего сечения балки, отсчитываемая от некоторого неподвижного начала координат;

t – время;

$Q(t)$ – переменная нагрузка.

При рассмотрении решения задачи в подвижной системе координат, перемещающейся вдоль оси x со скоростью v необходимо произвести замену $u = x - vt$, где u – абсцисса текущего сечения балки, отсчитываемая от начала координат, совмещенного с движущейся нагрузкой.

Считая функции $z_i(u, t)$ реакциями системы (2.26) на воздействие $Q(t) = e^{i\omega t}$, с учетом линейности оператора, имеется возможность записать:

$$z_i(u, t) = e^{i\omega t} W_{z_i}^Q(u, i\omega); i = \overline{1,3}, \quad (2.27)$$

где ω – частота колебаний.

В таком случае уравнения системы (2.26) примут следующий вид [106]:

$$\begin{cases} W_{z_1}^{IV} + a_1 W_{z_1}^{II} + a_2 W_{z_1}^I + a_3 W_{z_1} + b_1 W_{z_2}^I + b_1 W_{z_2} = 0; \\ W_{z_2}^{IV} + b_3 W_{z_2}^{II} + b_4 W_{z_2}^I + b_5 W_{z_2} + a_4 W_{z_1}^I + a_5 W_{z_1} + \\ + c_1 W_{z_3}^I + c_2 W_{z_3} = 0; \\ W_{z_3}^{IV} + c_3 W_{z_3}^{II} + c_4 W_{z_3}^I + c_5 W_{z_3} + b_6 W_{z_2}^I + b_7 W_{z_2} = 0; \end{cases} \quad (2.28)$$

В формуле (2.28) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} W_{z_i}^{IV} &= \frac{\partial^4 z_i}{\partial u^4}; \quad W_{z_i}^{II} = \frac{\partial^2 z_i}{\partial u^2}; \quad W_{z_i}^I = \frac{\partial z_i}{\partial u}; \quad i = \overline{1,3}; \\ a_1 &= \frac{m_1 v^2}{E_1 I_1}; \quad a_2 = -\frac{v(f_1 + m_1 \omega i)}{E_1 I_1}; \quad a_3 = \frac{U_1 - m_1 \omega^2 + f_1 \omega i}{E_1 I_1}; \\ a_4 &= \frac{f_1 v}{E_2 I_2}; \quad a_5 = -\frac{U_1 + f_1 \omega i}{E_2 I_2}; \quad b_1 = \frac{f_1 v}{E_1 I_1}; \quad b_2 = -\frac{U_1 + f_1 \omega i}{E_1 I_1}; \quad b_3 = \frac{m_2 v^2}{E_2 I_2}; \\ b_4 &= -\frac{v(f_1 + f_2 + 2m_2 \omega i)}{E_2 I_2}; \quad b_5 = \frac{U_1 + U_2 - m_2 \omega^2 + \omega(f_1 + f_2) i}{E_2 I_2}; \quad b_6 = \frac{f_2 v}{E_3 I_3}; \\ b_7 &= -\frac{U_2 + f_2 \omega i}{E_3 I_3}; \quad c_1 = \frac{f_2 v}{E_2 I_2}; \quad c_2 = -\frac{U_2 + f_2 \omega i}{E_2 I_2}; \quad c_3 = \frac{m_3 v^2}{E_3 I_3}; \\ c_4 &= -\frac{v(f_2 + f_3 + 2m_3 \omega i)}{E_3 I_3}; \quad c_5 = \frac{U_2 + U_3 - m_3 \omega^2 + \omega(f_2 + f_3) i}{E_3 I_3}. \end{aligned}$$

Частотные характеристики систем, определяющих при входе по силам $Q_i(t)$ прогибы слоев конструкции, могут быть представлены в виде:

$$W_{zi}^Q(u, i\omega) = \begin{cases} W_{zi+}^Q(u, i\omega) & \text{при } u \geq 0; \\ W_{zi-}^Q(u, i\omega) & \text{при } u \leq 0, \end{cases} \quad (2.29)$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{z1+}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 A_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при } u \geq 0; \\ W_{z1-}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 A_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \quad \text{при } u \leq 0; \\ W_{z2+}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 B_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при } u \geq 0; \\ W_{z2-}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 B_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \quad \text{при } u \leq 0; \\ W_{z3+}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 C_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при } u \geq 0; \\ W_{z3-}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 C_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \quad \text{при } u \leq 0. \end{array} \right.$$

С учетом краевых условий задачи коэффициенты A_i , B_i и C_i ($i = \overline{1,12}$) определяются так:

$$A_i = C_i \frac{(\lambda_i^4 + c_3 \lambda_i^2 + c_4 \lambda_i + c_5)(\lambda_i^4 + b_3 \lambda_i^2 + b_4 \lambda_i + c_5) - (b_6 \lambda_i + b_7)(c_1 \lambda_i + c_2)}{(b_6 \lambda_i + b_7)(a_4 \lambda_i + a_5)},$$

$$B_i = -C_i \frac{\lambda_i^4 + c_3 \lambda_i^2 + c_4 \lambda_i + c_5}{b_6 \lambda_i + b_7},$$

$$C_i = (-1)^{i+1} \prod_{1 \leq l \leq 12} (\lambda_i - \lambda_l)^{-1} \times \left\{ \gamma_{11} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{12} \lambda_j^{11} \prod_{\substack{1 \leq l \leq 12 \\ l \neq i, j}} (\lambda_j - \lambda_l)^{-1} \left[\gamma_{10} - \right. \right. \\ \left. \left. - \gamma_9 \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i, j}}^{12} \lambda_n^{10} \prod_{\substack{1 \leq l \leq 12 \\ l \neq i, j, n}} (\lambda_n - \lambda_l)^{-1} \right] \right\},$$

$$\gamma_9 = \frac{a_4 b_6}{E_1 I_1}, \quad \gamma_{10} = \frac{a_5 b_6 + a_4 b_7}{E_1 I_1}, \quad \gamma_{11} = \frac{a_5 b_7 - a_4 b_6 (a_1 + b_3 + c_3)}{E_1 I_1}.$$

В данном случае величины λ_i определяются из уравнения $\Delta = 0$, где Δ – характеристический определитель системы (2.28):

$$\Delta = \begin{vmatrix} \lambda^4 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 & b_1\lambda + b_2 & 0 \\ a_4\lambda + a_5 & \lambda^4 + b_3\lambda^2 + b_4\lambda + b_5 & c_1\lambda + c_2 \\ 0 & b_6\lambda + b_7 & \lambda^4 + c_3\lambda^2 + c_4\lambda + c_5 \end{vmatrix},$$

причём λ_i удовлетворяет условиям $Re\lambda_{(2i-1)} \geq 0, Re\lambda_{2i} \leq 0$.

Воспользовавшись найденными частотными характеристиками $W_{zi}^Q(u, i\omega)$ (2.29) находим величину прогибов z_i под действующей нагрузкой $Q(t)$ по формулам:

$$z_i(u, t) = Q(t)W_{zi}^Q(u, i\omega); i = \overline{1,3}. \quad (2.30)$$

Данная математическая модель была верифицирована путем сравнения расчетных значений с результатами измерений напряжений и вертикальных прогибов слоев БКП. Прогибы и осадки ЩПГС и слоя полифилизированного грунта измерялись при помощи оптоволоконной системы диагностики земляного полотна [109, 110].

2.2 Зарубежные методы расчёта воздействия подвижного состава на железнодорожный путь

2.2.1 Метод Айзенманна

В основе данного метода лежит расчёт пути согласно гипотезы Фусса-Винклера, с дискретизацией точек опирания рельса, описанный в [111] и дополненный в [112].

В стандартном понимании классической конструкции железнодорожного пути расчёты пути на прочность ограничены квазистатическими нагрузками, в различных слоях пути, представленными в виде непрерывной балки на упругом основании. В таком случае к статическим нагрузкам добавляется динамическое приращение. Для элементарного расчёта пути, как балки на сплошном упругом основании принимается гипотеза Винклера [113], сформулированная в 1867 году,

которая гласит, что сжимающее напряжение в каждой точке опоры пропорционально локальному сжатию. Данное отношение можно записать, как (Рисунок 2.3):

$$\sigma = Cw, \quad (2.31)$$

где σ – локальное сжимающее напряжение на опоре, Н/м²;

w – локальный прогиб опоры, м;

C – модуль упругости основания, Н/м³.

При рассмотрении ситуации с дискретным опиранием рельса на подрельсовое основание, между вертикальной силой $F(x_i)$, действующую на опору x_i с полезной площадью опирания A_{rs} и прогибом $w(x_i)$, существует следующая зависимость по Винклеру (Рисунок 2.4):

$$F(x_i) = CA_{rs}w(x_i) = k_d w(x_i). \quad (2.32)$$

В таком случае коэффициент жёсткости пружины равен:

$$k_d = CA_{rs}. \quad (2.33)$$

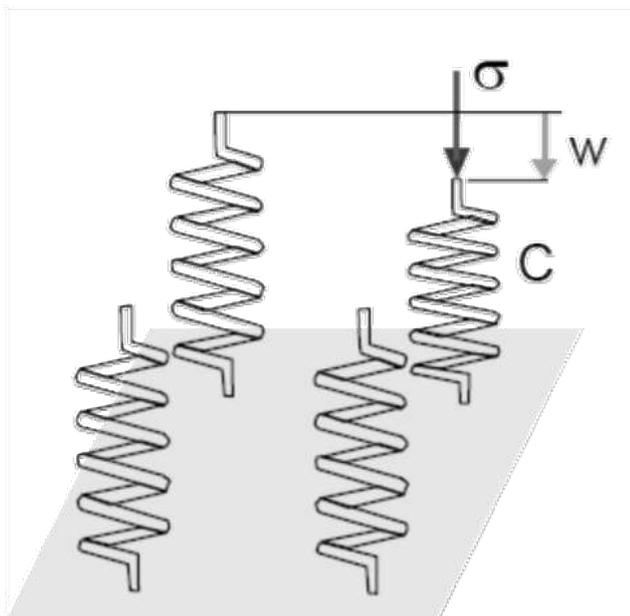


Рисунок 2.3 – Гипотеза Винклера

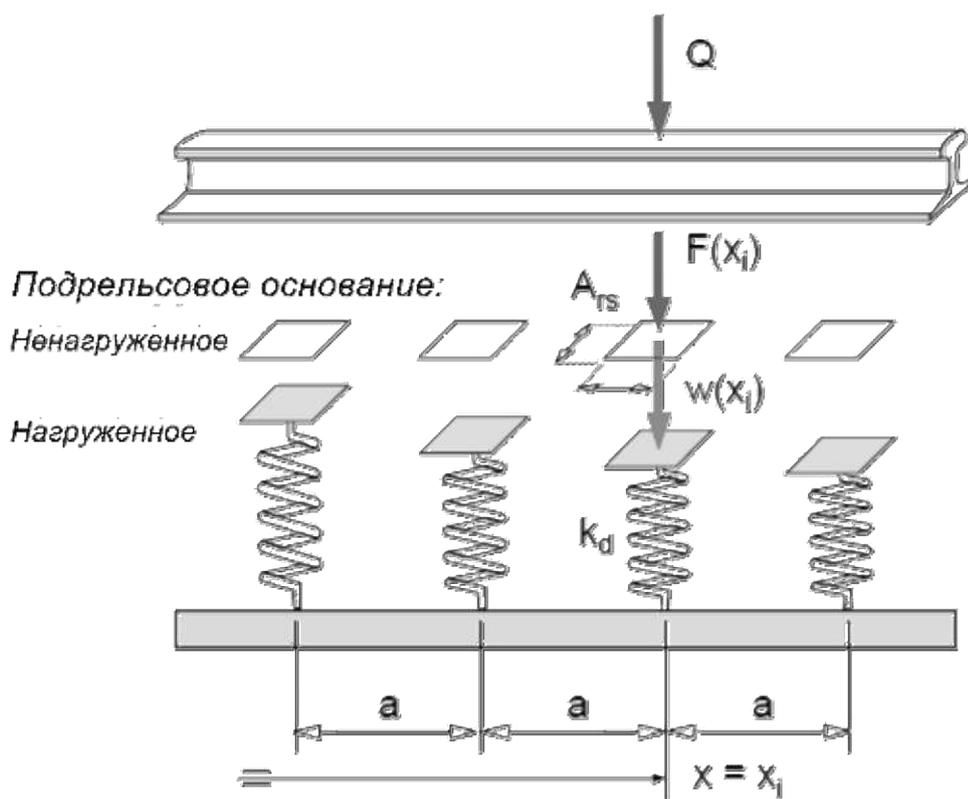


Рисунок 2.4 – Дискретное опирание рельса по Винклеру

При рассмотрении системы, в которой рельс располагается на сплошном основании, между рельсом и основанием будет иметь место распределённая нагрузка, которая, по мнению Винклера, пропорциональна функции прогиба $w(x)$:

$$p(x) = kw(x), \quad (2.34)$$

где k – коэффициент относительной жёсткости рельсового основания, который может быть рассмотрен, как коэффициент жесткости пружины на единицу длины Н/м/м.

В таком случае контактное давление на непрерывную рельсовую опору составляет:

$$\sigma_{rs}(x) = p(x)b_c, \quad (2.35)$$

где b_c – ширина опорной полосы под рельсом, м.

Конструкция, в которой рельс дискретно опирается на подрельсовое основание, может быть проанализирована численными методами. Однако для статической оценки и простых параметров может быть рассмотрена теория

опирания рельса на сплошном основании (Рисунок 2.5) в качестве аппроксимации для конструкции с дискретными точками опирания. В таком случае эквивалентность следует из:

$$k \approx k_d a, \quad (2.36)$$

где a – расстояния между осями дискретных точек опирания, м (Рисунок 2.4).

При рассмотрении модели, где рельс представляется в виде бесконечно длинной балки (рельсовые плети бесстыкового пути) с изгибной жёсткостью EI , которая поддерживается упругим основанием с коэффициентом основания k и нагружается колёсной нагрузкой Q при $x = 0$. Данная расчётная модель балки впервые была предложена Циммерманном [114] (Рисунок 2.6).

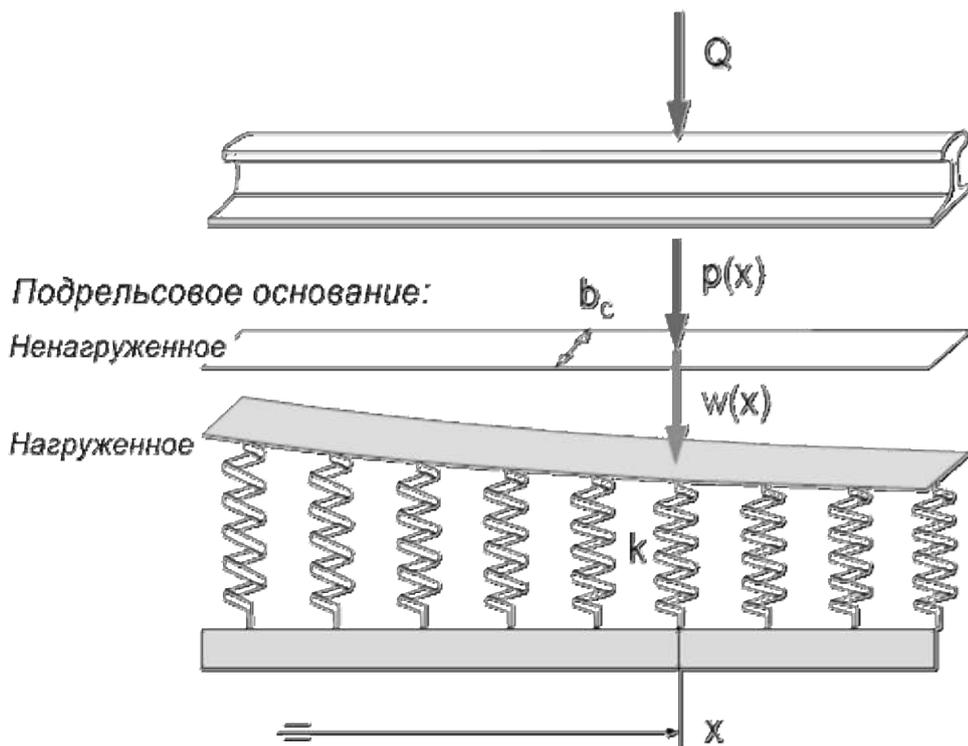


Рисунок 2.5 – Опираие рельса на сплошное основание по Винклеру

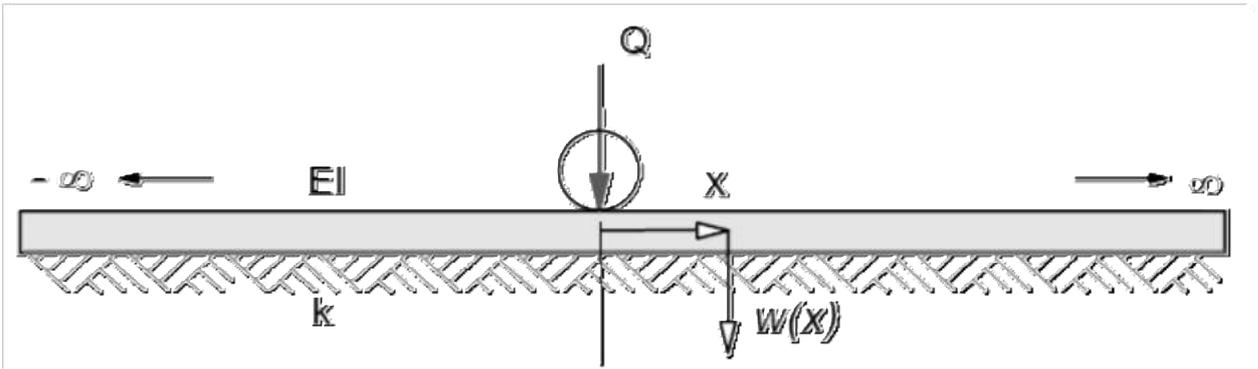


Рисунок 2.6 – Расчётная модель балки с колёсной нагрузкой Q по [110]

Исходя из необходимого условия равновесия элементов балки (Рисунок 2.7), определяется упругий прогиб балки $w(x)$. Поскольку в данной системе имеется только одна переменная x , то дифференциалы обозначаются буквенным значением d (а не δ).

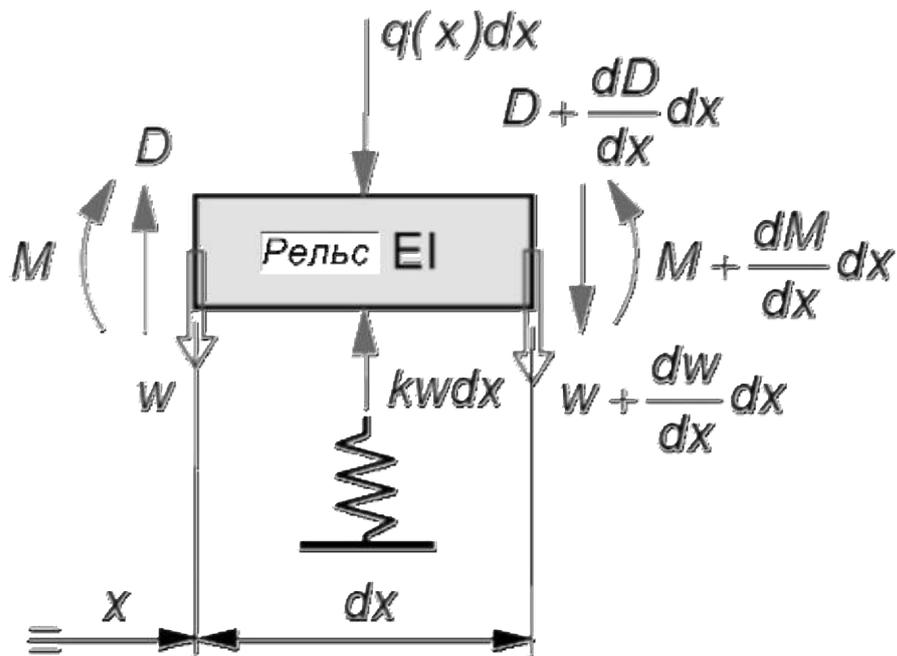


Рисунок 2.7 – Условие равновесия элементов балки

Требования равновесия:

$$q \cdot dx + \left(\frac{dD}{dx}\right) \cdot dx = kw \cdot dx$$

$$D \cdot dx = \left(\frac{dM}{dx}\right) \cdot dx, \quad (2.37)$$

Определяющим уравнением является:

$$M = -EI \cdot \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right). \quad (2.38)$$

После подстановки экспоненциальной функции для прогиба балки решение требуемой задачи будет выглядеть следующим образом:

$$M(x) = \frac{QL}{4} \cdot \mu(x). \quad (2.39)$$

Величина L в этих уравнениях представляет собой так называемую характеристическую длину, определяемую по следующему уравнению:

$$L = \left(\frac{4EI}{k} \right)^{0,25}. \quad (2.40)$$

Кроме того, в данной системе присутствуют две функции формы:

$$\begin{aligned} \eta(x) &= e^{-\frac{x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right] \quad x \geq 0, \\ \mu(x) &= e^{-\frac{x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L} \right] \quad x \geq 0, \end{aligned} \quad (2.41)$$

Основным различием между расчётами для классического пути и безбалластного пути является значение коэффициента относительной жёсткости подрельсового основания k . Для шпального основания учитывается полезная площадь нижней постели шпалы и модуль деформации щебёночного балласта, а для безбалластной конструкции принимается в расчет жёсткость узла рельсового скрепления.

Функции $\eta(x)$ и $\mu(x)$ определяют форму упругой линии и распределение моментов (Рисунок 2.8). Левая часть ($x < 0$) этих линий является результатом соображений симметрии. Эти линии могут также использоваться в качестве линий влияния для определения прогиба и изгибающего момента при $x = 0$, возникающих в результате воздействия соседних колёсных нагрузок. Эти выражения представляют собой сильно затухающие гармонические волны с длиной волны $2\pi L$. Поэтому они также являются хорошим инструментом для аппроксимации конечных балок с центральной колесной нагрузкой при условии, что длина балки больше $2\pi L$.

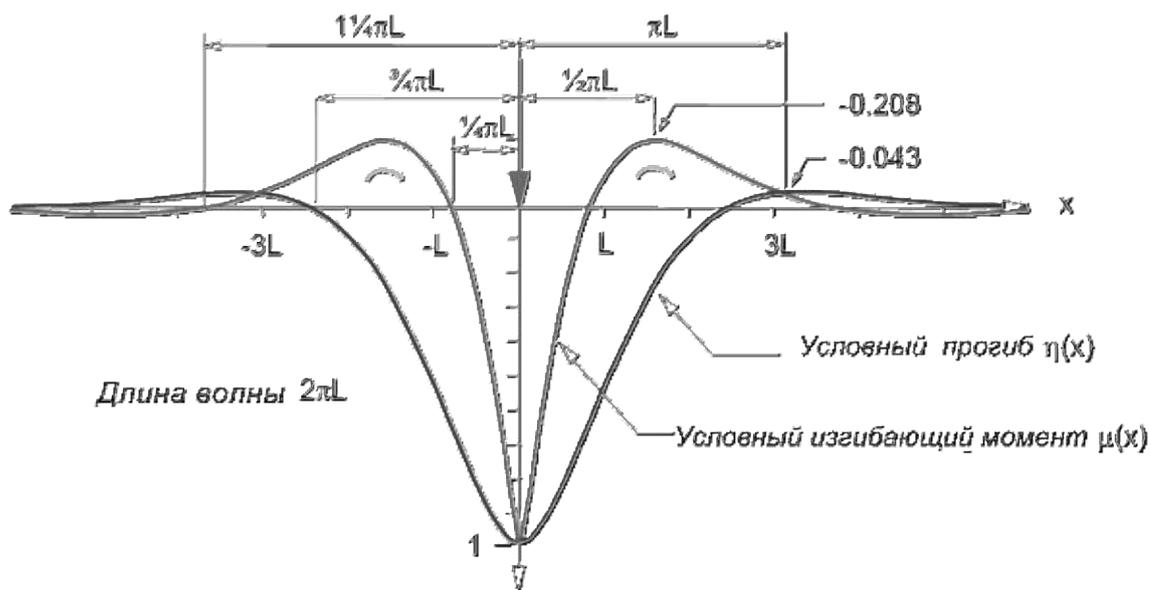


Рисунок 2.8 – Функции $\eta(x)$ и $\mu(x)$

Принимая во внимание функции $\eta(x)$ и $\mu(x)$ (2.43), имеется возможность рассчитать прогиб рельса y и изгибающий момент рельса M для цельного рельса (имеется ввиду без повреждений), изолированного стыка с поперечной силой сдвига 50%, а также произвести расчет для изломанного рельса [112] (Рисунок 2.9 и 2.10). Влияние непосредственно самой балки (рельса) на прогиб или на момент вне точки приложения нагрузки может быть определено на основе графиков, линии прогиба и линии влияния момента инерции рельса.

Направление движения \longrightarrow

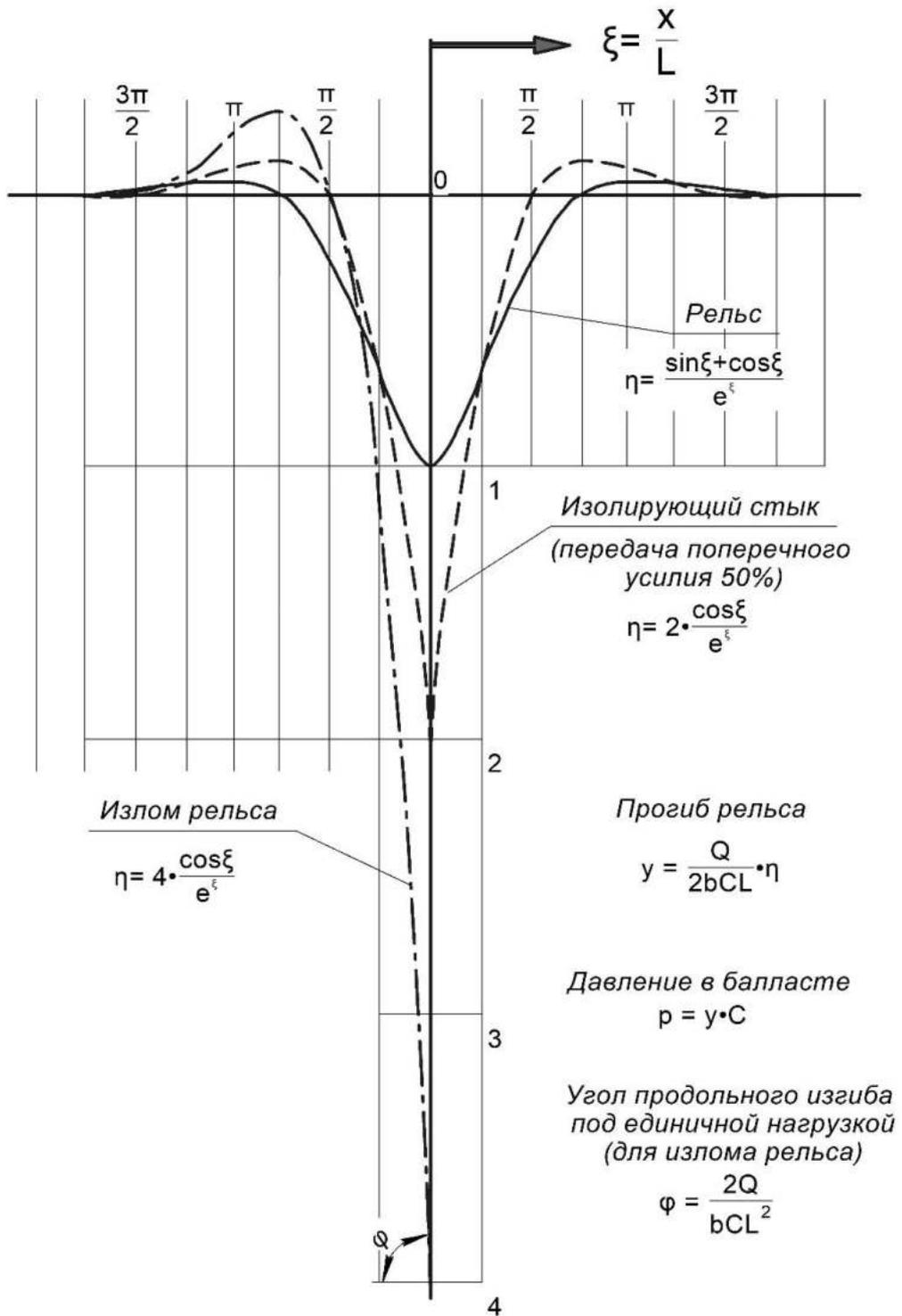


Рисунок 2.9 – Прогиб рельса $\eta(x)$ по [112]

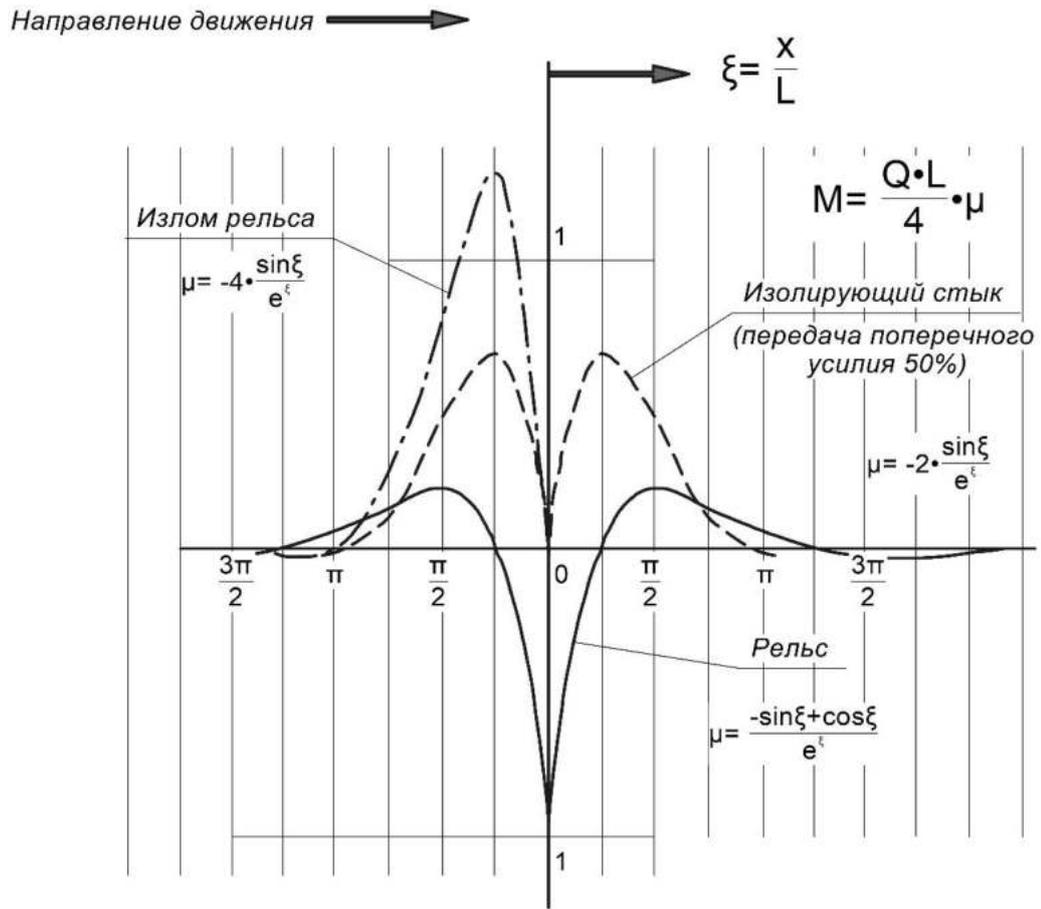


Рисунок 2.10 – Изгибающий момент рельса $\mu(x)$ по [112]

Самый наибольший отрицательный изгибающий момент при одноосном нагружении рельса происходит на расстоянии $0,5\pi L$ от точки приложения нагрузки и составляет 21%, а при двухосном нагружении рельса на расстоянии πL от точки приложения нагрузки и составляет 42% от положительного крутящего момента под колесом. Это следует учитывать при исследовании усталостно-прочностных характеристик материала рельса с микротрещинами (Head Checks) на поверхности катания рельса. В изолированном стыке под воздействием катящегося колеса начинающийся перепад поверхности катания на линии прогиба рельса ведет к импульсному возмущению в комбинации с быстрым ухудшением положения пути на балласте [115]. При изломе рельса увеличивается отрицательный изгибающий момент на расстоянии $0,25\pi L$ от места излома и составляет до 129% относительно положительного крутящего момента рельса под колесом. Наибольший теоретический подъем рельса при одноосном нагружении происходит на

расстоянии πL от точки приложения нагрузки и составляет 4%, а при двухосном нагружении на расстоянии $2\pi L$ от точки приложения нагрузки и составляет 8% от линии прогиба под осью колеса.

Подъем рельса, возникающий непосредственно в пути, бывает меньше или соответственно больше, чем теоретическое значение в зависимости от массы путевой решётки или в зависимости от негативного коэффициента модуля упругости безбалластного пути. При оценке стабильности классического балластного пути при повышении температуры рельсов в летний период следует принимать в расчёт снижение сопротивления поперечному сдвигу в районе подъёмной волны.

2.2.2 Метод DB

Данный метод описан в [116, 117].

Воздействие на шпалу выводится из следующей формулы:

$$R_{max} = S = \frac{Q_{total} \cdot l}{2 \cdot L} \Rightarrow R_{max} = \frac{Q_{total}}{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{total} \cdot l^4}{4 \cdot E \cdot J \cdot l}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_{max} = Q_{total} \cdot \frac{2}{2\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{total} \cdot l^3}{E \cdot J}} = \bar{A}_{stat} \cdot Q_{total}, \quad (2.42)$$

где L – это упругая длина пути, данная как:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot J \cdot l}{\rho_{total}}}, \quad (2.43)$$

а \bar{A}_{stat} также рассчитывается по формуле (2.49).

Также:

$$Q_{total} = Q_{wheel} \cdot (1 + t \cdot \bar{s}), \quad (2.44)$$

где \bar{s} – коэффициент состояния пути, находящийся в диапазоне от 0,1φ до 0,3φ, в соответствии со следующим:

– $\bar{s} = 0,1\varphi$ – для состояния пути с качественным показателем – «отлично»;

– $\bar{s} = 0,2\varphi$ – для состояния пути с качественным показателем – «хорошо»;

– $\bar{s} = 0,3\varphi$ – для состояния пути с качественным показателем – «удовлетворительно»;

Коэффициент φ – является функцией скорости, как описано ниже.

Для $V < 60$ км/ч - $\varphi = 1$;

Для $60 < V < 200$ км/ч:

$$\varphi = 1 + \frac{V-60}{140}, \quad (2.45)$$

где V – это максимальная скорость движения подвижного состава на данном участке пути;

t – это коэффициент, который зависит от вероятности возникновения события ($t = 1$ для $P = 68,3\%$, $t = 2$ для $P = 95,5\%$ и $t = 3$ для $P = 99,7\%$).

Таким образом, формула (2.41) преобразуется в:

$$R_{max} = \left(1 + 0,9 \cdot \left(1 + \frac{V_{max}-60}{140}\right)\right) \cdot \bar{A}_{stat} \cdot Q_{wheel}. \quad (2.46)$$

Для $V_{max} \leq 200$ км/ч с вероятностью появления события $P = 99,7\%$, где при Q_{wheel} – статическая нагрузка на колесо (половина нагрузки на ось), \bar{A}_{stat} рассчитывается по уравнению (2.49). Для скоростей движения свыше 200 км/ч введён приведенный коэффициент динамического компонента:

$$R_{max} = \left(1 + 0,9 \cdot \left(1 + \frac{V-60}{380}\right)\right) \cdot \bar{A}_{stat} \cdot Q_{wheel}. \quad (2.47)$$

Но, исходя из проведённых исследований, описанных в источниках [118, 119, 120], что формула (2.47) приводит к еще большей недооценке действующих нагрузок на путь, чем формула (2.46), которая позволяет определить размеры элементов верхнего строения пути, например шпал. Таким образом, формула (2.46) является наиболее предпочтительной при определении конструктивных типоразмеров элементов подрельсового основания, в частности определения конструктивных особенностей железобетонных шпал.

2.2.3 Метод SNCF

Данный метод описан в [118, 121].

Воздействие на шпалу рассчитывается по следующему уравнению:

$$R_{total} = (Q_{wheel} + Q_{\alpha} + 2 \cdot \sqrt{[\sigma^2 (\Delta Q_{NSM})] + [\sigma^2 (\Delta Q_{SM})]}) \cdot \bar{A}_{stat} \cdot 1,3, \quad (2.48)$$

где R_{total} - общее воздействие на шпалу после распределения действующей нагрузки;

Q_{wheel} - статическая нагрузка на колесо (половина осевой нагрузки);

Q_{α} - нагрузка, связанная с недостаточными уклонами (непогашенными ускорениями);

$\sigma (\Delta Q_{NSM})$ - стандартное отклонение не подвешенной (или неподдрессоренной) массы транспортного средства;

$\sigma (\Delta Q_{SM})$ - стандартное отклонение подвешенной (или поддрессоренной) массы транспортного средства.

Коэффициент 2 в приведенном выше уравнении используется с вероятностью 95,5%.

Кроме того, \bar{A}_{stat} - это коэффициент статической реакции шпалы, равный:

$$\bar{A}_{stat} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot 4 \sqrt{\frac{\rho_{total} \cdot l^3}{E \cdot J}}, \quad (2.49)$$

где ρ_{total} - коэффициент общей статической жесткости пути в кН/мм;

l - расстояние между шпалами в мм;

J - модуль упругости и момент инерции рельса.

2.2.4 Метод AREMA

Метод описан в AREMA [119].

Полная нагрузка на путь (статическая и динамическая) зависит от коэффициента динамического воздействия подвижного состава на путь:

$$\Theta = \frac{D_{33} \cdot V}{D_{wheel} \cdot 100}, \quad (2.50)$$

где D_{33} - это диаметр 33-дюймового эталонного колеса;

D_{wheel} - диаметр колеса транспортного средства в дюймах;

V – скорость подвижного состава в милях/час.

Общая нагрузка определяется следующим образом:

$$Q_{total} = Q_{wheel} \cdot (1 + \Theta). \quad (2.51)$$

Опорный модуль рельса U , измеряемый в фунтах на квадратный дюйм, полученный из отношения:

$$U = \frac{\rho}{l}, \quad (2.52)$$

а также коэффициент:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{U}{4 \cdot E \cdot J}} = \sqrt[4]{\frac{\rho}{4 \cdot E \cdot J \cdot l}} = \frac{1}{L}. \quad (2.53)$$

Кривая зависимости для прогиба y используется для определения максимального значения давления p_{max} и максимальной нагрузки подрельсовой площадки на отдельную шпалу R_{max} , которая определяется по формуле:

$$\begin{aligned} R_{max} &= p_{max} \cdot l = U \cdot y_{max} \cdot l = U \cdot \frac{\beta \cdot Q_{total}}{2 \cdot U} = \\ &= \sqrt[4]{\frac{\rho_{total}}{4EJl}} \cdot \frac{Q_{total} \cdot l}{2} \Rightarrow \\ \Rightarrow R_{max} &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{total} \cdot l}{E \cdot J}} \cdot Q_{total} = \bar{A}_{stat} \cdot Q_{total} \end{aligned} \quad (2.54)$$

где Q_{total} рассчитывается по формуле (2.51), а \bar{A}_{stat} - по формуле (2.49).

Отметим, что данная методика не принимает в учет вероятность возникновения события.

И в последующем формула (2.54) превращается в:

$$R_{max} = \bar{A}_{stat} \cdot \left(1 + \frac{D_{33} \cdot V}{D_{wheel} \cdot 100}\right) \cdot Q_{wheel}. \quad (2.55)$$

2.3 Предлагаемые автором положения расчёта

2.3.1 Предпосылки для выбора расчетной модели

В отечественной литературе параметр модуля упругости пути определяется как отношение упругого отпора основания пути к единице прогиба, в основе которой лежит модель Фусса-Винклера [113]. В таком случае рассматривается влияние каждого слоя рельсошпальной решётки на общий модуль упругости пути. При определении напряжений в рельсах от изгиба и кручения и напряжений в различных элементах подрельсового основания определяются две эквивалентные силы, принимаемые за нагружение расчётных точек. Данные модели позволяют определить расчётный изгибающий момент в рельсах, максимальную нагрузку на шпалу, максимальный прогиб рельса для условий классического пути. Согласно существующим методикам конструкция верхнего строения пути должна находиться в исправном состоянии. Значение модуля упругости пути U и коэффициента относительной жесткости рельсового основания и рельса k определялось экспериментальным путём комплексно, для заданных летних условий, без указания температурных диапазонов. В трудах В.П. Крачковского [122] подробно описано, что коэффициент относительной жесткости рельсового основания k зависит от модуля упругости пути U , который в свою очередь не является первичным и самостоятельным коэффициентом. Модуль упругости U представляет собой фиктивную силу, приходящуюся на 1 погонный см рельса и вызывающую его осадку на 1 см.

Модель сравнения базбалластного пути как многослойной балки, лежащей на модифицированном основании Фусса-Винклера, предложенная А.Я Коганом, требует сложных вычислений, вытекающих одно из другого, а также не учитывает влияние низких температур на упругие характеристики отдельных слоев.

Методы и методики, применяемые в отечественной практике, не позволяют в полной мере произвести расчёт требуемых параметров пути для БКП, а также не учитывают влияние температур на упругие характеристики элементов рельсовых скреплений.

В зарубежной практике расчётов пути на прочность в основе методов лежит также модель Фусса-Винклера [113] расчёта балки на сплошном упругом основании, дополненная Циммерманном [114]. Как в методе SNCF, так и в методе AREMA – основные силовые параметры пути определяются для классического балластного пути с рельсошпальной решёткой на железобетонных шпалах. В методе DB в основе расчёта лежит модель Винклера-Циммерманна с дополнениями профессора Айзенманна [112, 123], который предполагает разделение на два этапа, аналогично предложениям В.П. Крачковского [124], и позволяет произвести вычисления для классического балластного пути, также и для БКП. Для вычисления прогиба рельса БКП вводятся известные первичные расчётные величины, что также аналогично предложениям В.П. Крачковского [122]. Но в данной модели, также как и в остальных моделях, не учитывается в расчётах влияние температур на упругие характеристики элементов и/или различных слоев пути.

На основе проведённого анализа выбрана в качестве расчётной модель для определения прогиба рельса БКП, предложенная и реализованная профессором Айзенманном [112].

2.3.2 Метод расчета упругого прогиба рельса БКП

Предлагается дополнить метод расчёта [112] формулой определения жёсткости узла рельсового скрепления с промежуточным эластичным слоем с введением температурных коэффициентов изменения статической и динамической жёсткости, определённых экспериментальным путём в лабораторных условиях.

Характеристическая длина, т.н. упругоработающая длина рельса для БКП, определяется по следующему уравнению:

$$L = \left(\frac{4EIa}{c} \right)^{0.25}, \quad (2.56)$$

где E – модуль упругости рельсовой стали, Н/мм²;

I – момент инерции рельса, мм⁴;

a – расстояние между осями дискретных точек опирания (промежуточных рельсовых креплений), мм;

c – модуль упругости дискретной точки опирания рельса (промежуточного рельсового крепления), Н/мм.

В таком случае, прогиб рельса y в заданной точке, при нагружении рельса несколькими колёсными парами определяется исходя из требований уравнения, мм:

$$y = \frac{a}{2cL} \sum (Q_i \eta_i), \quad (2.57)$$

где Q_i – сила, действующая на колесо, равная половине осевой нагрузки, Н;

η_i – параметрический функциональный фактор, для учёта влияния соседних осей:

$$\eta_i = \frac{\sin \xi_i + \cos \xi_i}{e^{\xi_i}}, \quad (2.58)$$

$$\xi_i = \frac{x_i}{L}, \quad (2.59)$$

где x_i – расстояние от i -той оси до рассматриваемой точки, мм.

Для российских условий автор предлагает определять жёсткость узла рельсового крепления, в состав которого входят два упругих элемента, как показано на Рисунке 2.11, исходя из взаимного влияния двух упругих элементов по аналогии с ГОСТ 34078 [99]. В таком случае жёсткость узла определяется по следующему равенству, Н/мм:

$$c = \frac{c_{\text{пр}} \cdot c_{\text{эл}}}{c_{\text{пр}} + c_{\text{эл}}}, \quad (2.60)$$

где $c_{\text{пр}}$ – жесткость подрельсовой прокладки;

$c_{\text{эл}}$ – жесткость эластичной прокладки.

В расчётах для рассматриваемого рельсового крепления Система 300, вне зависимости от изменения температур, принимается постоянным значение статической и динамической жёсткости подрельсовой прокладки, выполненной из материала EVA 14%, со значениями 500 кН/мм и 1500 кН/мм соответственно.

В случае необходимости имеется возможность варьировать вводными параметрами подрельсовой прокладки, что отразится на конечном результате вычислений. Но как показывает статистика, влияние изменения жёсткости подрельсовой прокладки в данной системе рельсового крепления не превышает 5%.



Рисунок 2.11 – Схематическое изображение прокладок в узле крепления

С учётом влияния температур на упругие характеристики эластичной промежуточной прокладки в дискретной точке опирания рельса, статическая жёсткость эластичной прокладки определяется следующим образом, Н/мм:

$$c_{stat\text{эп}^{ti}} = c_{stat1} \cdot \tau_{stat1}, \quad (2.61)$$

где c_{stat1} – значение статической жёсткости эластичной прокладки, измеренное при комнатной температуре или заявленное производителем, кН/мм;

τ_{stati} – коэффициент изменения статической жёсткости эластичной прокладки при i -той температуре окружающего воздуха.

В свою очередь динамическая жёсткость эластичной прокладки определяется с учётом формулы (2.61), Н/мм:

$$c_{dynэп^{ti}} = c_{statэп^{ti}} \cdot \tau_{dyni}, \quad (2.62)$$

где τ_{dyni} – коэффициент изменения динамической жёсткости эластичной прокладки при i -той температуре окружающего воздуха.

Принимая во внимание взаимовлияние близко расположенных друг к другу колёсных пар на прогиб рельса, автором построена расчётная модель воздействия на путь двух двухосных тележек, имитирующая сцепку двух вагонов, показанная на Рисунке 2.12.

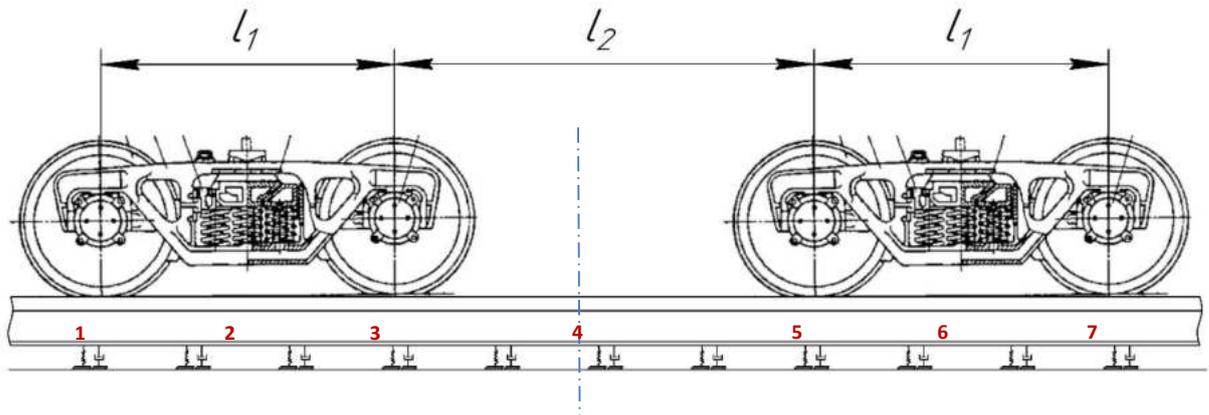


Рисунок 2.12 – Схема расположения тележек

Расчётная модель позволяет определить прогиб рельса как в статическом, так и в динамическом нагружении рельса от подвижных единиц. В расчёте (2.56) и (2.57), связанном с динамическим взаимодействием между БВСП и подвижным составом, учитывается коэффициент динамического усиления на модуль упругости дискретной точки опирания рельса, который определяется по следующему уравнению, согласно [2]:

$$k_{dyn} = 1 + 0.45\varphi, \quad (2.63)$$

где φ – коэффициент влияния скоростей движения подвижного состава.

При скоростях движения менее 60 км/ч данный коэффициент принимается $\varphi = 1$ вне зависимости типа движения, в других случаях определяется по следующим равенствам, согласно [2]:

для грузового движения при скоростях $60 < V \leq 140$ км/ч:

$$\varphi = 1 + 0,5 \cdot \frac{V-60}{80}, \quad (2.64)$$

для пассажирского движения при скоростях $60 < V \leq 400$ км/ч:

$$\varphi = 1 + 0,5 \cdot \frac{V-60}{190}. \quad (2.65)$$

Согласно [123] сила, возникающая в дискретной точке опирания рельса, определяется по следующему равенству, Н:

$$S = c \cdot y. \quad (2.66)$$

Математическая модель позволяет произвести вычисления прогиба рельса БКП в заданной точке с учётом воздействия отрицательной температуры окружающей среды. Также имеется возможность варьировать входными параметрами, такими как:

- тип подвижного состава – грузовой или пассажирский;
- геометрические характеристики тележки вагона;
- осевая нагрузка;
- скорость движения;
- тип рельса;
- материал эластичной прокладки;
- номинальная статическая жёсткость эластичной прокладки;
- расстояние между узлами рельсовых креплений;
- температура воздуха.

С целью проверки работоспособности расчётной модели были определены прогибы рельса БКП при статическом и динамическом нагружении от воздействия подвижного состава в диапазоне температур от -50 °С до $+23$ °С для грузового движения с осевой нагрузкой 250 кН со скоростью 70 км/ч, статической жесткостью эластичной прокладки 27,5 кН/мм, расстоянием между узлами крепления 650 мм и рельсом типа Р65, расстояние $l_1=1850$ мм, расстояние $l_2=3420$ мм (Рисунок 2.13).

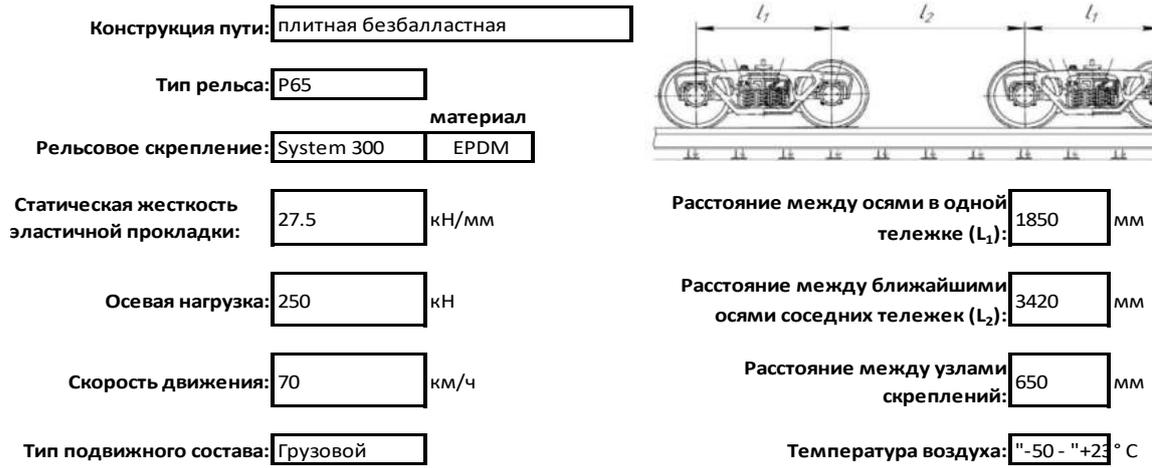


Рисунок 2.13 – Входные параметры для расчёта

Результаты вычислений изменения прогиба рельса БКП от температуры узлов рельсового скрепления типа Система 300, для эластичных прокладок из двух материалов EPDM и Byrel, представлены автором в виде графиков зависимостей на Рисунке 2.14.

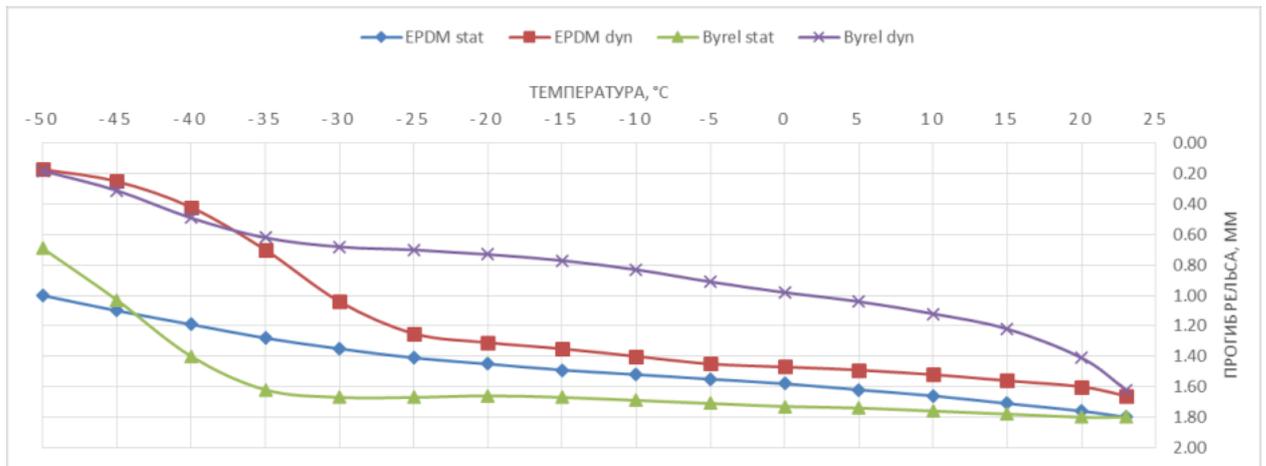


Рисунок 2.14 – График зависимостей прогиба рельса от температуры

Для автоматизации процессов вычисления адаптированная математическая модель реализована автором в виде макроса в Excel и в виде программного кода комплекса Matlab (Приложение А).

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1) Действующая на сети ОАО «РЖД» Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надёжности [103] в большей степени дублирует положения документа №ЦПТ-52/14 [104]. Основной акцент сделан на определении напряженно-деформированного состояния классической конструкции пути, для железобетонных или деревянных шпал. Значения модуля упругости пути U и коэффициента относительной жесткости рельсового основания и рельса k представлены в виде табличных данных для летних условий. Не предусматривается определение напряженно-деформированного состояния БКП.

2) Методика, предложенная А.Я. Коганом, предполагает комплексную оценку безбалластной конструкции пути как многослойной системы, содержащей три бесконечной длины балки. Данная система не предполагает оценку воздействия температуры на отдельно взятую верхнюю балку, которая имитирует рельс.

3) Методы DB, SNCF и AREMA рассматривают оценку напряжённого состояния рельсов в конструкции классического пути, состоящего из рельсошпальной решётки. Также не учитывается влияние температур на упругие характеристики отдельных элементов пути.

4) Метод Айзенманна предполагает определение упругого прогиба рельса для классической конструкции пути, состоящей из рельсошпальной решётки, а также для БКП. Расчетная модель учитывает предложения В.П. Крачковского об использовании первичных коэффициентов, влияющих на модуль упругости пути. Для безбалластной конструкции принимается в расчёт жёсткость узла рельсового скрепления, как главного элемента, формирующего упругие характеристики всей конструкции пути в целом. Отсутствует влияние температуры на изменение жёсткости узла рельсового скрепления.

5) Автор предлагает дополнить расчётную модель, указанную в методе Айзенманна, формулой определения жёсткости узла рельсового скрепления с эластичным слоем с введением коэффициентов влияния температуры на упругие характеристики элементов рельсового скрепления, полученных аппроксимацией зависимостей влияния низких температур на статическую и динамическую жёсткость эластичной прокладки рельсового скрепления, представленных в следующей главе.

6) Предложенная расчётная модель позволяет прогнозировать изменение прогиба рельса БКП с учетом влияния низких температур на жесткость узлов рельсовых скреплений в статическом и динамическом воздействии от подвижного состава.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Лабораторные испытания

3.1.1 Испытания эластичных прокладок в лаборатории Мюнхенского технического университета

В соответствии с поручениями, принятыми на совещании Немецкой инициативы по развитию ВСМ в России [125], были проведены испытания эластичных прокладок, входящих в состав узла скрепления System 300 в испытательной лаборатории Мюнхенского технического университета [126, 127].

Для проведения испытаний в испытательную лабораторию были направлены 4 (четыре) эластичные прокладки Zwp 104 NT номинальной жесткостью 22,5 кН/мм из материала EPDM.

Статические и динамические испытания по определению жесткости эластичных прокладок Zwp 104 NT проводились при помощи сервогидравлической испытательной машины, тип Wolpert 200 кН. Образец был помещен на плоскую жесткую пластину (размеры: 350 x 400 мм), и на его центральную часть была приложена нагрузка дополнительной плоскопараллельной пластиной тех же размеров. Между пластинами распределения нагрузки и испытуемым изделием каждый раз наносилось немного абразивного материала заводского производства на подкладку P240, изготовленной с применением жесткой тканевой основы.

Перед проведением испытаний, осуществлялось температурное воздействие на испытываемые образцы и испытательное оборудование в течение 16 часов (Рисунок 3.1).

Нагрузка, прилагаемая на испытательный образец, измерялась при помощи месдозы (производитель - Huppert, тип - 225 кН). Полученная амортизация, соответствующая смещению обеих нагружаемых плит в ходе испытаний,

передавалась посредством индукционных датчиков перемещения, расположенных по краям плит нагружения, со средним значением четыре (производитель НВМ, тип - WA 20). Месдоза и датчики перемещения соответствуют классу 1. Гидравлическое оборудование испытательной установки произведено фирмой Wolpert, регулировка осуществляется при помощи цифрового регулятора фирмы Roell Amsler типа «Лебедка с гидроприводом».

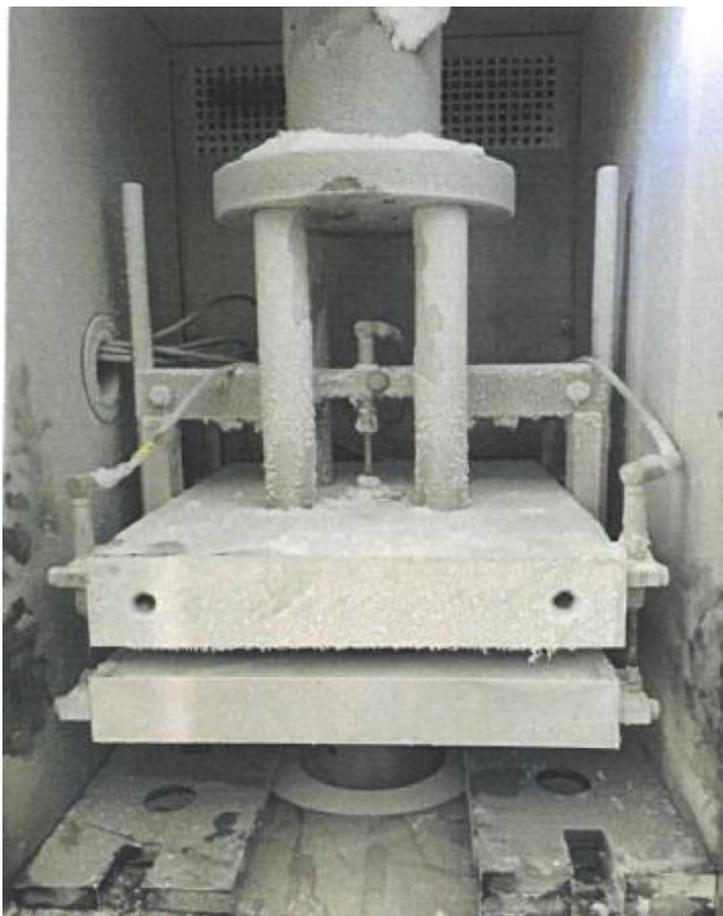


Рисунок 3.1 – Выдержка образцов и оборудования при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

После помещения испытываемого образца на испытательную установку было первоначально выполнено три калибровочных цикла нагружения и снятия нагрузки в диапазоне от 18 кН до 85 кН. При третьем цикле нагружения была произведена регистрация нагрузки и деформации с частотой дискретизации 10 Гц. Статическая жесткость была определена на основании деформаций при диапазоне нагрузок от 18 кН до 68 кН. Скорость приложения нагрузки составила 2 кН/с.

Испытания проводились в условиях предельных температур $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зафиксированные статические характеристики эластичных прокладок

представлены автором в Приложении Б. Результаты данных испытаний отражены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты испытаний в условиях предельных температур

Образец №	Статическая жёсткость, кН/мм		
	-50 °С	+70 °С	+100 °С
1	50,9	24,1	23,6
2	55,1	24,4	23,4
3	58,2	22,1	21,3
4	53,5	23,7	22,5
Среднее	54,4	23,6	22,7

С целью определения зависимостей статической и динамической жесткостей эластичных прокладок были проведены также дополнительно испытания по определению статической и динамической жесткостей согласно требованиям ДВ [93]. Испытания проводились в следующей последовательности.

После помещения испытываемого образца на испытательную установку было первоначально выполнено три цикла нагружения и снятия нагрузки в диапазоне от 18 кН до 85 кН. При третьем цикле нагружения была произведена регистрация нагрузки и деформации с частотой дискретизации 10 Гц. Статическая жесткость была определена на основании деформации при 18 кН и 68 кН. Скорость применения нагрузки составила 2 кН/с.

Затем на образце была повторно приложена нагрузка до соответствующего среднего нагружения в 43 кН применяемой синусоидальной нагрузки на основании со скоростью 2 кН/с. После достижения средней нагрузки была выполнена синусоидальная нагрузка с частотой 10 Гц (при комнатной температуре: 5 Гц, 10 Гц и 20 Гц) при предельной нагрузке 68 кН и минимальной нагрузке 18 кН. При этом измеренные значения были получены при частоте дискретизации 500 Гц.

Испытания проводились в условиях температур +50 °С, комнатная температура (+23 °С), 0 °С, -10 °С, -20 °С. Зафиксированные статические характеристики эластичных прокладок представлены автором в Приложении Б

на Рисунках Б.13 – Б.32. Результаты испытаний отражены в Таблице 3.2 и Таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Результаты испытаний эластичных прокладок при комнатной температуре

Температура	Образец №	Статическая жесткость, кН/мм	Динамическая жесткость, кН/мм			Коэффициент изменения жесткости		
			5 Гц	10 Гц	20 Гц	5 Гц	10 Гц	20 Гц
23 °С	1	26,8	29,6	29,6	29,4	1,32	1,32	1,31
	2	26,7	29,0	29,3	29,1	1,28	1,30	1,29
	3	23,6	25,8	26,2	25,8	1,15	1,16	1,15
	4	25,7	28,9	29,4	29,1	1,28	1,31	1,14
Среднее		25,7	28,3	28,6	28,4	1,25	1,27	1,22

Таблица 3.3 – Результаты испытаний эластичных прокладок при воздействии температур +50 °С, 0 °С, -10 °С и -20 °С

Температура	Образец №	Статическая жесткость, кН/мм	Динамическая жесткость, кН/мм	Коэффициент изменения жесткости	Требования ДВ
			10 Гц		
50 °С	1	25,4	27,6	1,23	$1,0 \leq f_v \leq 1,5$
	2	25,8	27,6	1,23	
	3	23,3	25,0	1,11	
	4	24,9	26,7	1,19	
	Среднее	24,9	26,7	1,19	
0 °С	1	29,3	34,3	1,52	$1,0 \leq f_v \leq 2,0$
	2	30,1	33,3	1,48	
	3	30,1	29,6	1,32	
	4	30,2	34,9	1,55	
	Среднее	29,9	33,0	1,47	
-10 °С	1	32,9	36,5	1,62	$1,0 \leq f_v \leq 2,0$
	2	31,8	36,2	1,61	
	3	30,2	32,5	1,44	
	4	32,4	26,2	1,61	
	Среднее	31,8	35,4	1,57	
-20 °С	1	35,2	39,1	1,74	$1,0 \leq f_v \leq 2,5$
	2	32,1	38,2	1,70	
	3	32,1	35,1	1,56	
	4	33,6	39,0	1,73	
	Среднее	33,25	37,85	1,68	

3.1.2 Испытания эластичных прокладок в лаборатории Шанхайского университета Тунци

Испытания проводились по методике [93] в испытательной лаборатории Шанхайского железнодорожного сертификационного центра при университете Тунци. Испытаниям подверглись эластичные прокладки, применяемые в конструкции рельсовых креплений WJ-8C и System 300, из материала Byrel и EPDM, двух европейских компаний производителей, поставляющих данные продукты для китайского рынка [128, 129]. Заявленная конструктивная жёсткость испытываемых прокладок была 22,5 кН/мм.

Статические и динамические испытания для расчета жесткости эластичных прокладок проводились при помощи сервогидравлической испытательной машины, с усилием не менее 100 кН. Последовательность испытаний по определению характеристик статической и динамической жёсткостей выполняли в соответствии с требованиями [95]. Также дополнительным требованием было определение величин статической и динамической жёсткости при предельной температуре -50 °С. Результаты испытаний отражены в Таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты испытаний эластичных прокладок при воздействии температур 23 °С, -35 °С и -50 °С

Температура		Показатель жесткости, кН/мм					
		23 °С		-35 °С		-50 °С	
Материал	Образец №	Стат.	Дин.	Стат.	Дин.	Стат.	Дин.
EPDM	1	23,13	30,71	39,40	86,73	45,98	937,92
	2	23,73	31,08	39,60	88,35	46,57	916,30
	3	23,53	30,08	39,52	88,12	51,93	994,44
Среднее		24,46	30,62	39,51	87,73	48,16	949,55
Byrel	1	24,77	28,23	27,61	93,64	79,01	733,22
	2	24,57	28,02	28,40	102,46	85,00	732,74
	3	24,36	27,72	28,02	92,75	100,01	927,14
Среднее		24,56	27,99	28,01	96,28	88,00	797,7

3.1.3 Коэффициенты жёсткости эластичных прокладок в зависимости от температуры окружающей среды

Зарубежные нормы к рельсовым скреплениям с промежуточным эластичным слоем [93, 94] устанавливают требования к изменению показателя жёсткости прокладок в зависимости от изменения температуры окружающей среды. Предельно минимальные температуры воздуха, установленные в требованиях, определяются на основании метеорологических наблюдений за последние 50 лет на дату утверждения нормативного документа. Так в требованиях DB [93] минимальный предел температуры при испытаниях установлен при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в требованиях железных дорог КНР [94] минимальный порог температуры при испытаний установлен при $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В отечественных требованиях, подготовленных для участка ВСМ Москва – Казань [101], регламентирована температура $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$. Учитывая данные требования, автор рассматривал изменение показателей жёсткости эластичных прокладок, изготовленных из двух представленных на рынке Китая материалов, в диапазоне температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Серии среднестатистических результатов испытаний эластичных прокладок из материала EPDM и Byrel представлены, соответственно, в Таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Среднестатистические результаты испытаний эластичных прокладок из материала EPDM и Byrel

T, °C	Значение жёсткости, кН/мм						
	-50	-35	-20	-10	0	+23	+50
EPDM							
c_{stat}	54,40	39,50	33,25	31,80	29,90	25,70	24,90
c_{dyn}	949,55	87,73	37,85	35,40	33,00	28,60	26,70
Byrel							
c_{stat}	88,00	28,01	26,94	26,41	25,78	24,56	23,92
c_{dyn}	797,70	96,28	78,52	65,48	53,19	27,99	25,12

Исходя из полученных данных, имеется возможность определить коэффициенты изменения показателей статической и динамической жёсткостей

эластичных прокладок. Автор предлагает определять по аналогии с ГОСТ 34078 [99].

Коэффициент изменения статической жёсткости эластичной прокладки, как отношение значения статической жёсткости, измеренного при заданной температуре, к значению статической жёсткости, измеренному при комнатной температуре (+23 °C):

$$\tau_{stati} = \frac{c_{stati}}{c_{stat1}}, \quad (3.1)$$

где c_{stat1} – значение статической жёсткости эластичной прокладки, измеренное при комнатной температуре, кН/мм;

c_{stati} – значение статической жёсткости эластичной прокладки, измеренное при заданной температуре, кН/мм.

Коэффициент изменения динамической жёсткости эластичной прокладки, как отношение значения динамической жесткости, измеренному при заданной температуре, к значению статической жесткости, измеренному при аналогичной температуре окружающей среды:

$$\tau_{dyni} = \frac{c_{dyni}}{c_{stati}}, \quad (3.2)$$

где c_{dyni} – значение динамической жёсткости эластичной прокладки, измеренное при заданной температуре, кН/мм;

c_{stati} – значение статической жёсткости эластичной прокладки, измеренное при заданной температуре, аналогичной при определении c_{dyni} , кН/мм.

Результаты вычислений коэффициентов τ_{stat} и τ_{dyn} , выполненные по формулам (3.1) и (3.2), представлены в Таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Коэффициенты изменения статической и динамической жёсткости эластичных прокладок из материала EPDM и Byrel

Т, °С	Коэффициенты изменения жесткости						
	-50	-35	-20	-10	0	+23	+50
EPDM							
c_{stat}	2,12	1,54	1,29	1,24	1,16	1	0,97
c_{dyn}	17,45	2,22	1,14	1,11	1,10	1,11	1,07
Byrel							
c_{stat}	3,58	1,14	1,13	1,11	1,10	1,00	0,97
c_{dyn}	9,06	3,52	2,91	2,48	2,06	1,14	1,05

Для указанных в Таблице 3.6 значений коэффициентов были построены графики функций аппроксимирующих зависимостей для коэффициентов изменения статической (Рисунок 3.2) и динамической (Рисунок 3.3) жёсткости эластичных прокладок от воздействия низких температур.

Аппроксимирующая зависимость изменения τ_{stat} для эластичной прокладки из материала EPDM описывается следующим степенным уравнением с коэффициентом детерминации $R^2=0,99$:

$$f(x) = 7,846 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 - 2,159 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 4,625 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,0060841x + 1,16$$

Аппроксимирующая зависимость изменения τ_{stat} для эластичной прокладки из материала Byrel описывается следующим степенным уравнением с коэффициентом детерминации $R^2=0,98$:

$$f(x) = -5,683 \cdot 10^{-12} \cdot x^7 + 1,117 \cdot 10^{-10} \cdot x^6 + 1,228 \cdot 10^{-8} \cdot x^5 - 8,805 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 - 4,757 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 1,269 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0,0021914x + 1,05$$

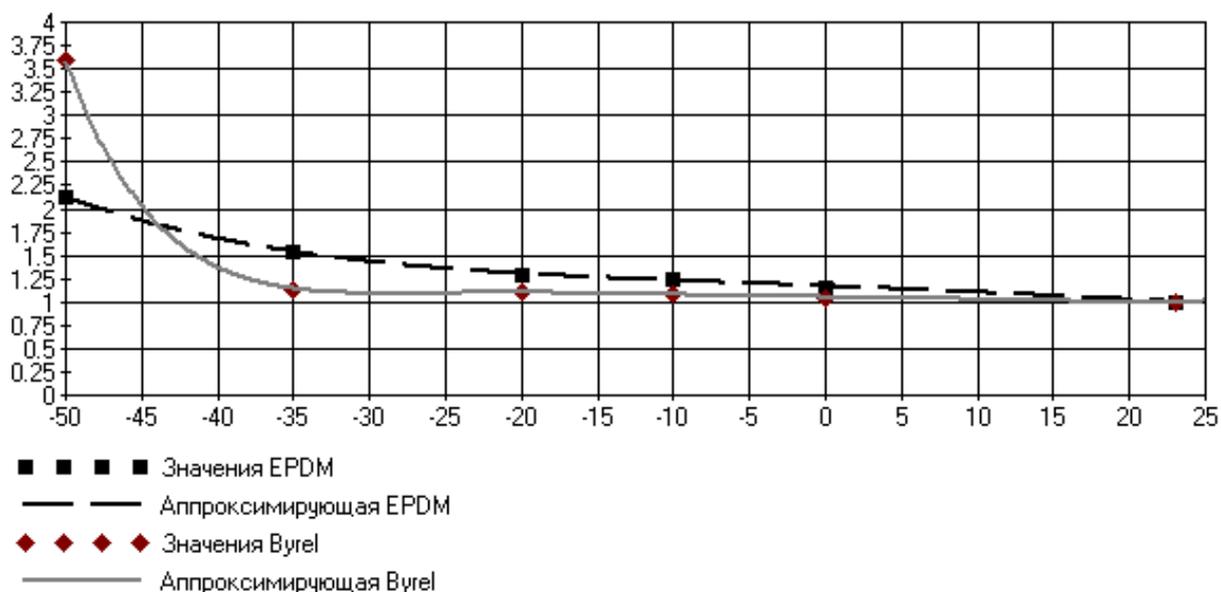


Рисунок 3.2 – Графики зависимостей коэффициентов τ_{stat} изменения статической жёсткости эластичных прокладок от температуры

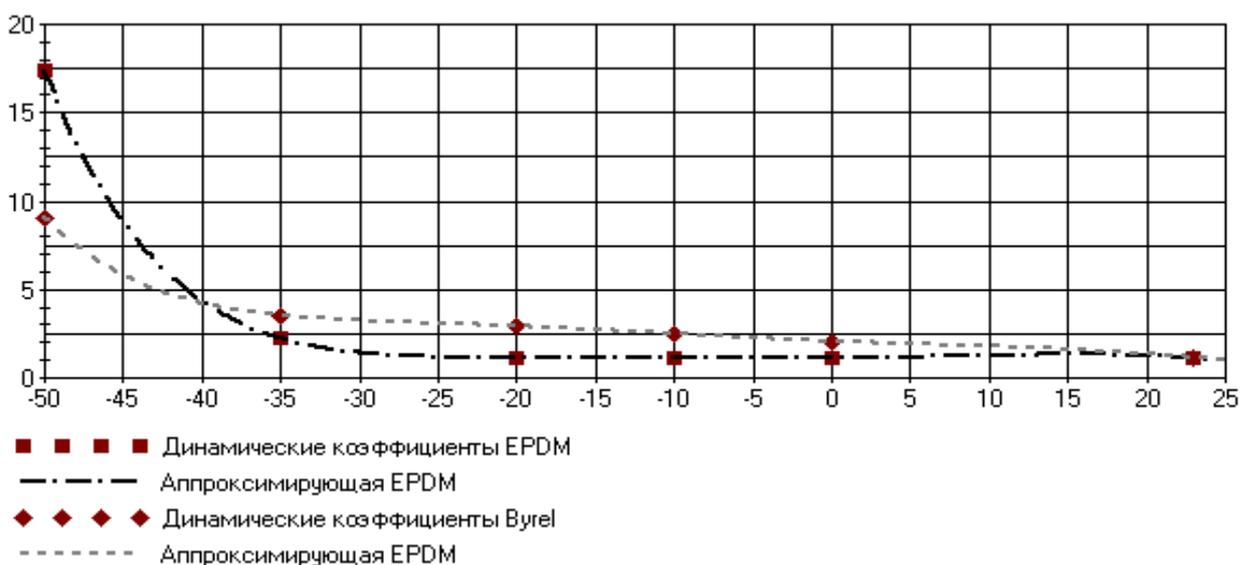


Рисунок 3.3 – Графики зависимостей коэффициентов τ_{dyn} изменения динамической жёсткости эластичных прокладок от температуры

Аппроксимирующая зависимость изменения τ_{dyn} для эластичной прокладки из материала EPDM описывается следующим степенным уравнением с коэффициентом детерминации $R^2=0,98$:

$$f(x) = 1,414 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,691 \cdot 10^{-8} \cdot x^5 - 2,652 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 - 1,242 + 1.16 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,0010553 \cdot x^2 + 0,0074826x + 1,104$$

Аппроксимирующая зависимость изменения τ_{dyn} для эластичной прокладки из материала Вугел описывается следующим степенным уравнением с коэффициентом детерминации $R^2=0,96$:

$$f(x) = 8,330 \cdot 10^{-10} \cdot x^6 - 2,925 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 - 1,927 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 - 1,101 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 8,142 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 0,0341217x + 2,0625$$

3.2 Строительство опытных БКП на ЭЖ

На основании распоряжения ОАО «РЖД» [130] в период с 11 августа 2014 г. по 15 ноября 2014 г. на ЭЖ (Рисунок 3.4) были выполнены работы по строительству четырех опытных безбалластных участков пути EBS (Tines, Польша), NBT Appitrack (Alstom, Франция), FFB (MaxBögl, Германия), LVT (РЖДстрой, Россия), с целью проведения сравнительных испытаний в равных условиях эксплуатации [89].

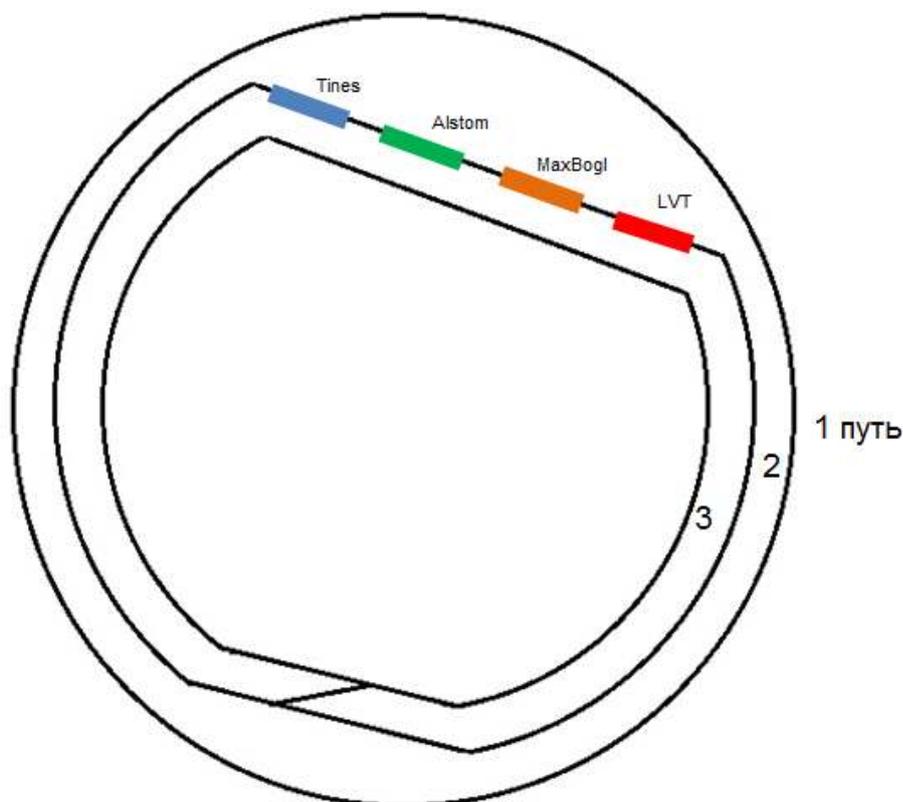


Рисунок 3.4 – Место расположения опытных участков

В процессе полигонных испытаний производились измерения физико-механических и геометрических показателей опытных конструкций пути сотрудниками отделений «Путь и путевое хозяйство» и «Комплексные исследования по взаимодействию пути и подвижного состава» АО «ВНИИЖТ» при непосредственном участии автора.

В Таблице 3.7 представлены типы рельсовых скреплений, применяемых в конструкции опытных участков пути на ЭК [131, 132, 133].

Таблица 3.7 – Рельсовые скрепления

	LVT	EBS	FFB	NBT Appitrack
Рельсовые скрепления на участках переходной жесткости (въезд/выезд)	ЖБР-65 Ш/ System 301 (Vossloh); ЖБР-65 Ш.	W30 НН (Vossloh)	W30 НН (Vossloh)	ЖБР-65 Ш
Рельсовые скрепления на безбалластных конструкциях	W30 НН (Vossloh); SBS W SL 1-900-R65 (Schwihag); Пандрол-350 (Pandrol).	W30 НН (Vossloh)	System 301 (Vossloh)	System DFF 301 (Vossloh); SFC (Pandrol).

3.2.1 Конструкция пути EBS

Конструкция пути (Рисунок 3.5) представляет собой предварительно изготовленные в заводских условиях сборные блоки с демпфирующей подливочной массой замоноличенные в путевой бетон на месте производства работ [134]. Слой путевого бетона является армированным и расположен на гидравлически-связанном слое с низким содержанием цемента, который формируется в виде непрерывного несущего слоя.

Строительство конструкции осуществлялось следующим образом: заливается гидравлически-связанный несущий слой в виде неармированной плиты из тощего бетона. Ширина плиты – 2,8 м, высота – 40 см. После этого производится связка каркаса арматуры для путевой плиты. Затем на монтажных

столбиках устанавливаются рельсы, к которым подвешиваются блоки. После чего производится регулировка положения уровня головки рельса в соответствии с проектным положением. Затем осуществляется заливка путевого бетона при помощи специального дозирующего оборудования либо непосредственно из миксеров.



1 – путевая плита; 2 – несущая плита; 3 – опорный блок; 4 – рельсовое скрепление; 5 – конструктивный шов

Рисунок 3.5 – БКП EBS

Основным отличительным элементом данной БКП является сборный опорный узел. Он состоит из бетонного блока, в конструктиве которого имеется закладной элемент рельсового скрепления. В нашем случае таковым является пластиковый дюбель Sdu 26. Несущая часть узла изготавливается из армированного бетона, в форме прямоугольного короба. Во внутрь короба укладывается амортизирующий мат, а затем на мат устанавливается сам опорный блок. После чего оставшееся пустое пространство заполняется жидким связующим компонентом, формирующим при застывании демпфирующий слой.

Прикрепление рельса к опорному блоку осуществляется посредством рельсового скрепления W30 НН (Рисунок 3.6) производства компании Vossloh. Рельс крепится с помощью двух упругих клемм, посредством нажатия от ввинчивающихся шурупов в замоноличенные под углом 5° , относительно вертикальной плоскости, дюбели. От поперечного смещения рельс удерживается двумя углонаправляющими боковыми упорами. Данный тип рельсового скрепления применяется также в конструкции LVT, а также на участках переходной жесткости, на подходах к конструкции FFB и EBS.



1-опорный блок; 2-упругая клемма Skl 30; 3- путевой шуруп Ss 35 с несъемной шайбой; 4- боковой упор Wfr 30K; 5-подрельсовая прокладка Zw 148
Рисунок 3.6 – Рельсовое скрепление W 30 НН

3.2.2 Конструкция пути NBT

Конструкция представляет собой (Рисунок 3.7) трехслойное монолитное железобетонное основание, в которое при монтаже верхнего путевого бетонного слоя замоноличены узлы рельсовых скреплений, предварительно закрепленных на выставленных по уровню рельсах. Необходимо отметить, что во время строительства опытного участка на Экспериментальном кольце работы по

строительству данного участка осуществлялись в ручном режиме. Так как при строительстве линий ВСМ работы производятся при помощи специализированных механизированных комплексов [135].

Основу конструкции составляют две скользящие бетонные плиты, уложенные друг на друга, одна из которых имеет продольный «паз», другая – продольный «шип». Таким образом, допускается продольное перемещение плит относительно друг друга, но исключается поперечное смещение. Путевая плита выполнена из армированного бетона. Ширина плиты – 2,5 м, высота – 0,24 м. Скрепления установлены с шагом 0,6 м. Плита основания – из армированного бетона, ширина – 2,8 м, высота – 0,3 м. Поперечные стыки плит располагаются через 4,8 м.



1 – несущая плита; 2 – путевая плита; 3 – рельсовое крепление System DFF 301; 4 – конструктивный шов; 5 – рельсовое крепление Pandrol SFC

Рисунок 3.7 – БКП NBT

Путевая плита и несущая плита расположены в шахматном порядке. Такое соединение плит обеспечивает их большую устойчивость в криволинейных участках пути и при перепадах температур.

В опытной конструкции пути применяются два типа промежуточных рельсовых креплений: System DFF 300 и Pandrol SFC.

Рельсовое крепление System DFF 300 (Рисунок 3.8) применяется в БКП. Является модернизированной версией рельсового крепления System 300, предназначенной для установки в конструкции, строительство которых осуществляется посредством заливки монолитной путевой плиты. Основным отличием от System 300, является наличие чугунной подкладки, которая имитирует бетонные боковые плечи подрельсового основания и прикрепляется к монолитному основанию с помощью четырех шурупов. Усилие прижатия достигается за счет нажима на упругую клемму, достигаемого путем завинчивания гайки. Боковые нагрузки передаются на плечи чугунной подкладки через массивные боковые упоры.



1-клеммный болт; 2-гайка; 3-тарельчатая шайба; 4- упругая клемма Skl 15;
5-чугунная подкладка; 6-путевой шуруп; 7-монтажная прокладка; 8-дюбель;
9-втулка; 10-двухвитковая пружинная шайба; 11- боковой упор

Рисунок 3.8 – Рельсовое крепление System DFF 300

Рельсовое крепление Pandrol SFC (Рисунок 3.9) является адаптированной версией Pandrol Fastclip для монолитного основания. Разработано специально для безбалластных конструкций пути. Представляет собой анкерную чугунную подкладку, уложенную на эластичную прокладку и зафиксированную анкерными

болтами. На анкерную подкладку для обеспечения электроизоляции устанавливаются полимерные боковые изоляторы. Рельс фиксируется с помощью пружинной клеммы, на которую устанавливается прижимной изолятор.



1 – прижимной изолятор; 2 – клемма; 3 – боковой изолятор; 4 – чугунная подкладка; 5 – монтажная прокладка; 6 – дюбель; 7 – подрельсовая прокладка; 8 – зубчатая шайба; 9 – пластиковая втулка; 10 – плоская шайба; 11 – пружинная одновитковая шайба; 12 – шуруп.

Рисунок 3.9 – Рельсовое крепление Pandrol SFC

3.2.3 Конструкция пути FFV

БКП компании Бёгль (Рисунок 3.10) – это железобетонные предварительно напряженные плиты заводского изготовления с рельсовыми креплениями System 300 (Рисунок 1.21) [136].

Использование конструкции с применением готовых железобетонных плит заводского изготовления не требует дополнительных затрат по выполнению большого объема бетонных работ в полевых условиях. Плиты размещаются на

несущей монолитной железобетонной плите с подливочным слоем, между собой плиты соединяются монтажным швом.



1 – путевая плита; 2 – соединительный шов; 3 – рельсовое крепление System 300; 4 – подливочный слой; 5 – несущая плита;

Рисунок 3.10 – БКП FFB

Основным элементом конструкции является железобетонная путевая плита заводского изготовления [137]. Класс бетона В55. Длина 6,45 м. Ширина 2,65 м. Высота 0,2 м. Масса 9,5 тонн. Армирование: предварительно напряженная проволока $\varnothing 10$ мм в поперечном направлении, в продольном направлении ненапряженная арматура. Рельсовые крепления 10 пар на плиту.

Технология сооружения безбалластного пути FFB реализуется «снизу-вверх» и состоит в следующем. Сначала устраивается гидравлически связанный несущий слой из тощего бетона. Марка бетона М 100-150. Толщина слоя 30 см. В этом слое пропиливаются поперечные прорезы глубиной 3 см на расстоянии 6 м друг от друга. Эти прорезы выполняют роль "провокаторов трещин". После этого плиты краном укладываются с интервалом 15 см друг от друга. Регулировка плит осуществляется с помощью специальных винтовых домкратов. После точной регулировки производится заливка специальным раствором подливочного слоя

между плитами и гидравлически связанным несущим слоем. Заливка осуществляется через круглые отверстия в центре плиты. Толщина подливочного слоя 3 см. После этого соединяют плиты в продольном направлении шестью стяжными «замками», производят армирование и заполнение раствором поперечных швов между плитами. При укладке конструкции FFB регулировка рельса по высоте и ширине колеи не требуется. Для укладки такого пути в больших объемах имеются укладочные машины для сооружения гидравлически-связанного слоя, специализированные краны и комплексы для приготовления заливочной смеси.

3.2.4 Конструкция пути LVT

Данная БКП разработана, как путь пониженной вибрации. Представляет собой полушпалы (блоки) из армированного бетона, которые находятся в полимерном чехле с широкой амортизирующей прокладкой под блоком [138, 139]. Эти блоки в чехлах замоноличены в неармированный слой путевого бетона. В зависимости от требований либо пожеланий конкретного заказчика в данной конструкции пути могут применяться различные типы рельсовых скреплений.

Общий вид конструкции представлен на Рисунке 3.11. Блоки замоноличены в неармированный слой бетона толщиной 30 см. Расстояние от края блока до края бетонного слоя 25 см. Ширина путевого бетона составляет 3 м. Верхняя поверхность этого слоя выполнена с двухсторонним уклоном в середину колеи, где расположен водосборный желоб. Через 15 м имеются поперечные желоба для отвода воды наружу. Под слоем путевого бетона расположен несущий слой армированного бетона. Толщина этого слоя 20 см, а ширина 340 см. Под несущим слоем расположен гидравлически-связанный слой неармированного тощего бетона, толщина которого составляет 20 см, ширина 380 см.



1 – блок LVT; 2 – путевой бетон; 3 – несущий слой;
4 – гидравлически-связанный слой

Рисунок 3.11 – БКП LVT

На опытном участке данной БКП применяются три типа рельсовых креплений, указанных в Таблице 3.7.

Рельсовое крепление типа W 30 НН (Рисунок 3.6) применяется на вновь построенном опытном участке, а также на ранее принятом в эксплуатацию участке.

Рельсовое крепление SBS W SL 1-900-R65 (Рисунок 3.12), производства компании Schwihag, применяется на участках высокоскоростного движения (до 250 км/ч), а также на участках тяжеловесного движения с осевыми нагрузками до 35 тонн на ось. За счет установки подрельсовых прокладок различной жесткости имеется возможность регулировки показателей под требуемые осевые нагрузки. Прикрепление рельса осуществляется двумя упругими W-образными клеммами Skl SL 1 с повышенными прочностными характеристиками. Шурупы ввинчиваются в замоноличенные в подрельсовое основание дюбеля Sdü S3, отличающиеся повышенными свойствами. От бокового смещения рельс

удерживают два боковых упора. Конструктивно, рельсовое скрепление SBS W SL 1-900-R65 аналогично W 30 НН.



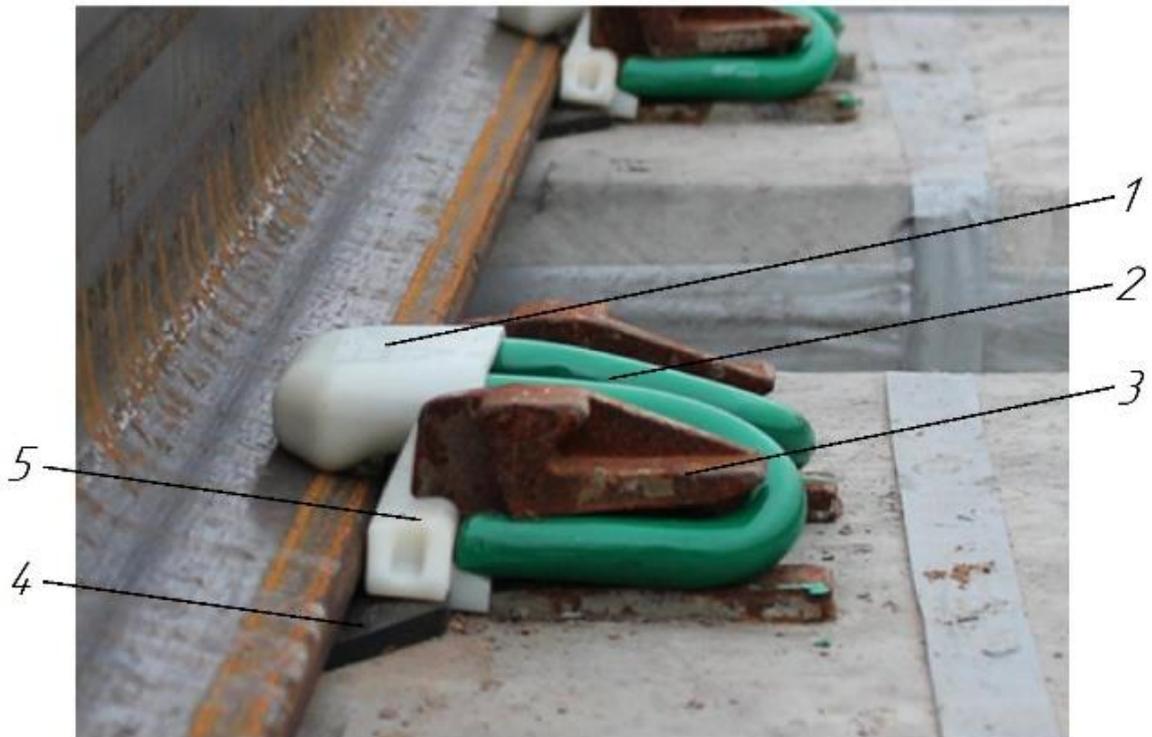
1-путевой шуруп Ss 25 с шайбой; 2- боковой упор Wfp SL-2; 3-упругая клемма SKL SL-1; 4-подрельсовая прокладка Zw SL-900

Рисунок 3.12 – Рельсовое скрепление SBS W SL 1-900-R65

Третьим типом рельсового скрепления, применяемого в данной БКП, является анкерное рельсовое скрепление Пандрол-350 (Рисунок 3.13). Данный тип рельсового скрепления применяется как на участках высокоскоростного движения, так и на участках с повышенными осевыми нагрузками до 35 тонн на ось.

Прикрепление рельса осуществляется двумя упругими клеммами, зафиксированными в монолитные чугунные анкера. Для увеличения электроизоляционных свойств контакт клеммы и анкера с подошвой рельса осуществляется через прижимной и боковой изоляторы соответственно. В зависимости от требований, имеется возможность регулировки жесткости узла скрепления под необходимую осевую нагрузку за счет применения различных подрельсовых прокладок. Необходимо отметить, что скрепление установлено на

усиленных блоках, предназначенных для гашения вибрации при повышенном воздействии на путь от подвижного состава.



1-прижимной изолятор; 2-упругая клемма; 3-анкер; 4-подрельсовая прокладка;
5-боковой изолятор

Рисунок 3.13 – Рельсовое скрепление Пандрол-350

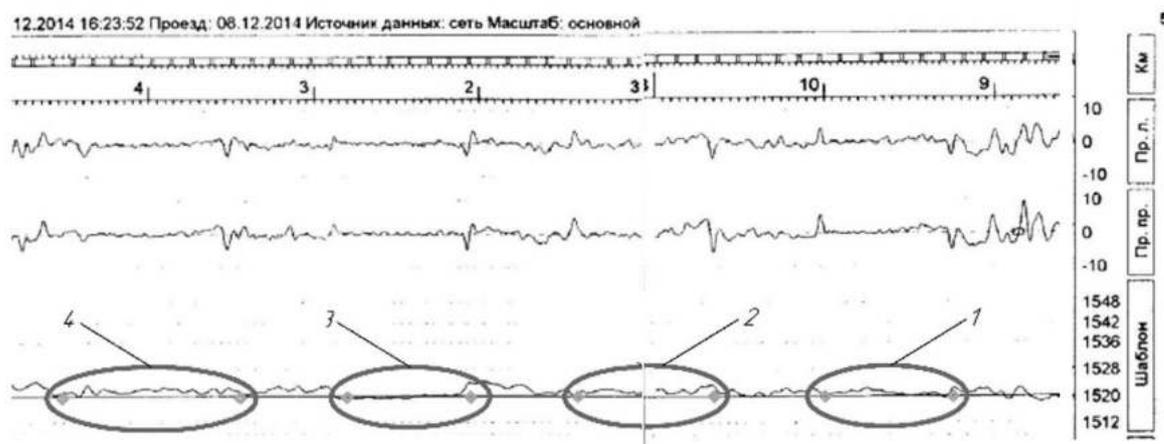
3.3 Натурные измерения на ЭК

Экспериментальные исследования были выполнены в период с октября 2014 года по октябрь 2016 года на ЭК при непосредственном участии автора.

3.3.1 Измерения состояния рельсовой колеи

Регистрация результатов измерений во время проведения опытной эксплуатации выполнялась согласно Программы и Методики сравнительных испытаний безбалластных конструкций пути [140].

Фактические показатели состояния ширины рельсовой колеи были взяты автором из выкопировки данных вагона-путеизмерителя КВЛ-П (Рисунок 3.14). Для удобства и единообразия снятия результатов измерений, данные фиксировались по 17-ти контрольным точкам на каждом из опытных участков пути. Принимая во внимание тот факт, что протяженность участка конструкции LVT в общей сложности составила 109 м, следовательно, данные фиксировались по 24 точкам.



1 – EBS; 2 – NBT Appitrack; 3 – FFB; 4 – LVT

Рисунок 3.14 – Выкопировка данных вагона-путеизмерителя КВЛ-П

Результаты состояния рельсовой колеи фиксировались ежемесячно. В соответствии с [141] фиксировалось состояние рельсовой колеи каждые 100 млн т брутто пропущенного груза до наработки тоннажа в 600 млн т брутто пропущенного груза, данные оформлялись в виде промежуточных отчетов [142]. Результаты измерений состояния ширины рельсовой колеи, взятые автором из выкопировки по результатам проходов вагона-путеизмерителя КВЛ-П, а также результаты ручных промеров представлены в Приложении В.

Средние значения ширины рельсовой колеи и их СКО от пропущенного тоннажа опытных БКП представлены в Таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Средние значения ширины рельсовой колеи и СКО

Тоннаж	EBS		NBT		FFB		LVT	
	Колея, мм	СКО						
0	1522,08	0,7620	1523,07	0,7229	1522,48	1,6108	1522,91	0,6172
12	1520,95	0,7493	1521,46	0,6457	1520,40	0,8120	1521,39	0,4513
100	1522,21	0,8181	1523,32	0,9055	1521,45	0,7016	1521,89	1,3110
200	1520,85	1,2377	1523,35	1,0420	1521,89	0,9844	1520,66	1,3969
300	1521,11	1,0859	1522,96	0,8746	1521,68	0,7473	1521,55	1,3929
400	1520,70	1,2796	1522,83	0,9251	1521,53	0,9375	1520,93	1,8534
500	1521,92	1,1939	1524,28	0,9124	1522,19	0,8550	1521,02	1,9019
600	1522,40	1,0496	1525,03	0,9094	1523,29	0,9429	1521,59	1,9830

Для каждого участка были построены зависимости изменения среднего значения ширины рельсовой колеи от пропущенного тоннажа с указанием СКО (Рисунок 3.15, Рисунок 3.16, Рисунок 3.17, Рисунок 3.18).

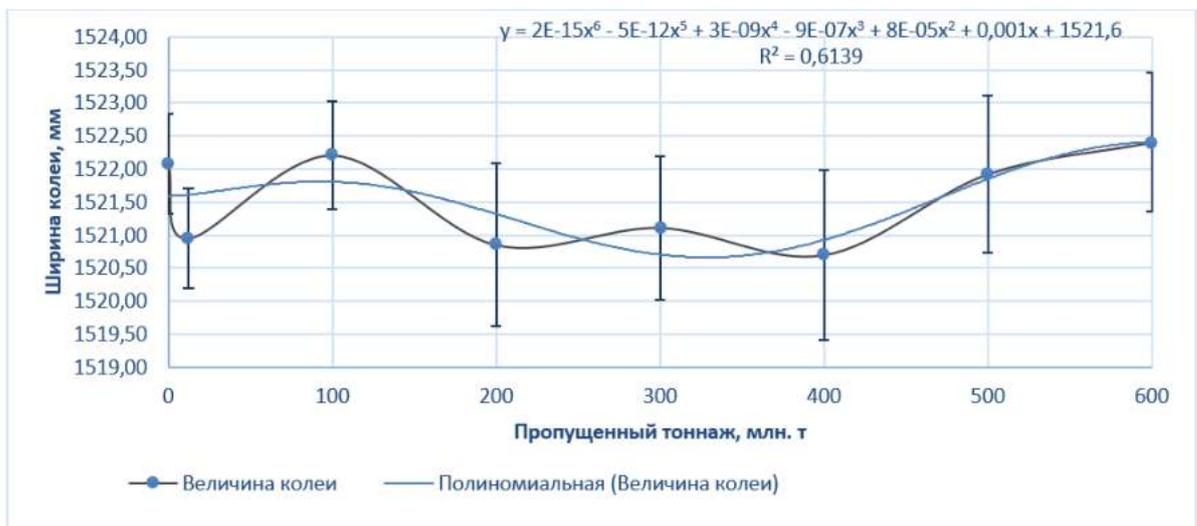


Рисунок 3.15 – Средние значения ширины рельсовой колеи EBS

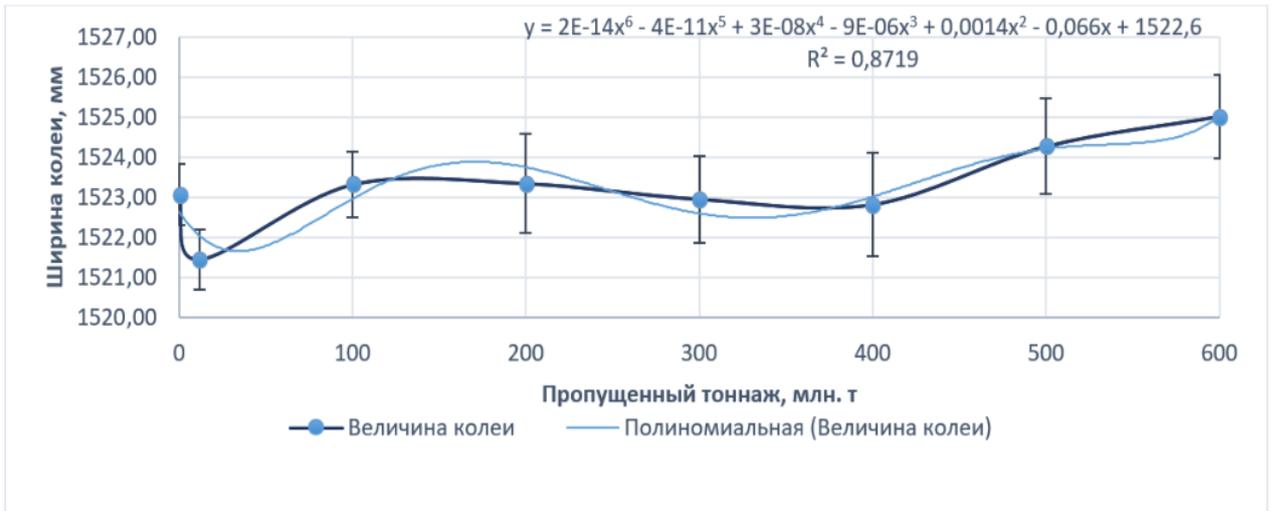


Рисунок 3.16 – Средние значения ширины рельсовой колеи NBT

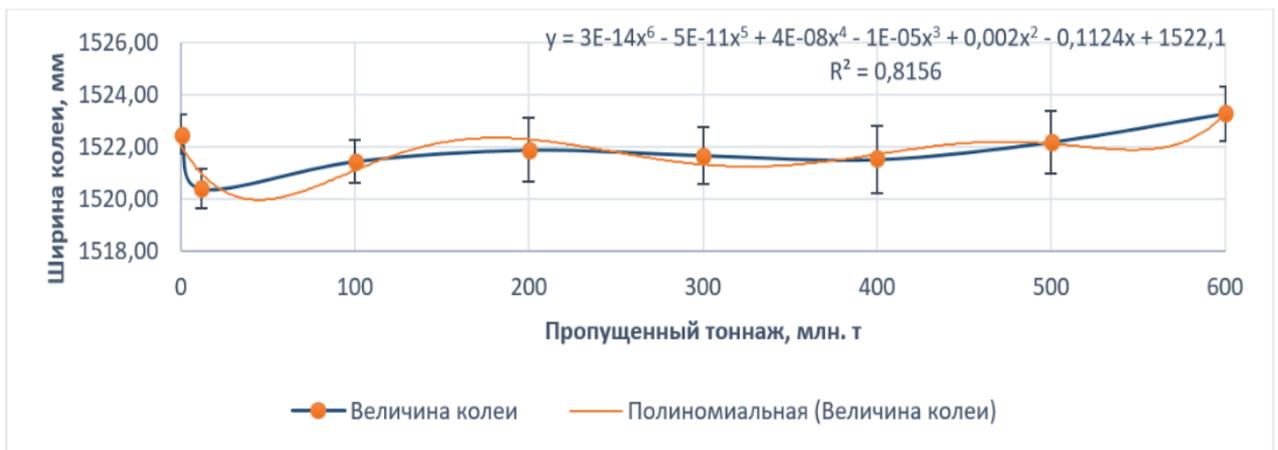


Рисунок 3.17 – Средние значения ширины рельсовой колеи FFB

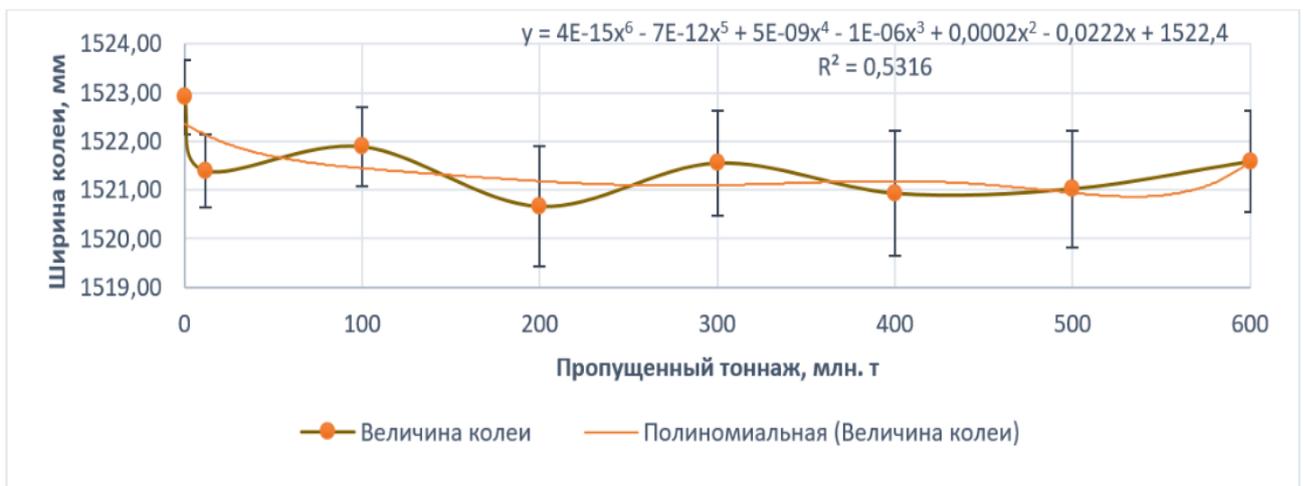


Рисунок 3.18 – Средние значения ширины рельсовой колеи LVT

Исходя из анализа полученных данных, для каждой БКП наблюдается устойчивая тенденция увеличения ширины рельсовой колеи в зависимости от пропущенного тоннажа. Для более подробного изучения изменения ширины рельсовой колеи были построены полиномиальные зависимости, описываемые уравнениями, указанными в графиках зависимости. При этом необходимо отметить, что наибольший разброс СКО наблюдается у конструкций EBS и LVT. Также полиномиальные зависимости данных конструкций имеют самые низкие значения коэффициента детерминации $R^2 = 0,6139$ и $R^2 = 0,5316$ соответственно. Что в свою очередь связано с конструктивными особенностями данных БКП [134, 131, 139], а также качеством строительных работ [141].

Следует отметить стабильные показатели ширины рельсовой колеи у конструкций NBT и FFB, полиномиальные зависимости имеют коэффициенты детерминации $R^2 = 0,8719$ и $R^2 = 0,8156$ соответственно. При этом основной разброс значений у конструкции FFB наблюдается на выезде с УПЖ [143, 144] и въезде на УПЖ по ходу движения подвижного состава. На участке непосредственно самой конструкции стандартное отклонение значений ширины рельсовой колеи колеблется в диапазоне от 0,23 мм до 0,41 мм.

3.3.2 Измерения прогибов рельса под статической нагрузкой от подвижного состава

Измерения выполнялись автором совместно со специалистами отделения Комплексные исследования по взаимодействию пути и подвижного состава АО «ВНИИЖТ». На опытном участке фиксировались четыре точки в зоне расположения узлов рельсовых скреплений. С нивелирной рейки снимались показания УГР до нагружения и после нагружения. В качестве нагрузочной массы накатывался груженный железнодорожный полувагон с осевой нагрузкой 23,5 т.

Данный эксперимент выполнялся на каждой БКП. Результаты измерений представлены автором в Таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Перемещение рельса под статической нагрузкой, мм

БКП	Контрольные точки			
	1	2	3	4
	Перемещение рельса под статической нагрузкой, мм			
EBS	3	3	5	7
NBT	0	1	4	4
FFB	1	1	3	1
LVT	5	6	8	11

Принимая во внимание конструктивные особенности EBS и LVT [134, 138, 139], что основной прогиб происходит вне узла рельсового скрепления, автором принято решение более детально провести исследование БКП с дискретными точками опирания на плите Рисунок 1.18. Таковыми в данном случае являются NBT и FFB. Для конструкции NBT значения прогибов в точках 1 и 2 соответствуют участку с рельсовым скреплением Pandrol SFC, а точки 3 и 4 – участку с рельсовым скреплением System DFF 300. На участке FFB соответственно уложен единственный тип скрепления - System 300.

3.3.3 Измерения прогибов рельса под динамической нагрузкой от подвижного состава

Измерения прогибов рельса под воздействием динамической нагрузки от подвижного состава производились на ЭК сотрудниками отделения «Комплексные исследования по взаимодействию пути и подвижного состава» АО «ВНИИЖТ» при непосредственном участии автора.

Условия проведения испытаний представлены в Таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Условия при проведении испытаний по определению прогиба рельса под воздействием подвижного состава на ЭК

1	Дата	21.10.2015 г.
2	Время	18:00 – 21:00
3	Температура воздуха, °С	- 2
4	Локомотив	ВЛ 80°
5	Кол-во полувагонов, шт.	83
6	Максимальная осевая нагрузка, кН/ось	250
7	Скорость движения, км/ч	70
8	Конструкция БКП	FFB
9	Конструкция рельсового скрепления	System 300

Данные испытания выполнялись на участке опытной БКП FFB. На каждой плите в трех местах устанавливались датчики перемещения (Рисунок 3.19) в трех различных слоях - между рельсом и путевой плитой, путевой плитой и несущей плитой, несущей плитой и тощим бетоном соответственно (Рисунок 3.20).

Во время прохождения подвижного состава по опытному участку пути данные серии результатов перемещения фиксировались с помощью специализированного прикладного программного обеспечения на персональном компьютере (Рисунок 3.21).



Рисунок 3.19 – Датчик перемещения между рельсом и плитой



Рисунок 3.20 – Установка датчиков перемещения



Рисунок 3.21 – Регистрация результатов измерений

Фиксирование результатов осуществлялось по тридцати шести точкам после прохождения подвижного состава с установленной для кольца скоростью – 70 км/ч. Результаты измерений представлены автором в Таблице 3.11, а также на Рисунке 3.22.

На момент проведения эксперимента поднадзорный опытный участок находился в опытной эксплуатации. Общий пропущенный тоннаж по участку составил 285 млн т брутто пропущенного груза, что сопоставимо с эксплуатацией линий высокоскоростного железнодорожного сообщения на протяжении порядка 10 лет.

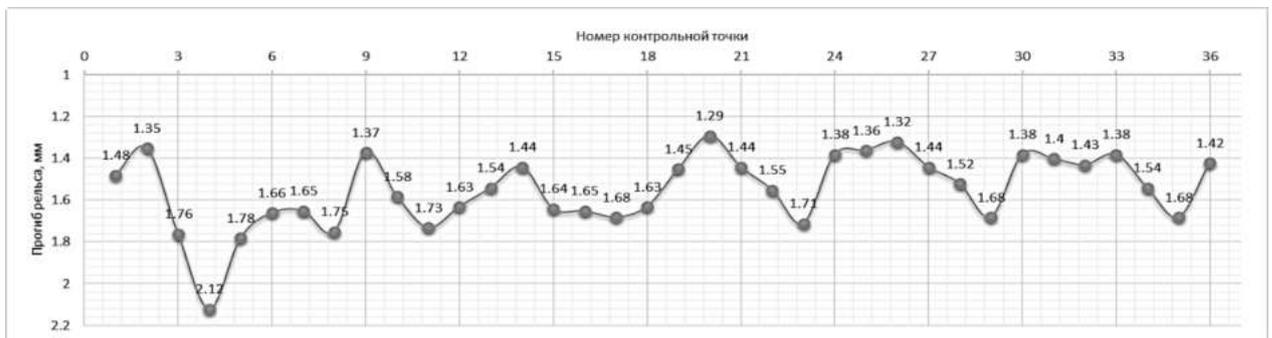


Рисунок 3.22 – Прогибы рельса конструкции FFV в узле скрепления

Таблица 3.11 – Величины прогибов, измеренные на БКП FFV на ЭК

№ плиты	№ точки	Прогиб, мм		
		А	Б	В
1	1	1,48	0,78	0,11
	2	1,35	0,34	0,14
	3	1,76	0,43	0,12
2	1	2,12	0,78	0,06
	2	1,78	0,43	0,11
	3	1,66	0,45	0,05
3	1	1,65	0,49	0,25
	2	1,75	0,41	0,21
	3	1,37	0,64	0,30
4	1	1,58	0,69	0,37
	2	1,73	0,59	0,33
	3	1,63	0,22	0,12
5	1	1,54	0,68	0,35
	2	1,44	0,61	0,30
	3	1,64	0,56	0,10
6	1	1,65	0,71	0,09
	2	1,68	0,31	0,05
	3	1,63	0,59	0,03

Продолжение таблицы 3.11

№ плиты	№ точки	Прогиб, мм		
		А	Б	В
7	1	1,45	1,00	0,09
	2	1,29	0,58	0,18
	3	1,44	0,52	0,19
8	1	1,55	0,83	0,09
	2	1,71	0,12	0,05
	3	1,38	0,76	0,15
9	1	1,36	0,59	0,18
	2	1,32	1,09	0,08
	3	1,44	0,46	0,19
10	1	1,52	1,03	0,08
	2	1,68	0,49	0,05
	3	1,38	0,26	0,03
11	1	1,40	0,82	0,07
	2	1,43	0,43	0,05
	3	1,38	0,77	0,08
12	1	1,54	0,73	0,08
	2	1,68	0,34	0,04
	3	1,42	0,57	0,06
Среднее		1,55	0,59	0,13
СКО		0,17	0,22	0,09

А – между рельсом и путевой плитой;

Б – между путевой плитой и несущей плитой;

В – между несущей плитой и тощим бетоном.

С целью верификации предлагаемой автором математической модели для аналогичных условий во время проведения эксперимента на ЭК, указанных в Таблице 3.10, были проведены вычисления по определению прогибов рельса от статического и динамического нагружения подвижного состава на безбалластный путь. Результаты вычислений представлены на Рисунке 3.23.

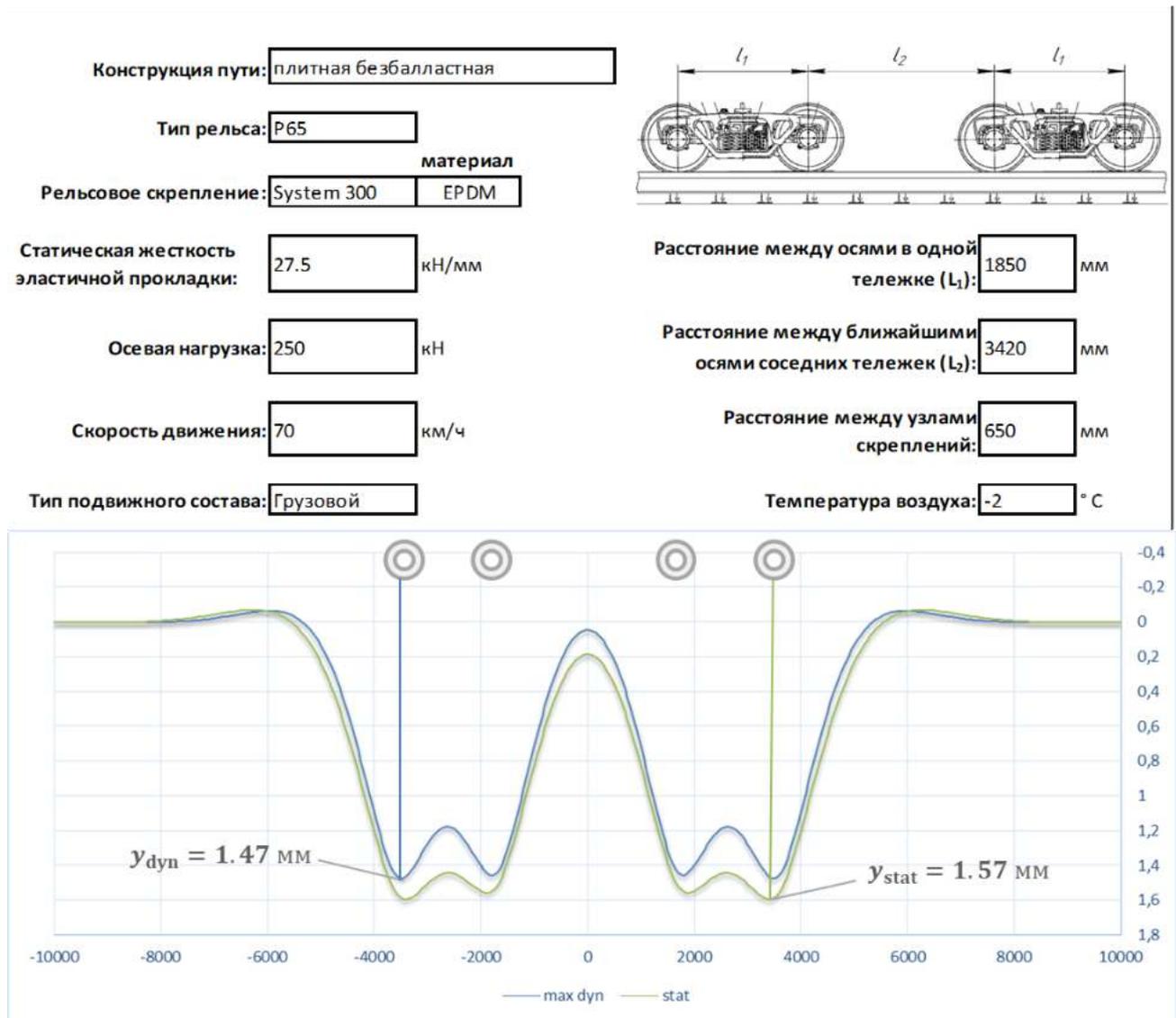


Рисунок 3.23 – Результаты математических вычислений аналогично условиям эксперимента на ЭК

Согласно серии среднестатических результатов определения экспериментальным путем прогиба рельса, указанных в Таблице 3.11, среднее значение прогиба рельса составляет 1,55 мм со среднеквадратичным отклонением 0,17 мм. Полученное значение прогиба рельса, согласно вычислениям с помощью предлагаемой автором математической модели, составляет 1,47 мм. Таким образом, подтверждается сходимость результатов вычисления с данными, полученными экспериментальным путём, с точностью в 94,8%.

3.3.4 Экономическая составляющая элементов рельсового скрепления System 300 в конструкции FFB

Протяжённость эксплуатируемых участков пути с БКП в нашей стране незначительна, и как следствие отсутствует достаточный накопленный опыт эксплуатации таких линий, позволяющий достоверно прогнозировать затраты на его строительство и дальнейшую эксплуатацию.

В мировой практике БКП позиционируются как конструкции для выделенного высокоскоростного движения со сроком службы до 60 лет. Однако отечественный опыт поднадзорной эксплуатации на ЭК подтверждает, что значения прогибов и напряжений в элементах БКП существенно меньше предельно-допустимых значений, что дает возможность применять ее даже при грузовом сообщении [145].

Технико-экономическое обоснование строительства выделенных железнодорожных линий на БВСП требует тщательного многофакторного анализа возможных рисков, которые, в свою очередь, могут существенно повлиять на СЖЦ пути [72]. В рамках реализации проектов по строительству новых железнодорожных линий, капитальные вложения в верхнее и нижнее строение пути составляют порядка 70% от общей суммы инвестиций в инфраструктурную часть проекта. При этом важен и тип конструкции нижнего строения пути. Процентное соотношение стоимости верхнего строения пути на земляном полотне и на эстакаде показано на Рисунке 3.24 и Рисунке 3.25 [146]. Таким образом можно предположить, что стоимость элементов БВСП не превышает 20 % от общей стоимости затрат при строительстве новых линий.

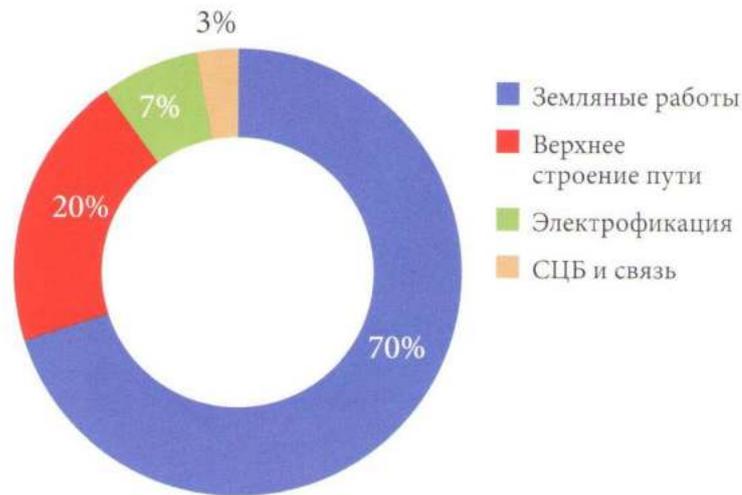


Рисунок 3.24 – Соотношение стоимости элементов пути на земляном полотне

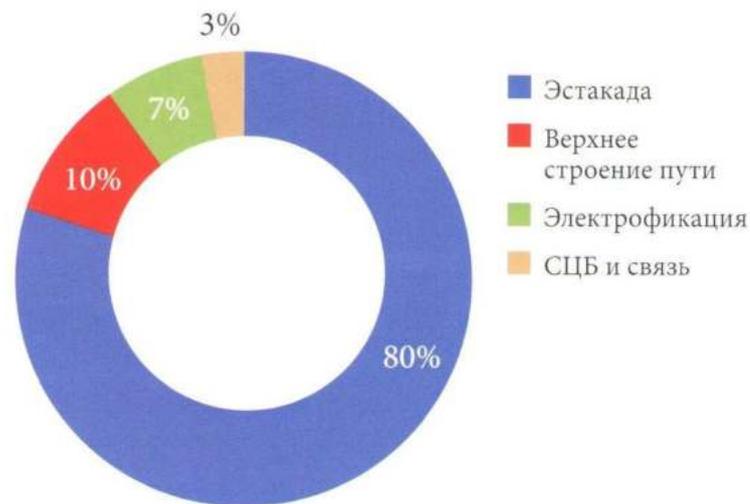


Рисунок 3.25 – Соотношение стоимости элементов пути на эстакаде

В свою очередь необходимо учитывать технические характеристики конструкций БВСП, в частности расстояние между узлами рельсовых скреплений, которое влияет на первоначальные инвестиции при строительстве, а в последующем на возможные расходы, связанные с эксплуатацией.

По состоянию на декабрь 2021 года стоимость одного узла рельсового скрепления типа System 300 составляет 60 Евро. Таким образом, имеется возможность спрогнозировать необходимые инвестиции на обустройство 1 км пути на примере сравнения двух плитных конструкций пути FFB, расстояние между узлами скреплений 650 мм [137], и CRTS III RUS, расстояние между

узлами креплений 592 мм [90], а также условной БКП с расстоянием между узлами рельсовых креплений 543 мм, что соответствует принятой эпюре шпал в 1840 штук на км пути. Результаты представлены на Рисунке 3.26.



Рисунок 3.26 – Стоимость креплений на 1 км БВСП

Наименьшие инвестиции необходимы для конструкции FFВ. Для китайской конструкции пути CRTS III RUS и условной БКП необходимо на первоначальном этапе инвестировать на 9,8% и 19,6% больше, чем для FFВ. Что в свою очередь подтверждает необходимость разработки технико-экономического обоснования при выборе технических решений конструкции верхнего строения пути для высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва – Санкт-Петербург».

За время опытной эксплуатации конструкции пути FFВ на ЭК автор фиксировал выход из строя и/или дефектность элементов рельсового крепления System 300. Также после закрытия движения по II-му пути на ЭК было произведено обследование с полным демонтажем рельсовых нитей и рельсовых креплений. Обследованию подвергались все элементы рельсовых креплений. Пропущенный тоннаж по опытному участку на момент закрытия движения (01.11.2018 г.) составил 1066,55 млн. т брутто пропущенного груза. Выход элементов креплений при наработке указанного тоннажа представлен в Таблице 3.12

Таблица 3.12 – Дефектность элементов креплений System 300 и их стоимость в конструкции FFВ

Наименование	Кол-во, шт.	Стоимость, с НДС 20%, € за шт.	Итого, с НДС 20%, €	Примечание
Клемма SKL 15	4	2,65	10,6	Излом прижимного рукава клеммы
Боковой упор Wfp 15a	1	4,41	4,41	Скол упора, находящегося на участке переменной жесткости
Шуруп Ss36/230	1	1,47	1,47	Излом шурупа, находящегося на участке переменной жесткости
Итого			16,48	

Наиболее распространённым дефектом элементов узла рельсового крепления System 300, зафиксированным за период поднадзорной эксплуатации на ЭК, является излом прижимного рукава клеммы SKL 15 (Рисунок 3.27).



Рисунок 3.27 – Излом клеммы SKL 15 на участке FFВ

На поднадзорном экспериментальном участке FFВ на ЭК в общем было установлено 240 узлов рельсовых креплений System 300. Следовательно, отнесённые на один узел рельсового крепления затраты на замену вышедших из строя элементов составляют 0,069 €/на узел. Принимая во внимание риски,

связанные со строительством, а также возможными эксплуатационными отклонениями от заданного положения пути в плане и профиле, как на участках основной конструкции, так и участков переменной жёсткости, необходимо учитывать коэффициент возникновения данного события 100%.

Основываясь на расчётных и экспериментальных данных, указанных в Таблице 3.12, имеется возможность спрогнозировать выход и стоимость вышедших из строя элементов скрепления за период 1 млрд т брутто на 1 км пути для конструкций FFB, CRTS III RUS и условной БКП. Прогнозируемые затраты на замену вышедших из строя элементов скрепления, с коэффициентом запаса 100%, представлены автором на Рисунке 3.28



Рисунок 3.28 – Прогнозируемые затраты стоимости вышедших элементов скрепления на участках БВСП за период 1 млрд. т брутто пропущенного груза

Исходя из полученных расчётных прогнозируемых затрат имеется возможность предположить, что прогнозируемые затраты на замену вышедших из строя элементов рельсовых скреплений в конструкции FFB ниже на 2,2% в сравнении с конструкцией CRTS III RUS и ниже на 4,3% в сравнении с условной БКП.

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

1) По результатам лабораторных испытаний в лабораторных условиях были определены фактические значения статической и динамической жесткости эластичных прокладок из материалов EPDM и Vugel, применяемых в конструкции рельсового скрепления типа System 300, в диапазоне температур от -50°C до $+23^{\circ}\text{C}$ и интервале испытательных нагрузок от 20 до 70 кН.

2) Посредством аппроксимации зависимостей влияния низких температур на статическую и динамическую жёсткость эластичной прокладки рельсового скрепления были определены полиномиальные функции, позволяющие вычислить коэффициенты, введённые в расчётную модель.

3) В ходе натурных испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» за опытными участками безбалластных конструкций пути при наработке тоннажа в 600 млн т пропущенного груза наиболее стабильные показатели ширины рельсовой колеи зафиксированы на безбалластном участке пути Feste Fahrbahn Voegl.

4) Впервые был проведён эксперимент на Экспериментальном кольце в условиях Российских железных дорог по определению прогиба рельса БКП под воздействием динамической нагрузки от грузового подвижного состава при отрицательной температуре окружающего воздуха. Среднее значение прогиба рельса из серии зафиксированных экспериментальных результатов составило 1,55 мм со среднеквадратичным отклонением 0,17 мм.

5) Проверена адекватность усовершенствованной математической модели определения прогиба рельса БКП с учётом влияния низкой температуры. Сходимость расчётных значений с экспериментальными данными составила 94,8% для конструкции пути Feste Fahrbahn Voegl и узлами рельсового скрепления System 300 с эластичными прокладками из материала EPDM.

6) С целью дальнейшего уточнения и верификации расчётной модели необходимо продолжить проведение испытаний на реальных высоких скоростях

свыше 250 км/ч на высокоскоростном полигоне, которым возможно станет участок линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

4 ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ОБЛАСТИ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ

4.1 Отечественная нормативная база

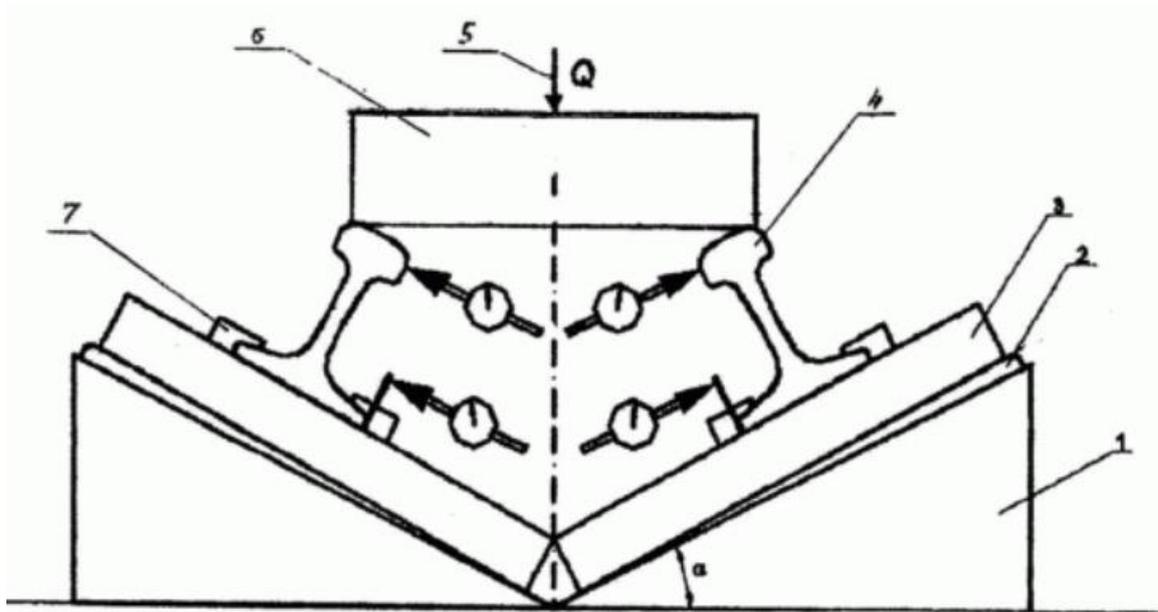
4.1.1 Требования безопасности и методы контроля характеристик рельсовых креплений

Основные требования, предъявляемые к показателям безопасности рельсового крепления, их нормативные значения и методы их контроля приведены в Таблице 4.1 ГОСТ 32698 [97].

Таблица 4.1 – Показатели безопасности и методы контроля

Наименование показателя безопасности		Значение
1) Удерживающая способность узла рельсового крепления (с отрезком рельса) в поперечном направлении пути при одновременном действии циклических нагрузок на базе 4 млн. циклов	вертикальной, кН	100
	горизонтальной, кН,	50
1.1) Остаточное перемещение головки рельса, мм, не более		3
1.2) Остаточное перемещение подошвы рельса при циклическом воздействии, мм, не более		2
1.3) Наличие трещины, разрушения элементов рельсового крепления и шпалы		не допускается
2) Удерживающая способность узла рельсового крепления в продольном направлении пути		
2.1) Усилие монтажного прижатия рельса к шпале (подкладке)	при температурном интервале T_A меньше или равном 110 °С, кН, не менее	20
	при температурном интервале T_A больше 110 °С, кН, не менее	25
2.2) Усилие монтажного прижатия подкладки к шпале (для отдельных рельсовых креплений с резьбовыми крепежителями)	при температурном интервале T_A меньше или равном 110 °С, кН, не менее	40
	при температурном интервале T_A больше 110 °С, кН, не менее	50
2.3) Продольная нагрузка, необходимая для возникновения необратимого смещения рельса или подкладки при их монтажном прижатии	при температурном интервале T_A меньше или равном 110 °С, кН, не менее	14,0
	при температурном интервале T_A больше 110 °С, кН, не менее	16,5
3) Упругие характеристики узла рельсового крепления		
3.1) Вертикальная жесткость узла рельсового крепления, МН/м		от 50 до 150
3.2) Поперечная жесткость (по подошве рельса), не менее МН/м		30
4) Электрическое сопротивление между узлами рельсового крепления на шпале, кОм, не менее		10

Необходимо отметить, что требования к упругим характеристикам ограничиваются показателями вертикальной статической и поперечной жесткости узла рельсового скрепления без учета влияния низких температур, что показано на схеме нагружения. Осуществляется нагружение двух узлов рельсовых скреплений на испытательной машине (Рисунок 4.1) без применения климатического оборудования.



1 – металлическая станина, неподвижно закреплённая на подвижной части испытательной машины и создающая наклон для полушпал под углом $\alpha = (27 \pm 1)^\circ$;
 2 – регулировочные пластины для выставления угла α ; 3 – полушпала с узлом скрепления, неподвижно закреплённая на станине; 4 – рельс; 5 – вертикальная нагрузка от испытательной машины; 6 – нагрузочная балка; 7 – крепление

Рисунок 4.1 – Схема нагружения двух узлов рельсового скрепления на испытательной машине по [97]

Следует отметить, что область применения стандарта ГОСТ 32698 распространяется на промежуточное рельсовое скрепление, применяемое в конструкции железнодорожного пути с железобетонными шпалами.

4.1.2 Технические нормы и требования к рельсовым скреплениям для участков ВСМ

Согласно первой редакции СТУ №2 [101], разработанных специально для участка ВСМ Москва – Казань, предъявляются требования к промежуточным рельсовым скреплениям для БВСП и к рельсовым скреплениям для пути на балласте, а также рельсовым скреплениям для стрелочных переводов.

Промежуточные рельсовые скрепления для БВСП должны обеспечивать:

- стабильность положения рельсовой колеи;
- прижатие рельса к основанию с усилием не менее 20 кН;
- сопротивление продольному сдвигу рельса в узле скрепления не менее 14 кН;
- в случае применения промежуточных рельсовых скреплений, которые должны обеспечивать свободное скольжение рельсов относительно опор в конструкции пути (в маячных шпалах, уравнильных приборах и на искусственных сооружениях), должны обеспечиваться требования по прижатию – не менее 9 кН, по продольному сдвигу – не менее 4 кН.

При БВСП должны применяться упругие рельсовые скрепления, позволяющие осуществлять регулировку рельсов по высоте не менее 10 мм, в плане – в диапазоне ± 4 мм.

Промежуточные рельсовые скрепления должны иметь упругие клеммы. В узлах скрепления необходимая жесткость обеспечивается за счет применения упругих элементов. Упругие свойства этих элементов должны соответствовать требованиям II категории исполнения «ПД» ГОСТ Р 56291 [147]. В настоящее время на территории ЕАЭС действует ГОСТ 34078-2017 [99].

На искусственных сооружениях и на тех участках, где необходимо виброгашение могут применяться дополнительные упругие элементы.

На стрелочных переводах необходимо обеспечить равномерный прогиб рельсов и конструктивных элементов перевода под поездной нагрузкой.

Эпюра шпал (или иных подрельсовых опор) независимо от плана должна быть не менее 1660 шт./ км.

Электрическое сопротивление узла скрепления должно быть более 10 кОм.

Промежуточные рельсовые скрепления для балластного пути должны обеспечивать:

- стабильность положения рельсовой колеи в пространстве;
- прижатие рельса к основанию с усилием не менее 20 кН;
- сопротивление продольному сдвигу рельса в узле скрепления не менее 14 кН.

В случае применения промежуточных рельсовых скреплений, которые должны обеспечивать свободное скольжение рельсов относительно опор в конструкции пути (в маячных шпалах, уравнильных приборах и на искусственных сооружениях), должны обеспечиваться требования по прижатию - не менее 9 кН, по продольному сдвигу - не менее 4 кН.

Промежуточные рельсовые скрепления должны обеспечивать сопротивление горизонтальным боковым силам не менее 50 кН.

Совместимость размеров и взаимодействующих поверхностей составляющих элементов узла рельсовых скреплений должна быть обеспечена применительно ко всем типам используемых рельсов, видам используемых шпал и подрельсовых оснований, обеспечивать необходимую подуклонку рельсов.

Промежуточные рельсовые скрепления должны иметь упругие элементы, обеспечивающие необходимую жесткость пути. Вертикальная жесткость узла скрепления должна быть от 50 до 150 МН/м. Поперечная жесткость (по подошве рельса) должна быть не менее 50 МН/м. Упругие свойства этих элементов должны быть стабильны в диапазоне изменения расчетной температуры рельсов от - 48 °С до + 67 °С на протяжении нормативного ресурса эксплуатации.

Конструкция скреплений должна обеспечить снижение резонансных колебаний в железобетонном основании шпал.

Упругие промежуточные скрепления должны обеспечивать стабильность положения рельсовой колеи, возможность регулировки положения рельса по высоте до ± 10 мм, и по ширине до ± 4 мм на один узел скрепления.

Промежуточные рельсовые скрепления, используемые в конструкции стрелочных переводов, должны соответствовать в стандартном исполнении требованиям раздела 4.2 или 5.2 [101].

Исходя из вышеперечисленных качественных и количественных показателей, имеем следующие требования, представленные автором в сводной Таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Требования к рельсовым скреплениям для ВСМ по [101]

№ п/п	Наименование показателя	БВСП	Балласт
Количественные показатели			
1	Усилие прижатия рельса к основанию	не нормируется	≥ 20 кН
2	Сопротивление продольному перемещению рельса в узле скрепления	≥ 14 кН	≥ 14 кН
3	Сопротивление горизонтальным боковым силам	не нормируется	
4	Для конструкций, обеспечивающих свободное скольжение подошвы рельса: - усилие прижатия рельса к основанию - сопротивление продольному сдвигу рельса	≥ 9 кН ≥ 4 кН	≥ 9 кН ≥ 4 кН
5	Регулировка положения головки рельса - в плане - в профиле	± 4 мм ≥ 10 мм	± 4 мм ± 10 мм
6	Вертикальная жесткость узла рельсового скрепления	не нормируется	50 – 150 МН/м
7	Поперечная жесткость (по подошве рельсов)	не нормируется	≥ 50 МН/м
8	Электрическое сопротивление узла скрепления	> 10 кОм	не нормируется
Качественные показатели			
1	Стабильность положения рельсовой колеи в пространстве	да	да
2	Должны применяться упругие рельсовые скрепления	да	не нормируется
3	Наличие упругой клеммы в узле скрепления	да	не нормируется
4	Наличие рельсовых скреплений, обеспечивающих свободное скольжение подошвы рельса (в уравнивательных приборах, искусственных сооружениях)	да	да
5	Совместимость с различными типами рельсов и различными видами подрельсового основания	не нормируется	да

Продолжение таблицы 4.2

№ п/п	Наименование показателя	БВСП	Балласт
6	Физико-механические свойства упругих неметаллических элементов должны соответствовать требованиям II категории исполнения «ПД» ГОСТ Р 56291	да	не нормируется
7	Физико-механические свойства упругих неметаллических элементов должны быть стабильны в диапазоне изменения расчетной температуры рельсов от минус 48 °С до плюс 67 °С	не нормируется	да

В настоящий момент наиболее приоритетным направлением реализации проекта создания линий ВСМ является маршрут между Москвой и Санкт-Петербургом. Действующие специальные технические условия для данной линии ВСМ [102] не достаточно полно регламентируют требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений для БКП (Таблица 1.6). Но при этом имеется требование, чтобы упругие свойства должны быть стабильны в диапазоне изменения расчётной температуры рельсов, в соответствии с требованиями настоящих СТУ. Для рассматриваемой линии минимальная температура рельсов составляет -50 °С по станциям Тверь и Бологое.

4.1.3 Технические условия на прокладки рельсовых скреплений

В специальных технических условиях для высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва – Санкт-Петербург» [102] ссылачно указаны требования к упругим характеристикам подрельсовых прокладок промежуточных рельсовых скреплений для БКП на ГОСТ 34078 [99], который устанавливает требования к прокладкам рельсовых скреплений железнодорожного пути.

В данном стандарте устанавливаются требования к физико-механическим показателям прокладок в зависимости от их классификации. Наибольший объем требований предъявляется к физико-механическим показателям материала, из которого изготовлены прокладки. Контролируется статическая вертикальная жёсткость на сжатие в диапазоне нагрузок от 20 до 90 кН и ее изменение после комплексного климатического старения. Также контролю подлежит коэффициент жесткости в диапазоне испытательных нагрузок от 20 до 90 кН. Минимальная испытательная температура при определении коэффициентов жесткости составляет минус (40.2) °С.

Важно отметить, что требования ГОСТ 34078 распространяются на прокладки рельсовых креплений железнодорожного пути, предназначенные для установки на деревянных и железобетонных шпалах, брусках стрелочных переводов и эксплуатации в звеньевом и бесстыковом железнодорожном пути в условиях грузового, скоростного, совмещённого со скоростным движением. Таким образом, имеется возможность утверждать, что область действия стандарта не распространяется на подрельсовые и эластичные прокладки рельсовых креплений, применяемых в БКП на участках высокоскоростного движения.

4.2 Зарубежная нормативная база

4.2.1 Европейские нормы

Основные требования к рабочим характеристикам рельсовых креплений, предъявляемых в сообществе на территории стран Европейского союза? прописаны в положениях серии норм. Данные нормы подразделяются на следующие основные части:

- Часть 1: Определения [9];
- Часть 2: Рельсовые крепления для железобетонных шпал [148];

- Часть 3: Рельсовые скрепления для деревянных шпал [149];
- Часть 4: Рельсовые скрепления для металлических шпал [150];
- Часть 5: Рельсовые скрепления для безбалластных конструкций пути с рельсами, расположенными на поверхности и рельсами вмонтированными в специальные каналы [151];
- Часть 7: Специализированные рельсовые скрепления для прикрепления острияков, крестовин и контррельсов стрелочных переводов [152].

В данных нормах указывается классификация рельсовых скреплений по категориям, в зависимости от сфер применения, скоростей движения, осевых нагрузок, типа применяемых рельсов, а также непосредственной конструкции пути, в которой работают данные узлы. Согласно европейским требованиям, рельсовые скрепления должны быть адаптированы применительно к конкретной конструкции подрельсового основания: на железобетонных, деревянных, стальных шпалах, безбалластном основании, а также в конструкции стрелочных переводов. Таким образом, различают пять категорий рельсовых скреплений, указанные в Таблице 4.3, причем для высокоскоростного движения (категория D) не применимы деревянные и стальные шпалы, а для линий с повышенными осевыми нагрузками (категория E) не применимо безбалластное основание.

Основные методики и принципы подтверждения требованиям безопасности прописаны в европейских стандартах серии EN 13146 [153], на которые в свою очередь имеются прямые ссылки из [154]. По сути, данные серии стандартов являются взаимодополняющими.

[153] состоит из следующих основных частей:

- Часть 1: Определение сопротивления продольному перемещению рельса [155];
- Часть 2: Определение сопротивления кручению рельса [156];
- Часть 3: Определения затухания ударных нагрузок [157];
- Часть 4: Эффект от воздействия циклической нагрузки [158];
- Часть 5: Определение электрического сопротивления [159];

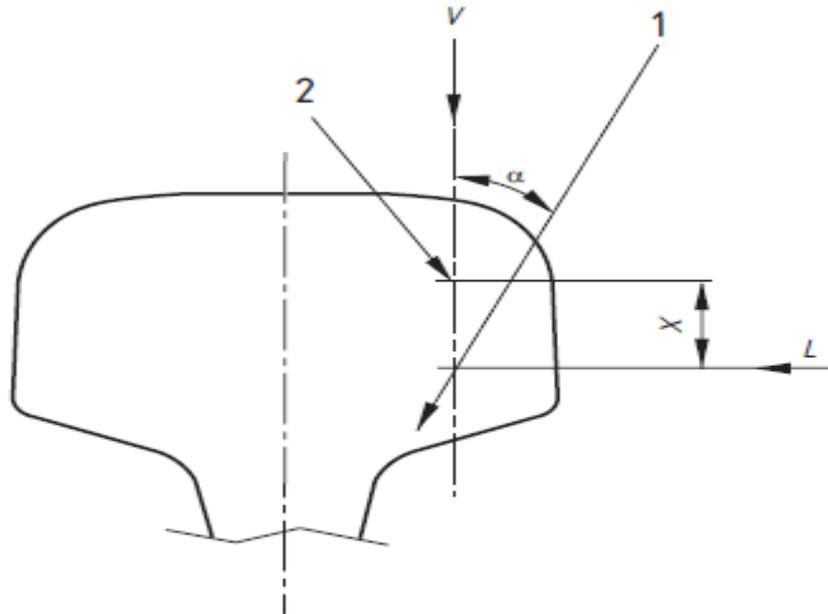
- Часть 6: Эффект от воздействия тяжелых условий окружающей среды [160];
- Часть 7: Определения усилия прижатия [161];
- Часть 8: Эксплуатационные испытания [162];
- Часть 9: Определение жёсткости [163].

Таблица 4.3 – Классификация рельсовых скреплений по категориям

Категория	Назначение	Расчетная осевая нагрузка, кН / тс	Макс. осевая нагрузка, кН / тс	Макс. скорость, км/ч	Тип рельса	Мин. радиус кривой, м	Расстояние между опорным и точками, мм	Тип основания
							эпюра шпал, шт./км	
А	Легкий городской и некоторые промышленные пути		100* / 10,2	100	40E1	80	800/ 1250	жб. шпалы, дер. шпалы, стал.шпалы, безбалласт, брусья стрелочных переводов
В	Легкий городской и некоторые промышленные пути		160* / 16,3	140	54E1	100	600/ 1667	жб. шпалы, дер. шпалы, стал.шпалы, безбалласт, брусья стрелочных переводов
С	Основные железнодорожные линии		225 / 22,9	250	60E1	400	600/ 1667	жб. шпалы, дер. шпалы, стал.шпалы, безбалласт, брусья стрелочных переводов
Д	Линии с большими радиусами кривых для ВСМ		180 / 18,4	по усмотрению оператора	60E1	800	600/ 1667	жб. шпалы, безбалласт, брусья стрелочных переводов
Е	Линии смешанного движения, пропускающие тяжеловесные грузовые поезда		300 / 30,6	200	60E1	150	600/ 1667	жб. шпалы, дер. шпалы, стал.шпалы, брусья стрелочных переводов

* – Максимальная осевая нагрузка категорий А и В не относится к путевой технике.

С целью единообразного трактования мест приложения к поверхности катания рельса нагрузки, передаваемой от подвижного состава, в каждой части [154] и [153] дана поясняющая схема (Рисунок 4.2).



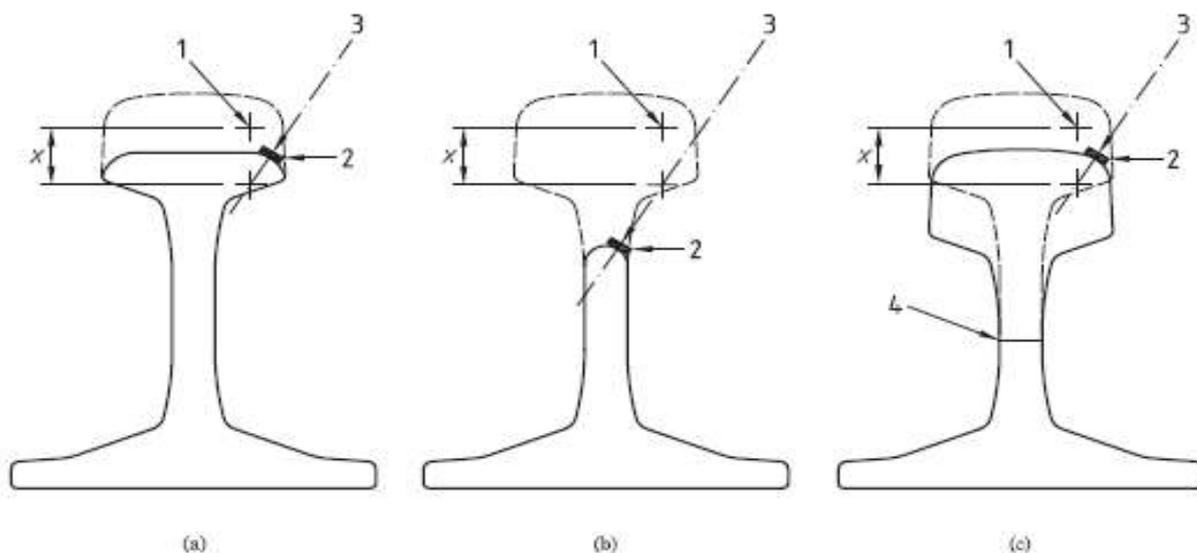
1- вектор приложения нагрузки; 2- центр радиуса выкружки головки рельса; V – вертикальная составляющая нагрузки, передаваемой от колеса на поверхность катания головки рельса; L – горизонтальная составляющая нагрузки, передаваемой от колеса на поверхность катания головки рельса; X – расстояние от центра радиуса выкружки рельса до плоскости приложения бокового усилия от колесной пары подвижного состава; α – угол между прилагаемой испытательной нагрузкой и нормалью к поверхности катания рельсов

Рисунок 4.2 – Схема приложения нагрузки к головке рельса

В зависимости от категории скрепления назначают величину испытательной нагрузки, которая характеризуется изменением угла наклона и точкой приложения к рельсу (Рисунок 4.3, Таблица 4.4) при проведении стендовых лабораторных испытаний.

К примеру, для скреплений, применяемых в конструкции пути для высокоскоростного движения категории D, угол приложения нагрузки 26° , величина прилагаемой нагрузки 70 кН при низкочастотной динамической жесткости узла рельсового скрепления менее 200 МН/м и 76 кН при жесткости узла выше 200 МН/м. Соответственно, вертикальные нагрузки, действующие в

узле скрепления перпендикулярно плоскости подошвы рельса (с учетом косинуса угла α), составят 62 кН и 68 кН для этих случаев.



1 – центр радиуса выкружки головки рельса; 2 – место приложения нагрузки, при проведении циклических испытаний; 3 – вектор приложения испытательной нагрузки; 4 – место выреза и сварки шейки рельса; X – расстояние от центра радиуса выкружки рельса до плоскости приложения бокового усилия от колесной пары подвижного состава

Рисунок 4.3 – Варианты приложения нагрузки по [158] в зависимости от категории рельсового скрепления

Таблица 4.4 – Значения испытательной нагрузки и позиционирование мест ее приложения по [148]

Категория скрепления	Угол приложения нагрузки α , град	X, мм	Значение нагрузки P, кН	
			$K_{LFA} < 200$ МН/м	$K_{LFA} > 200$ МН/м
A	38,6	25	55	55
B	38,6	25	62	65
C	33	15	75	83
D	26	15	70	76
E	40	75	100	108

Для испытаний конструкций скреплений с повышенными осевыми нагрузками, категория E: угол приложения нагрузки 40° , при этом величина вертикальной нагрузки составляет 100 кН при низкочастотной динамической жесткости узла рельсового скрепления менее 200 МН/м и 108 кН низкочастотной динамической жесткости узла рельсового скрепления выше 200МН/м.

Необходимо отметить, что значения испытательной нагрузки для каждой категории рельсовых креплений различны и учитывают особенности комплексной работы узла крепления с подрельсовым основанием. Для рельсовых креплений, применяемых в безбалластных конструкциях пути, испытательные нагрузки и места их приложения представлены в Таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Значения испытательной нагрузки и позиционирование мест ее приложения по [151]

К _{LFA}	< 50 МН/м			≥ 50 < 75 МН/м			≥ 75 < 100 МН/м			≥ 100 МН/м		
	α, град	X, мм	P _{v/cos α} , кН	α, град	X, мм	P _{v/cos α} , кН	α, град	X, мм	P _{v/cos α} , кН	α, град	X, мм	P _{v/cos α} , кН
A	45	100	50	45	100	55	38,6	50	65	38,6	50	80
B	38,6	100	55	38,6	100	60	38,6	50	70	38,6	50	85
C	33	25	60	33	25	65	33	25	75	33	25	95
D	26	15	60	26	15	65	26	15	75	26	15	95

В 9-й части EN 13146 [163] приводится процедура проведения испытаний прокладок при комнатной температуре в лаборатории (23±5) °С. В случае использования прокладок в других температурах окружающей среды, по требованию заказчика испытаний, проводятся дополнительные испытания при следующих температурах: (- 20 ± 3) °С, (- 10 ± 3) °С, (0 ± 3) °С и (50 ± 3) °С.

Каждый оператор железных дорог в праве установить свои требования к изменению показателя жёсткости прокладки в зависимости от температуры в рамках соблюдения процедуры испытаний [163]. К примеру, DB устанавливает требования к упругим характеристикам подрельсовых и эластичных прокладок [93] в диапазоне жёсткостей от 15 кН/мм до 200 кН/мм для своих климатических условий эксплуатации. Регламентируется отклонение от номинального значения статической жёсткости, а также допустимые коэффициенты изменения жёсткости в зависимости от воздействия различных испытательных температур.

4.2.2 Нормы AREMA

Основные требования к рельсовым скреплениям и подрельсовому основанию, которыми руководствуются железнодорожные операторы на территории Северной Америки, регламентированы в нормах AREMA [164]. Данная глава была сформирована в 2000 году, когда было принято решение об объединении норм [165] и [166]. Несмотря на несомненное преимущество в эксплуатации железнодорожных линий на деревянных шпалах (доля на рынке в Северной Америке достигает 90%), основные исследования и основное внимание работы комитетов направлено на применение железобетонных шпал.

Основные части данного стандарта:

- Часть 1: Основные определения;
- Часть 2: Оценочные испытания шпалоконструкций;
- Часть 3: Пиленные шпалы из твердых пород древесины;
- Часть 4: Железобетонные шпалы;
- Часть 5: Изготовленные композитные шпалы.

Первая часть является описательной, в которой предъявляются качественные показатели к рельсовым скреплениям, указанные в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Требования к рельсовым скреплениям по критериям, имеющим качественные показатели [164]

Тип шпалы	Стабильность колеи	Передача сил	Обеспечение подуклонки	Затухание ударной нагрузки	Несущая способность	Электрическая изоляция
Деревянная	Да	Да	Да	Нет	Да	Нет
Железобетонная	Да	Да	Нет	Да	Нет	Да
Композитная	Да	Да	Да	Нет	Да	Нет
Металлическая	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Да/нет

Во втором подразделе приводится описание требований к процедурам, связанным с испытаниями шпал, как в отдельности, так и в сборе с рельсовыми скреплениями.

Испытания приводятся по следующим параметрам:

- изгиб шпал (с жесткой фиксацией рельса, фиксация рельса с люфтами, центральная часть шпалы подвержена негативным нагрузкам, усталостная изгибная прочность шпалы, нагружение до предельной нагрузки);
- нагружение подрельсовой зоны;
- проверка креплений на сопротивление воздействию (вырывание замоноличенных элементов, боковое сопротивление движению рельса);
- испытания подрельсовой прокладки (прогиб и амортизация);
- узел рельсового крепления (сила прижатия рельса к подрельсовому основанию, удерживающая сила в продольном направлении, испытания под воздействием циклических нагрузений, удерживающая сила в боковом направлении, сопротивление кручению);
- износ подрельсовой зоны, истираемость;
- электрическое сопротивление между узлами рельсового крепления;
- боковая стабильность шпал.

Целью испытания подрельсовой прокладки является определение деформационных характеристик подрельсовой прокладки в части зависимости прогиба от нагрузки.

Данные испытания осуществляются в несколько этапов:

- вертикальное нагружение подрельсовой прокладки либо в узле рельсового крепления, либо независимое нагружение;
- циклическое нагружение с усилием изменяемым в диапазоне от 4 kips (18 кН) до 30 kips (133 кН) прилагаемым непрерывно на протяжении 1 000 (одной тысячи) циклов;
- испытание с квази-статическим приложением растущей нагрузки в диапазоне от 1 kip (4,45 кН) до 50 kips (223 кН); коэффициент упругости определяется как секущая линия между полученными значениями прогиба прокладки в диапазоне между 24 и 44 kips (между 107 кН и 196 кН) для тяжелонагруженного движения и в диапазоне между 4 и 20 kips (между 18 кН и 89 кН) для путей совмещенного магистрального движения;

– фиксируется прогиб подрельсовой прокладки после 10 секунд с момента снятия нагрузки. в данном случае упругие свойства характеризуются способностью материала релаксировать и возвращаться в исходное положение. толщина подрельсовой прокладки должна вернуться к своей первоначальной толщине с отклонением не более 0,002 inch (0,051 мм);

– изменение коэффициента упругости до и после циклических испытаний должно быть не более 25 %.

Целью испытания по определению усилия прижатия рельса к подрельсовому основанию является определение фактической физической величины, которая в дальнейшем принимается за базовую при проведении дальнейших нагружений.

Рельс крепится к подрельсовому основанию как показано на Рисунке 4.4. При помощи специального захвата к головке рельса подается вертикальная нагрузка, работающая на отжим рельса. Данная нагрузка является растущей от 1 kip/min (4,45 кН/мин) до момента образования зазора между рельсом и подрельсовой прокладкой либо подрельсовой прокладкой и подрельсовой площадкой шпалы, в данный момент фиксируется показание усилия (Р). Затем снимается нагружение и после чего производится повторное нагружение головки рельса на отрыв с усилием 1,5 Р. Измеряется величина зазора между подошвой рельса и подрельсовой прокладкой.

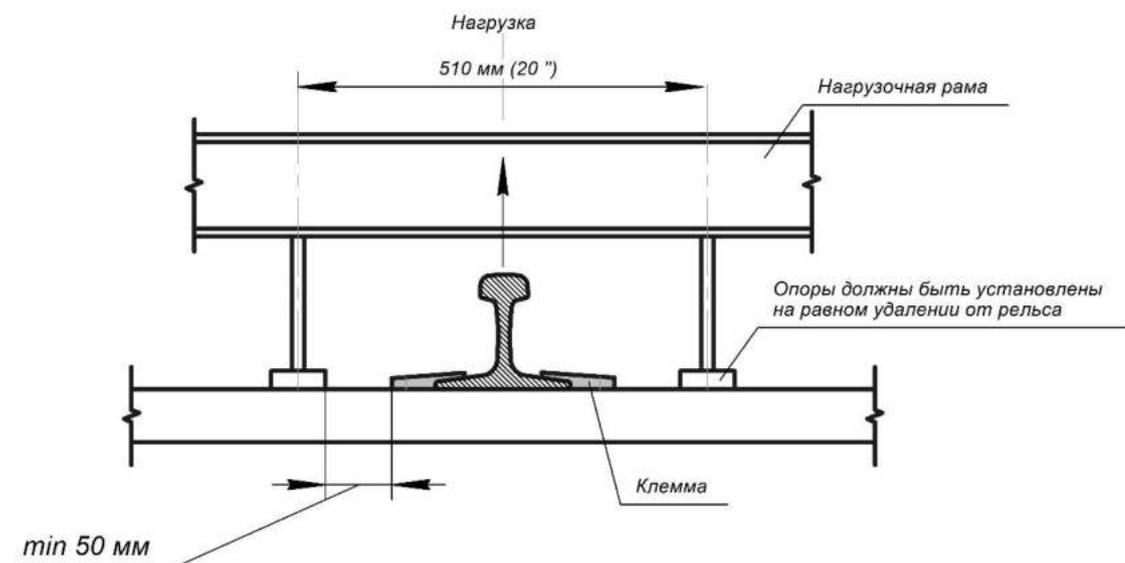


Рисунок 4.4 – Определение усилия прижатия рельса к подрельсовому основанию

При проведении данного испытания фиксируемая величина зазора является числовым показателем, который в дальнейшем сравнивается с аналогичными показателями других рельсовых креплений. Так же необходимо учитывать, что при приложении нагрузки, превышающей первоначальную в 1,5 раза, монолитные элементы крепления не должны выйти из строя и не должны быть демонтированы из основания. Рельс должен быть зафиксирован в узле.

Целью проведения испытания под воздействием циклических нагрузок является определение возможности узла рельсового крепления выдерживать комбинированные вертикальные и боковые нагрузки.

Знакопеременные (вверх/вниз) нагрузки прилагаются к головке рельса закрепленного на стенде узла рельсового крепления (Рисунок 4.5) с подрельсовым основанием под углом 20° , относительно горизонта, на протяжении 3 млн циклов (частота приложения не должна превышать 5 Гц).

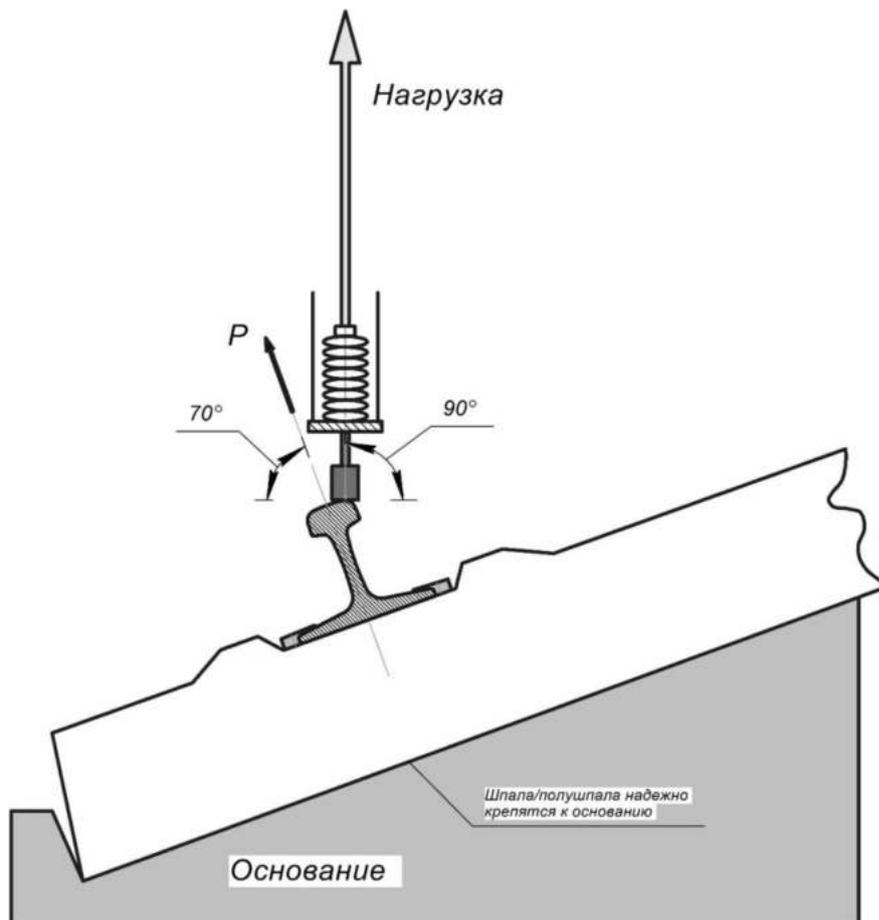


Рисунок 4.5 – Схема проведения испытаний по циклическому нагружению узла рельсового крепления

При проведении данного испытания прилагается нагрузка, определённая при проведении испытаний по определению усилия прижатия рельса к подрельсовому основанию. Подъёмная нагрузка должна быть $0,6P$. Если для создания подъёмного усилия применяются пружины, то нажимное усилие должно быть $30 \text{ kips (133,5 кН)} + 0,6P$. В случае проведения испытаний на сервогидравлической машине, которая создает усилия в двух направлениях, тогда нажимное усилие должно быть $30 \text{ kips (133,5 кН)}$. Температура подрельсовой прокладки не должна превышать $140 \text{ }^\circ\text{F (71 }^\circ\text{C)}$.

Критериями оценки данного испытания являются:

- выход из строя любого из элементов (разрыв, поломка и т.п.) констатирует несоответствие работоспособности;
- должны быть соблюдены и выполнены в полном объеме до проведения и после проведения циклического нагружения следующие испытания: испытания подрельсовых прокладок, определение усилия прижатия, определение сопротивления продольному перемещению рельса.

Основной целью проведения испытания по определению снижения силовых характеристик рельсового скрепления и состояния подрельсового основания является определение усталостно-прочностных характеристик подрельсовой зоны подрельсового основания, а также комплексной работы рельсового скрепления в условиях работы под тяжело нагружёнными осевыми нагрузками (33-35 тонн). Данные испытания выполняются по принципу приложения циклической повторяющейся нагрузки на базе 3 млн циклов с частотой нагружения 2,5 Гц. На Рисунке 4.6 показаны схематически векторы приложения испытательных нагрузок.

В зависимости от требуемых испытательных условий варьируются прилагаемые нагрузки. Для прямых участков пути и пологих кривых к рельсу прилагается нагрузка 50 kip (222 кН) . Для имитации суровых условий эксплуатации (кривые малого радиуса менее чем 350 м) принимаем испытательная нагрузка 65 kip (289 кН) . Также для более реалистичной имитации к подошве рельса прилагается реверсивная сила 1 kip (4,45 кН) , вектор которой

противоположен направлению вектора боковой силы. Также на всем протяжении испытаний в подрельсовую зону добавляется песок и вода, тем самым усиливая условия воздействия абразивной среды. В зависимости от требований заказчика могут варьироваться температурные показатели окружающей среды.

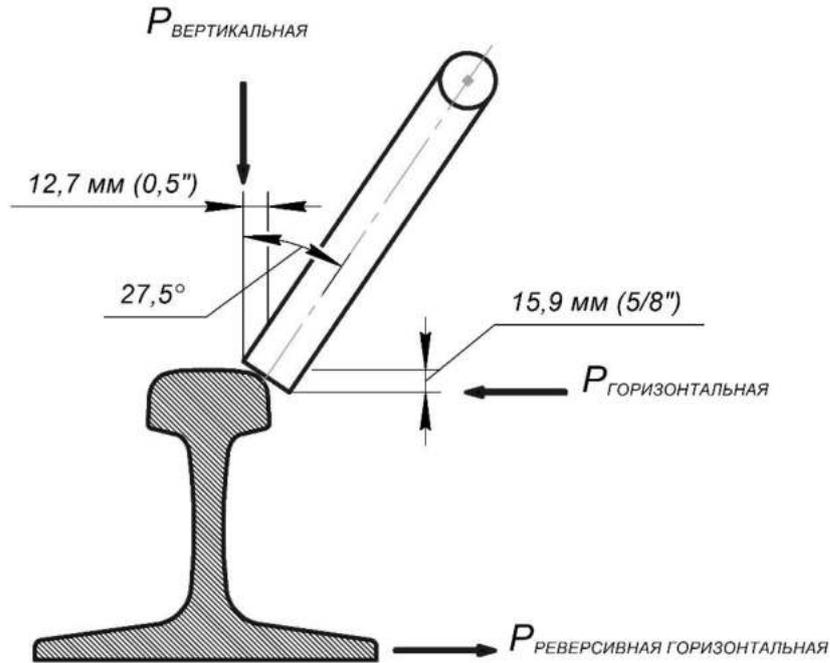


Рисунок 4.6 – Схема приложения нагрузок при проведении усталостно-прочностных испытаний подрельсового основания и рельсового скрепления

Несоответствие требованию считается в том случае, когда в процессе испытания выйдет из строя любой из элементов скрепления, либо отклонение рельса в любой точке, измеренное от первоначального положения, более чем 0,2 inches (5,08 мм).

4.2.3 Отраслевой стандарт железных дорог КНР

С 2016 года на сети железных дорог КНР действуют технические требования к рельсовым скреплениям для высокоскоростных железнодорожных линий, в которых прописаны основные требования к работоспособности конструкции и характеристикам деталей и узлов [94].

Данный стандарт применим для рельсовых креплений, эксплуатирующихся как на балластной конструкции, так и на БКП высокоскоростных линий.

Рельсовые крепления применяются с тяжелыми рельсами весом не менее 60 кг/м. В стыковой зоне, крепления должны обеспечивать плотное прилегание прикрепителя к подошве рельса. Подуклонка рельсов составляет 1:40, в случае отсутствия подуклонки выполненного на подрельсовом основании, она должны быть сформирована в узле рельсового крепления.

Рельсовые крепления должны обеспечивать регулировку ширины рельсовой колеи с шагом не более 1 мм (Таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Диапазоны регулировки ширины рельсовой колеи по [94]

№ п/п	Конструкция пути	Минимальный диапазон регулировки в одиночном узле крепления	Минимальный диапазон регулировки ширины рельсовой колеи
1	Безбалластный путь	-5 ~ +5	-10 ~ +10
2	Балластный путь	-4 ~ +2	-8 ~ +4

Регулировка уровня головки рельса в узле рельсового крепления должна обеспечивать диапазон от -4 мм до +26 мм, с шагом 1 мм.

Так же данный стандарт предъявляет требования не только к усилию прижатия от прижимных элементов, а также и к диапазону упругого перемещения прижимных элементов Таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Усилие нажима и диапазон упругого перемещения прижимных элементов крепления по [94]

Номер	Тип крепления	Расчетная прижимная сила, кН	Расчетная длина упругого хода, мм
1	Крепления, используемые на безбалластных путях	≥ 9	≥ 12
2	Крепления, используемые на балластных путях	≥ 10	≥ 10
3	Крепление с малой силой сопротивления	≥ 3	$\geq 7^*$

Упругость узлов скрепления выражается через показатели жесткости эластичных прокладок. Измерения проводятся по двум методикам, динамическая и статическая жёсткость прокладок должны соответствовать показателям, указанным в Таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Соотношение динамической и статической жёсткости эластичной прокладки по [94]

Номер	Тип путей	Статическая жесткость, кН/мм	Соотношение динамической и статической жесткости
1	Безбалластные пути	20–30	$\leq 1,5$
2	Балластные пути	50–70	$\leq 2,0$

Усилие продольного сопротивления движению рельса в каждом узле рельсового скрепления с нормальным сопротивлением не должно быть менее 9 кН, усилие продольного сопротивления движению рельса в каждой узле рельсового скрепления с низким сопротивлением обычно составляет 4 кН, но должна быть не менее 3 кН. Значение усилия продольного сопротивления рельса, закладываемое при проектировании бесстыковых путей, должно определяться в соответствии с типом рельсовых скреплений, условиями эксплуатации и рациональными расчетами, с учетом многофакторных значений.

Усилие прижатия в узле рельсового скрепления должно удовлетворять следующим требованиям: для скреплений балластных путей оно должна быть не менее 20 кН, для скреплений БКП — не менее 18 кН, для скреплений с низким сопротивлением — не менее 6 кН.

Для рельсовых скреплений в стандартном исполнении узла определены требования на усталость при нагружении в течение 3 млн циклов. После нагружения никакие детали не должны быть повреждены, увеличение ширины колеи не должно превышать 6 мм. Коэффициент изменения продольного сопротивления рельса до и после испытаний на усталость не должен превышать 20%, коэффициент изменения усилия прижатия узла скрепления не должен превышать 20%, коэффициент изменения статической жесткости узла не должен превышать 25%.

Для узлов рельсовых креплений, в которых осуществляется регулировка ширины колеи либо регулировка УГР, осуществляются только циклические испытания. После 3 млн. циклов нагружения никакие детали не должны быть повреждены, увеличение ширины колеи не должно превышать 6 мм. Электрическое сопротивление между двумя узлами крепления должно быть не менее 5 кОм.

После испытаний узлов креплений в камере с солевым туманом длительностью 300 часов крепления должны успешно разбираться ручным специнструментом, без разрушения отдельных элементов.

Сила сопротивления закладных элементов на вырывание из железобетонного подрельсового основания (шпалы, плиты, блоки и т.п.) должна удовлетворять расчетным требованиям и быть не менее 60 кН. После проведения испытаний на вырыв, закладные элементы не должны быть повреждены, в бетонных шпалах вокруг закладных деталей не должно быть видимых трещин, однако допускается небольшие отслоения бетона около выкружки закладного элемента.

Также могут быть предъявлены дополнительные требования к характеристикам рельсовых креплений при согласовании технического задания с оператором железнодорожной линии.

4.3 Сравнение требований к рельсовым креплениям для БВСП

Анализируя представленную в 4.1 и 4.2 действующую нормативную базу, регулирующую требования к рельсовым креплениям, необходимо отметить, что требования к рельсовым креплениям для БВСП нормируются в [101, 151, 94]. В [164] основные требования предъявляются к конструкциям рельсовых креплений для железобетонных шпал и высоких осевых нагрузок. Принимая во внимание вышеизложенное, автором представлены отечественные и зарубежные

требования к рельсовым скреплениям для БВСП в виде сравнительной таблицы в Приложении Г.

4.3.1 Силовые характеристики узла и его элементов

Усилие прижатия рельса к основанию в соответствии с требованием [101] должно быть не менее 20 кН, в [151] данные требования отсутствуют. В [94] регламентируется усилие прижатия рельса к основанию с усилием не менее 18 кН, также регламентируется требование по усилию от одного прижимного элемента (клеммы), которое должно быть не менее 9 кН.

Немаловажным показателем является требование к упругому ходу прижимных рукавов клеммы – не менее 12 мм.

В нормах безопасности [100] действовало требование по минимальному снижению монтажного прижатия рельса после воздействия циклической нагрузки, которое составляло не более 10%. В [101] этот показатель не прописан. В [151], тем не менее, существует требование по снижению монтажного прижатия рельса, которое должно быть не более 20%. Необходимо отметить, что в евронормах данный показатель не устанавливает минимальное требование к усилию прижатия, а контролирует комплексную работоспособность всех элементов скрепления непосредственно в узле.

При проведении данного испытания фиксируется фактическое усилие прижатия рельса к подрельсовому основанию при первоначальной сборке узла скрепления (до проведения каких-либо испытаний, например, циклических). Затем измеряется фактическое усилие прижатия рельса к подрельсовому основанию после проведения циклических испытаний. Данный показатель оценивает работоспособность всей конструкции узла в целом (комплексно, как конструкторскую разработку), а также качество изготовления элементов скрепления (правильно ли подобраны материалы, соблюден ли технологический процесс и т.п.).

4.3.2 Испытания с приложением продольной нагрузки

Продольная нагрузка, необходимая для возникновения необратимого смещения рельса или подкладки при их монтажном прижатии зависит от условий эксплуатации, в частности от расчетной амплитуды температур и от скорости движения. Так же следует отметить, что допускаемые значения требований [101] превышают в два раза минимальные требования [151]. Данный факт, возможно, объясняется различием методов испытаний либо более жесткими требованиями к коэффициенту запаса, используемому при расчетах железнодорожного пути. В [94] требование совпадает с [151] при скоростях движения более 250 км/ч.

В европейских нормах существует требование по контролю изменения продольного сопротивления смещению рельса после проведения циклических испытаний, которое должно быть не более 20%. Данный показатель является критическим и характеризует основной показатель работоспособности рельсового скрепления, в части сопротивления так называемому «угону» пути. Данный показатель характеризует комплексную работу узла скрепления, которая интегрирует упругую работу клеммы и подрельсовой прокладки, подкладки или боковых упоров, изоляторов и анкеров и т.п. Ведь соблюдение поставленных требований – необходимого показателя сопротивления, возможно достигнуть комплексно варьируя физико-механическими показателями отдельных элементов узла скрепления. Например, возможно применить упругую клемму, произведенную из металлического прутка меньшего диаметра, которая будет осуществлять нажим на рельс с меньшим усилием, но при этом использовать в узле подрельсовую прокладку из материала, имеющего высокий коэффициент трения. В итоге получаем рабочую конструкцию узла рельсового скрепления, отвечающего необходимым требованиям, но с меньшей себестоимостью.

4.3.3 Циклические испытания

В [101] данные требования не установлены, но с целью сравнения существующих в РФ требований с аналогичными показателями в зарубежных нормативах, автором рассмотрены показатели по [97]. В которых регламентируются остаточные перемещения головки рельса в узле скрепления после проведения циклических испытаний на базе 4 млн циклов с частотой приложения нагрузки 5-10 Гц.

В [151] устанавливаются требования по изменению показателя продольного сопротивления рельса или продольной жёсткости узла скрепления, изменения показателя вертикальной статической жёсткости и изменения показателя усилия прижатия рельса на базе 3 млн циклов с частотой приложения нагрузки 4 Гц.

В [94] аналогично евронормам предъявляются требования к изменению коэффициента продольного сопротивления рельса, изменению коэффициента вертикальной статической жёсткости и изменения коэффициента усилия прижатия рельса на базе 3 млн циклов с частотой приложения нагрузки 4 Гц. Также регламентируется показатель увеличения ширины рельсовой колеи, который не должен превышать 6 мм. Отдельно установлены требования к циклическим испытаниям клемм и упругих прокладок.

4.3.4 Упругие характеристики узла рельсового скрепления

Упругие характеристики узла рельсового скрепления по [101] выражаются через вертикальную статическую жесткость скрепления и поперечную жесткость, определяемую по подошве рельса. Европейские нормы [151] различают следующие упругие характеристики скрепления и подрельсовой прокладки:

- статическая жесткость подрельсовой прокладки;
- статическая жесткость скрепления;

- динамическая низкочастотная (3-10 Гц) жесткость узла скрепления;
- динамическая высокочастотная (20-450 Гц) жесткость узла скрепления (дополнительные испытания по требованию заказчика);
- динамическая низкочастотная жесткость прокладки (дополнительные испытания по требованию заказчика);
- коэффициент затухания ударной нагрузки.

В [94] упругость узла рельсового скрепления выражается через показатель упругости эластичной прокладки, статическая жесткость которой должна быть в диапазоне 20-30 кН. Учитывается влияние низких температур на упругие характеристики. При температуре -35°C коэффициент изменения статической жёсткости эластичных прокладок не должен превышать 20%. Также учитывается коэффициент соотношения динамической и статической жесткостей прокладок, который не должен превышать показатель 1,5.

4.3.5 Электрическое сопротивление

Требования к электрическому сопротивлению узла рельсового скрепления на подрельсовом основании согласно [101] выше в два раза в сравнении с требованиями по [151] и [94].

4.3.6 Дополнительные требования

Дополнительными требованиями в [101] является регулировка ширины рельсовой колеи в узле скрепления в диапазоне ± 4 мм, а также регулировку УГР не менее 10 мм.

В [151] и [94] прописаны требования к работоспособности узлов скреплений после проведения испытаний в солевом тумане. Также

регламентируется требование к сопротивлению на вырывание закладных элементов скрепления. В [151] прописаны такие требования как влияние допусков элементов скрепления в сборке на ширину рельсовой колеи, уменьшение интенсивности шума и вибрации, габаритные размеры скрепления относительно поверхности катания и оси рельса, проведение полигонных испытаний.

В [94] регламентируются требования по регулировке положение рельса в плане ± 5 мм, а также минимальный диапазон регулировки положения УГР в диапазоне от -4 мм до +26 мм.

4.4 Требования к упругим характеристикам узла рельсового скрепления БКП для российских условий эксплуатации

Для обеспечения комфортного и плавного хода высокоскоростного подвижного состава по БКП необходимо обеспечить равномерное распределение поездной нагрузки на нижние структурные слои. Заданная распределённая нагрузка должна гарантировать многолетнюю эксплуатацию рельса без перенапряжений и изломов [123, 167]. С этой точки зрения для безбалластного полотна необходим относительно большой прогиб рельса, который позволит выполнить заданное условие не в ущерб надёжности. Зарубежные источники справочно указывают, что целевым показателем статического прогиба рельса для безбалластного пути является 1,2–1,5 мм. Данные значения являются условно целевыми и рассматриваются при воздействии температуры окружающей среды равной условиям комнатной температуры. Для достижения указанного значения, динамическая жёсткость промежуточной эластичной прокладки должна быть около 30 кН/мм, соответственно, статическая жёсткость данной прокладки должна быть в диапазоне 20–22 кН/мм [112]. Немецкие специалисты для высокоскоростного движения и безбалластной конструкции пути установили целевой показатель прогиба рельса в 1,5 мм [167]. При этом базовыми элементами

являются рельсы UIC 60, расстояние между опорами 650 мм, статическая жесткость узлов скрепления 22,5 кН/мм для осевых нагрузок 18 тс.

Для безбалластной конструкции пути китайский стандарт регламентирует применение эластичных прокладок, статическая жёсткость которых должна находиться в диапазоне 20-30 кН/мм [94]. Также китайские специалисты принимают в расчёт рельс массой не менее 60 кг/м, расстояние между опорами не более 650 мм.

Результаты моделирования, согласно усовершенствованной автором математической модели, показывают, что прогиб рельса для немецких параметров составляет 1,41 мм (Рисунок 4.7, Рисунок 4.8, Рисунок 4.9), для китайских – 1,04-1,56 мм.

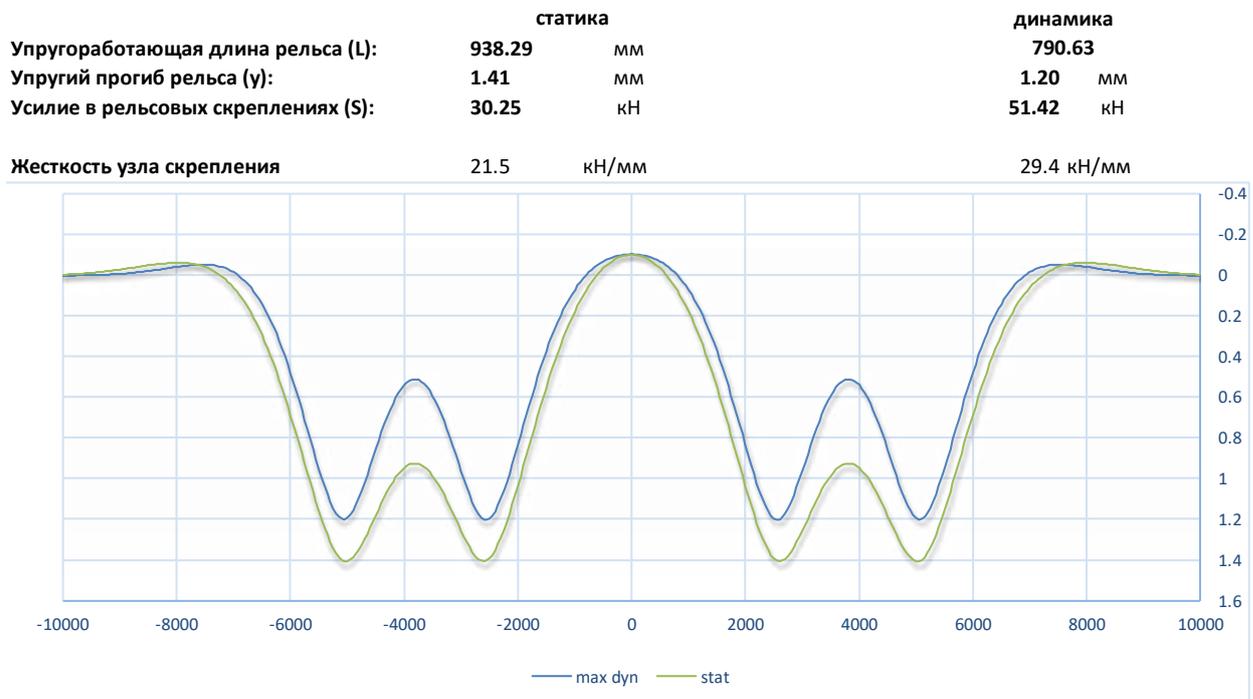


Рисунок 4.7 – Прогиб рельса согласно немецким параметрам

	статика		динамика	
Упругоработаящая длина рельса (L):	965.17	мм	813.88	
Упругий прогиб рельса (y):	1.54	мм	1.31	мм
Усилие в рельсовых скреплениях (S):	29.57	кН	49.96	кН
Жесткость узла скрепления	19.2	кН/мм	26.2	кН/мм

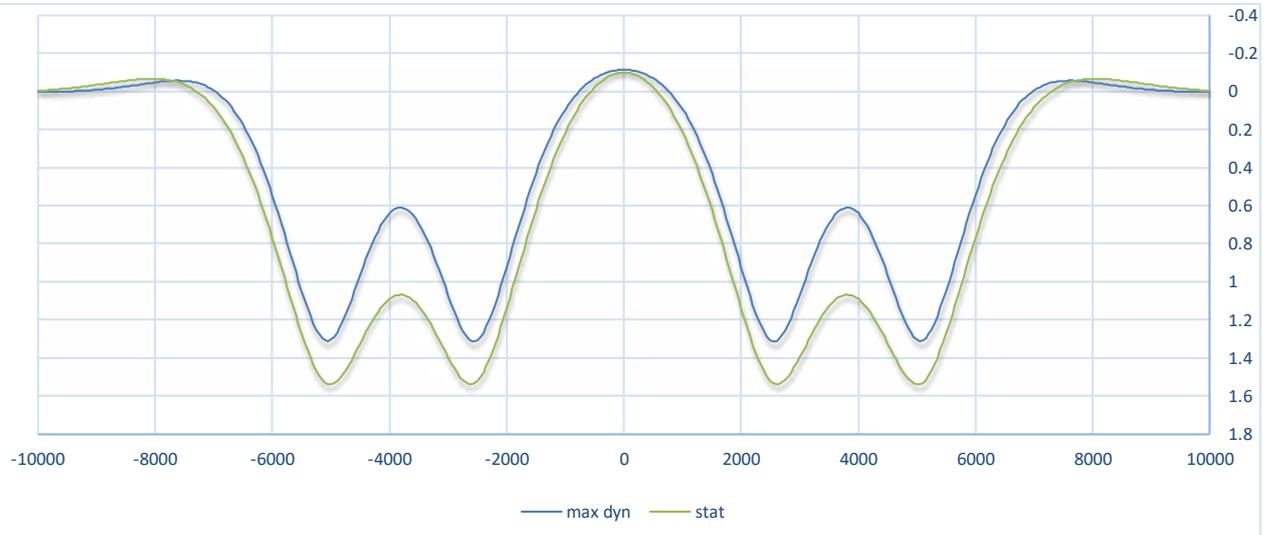


Рисунок 4.8 – Прогиб рельса согласно китайским параметрам (для 20 кН/мм)

	статика		динамика	
Упругоработаящая длина рельса (L):	876.29	мм	736.77	
Упругий прогиб рельса (y):	1.14	мм	0.98	мм
Усилие в рельсовых скреплениях (S):	32.08	кН	55.29	кН
Жесткость узла скрепления	28.3	кН/мм	39.0	кН/мм

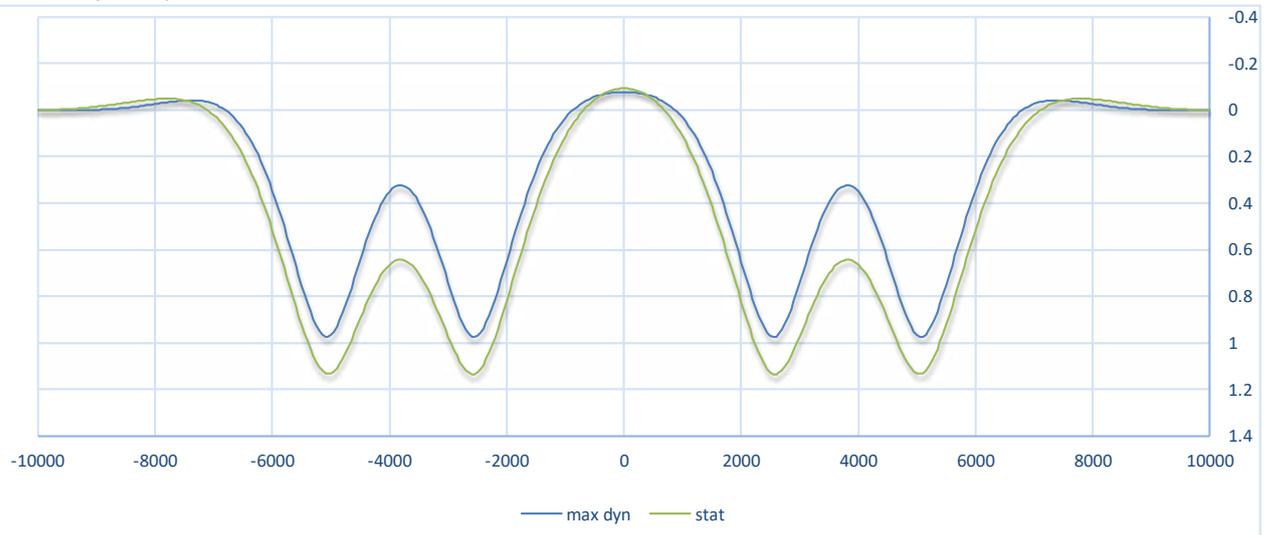


Рисунок 4.9 – Прогиб рельса согласно китайским параметрам (для 30 кН/мм)

При формировании требований к упругим характеристикам рельсовых скреплений, которые будут применяться в конкретной БКП, необходимо иметь точные данные о конструктивных особенностях самого пути и подвижного

состава. В настоящий момент времени такие данные для проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» являются неточными. В проектных решениях рассматриваются различные варианты, как конструкций пути, так и подвижного состава. По этой причине, учитывая многолетний китайский опыт эксплуатации линий ВСМ на безбалластном пути, следует рассматривать минимально допустимый прогиб рельса от воздействия подвижного состава на БКП для проектируемой ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» аналогично китайским требованиям - не менее 1 мм. При этом верхним рекомендуемым целевым порогом прогиба рельса является значение 2 мм, что в свою очередь обусловлено усталостно-прочностными характеристиками пружинных прутковых клемм. В случае многократного и длительного превышения данного значения в пути произойдет хрупкий излом клеммы, что в свою очередь повлечёт к возможному нарушению требований безопасности.

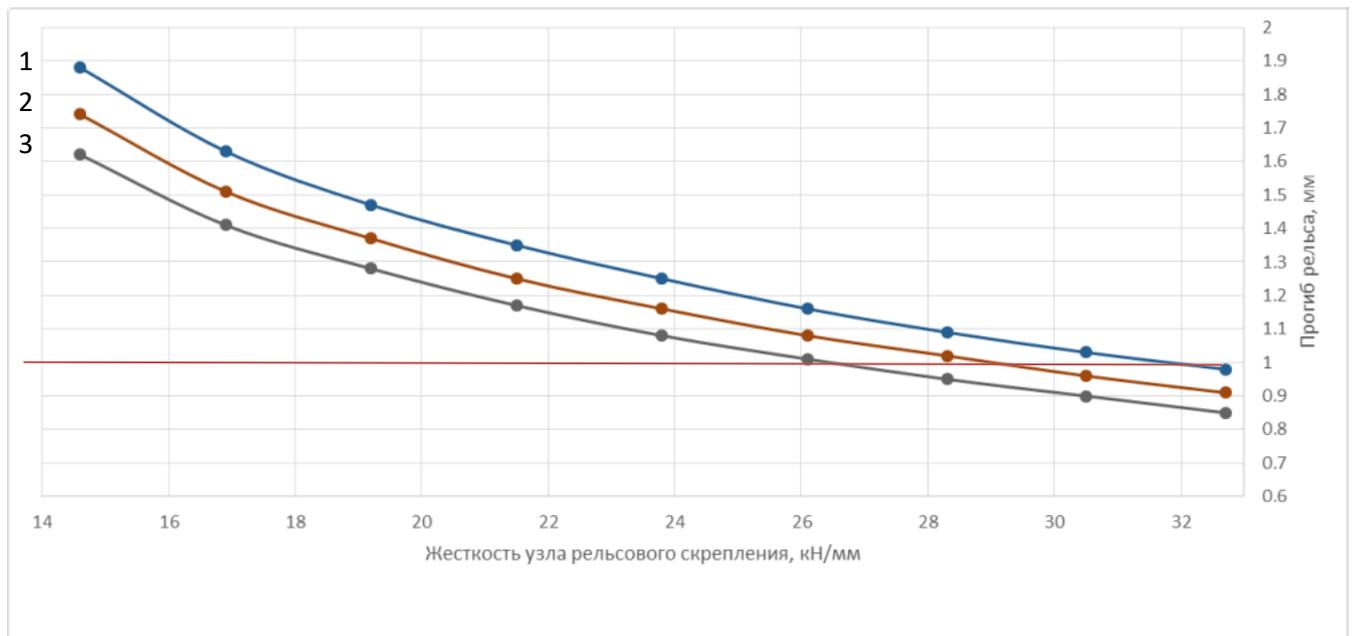
4.4.1 Жесткость узлов рельсовых креплений

Для рассматриваемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» были проведены расчеты прогиба рельса согласно следующим вариациям вводных данных:

- рельса типа Р65;
- конструкция пути FFB, расстояние между узлами креплений 650 мм;
- конструкция пути CRTS III RUS, расстояние между узлами креплений 592 мм;
- проектная конструкция пути 1840, расстояние между узлами креплений 543 мм, что соответствует эпюре 1840 шпал/км [168];
- конструктивные особенности тележки и вагона высокоскоростного электропоезда ЭВС «Сапсан»;
- температура воздуха +23 °С;

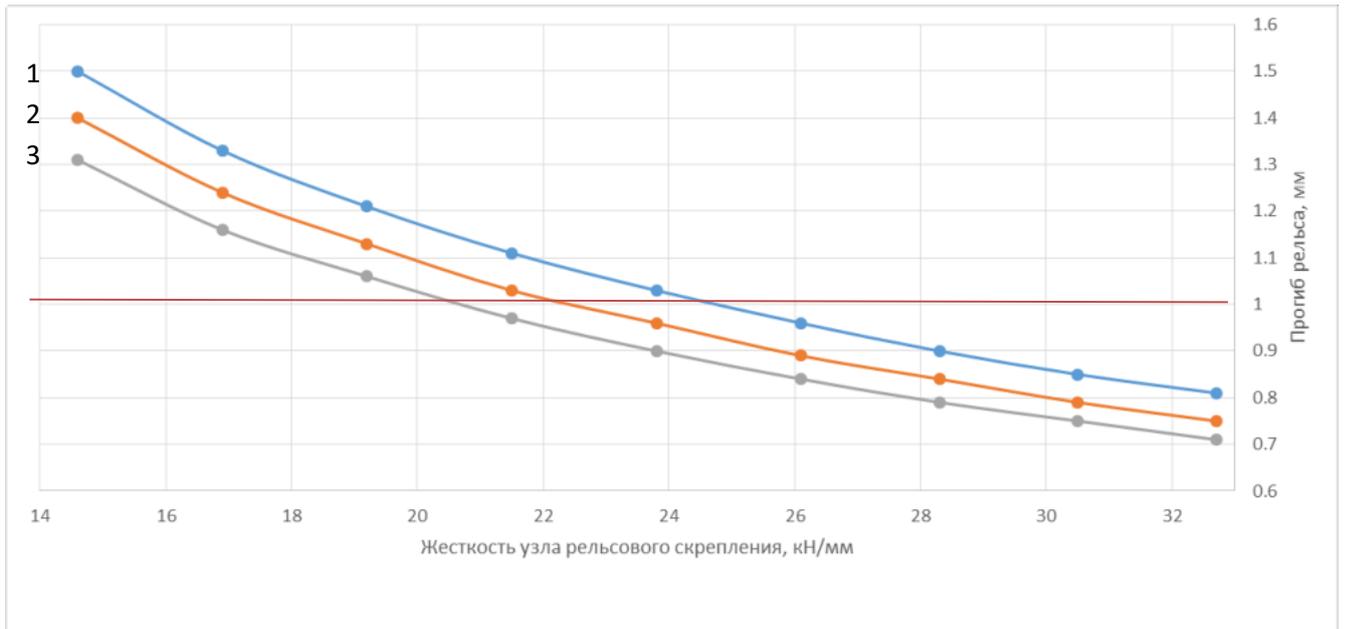
- жесткость узлов рельсовых креплений в диапазоне от 15 кН/мм до 33 кН/мм;
- материал эластичных прокладок EPDM и Byrel.

Для заданных условий были произведены вычисления прогиба рельса БКП как в статическом, так и в динамическом нагружении на скорости 400 км/ч. Полученные графики зависимостей прогиба рельса от жёсткости узла крепления представлены на Рисунках 4.10-4.12.



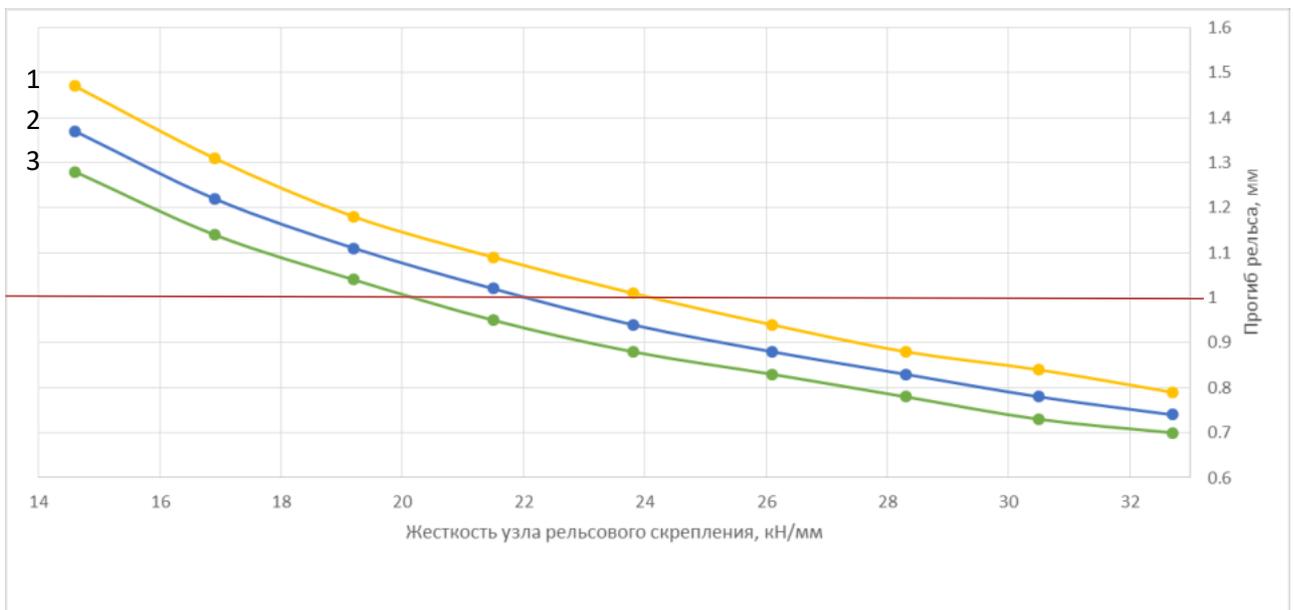
1 - конструкция пути FFB; 2- конструкция пути CRTS III RUS; 3 – проектная конструкция пути 1840

Рисунок 4.10 – Прогиб рельса при статическом нагружении БКП



1 - конструкция пути FFB; 2- конструкция пути CRTS III RUS; 3 – проектная конструкция пути 1840

Рисунок 4.11 – Прогиб рельса при динамическом нагружении БКП с эластичной прокладкой из материала EPDM



1 - конструкция пути FFB; 2- конструкция пути CRTS III RUS; 3 – проектная конструкция пути 1840

Рисунок 4.12 – Прогиб рельса при динамическом нагружении БКП с эластичной прокладкой из материала Бурил

Рассмотрим минимальные значения прогибов рельса для каждой рассматриваемой конструкции, полученных посредством моделирования. При статическом нагружении отмечено, что для конструкции FFB целевой минимальный прогиб рельса в 1 мм обеспечивается узлами рельсовых скреплений

с жёсткостью 32 кН/мм, конструкции CRTS III RUS – 29 кН/мм, проектной конструкции 1840 – 27 кН/мм. При динамическом нагружении с эластичной прокладкой из материала EPDM для указанных конструкций соответственно – 25 кН/мм; 22,5 кН/мм; 20,5 кН/мм. При динамическом нагружении с эластичной прокладкой из материала Byrel для указанных конструкций соответственно – 23,5 кН/мм; 21,5 кН/мм; 20 кН/мм. В таком случае мы имеем наибольшее значение жёсткости эластичной прокладки в 27 кН/мм, при котором выполняется требования минимального прогиба рельса в 1 мм.

Максимальный прогиб рельса составляет 1,9 мм при статическом нагружении конструкции FFB с жёсткостью узлов рельсовых креплений 15 кН/мм.

Проведённые натурные измерения прогибов рельса на высокоскоростной линии в Китае показали, что при увеличении скорости движения с 200 км/ч до 350 км/ч в контакте колесо-рельс возникают дополнительные динамические силы, приводящие к увеличению амплитуды колебания рельса на 40,3% [169]. Таким образом, для динамического нагружения рельса при скорости 400 км/ч необходимо, чтобы прогиб рельса предпочтительно не превышал значение 1,42 мм. Основываясь на данных моделирования данное требование соблюдается при минимальной жесткости узла рельсового крепления в 16 кН/мм.

Следовательно, рекомендованная жесткость узлов рельсовых креплений БКП в условиях эксплуатации проектируемой линии ВСМ Москва – Санкт-Петербург составляет 16 – 27 кН/мм.

Для вышеуказанных конструкций пути также были проведены расчеты прогиба рельса БКП от динамического воздействия на скорости 160 км/ч вагона-платформы для перевозки контейнеров, в которых применяются двухосные тележки модели 18-100. Принимая во внимание тот факт, что линия ВСМ проектируется под конкретные условия эксплуатации специального высокоскоростного подвижного состава, но в целях окупаемости линии могут быть организованы в ночные часы контейнерные перевозки, то для этого случая следует предусмотреть средние значения прогиба рельса в 1,5 мм. Полученные

графики зависимости прогиба рельса от жёсткости узла крепления представлены на Рисунках 4.13- 4.15.

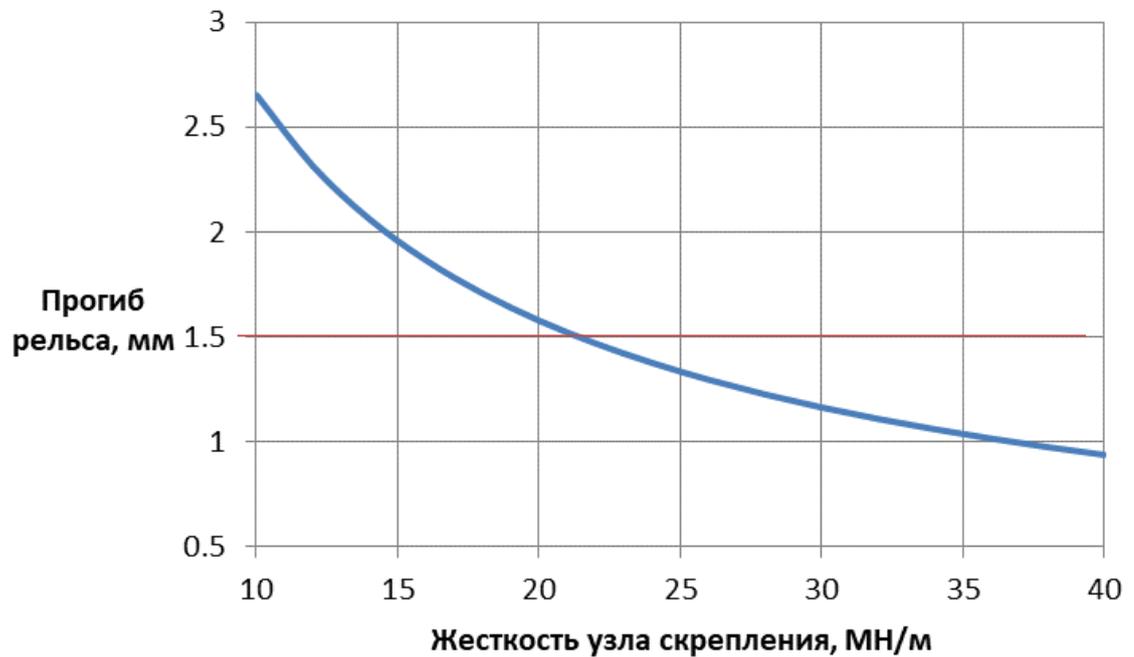


Рисунок 4.13 – Прогиб рельса конструкции FFB под воздействием вагона контейнеровоза

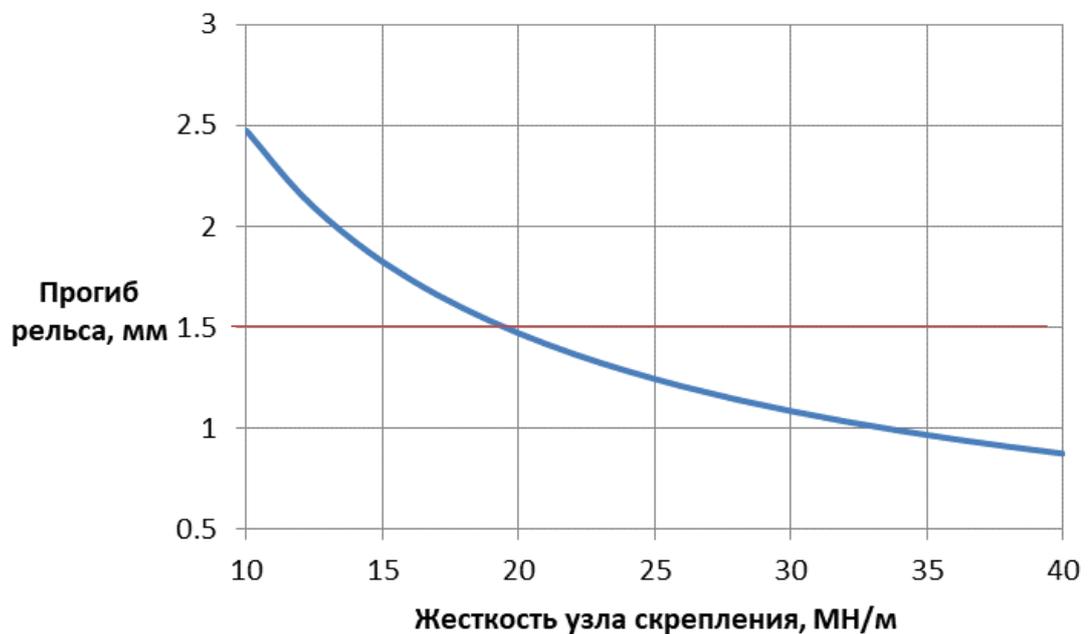


Рисунок 4.14 – Прогиб рельса конструкции CRTS III RUS под воздействием вагона контейнеровоза

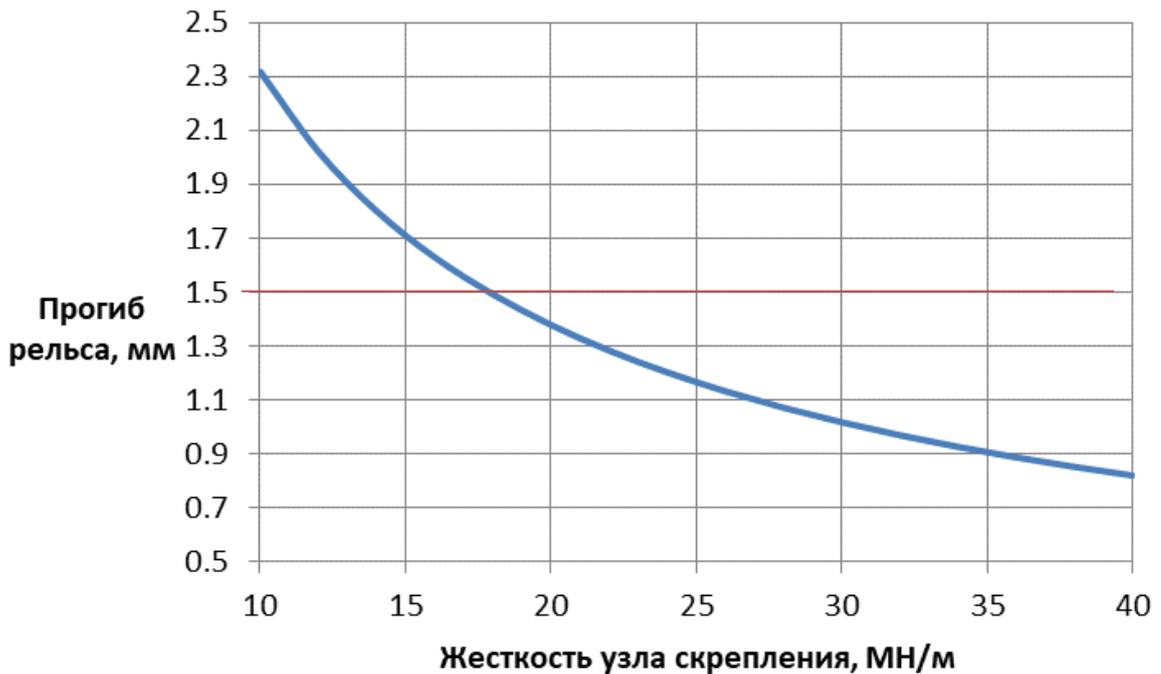


Рисунок 4.15 – Прогиб рельса проектной конструкции 1840 под воздействием вагона контейнеровоза

Исходя из анализа графиков зависимостей, указанных на Рисунках 4.13-4.15, имеется возможность определить предпочтительный диапазон жёсткости узлов рельсовых креплений для организации контейнерных перевозок, который составит от 17 кН/мм до 22,5 кН/мм. Полученный диапазон также соответствует рекомендованному диапазону жесткостей для узлов рельсовых креплений 16 – 27 кН/мм.

4.4.2 Коэффициенты жёсткости

В целях осуществления надзора за качеством материала и стабильности упругих свойств эластичных прокладок, применяемых в узлах рельсовых креплений БКП, необходимо контролировать жёсткость эластичных прокладок и коэффициенты жёсткости.

В лабораторных условиях были проведены испытания по определению статической и динамической жёсткостей эластичных прокладок из материалов

EPDM и Byrel с учетом влияния низких температур. В соответствии с ГОСТ 34078 [99] под коэффициентами жёсткости понимается отношение динамической жесткости при определенной испытательной частоте, амплитуде и температуре к статической жёсткости, определённой при той же температуре. Согласно данному требованию были определены коэффициенты жёсткости, результаты указаны в 3.1.3 настоящей работы.

Определено, что при понижении температуры от +23 °С до -50 °С происходит увеличение показателя статической жёсткости эластичных прокладок для БКП из материала EPDM в 2,12 раза, а из материала Byrel в 3,58 раза. Оба показателя не превышают коэффициент 4, что показано на Рисунке 4.16.

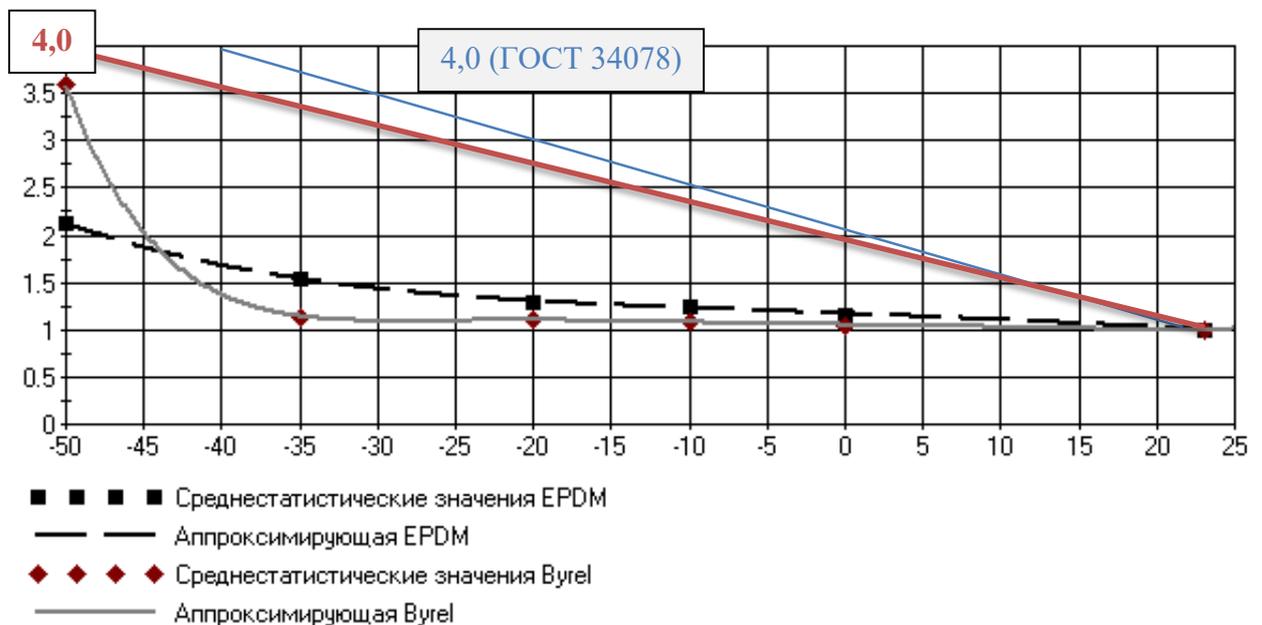


Рисунок 4.16 – График изменения коэффициентов статической жёсткости эластичных прокладок из материалов EPDM и Byrel с условной линией пределов

Требования ГОСТ 34078 [99] регламентируют, что коэффициент изменения статической жёсткости при температуре минус (40.2) не должен превышать коэффициент 4,0. Данный коэффициент получен посредством обработки полученных по результатам серии испытаний различных подрельсовых прокладок из различных материалов, согласно ГОСТ 34078 [99]. Полученные опытным путем коэффициенты статической жесткости эластичных прокладок при температуре -50°С из двух рассматриваемых материалов коррелируются с требованиями ГОСТ 34078 [99].

Предлагается определить для эластичных прокладок рельсовых скреплений БКП, что коэффициент изменения статической жёсткости при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ не должен превышать 4,0.

Результаты обработки данных, в ходе которых были определены коэффициенты динамической жёсткости, показали, что наиболее стабильно и линейно изменяется динамическая жёсткость эластичных прокладок при понижении температуры до $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$. С понижением температуры менее $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается прогрессивное увеличение динамической жёсткости эластичных прокладок, что связано с процессом стеклования материалов и, как следствие, увеличением жёсткости.

Определено, что эластичные прокладки из материала EPDM в сравнении с эластичными прокладками из материала Byrel имеют более низкие коэффициенты динамической жёсткости при понижении температуры от $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но при понижении температуры менее $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается обратный эффект, что показано на Рисунке 4.17.

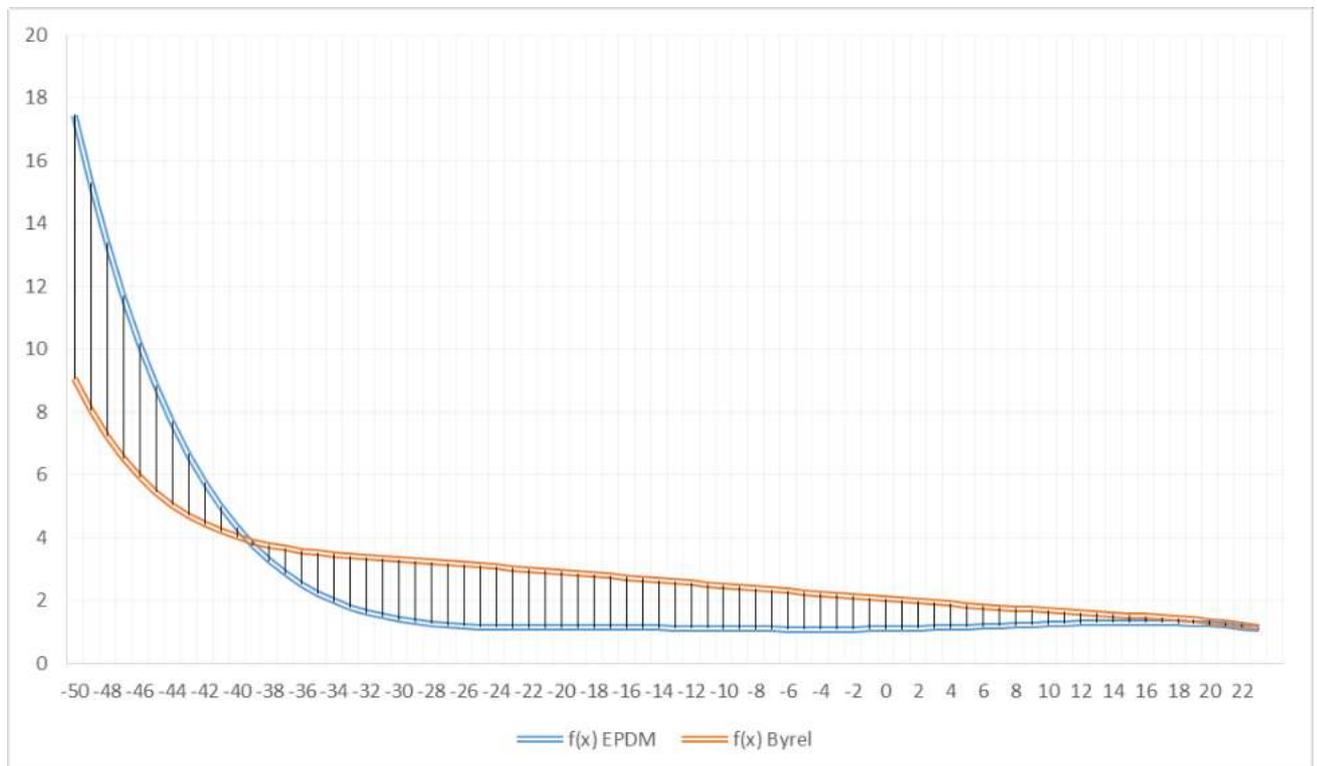


Рисунок 4.17 – Графики зависимостей коэффициентов динамической жёсткости от температуры эластичных прокладок

На основании полученных зависимостей изменения коэффициентов динамических жёсткостей для эластичных прокладок из двух материалов предлагается определить (Рисунок 4.18), что для эластичных прокладок рельсовых скреплений БКП, соотношение динамической жёсткости к статической жёсткости эластичных прокладок, не должно превышать коэффициент [170]:

- при температуре 23 °С – 1,5;
- при температуре 0 °С – 2,0;
- при температуре -10 °С – 2,5;
- при температуре -20 °С – 3,0;
- при температуре -30 °С – 3,5;
- при температуре -40 °С – 5,0;
- при температуре -50 °С – 18,0.

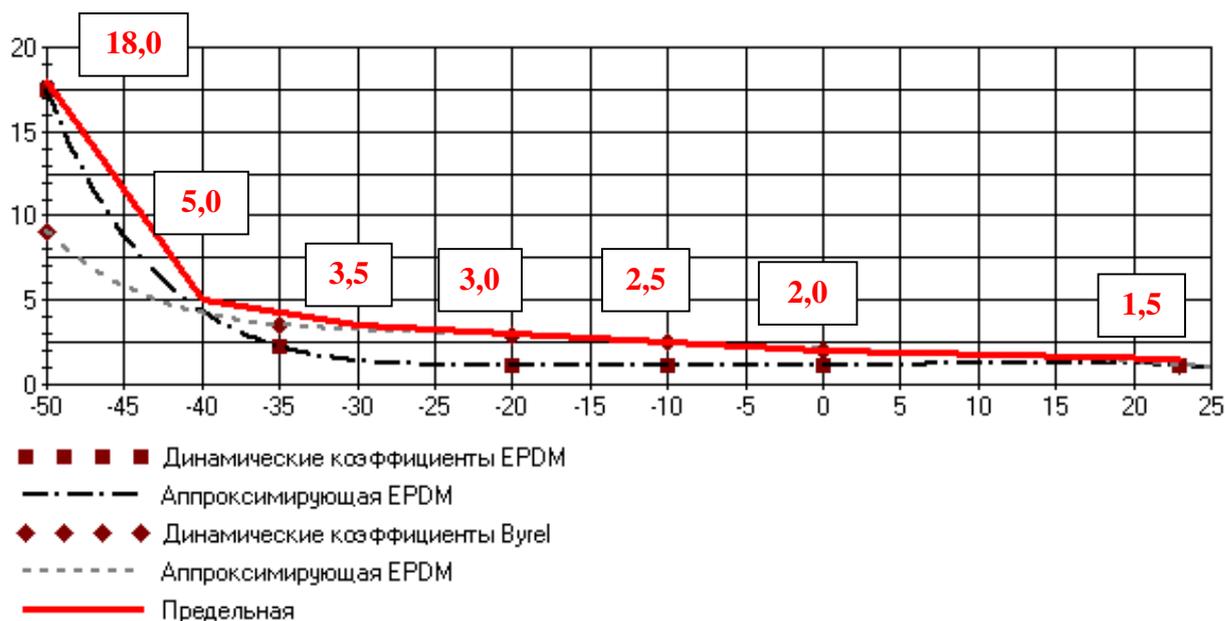


Рисунок 4.18 – График коэффициентов динамической жёсткости с линией пределов

Рекомендации из 4.4.1 и 4.4.2 были использованы при формировании предложений по изменению ГОСТ 32698-2014 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля» в части добавления раздела, регламентирующего требования к упругим характеристикам рельсовых скрепления для БКП (Приложение Д). Также данные

рекомендации были учтены при разработке модернизированного узла рельсового скрепления (заявки на патент №2022123430, №2022123431 от 01.09.2022), представленные в Приложении Е.

4.4.3 Метод испытаний эластичной прокладки по определению статической жёсткости

Обозначения и определения:

F_1 — минимальная нагрузка, под которой находится испытываемая эластичная прокладка, единица измерения — кН;

F_2 — максимальная нагрузка, под которой находится испытываемая эластичная прокладка, единица измерения — кН;

D_1 — изменение толщины эластичной прокладки, когда она находится под нагрузкой F_1 , единица измерения — мм;

D_2 — изменение толщины эластичной прокладки, когда она находится под нагрузкой F_2 , единица измерения — мм;

$K_{\text{стат}}$ — статическая жесткость эластичной прокладки, единица измерения — кН/мм.

Основные положения.

С помощью испытательной машины, которая оказывает вертикальную нагрузку на эластичную прокладку, измеряется максимальное и минимальное вертикальное изменение толщины эластичной прокладки под максимальной и минимальной нагрузкой.

Оборудование.

Серво-гидравлическая испытательная машина, которая может обеспечить минимальную нагрузку 100 кН. Для испытаний на статическую жесткость при низкой температуре испытательная машина должна обеспечивать понижение

температуры окружающей среды для эластичной прокладки до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ с погрешностью прибора в $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вместо рубка рельса применяется стальная нагрузочная пластина, длина которой больше, чем у эластичной прокладки вдоль рельса, ширина совпадает с шириной подошвы рельса, где установлена эластичная прокладка, а толщина составляет 40 мм. Затем устанавливается пластина распределения нагрузки, которая по размерам совпадает с размерами эластичной прокладки. В качестве опорной части применяется стальная пластина, длина и ширина которой не меньше, чем у нижней опоры испытываемой эластичной прокладки, а толщина не меньше 25 мм. Если длина или ширина рабочей площадки испытательной машины меньше длины или ширины опорной стальной пластины, толщина опорной пластины должна быть не меньше 40 мм.

Между пластиной распределения нагрузки и образцом, образцом и опорной пластиной устанавливается наждачная бумага с зернистостью 5-Н, М63 по ГОСТ 3648-80.

Датчики перемещения, позволяющие обеспечить измерение вертикального смещения в диапазоне температур от $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ с погрешностью 0,01 мм.

Регистрационное оборудование с частотой дискретизации не ниже 100 Гц, которое в ходе испытаний может вести цифровую запись и строить кривую перемещения и нагрузки.

Ход испытаний.

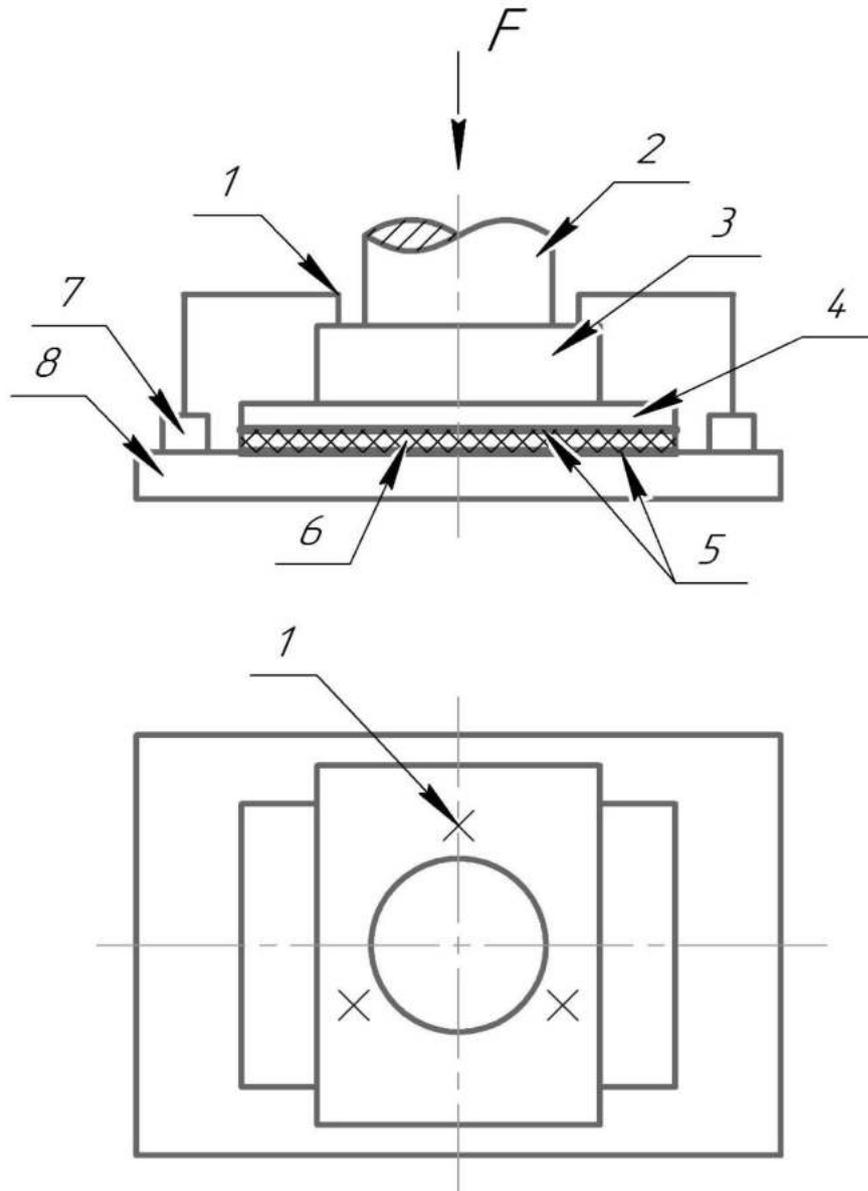
Испытания по определению статической жесткости при комнатной температуре ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Температура окружающей среды в лаборатории — $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

До начала испытаний испытываемую эластичную прокладку, а также все детали и оборудование, необходимые при испытании, оставляют в среде с температурой $23 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ минимум на 24 часа.

На испытательной машине по порядку размещаются: опорная стальная пластина, наждачная бумага (лицевой стороной вверх), испытываемая эластичная прокладка, наждачная бумага (лицевой стороной вниз), пластина распределения

нагрузки, нагрузочная пластина. На стальной опоре устанавливается, по меньшей мере, 3 отдельных датчика перемещения, которые на равном расстоянии друг от друга измеряют вертикальное перемещение нагрузочной пластины, как показано на Рисунке 4.19.



1 – датчик перемещения и его место расположения; 2 – нагрузочный цилиндр испытательной машины; 3 – стальная нагрузочная пластина; 4 – пластина распределения нагрузки; 5 – наждачная бумага; 6 – испытываемый образец; 7 – основание датчика перемещения; 8 – опорная стальная пластина

Рисунок 4.19 – Схема испытаний прокладки по определению статической жесткости

Датчики перемещения обнуляются, затем, после помещения испытываемого образца на испытательную установку, осуществляется трёхкратное нагружение и

снятие нагрузки в диапазоне нагрузок от 20 кН до 85 кН. Необходимо между нагружениями выдерживать интервал не менее 1 минуты с целью релаксации эластичной прокладки. При третьем нагружении производится регистрация нагрузки и изменение толщины испытываемого образца (указывается среднее значение измерений по трем датчикам перемещений). Скорость приложения нагрузки составляет 2 кН/с. Статическая жёсткость эластичной прокладки определяется в диапазоне приложения нагрузок 20 кН – 70 кН по равенству (4.1):

$$K_{\text{стат}} = \frac{F_2 - F_1}{D_2 - D_1}. \quad (4.1)$$

Если разница между значениями $F_2 - F_1$ и/или $D_2 - D_1$, измеренных любым из трех датчиков перемещения, составляет более 20%, то необходимо провести повторные испытания таким образом, чтобы нагрузка прикладывалась к центру испытываемого образца. Датчики перемещения обнуляются, затем, после помещения испытываемого образца на испытательную установку осуществляется трёхкратное нагружение и снятие нагрузки в диапазоне нагрузок от 20 кН до 85 кН. Необходимо между нагружениями выдерживать интервал не менее 1 минуты с целью релаксации эластичной прокладки. Если для измерения перемещений стальной пластины от прилагаемых нагрузок применяются собственные датчики перемещения испытательного оборудования, необходимо учитывать собственную системную погрешность, вызываемую собственной деформацией испытательной машины при нагрузке.

Испытания по определению статической жесткости при температуре отличной от комнатной (23 °С).

Температура окружающей среды в лаборатории — 23 °С ±3 °С.

До начала испытаний испытываемую эластичную прокладку, а также все детали и оборудование, необходимые при испытании, оставляют в среде с температурой 23±3 °С минимум на 24 часа.

На испытательной машине размещается испытываемый образец аналогично испытаниям по определению статической жесткости при комнатной температуре, используемые при испытании детали и датчики смещения. После этого

испытательную машину включают на достижение необходимой температуры среды для эластичной прокладки. Испытания начинают через 16 часов после момента, как температура достигнет требуемого значения.

Нагрузки при проведении испытаний, а также вычисление статической жесткости выполняются в соответствии испытаниями по определению статической жесткости при комнатной температуре.

Если для измерения перемещений стальной пластины от прилагаемых нагрузок применяются собственные датчики перемещения испытательного оборудования, необходимо учитывать собственную системную погрешность, вызываемую собственной деформацией испытательной машины при нагрузке.

Протокол испытаний.

Протокол испытаний должен включать в себя, по меньшей мере, следующие сведения:

- а) Название и адрес лаборатории;
- б) Наименование и модель испытательного оборудования;
- в) Наименование и модель испытываемой эластичной прокладки;
- г) Заказчик или источник образцов;
- д) Методы испытаний;
- е) Дата проведения испытаний;
- ж) Результат испытаний;
- з) Лаборанты.

4.4.4 Метод испытаний эластичной прокладки по определению динамической жёсткости

Обозначения и определения:

F_{1a} — минимальная нагрузка в a -том цикле, прикладываемая к испытываемой эластичной прокладке, единица измерения — кН;

F_{2a} — максимальная нагрузка в a -том цикле, прикладываемая к испытываемой эластичной прокладке, единица измерения — кН;

D_{1a} — изменение толщины прокладки от минимальной нагрузки F_{1a} в a -том цикле, приложенной к испытываемой прокладке, единица измерения — мм;

D_{2a} — изменение толщины прокладки от максимальной нагрузки F_{2a} в a -том цикле, приложенной к испытываемой прокладке, единица измерения — мм;

F_1 — среднее значение фактических минимальных нагрузок, приложенных к испытываемой прокладке при 10 циклах нагружения, единица измерения кН;

F_2 — среднее значение фактических максимальных нагрузок, приложенных к испытываемой прокладке при 10 циклах нагружения, единица измерения кН;

D_1 — среднее значение изменений толщины прокладки от минимальной нагрузки F_{1a} в a -том цикле, приложенной к испытываемой прокладке, единица измерения — мм;

D_2 — среднее значение изменений толщины прокладки от максимальной нагрузки F_{2a} в a -том цикле, приложенной к испытываемой прокладке, единица измерения — мм;

$K_{\text{дин}}$ — динамическая жесткость эластичной прокладки, единица измерения — кН/мм.

Основные положения.

С помощью испытательной машины, которая оказывает вертикальную циклическую нагрузку с постоянной частотой на эластичную прокладку, измеряется максимальное и минимальное вертикальное изменение толщины эластичной прокладки под максимальной и минимальной нагрузкой.

Оборудование.

Серво-гидравлическая испытательная машина, которая может обеспечить минимальную циклическую нагрузку с частотой нагружения 20 Гц и статическую нагрузку с усилием не менее 100 кН. Для испытаний на динамическую жесткость при низкой температуре испытательная машина должна обеспечивать понижение температуры окружающей среды для эластичной прокладки до -50 °С с погрешностью прибора в 3 °С.

Вместо рубка рельса применяется стальная нагрузочная пластина, длина которой больше, чем у эластичной прокладки вдоль рельса, ширина совпадает с шириной подошвы рельса, где установлена эластичная прокладка, а толщина составляет 40 мм. Затем устанавливается пластина распределения нагрузки, которая по размерам совпадает с размерами эластичной прокладки. В качестве опорной части применяется стальная пластина, длина и ширина которой не меньше, чем у нижней опоры испытываемой эластичной прокладки, а толщина не меньше 25 мм. Если длина или ширина рабочей площадки испытательной машины меньше длины или ширины опорной стальной пластины, толщина опорной пластины должна быть не меньше 40 мм.

Между пластиной распределения нагрузки и образцом, образцом и опорной пластиной устанавливается наждачная бумага с зернистостью 5-Н, М63 по ГОСТ 3648-80.

Датчики перемещения, позволяющие обеспечить измерение вертикального смещения в диапазоне температур от +50 °С до -50 °С с погрешностью 0,01 мм.

Регистрационное оборудование с частотой дискретизации не ниже 100 Гц, которое в ходе испытаний может вести цифровую запись и строить кривую перемещения и нагрузки.

Ход испытаний.

Испытания по определению динамической жесткости при комнатной температуре (23 °С).

На испытательной машине по порядку размещаются: опорная стальная пластина, наждачная бумага (лицевой стороной вверх), испытываемая эластичная прокладка, наждачная бумага (лицевой стороной вниз), пластина распределения нагрузки, нагрузочная пластина. На стальной опоре устанавливается, по меньшей мере, 3 отдельных датчика перемещения, которые на равном расстоянии друг от друга измеряют вертикальное перемещение нагрузочной пластины, как показано на Рисунке 4.19.

Датчики перемещения обнуляются, затем осуществляется циклическое нагружение образца с частотой 10 Гц в диапазоне испытательных нагрузок

20-70 Гц. Количество циклов нагружения составляет 1000 раз. Последние 100 циклов нагрузки записываются и выбираются фактические значения нагрузки F_{1a} , F_{2a} в 10 непрерывных циклах, а также перемещения стальной нагрузочной пластины D_{1a} , D_{2a} (являются средними значениям от полученных данных с 3-х датчиков). Вычисляются средние значения для F_{1a} , F_{2a} , D_{1a} , D_{2a} из 10 циклов и обозначаются как F_1 , F_2 , D_1 , D_2 .

Динамическая жёсткость прокладки вычисляется по формуле 4.2:

$$K_{\text{дин}} = \frac{F_2 - F_1}{D_2 - D_1}. \quad (4.2)$$

Если разница между значениями $F_2 - F_1$ и/или $D_2 - D_1$, измеренных любым из трех датчиков перемещения, составляет более 20%, то необходимо провести повторные испытания таким образом, чтобы нагрузка прикладывалась к центру испытываемого образца. Датчики перемещения обнуляются, затем, после помещения испытываемого образца на испытательную установку осуществляется трёхкратное нагружение и снятие нагрузки в диапазоне нагрузок от 20 кН до 85 кН. Необходимо между нагружениями выдерживать интервал не менее 1 минуты с целью релаксации эластичной прокладки. Если для измерения перемещений стальной пластины от прилагаемых нагрузок применяются собственные датчики перемещения испытательного оборудования, необходимо учитывать собственную системную погрешность, вызываемую собственной деформацией испытательной машины при нагрузке.

Испытания по определению динамической жесткости при температуре отличной от комнатной (23 °С).

Температура окружающей среды в лаборатории — 23 °С ±3 °С.

До начала испытаний испытываемую прокладку, а также все детали и оборудование, необходимые при испытании, оставляют в среде с температурой 23±3 °С минимум на 24 часа.

На испытательной машине размещается испытываемый образец аналогично испытаниям по определению динамической жесткости при комнатной температуре, используемые при испытании детали и датчики смещения. После

этого испытательную машину включают для достижения необходимой температуры окружающей среды для эластичной прокладки. Испытания начинают через 16 часов с момента, как температура достигнет требуемого значения.

Нагрузки при проведении испытаний, а также вычисление статической жесткости выполняются в соответствии с испытаниями по определению динамической жесткости при комнатной температуре.

Протокол испытаний.

Протокол испытаний должен включать в себя, по меньшей мере, следующие сведения:

- а) Название и адрес лаборатории;
- б) Наименование и модель испытательного оборудования;
- в) Наименование и модель испытываемой эластичной прокладки;
- г) Заказчик или источник образцов;
- д) Методы испытаний;
- е) Дата проведения испытаний;
- ж) Результат испытаний;
- з) Лаборанты.

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1) Существующая отечественная нормативно-техническая документация, регулирующая требования к рельсовым скреплениям, ориентирована на установление требований к скреплениям и их элементам, применяемым в конструкции классического пути со шпальным основанием на балластном слое. Отсутствуют требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем, применяемых в БКП, а также отсутствуют методы подтверждения указанных требований.

2) Наиболее развернутый объем требований и методы подтверждения данных требований прописаны в регулирующих документах EN и Китая, но в данной документации отсутствуют требования по контролю изменения упругих характеристик рельсовых скреплений при температурах ниже $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3) Физико-механические показатели, предъявляемые к рельсовым скреплениям в качестве требований, должны рассматриваться совместно с методами их определения. Требования к отдельным элементам рельсовых скреплений должны быть интегрированы с требованиями, предъявляемым к сборочным единицам узлов рельсовых скреплений.

4) Для российских условий эксплуатации для проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» предлагается установить следующие требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений БКП:

Вертикальная жёсткость узла рельсового скрепления должна быть в пределах, кН/мм – 16-27.

Изменение статической жесткости эластичных прокладок, эксплуатируемых в условиях низких температур (от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$), не должно превышать коэффициент – 4.

Соотношение динамической жёсткости к статической жесткости эластичных прокладок, не должно превышать коэффициент:

- при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 1,5;
- при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 2,5;
- при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 3,0;
- при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 3,5;
- при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 5,0;
- при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 18,0.

5) Для подтверждения соответствия установленным требованиям к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем безбалластных конструкций пути, автор рекомендует к применению методики определения статической и динамической жёсткости эластичной прокладки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы:

1) Определено влияние низких температур на жёсткость узлов рельсовых скреплений БКП. Уточнена расчётная модель определения упругого прогиба рельса от воздействия подвижного состава на БКП посредством введения коэффициентов, позволяющих учитывать влияние низких температур на изменение жёсткости рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем.

2) Определены коэффициенты изменения статической и динамической жёсткости эластичных прокладок из материалов EPDM и Byrel в состоянии заводского изготовления в диапазоне температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, полученные в лабораторных условиях. Экспериментально подтверждено, что с понижением температуры до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ для эластичных прокладок из материала EPDM и Byrel происходит, соответственно, увеличение статической жёсткости в 2,11 и 3,57 раза, а также происходит соответственно увеличение динамической жёсткости эластичных прокладок из материала EPDM и Byrel в 17,54 и 9,06 раза.

3) Проведены испытания на Экспериментальном кольце АО ВНИИЖТ по определению прогиба рельса на участке безбалластного пути конструкции Feste Fahrbahn Voegl. Адекватность расчётов подтверждена удовлетворительной сходимостью с экспериментальными данными. Сходимость расчётных результатов с экспериментальными данными составила 94,8%.

4) Сформированы дополнительные требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений БКП для российских условий эксплуатации для участков высокоскоростного железнодорожного сообщения со скоростями движения до 400 км/ч проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург», рекомендуемые для включения в ГОСТ 32698:

– вертикальная жёсткость узла рельсового скрепления должна быть в пределах, кН/мм – 16-27;

– изменение статической жесткости эластичных прокладок, эксплуатируемых в условиях низких температур (от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$) не должно превышать коэффициент – 4;

– соотношение динамической жёсткости к статической жесткости эластичных прокладок, не должно превышать коэффициент: при температуре $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 1,5; при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 2,0; при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 2,5; при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 3,0; при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 3,5; при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 5,0; при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 18,0.

5) Разработаны рекомендации по методам определения упругих характеристик узла рельсового скрепления с промежуточным эластичным слоем для БКП с учетом влияния низких температур.

6) Перспективой дальнейшей разработки темы является проведение исследований работы рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем БКП на реальных скоростях движения под нагрузками от реального высокоскоростного подвижного состава на высокоскоростном полигоне, которым должен стать участок линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- БВСП – безбалластное верхнее строение пути
- БКП – безбалластная конструкция пути
- ВСМ – высокоскоростная магистраль
- ВСП – верхнее строение пути
- ЕАЭС – Евразийский экономический союз
- КНР – Китайская Народная Республика
- РЖД – ОАО «Российские железные дороги»
- СКО – среднеквадратическое отклонение
- СЖЦ – стоимость жизненного цикла
- УГР – уровень головки рельса
- УПЖ – участок переменной жесткости
- ЭК – экспериментальное кольцо ОАО «ВНИИЖТ» ст. Щербинка
- AREMA – Американская ассоциация строительства и обслуживания железных дорог (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association)
- CRTS III RUS – безбалластная конструкция пути китайских железных дорог для России (China Railway Track System III for Russia)
- DB – Немецкие железные дороги (Deutsche Bahn)
- EBS – конструкция пути компании Tines, Польша (Embedded Block System)
- EPDM – синтетический эластомер этилен пропиленовый каучук (Ethylene Propylene Diene Monomer)
- SNCF – Национальная компания французских железных дорог (Société Nationale des Chemins de fer Français)
- NBT – конструкция пути компании Alstom, Франция (New Ballastless Track Appitrack)
- LVT – конструкция пути компании РЖДСтрой, Россия (Low Vibration Track)
- FFB – конструкция пути компании Max Boegl, Германия (Feste Fahrbahn Boegl)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крейнис, З.Л. Путь и путевое хозяйство железных дорог. Термины и определения. Словарь-справочник. [Текст] / М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. — 639 с.
2. Лихтенберг, Б. Справочник «Железнодорожный путь». Нижнее строение – верхнее строение – текущее содержание – экономическая эффективность. – Гамбург: Eurailpress, 2010. – 432 с.
3. Kaewunruen, S. Dynamic properties of railway track and its components: a state-of-the-art review [Текст] / S. Kaewunruen, A.M. Remennikov // в BN (ed) New Research on Acoustics, Hauppauge, New York, Nova Science Publishers. – 2008. – P. 197-220.
4. Инячин, А.И. Результаты сравнительных полигонных испытаний рельсовых креплений типа КБ-65, ЖБР-65 и АРС-4 [Текст] / А.И. Инячин // Труды V науч.-техн. конф. с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». Москва, МИИТ. – 19-20 ноября 2008. – С. 195-201.
5. Ершов, Д.С. Изменить систему проектирования креплений [Текст] / Д.С. Ершов, Н.И. Питеев // Путь и путевое хозяйство. – 2008. - №4. – С. 18-19.
6. Ершов, Д.С. Промежуточные рельсовые крепления [Текст] / Д.С. Ершов, Н.И. Питеев // Труды IV науч.-техн. конф. с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». Москва, МИИТ. – 7-8 ноября 2007. – С. 34-36.
7. Петров, А.В. Анализ требований российских и европейских стандартов к рельсовым креплениям [Текст] / А.В. Савин, А.В. Лебедев // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № №9. – С. 22-27.
8. Альбрехт, В.Г. Бесстыковой путь / Альбрехт, В.Г.; Виногоров, Н. Н.; Зверев, Н. Б. и др. – М.: Транспорт, 2000. – 408 с.

9. EN 13481-1:2012. Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 1: Definitions.

10. Каменский, В.Б. Нужно ли снижать мощность пути [Текст] / В. Б. Каменский // Путь и путевое хозяйство. – 2007. - №4. – С. 23-24.

11. Прокудин, И. В. Зависимость вибродинамического воздействия, передающегося земляному полотну, от состояния верхнего строения пути [Текст] / И. В. Прокудин // Вопросы земляного полотна и геотехники на железнодорожном транспорте. Труды ДИИТ. – 1978. – № 201/27 – С .10-14.

12. Список стран по длине сети железных дорог [Электронный ресурс] // Википедия. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%BA_%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD_%D0%BF%D0%BE_%D0%B4%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B5_%D1%81%D0%B5%D1%82%D0%B8_%D0%B6%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D1%8B%D1%85_%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B3 (дата обращения 18.01.2019)

13. Яковлева, Т.Г. Железнодорожный путь [Текст] / Яковлева, Т. Г.; Карпущенко, Н. И.; Клинов и др. – М.: Транспорт, 1999, р. 405 с.

14. Яковлева, Т.Г. Основы устройства и расчетов железнодорожного пути [Текст] / Т.Г. Яковлева, В.Я. Шульга, С.В. Амелин. – М.: Транспорт, 1990. – 367 с.

15. Андреев. Г.Е. Эксплуатационные наблюдения за работой пути на железобетонных шпалах [Текст] / Г.Е. Андреев // Вопросы путевого хозяйства. – 1968. – С. 11-28.

16. Бекиш, А.А. Расчетная оценка эксплуатационных параметров железобетонных шпал [Текст] / А. А. Бекиш // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – №5. – С. 39-43.

17. Виноградов, В.В. Расчеты и проектирование железнодорожного пути [Текст] / В.В. Виноградов, А.М. Никонов, Т.Г. Яковлева. – М.: Маршрут, 2003. – 486 с.

18. Опыт разработки и эксплуатации безбалластного пути [Текст] // Железные дороги мира. – 2005. – № 1. – С.68–71.

19. Певзнер, В.О. Оценка деформативности пути в местах расстройств и возможных изменений в сроках выправки при повышении осевой нагрузки грузовых вагонов [Текст] / В.О. Певзнер, С.С. Надежин, А.В. Анисин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 4. – С. 44–47.
20. Певзнер, В.О. Влияние жесткости подбалластного основания на упругие осадки и нагруженность пути [Текст] / В.О. Певзнер // Труды III науч.-техн. конф. с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». Москва, МИИТ. – 1-2 ноября 2006. – С. 120-122.
21. Варызгин, Е.С. Исследование неравномерности остаточных осадок щебеночного слоя [Текст] / Е.С. Варызгин // Вестник ВНИИЖТ. - 1968. - № 5. - С. 43-46.
22. Певзнер, В.О. Путь и повышенные осевые нагрузки вагонов [Текст] / В.О. Певзнер, О.Ю. Белоцветова, И.Б. Петропавловская и др. // Железнодорожный транспорт. – 2014. - №4. – С. 55-58.
23. Расчет и конструирование балластной призмы железнодорожного пути [Текст] // Сборник трудов ВНИИЖТ. Вып. № 387 под общей редакцией канд. техн. наук Е. С. Варызгина. – М.: Транспорт. 1970. – 190 с.
24. Певзнер, В.О. Состояние железнодорожного пути и установление скоростей движения : дис. ...д-ра тех. наук : 05.22.06 / Певзнер Виктор Ошеревич. – М.: ВНИИЖТ., 1991. – 331 с.
25. Esveld, C. Historic data on track geometry in relation to maintenance [Text] / C. Esveld, A. Jourdain, G. Kaess, M. Shenton // Rail Engineering International Edition. – 1988. - №2. – P. 16-19.
26. Щебеночный балласт [Текст] // Железные дороги мира. – 2009. - №3. – С. 65-77.
27. Giannakos, K. Influence of Rail Pad Stiffness on Track Stressing, Life-Cycle and Noise Emission [Электронный ресурс] / К. Giannakos // Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. – 2010. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/292989877_Influence

_of_Rail_Pad_Stiffness_on_Track_Stressing_Life-Cycle_and_Noise_Emission (дата обращения 21.06.2018 г).

28. Прочностные и деформационные характеристики балласта в процессе абразивного износа его частиц [Текст] // Железные дороги мира. – 2008. - №1. – С. 72-77.

29. RTSE: International Workshop. Ballast: Issues and Challenges. UIC Paris, 5- 6 Dec 2013. - 65 p. ISBN: 978-0-9565951-9-5.

30. Новое в конструкции балластного пути [Текст] // Железные дороги мира. – 2010. - №9. – С. 49-61.

31. Влияние ширины железобетонных шпал на износ балласта [Текст] // Железные дороги мира. – 2005. - №2. – С. 70-73.

32. Влияние размера и формы шпал на осадку балластного пути [Текст] // Железные дороги мира. – 2006. - №8. – С. 68-70.

33. Le Pen L. The use of under sleeper pads to improve the performance of ballasted railway track at switches and crossings: A case study [Электронный ресурс] / L. Le Pen, T. Abadi, A. Hudson and others // 2014. Режим доступа: https://alertgeomaterials.eu/data/workshop/2014/workshop2014-session2/ALERT2014_01_LePen.pdf (дата обращения 18.03.2020 г).

34. Барабошин, В.Ф. Повышение стабильности пути в зоне рельсового стыка [Текст] / В.Ф. Барабошин, Н.И. Ананьев // М. : Транспорт, 1978. – 45 с.

35. Марготьев, А.Н. Оценка прочности балластного слоя и земляного полотна по предельному состоянию [Текст] / А.Н. Марготьев. – М.: Транспорт, 1970. – 149 с.

36. Барабошин, В.Ф. Вредные вибрации пути и борьба с ними [Текст] / В.Ф. Барабошин, Н.И. Ананьев // М.: Транспорт, 1972. – 48 с.

37. Першин, С.П. Приближенная статистическая оценка влияния неравножесткости пути на характеристики его напряженно-деформированного состояния [Текст] / С.П. Першин // Вестник ВНИИЖТ. – 1971. - №5. – С. 7-10.

38. Кулагин, М.И. Неровности на поверхности катания рельсов и их влияние на динамическое давление колеса на рельс [Текст] / И.М. Кулагин // Труды ЦНИИ МПС. – М. – 1959. – Вып. 177. – С. 125.
39. Лысюк, В.С. Влияние жесткости и неровностей пути на деформации, вибрации и силы взаимодействия его элементов [Текст] / В.С. Лысюк // Труды ЦНИИ МПС. – М. – 1969. – Вып. 370. – С. 169.
40. Лысюк, В.С. Управление надежностью бесстыкового пути [Текст] / В.С. Лысюк, В.Т. Семенов, В.М. Ермаков и др. // М.: Транспорт. – 1999. – 373 с.
41. Шахунянец Г.М. Железнодорожный путь: учебник для вузов ж.-д. трансп. [Текст] / Г.М. Шахунянец. – 3-е изд., перераб и доп. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.
42. Золотарский А.Ф. Железобетонные шпалы [Текст] / А.Ф. Золотарский и др. // М.: Трансжелдориздат, 1959. – 234 с.
43. Золотарский, А.Ф. Железнодорожный путь и подвижной состав для высоких скоростей движения [Текст] / А.Ф. Золотарский, С.В. Вершинский, О.П. Ершков и др. // М.: Транспорт, 1964. – 272 с.
44. Шахунянец, Г.М. Работа пути с блочными подрельсовыми основаниями [Текст] / Г.М. Шахунянец. // Сб. трудов МИИТа и ДИИТа. – М., 1967. – Вып. 249. – 135 с.
45. Волошко, Ю.Д. Исследование свободных колебаний колеса и рельса при переменной жесткости пути [Текст] / Ю.Д. Волошко. // Труды ДИИТа. – Днепропетровск, – 1965. - Вып. 57. – 254 с.
46. Орловский, А.Н. Обоснование выбора расчетной схемы для исследования взаимодействия колеса и пути в зоне неровностей [Текст] / А.Н. Орловский, В.Н. Клименко // Труды ДИИТа. – Днепропетровск, – 1965. – Вып. 57. – 321 с.
47. Евдокимов, Б.А. О влиянии упругих прокладок на работу пути [Текст] / Б.А. Евдокимов // Вестник ЦНИИ МПС. - 1967. - № 1. - С. 21-28.

48. Каменский, В.С. Оптимизация жесткости пути на железобетонных шпалах [Текст] / В.С. Каменский // Путь и путевое хозяйство. – 2007. - №3. – С. 10-14.
49. Ермаков, В.М. Дифференцированные требования к конструкции пути и его элементам [Текст] / В.М. Ермаков // Путь и путевое хозяйство. – 2004. - №10. – С. 11-14.
50. Лебедев, А.В. Экспериментальное определение сопротивления промежуточных скреплений повороту рельсов относительно шпал [Текст] / А.В. Лебедев // Вестник ВНИИЖТ. – 2006. - №6 – С. 42-44.
51. Коган, А.Я. Устойчивость бесстыкового пути при различных конструкциях скреплений и условиях эксплуатации [Текст] / А.Я. Коган, А.В. Лебедев // Вестник ВНИИЖТ. – 2007. - №2. – С. 3-9.
52. Зверев, Н.Б. Бесстыковой путь со скреплениями различных типов [Текст] / Н.Б. Зверев // М.: Транспорт, 1965. – 32 с.
53. Суслов, О.А. Функциональная безопасность эксплуатации бесстыкового пути : дис. ...д-ра тех. наук : 05.22.06 / Суслов Олег Александрович. – М.: ВНИИЖТ., 2017. – 241 с.
54. Лисицын, А. И. Тяжеловесное движение и его влияние на инфраструктуру путевого хозяйства [Текст] / А.И. Лисицын // Труды XIII международной науч.-техн. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – 31 марта-1 апреля 2016. – С. 11-17.
55. Петров, А.В. Совершенствование конструкции рельсового скрепления ПФК-350 [Текст] / А.В. Петров, А.В. Лебедев // Путь и путевое хозяйство. – 2016. - №1. – С. 17-20.
56. Распоряжение «Об утверждении и введении в действие Положения о системе ведения путевого хозяйства ОАО «Российские Железные Дороги» от 02.05.2012 № 857р. – ОАО «РЖД», Москва, 2012.
57. Купцов В.В. Современные конструкции и параметры промежуточных рельсовых скреплений для железобетонных шпал [Текст] / В.В. Купцов //

Сборник научных трудов. Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации; под ред. Л.Г. Крысанова. – М.: Интекст, 2000. – С. 100-129.

58. Протокол совещания под председательством Министра промышленности и торговли РФ Д.В. Мантурова от 30.08.2018 № 56-МД/20.

59. Кузнецова, Н.В. Особенности влияния промежуточных рельсовых скреплений на эксплуатационную стойкость рельсов [Текст] / Н.В. Кузнецова, Е.А. Сидорова // Вестник ВНИИЖТ. – 2021. – т. 80. - №4. – С. 201-208.

60. Савин, А.В. Вопросы снятия ограничений скорости в условиях низких температур [Текст] / А.В.Савин, К.И. Третьяков, А.В. Петров и др. // Сборник статей всероссийской науч.-техн. конф. «Транспортное строительство». – 2020. – С. 32-43.

61. Asmussen, B. State of the art review of mitigation measures on track [Электронный ресурс] / B. Asmussen // Railway Induced Vibration Abatement Solutions. – 2011. – 85 P. Режим доступа: http://www.rivas-project.eu/fileadmin/documents/rivas_uic_wp3_d3_1_v01-3_final.pdf (дата обращения 21.09.2019)

62. Ekberg, A. INNOTRACK. Concluding Technical Report [Электронный ресурс] / A. Ekberg, B. Paulsson // International Union of Railways (UIC): Intellecta Infolog, Solna, 2010. – 148 P. Режим доступа: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/129645/local_129645.pdf (дата обращения 11.12.2019)

63. Высокоскоростные линии с путем на балласте [Текст] // Железные дороги мира. – 2014. – № 3. – С. 69–71.

64. Esveld, C. INNOVATIONS IN RAILWAY TRACK [Электронный ресурс] / C. Esveld // Faculty of Civil Engineering, Section of Roads & Railways. Режим доступа: <http://www.esveld.com/Download/TUD/Innovations.PDF>. (дата обращения 03 11 2017).

65. Michas, G. Slab Track Systems for High-Speed Railways [Text] / G. Michas // Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH). – 2012. – P. 95.

66. Feigenbaum, B. High-Speed Rail in Europe and Asia: Lessons for the United States [Электронный ресурс] / B. Feigenbaum // Los Angeles, CA: Reason Foundation. – 2013. – 39 p. Режим доступа: https://reason.org/wp-content/uploads/files/high_speed_rail_lessons.pdf (дата обращения 21.04.2019 г).
67. Pichler, D. Ballastless track systems experiences gained in Austria and Germany [Электронный ресурс]/ D. Pichler, J. Fenske, // Railway Interchange 2013. Indianapolis – 2013. Режим доступа: http://www.arena.org/files/library/2013_Conference_Proceedings/Ballastless_Track_Systems-Experiences_Gained_in_Austria_and_Germany.pdf (дата обращения 04.04.2019 г)
68. Koriath, H. Bringing Objectivity into System Decisions between Ballasted Track and Slab Track at Deutsche Bahn [Text] / H. Koriath, A. Hamprecht, H. Huesmann, P. Ablinger // RTR/ - 2003. - № 2-3. – PP. 9-15.
69. Wang, J. The Ballastless Track Technology For China High-Speed Line [Электронный ресурс] / J. Wang // CRH. – 2011. – 40 p. Режим доступа: <https://pdfslide.net/documents/the-ballastless-track-technology-for-china-high-speed-the-ballastless-track.html?page=39> (дата обращения 23.12.2018 г).
70. ВСМ в мире [Электронный ресурс] // АО «Скоростные магистрали». – Режим доступа: <http://www.hsrail.ru/info/vsмм/> (дата обращения 02.03.2019).
71. Савин, А.В. Условия применения безбалластного пути [Текст] / А.В. Савин // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство: 9-я научно-практическая конференция с международным участием МГУПС-МИИТ. – Москва, – 2016. – С. 75–79.
72. Разуваев, А.Д. Сферы применения безбалластного пути [Текст]/ Савин А.В., Разуваев А.Д. // Вестник института проблем естественных монополий: Техника железных дорог, 2016. – № 3(35). – С. 32–41.
73. Савин, А.В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения. [Текст] / А.В. Савин // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – № 1. – С. 55–59.

74. Савин, А.В. Безбалластный путь для грузового движения [Текст] / А.В. Савин, А.В. Петров, К.И. Третьяков, С.С. Князев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – Т. 12. – С. 142-145.

75. Безбалластный путь на высокоскоростных магистралях. Гарантия безопасного и комфортабельного путешествия [Электронный ресурс] // SSF Ingenieure. – 2016. – Режим доступа: <https://www.ssf-ing.de/en.html>. (Дата обращения: 13.04.2016 г).

76. Takai, H. 40 Years Experiences of the Slab Track on Japanese High Speed Lines [Text] / H. Takai // Tokyo: Railway Technical Research Center. – 2007.

77. Lechner, B. Railway Concrete Pavements [Электронный ресурс] / B. Lechner // 2nd International Conference on Best Practices for Concrete Pavements, Florianopolis, November 2011. – 68 P. Режим доступа: <http://www.ibracon.org.br/eventos/53cbc/pdfs/BernhardLechner.pdf> (дата обращения 14.04.2016 г).

78. Lechner, B. Design and layout of ballastless track systems using unbound base course layers [Text] / B. Lechner // Ballastless. – 2008. – Track 2. – pp. 1-12.

79. Lechner, B. General Requirements for Ballastless Rail-Trackforms Asphalt and Concrete Pavement Design [Text] / B. Lechner // In Proceedings of the International Journal of Pavement Conference, IJPC, Sao Paulo, Brazil, 9–10 December 2013. – pp. 1-9.

80. Савин, А. В. Критерии выбора конструкции безбалластного пути. [Текст] / А.В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 2–8.

81. Auersch, L. The dynamic force transfer of slab tracks and floating slab tracks and the corresponding ground vibration [Text] / L. Auersch // Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2011, Leuven, Belgium, 2011. – PP. 820-827.

82. Blanco-Lorenzo, J. Dynamic comparison of different types of slab tracks and ballasted track using a flexible track model [Text] / J. Blanco-Lorenzo, J.

Santamaria, E.G. Vadillo, O, Oyarzabal // Journal of Rail and Rapid Transit. – 2011. – Vol. 225. – Issue 6. – pp. 574-592.

83. ВСМ в России [Электронный ресурс] // АО «Скоростные магистрали». – Режим доступа: <http://www.hsrail.ru/info/vsmr/> (дата обращения 21.02.2019).

84. Nigel, O. Innovative track systems: Criteria for their election. Project funded by the European Community, Directorate General Energy and Transport under the «Competitive and Sustainable Growth» Programme. [Text] / O. Nigel, Q. Franz // ProMain. TÜV Intertraffic, Cologne. – Okt. 2011. – PP. 50-58.

85. Тони О. В. Проект создания ВСМ "Москва - Казань" / Доклад на конференции INFRAONE, VEGAS LEX, АО «Скоростные магистрали». - Москва, 10 ноября 2016

86. Савин, А.В. Концепция проведения испытаний на Экспериментальном кольце АО "ВНИИЖТ" [Текст]/ А.В. Савин, А.В. Петров, К.И. Третьяков, С.С. Князев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – Т. 12. – С. 136-141.

87. Савин, А.В. Испытания безбалластных конструкций пути [Текст]/ А.В. Савин, А.В. Петров, К.И. Третьяков // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2016. – № 2 (34). – С. 46-56.

88. Савин, А.В. Результаты испытаний безбалластных конструкций пути на Экспериментальном кольце АО "ВНИИЖТ" / А.В. Савин, В.В. Третьяков, В.Н. Каплин, А.В. Петров, К.И. Третьяков // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – №4 (Т. 76) – С. 195-201.

89. Савин, А.В. Экспериментальное кольцо: укладка новых конструкций пути [Текст] / А.В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 12–15.

90. Временный железнодорожный путь безбалластной конструкции верхнего строения пути на участке 3-го пути (необщего пользования) Экспериментального кольца ст. Щербинка Московской железной дороги. Проектная документация. Раздел 1. Пояснительная записка. – 2019. – Том 1. – 46 с.

91. Петров, А.В. Эластичные прокладки рельсовых креплений – фундаментальная часть безбалластного пути [Текст]/ А.В. Петров. // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2019. – Т. 14. – С. 87-93.

92. Freudenstein, S. The development of high speed railways in China and its impact on the Chinese economy [Электронный доступ]/ S. Freudenstein, J. Liu, J. Ren // Global Railway Review. – 2010. – Issue 2. Режим доступа: <https://www.globalrailwayreview.com/article/5039/the-development-of-high-speed-railways-in-china-and-its-impact-on-the-chinese-economy/> (дата обращения 28.06.2019 г).

93. DBS 918 235 - 2017. Elastische Zwischenlagen und Zwischenplatten von Schienenbefestigungssystemen. Deutsche Bahn-Standard. – Januar 2017.

94. TB/T 3395/1-2015 Fastening systems for high-speed railway. Part 1: General requirement.

95. Технический регламент Таможенного Союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта», ТР ТС 002/2011. Утвержден решением Комиссии Таможенного Союза от 15.07.2011 №710.

96. Технический регламент Таможенного Союза «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» ТР ТС 003/2011. Утвержден решением Комиссии Таможенного Союза от 15.07.2011 №710.

97. ГОСТ 32698-2014. Крепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля [Текст]. Введ. 2015-03-01 – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

98. ГОСТ 33186-2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов [Текст]. Введ. 2015-07-01 – М.: Стандартинформ, 2014. – 8 с.

99. ГОСТ 34078-2017. Прокладки рельсовых креплений железнодорожного пути. Технические условия [Текст]. Введ. 2018-01-01 – М.: Стандартинформ, 2014. – 30 с.

100. НБ ЖТ ЦП 122-2003. Нормы безопасности на железнодорожном транспорте. Пружинные рельсовые крепления бесстыкового пути. Нормы

безопасности. Приняты и введены в действие Указанием МПС России от 25.06.2003 № Р-634-у.

101. Специальные технические условия. Верхнее строение пути участка Москва - Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва - Казань - Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству, ФГБОУ ВО ПГУПС: СПб, – 2016. – 27с.

102. Специальные технические условия Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва - Санкт-Петербург (ВСЖМ - 1). ФГБОУ ВО ПГУПС, т. 3.1. СПб – 2021.

103. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности. Утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» №2706р от 22.12.2017, Москва, 2017.

104. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности: №ЦПТ-52/14: утв. М.: ПТКБ ЦП МПС, 2000. 38 с.

105. Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность / МПС СССР, ВНИИЖТ. – Москва. – 1954. – 60 с.

106. Коган, А.Я. Колебания пути при высоких скоростях движения экипажей и ударном взаимодействии колеса и рельса [Текст] / А.Я. Коган, Д.А. Никитин, И.В. Полещук [и др.] // М.: Интекст, 2007.– 168 с.

107. Коган, А.Я. Колебания пятислойной балки на упругом основании под действием подвижной динамической нагрузки [Текст] / А.Я. Коган, В.Ф. Барабошин, В.М. Гаврилов // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений: сб. науч. тр.: Новосибирск, 1986. – С. 33–43

108. Коган, А. Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь [Текст] /А. Я. Коган // Тр. ВНИИЖТ. –1969. – Вып. 402. – 205 с.

109. Савин, А.В. Безбалластный путь и его основание [Текст] / А.В. Савин, П.И. Дыдышко // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 12. – С. 39–41.

110. Савин, А.В. Волоконно-оптическая система контроля состояния земляного полотна [Текст] / А.В. Савин // Труды XVI научно-практической

конференции «Безопасность движения поездов», МГПУС. – 2015. – С. 115-116.

111. Hanker, R. Eisenbahnoberbau: Die Grundlagen des Gleisbaues [Text] // Springer-Verlag, Vienna, 1952. – 268 p.

112. Eisenmann, J. Die Schiene als Tragbalken [Текст] // DER EISENBAHNINGENIEUR. – 2004. – (55). – P. 22-25

113. Winkler, E. Die Lehre von Elastizität und Festigkeit: 1. Teil // Prague, 1867. – 412 p.

114. Zimmermann, H. Die Berechnung des Eisenbahnoberbaues // Verlag von Ernst & Korn, Berlin, 1888. – 308 p.

115. Eisenmann, J. Isolierstoss, Stoerstelle und Schwachstelle im Glies [Text] / J. Eisenmann, G. Leykauf // EI - Eisenbahningenieur (45). – 1985. - №3. – PP. 99-107.

116. Eisenmann, J. Schotteroberbau – Möglichkeiten und Perspektiven für die Moderne Bahn, 1988.

117. Eisenmann, J. Das Verhalten des Schotters unter Belastung / J. Eisenmann, G. Kaess // ETR. – 1980. – № 3. – 201 p.

118. Alias, J. La voie ferree // Editions Eyrolles, Paris. – 1977. – 472 p.

119. AREMA, Manual for Railway Engineering, 2005.

120. Giannakos, K. Loads on track, Ballast Fouling and Life-cycle under Dynamic Loading in Railways [Text] / K. Giannakos // Journal of Transportation Engineering. – 2010. – т. 136. – № 12. – PP. 1075-1084.

121. Prud'homme, A. Les nouvelles traverses en beton de la SNCF / A. Prud'homme, J. Eribeau // RGCF-2, 1976.

122. Крачковский, В.П. Коэффициенты, применяемые при расчетах пути [Текст] / В.П. Крачковский // Труды МИИТа. - Вып. 54. - М.: Трансжелдориздат, 1937. - С. 125-213.

123. Eisenmann, J. Feste Fahrbahn für Schienenbahnen [Text] / J. Eisenmann, G. Leykauf // Betonkalender. – 2000. – vol. 2. – PP. 291-326.

124. Крачковский, В.П. Расчет железнодорожного пути под действием вертикальных нагрузок [Текст] / В.П. Крачковский // М.: Тр. МИИТ, 1934. - Вып. 40. – 280с.

125. Немецкая инициатива по развитию высокоскоростных железнодорожных магистралей [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://russland.ahk.de/ru/vtp/nemeckaja-iniciativa-po-vsm>. (дата обращения 28.10.2020 г).

126. Technische universitat Munchen, «Bericht №3511 vom 26.10.2016. Statische und dynamische Steifigkeiten von Zwischenplatten ZwP 300 NG gemäß dem Entwurf des DBS 918 235:2017».

127. Technische universitat Munchen, «Bericht №3512 vom 26.10.2016. Statische Steifigkeiten von Zwischenplatten ZwP 300 NG bei extremen Temperaturen».

128. Петров, А.В. Упругие свойства эластичных прокладок рельсовых скреплений для безбалластных конструкций пути в зависимости от температуры [Текст]/ А.В. Петров. // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Часть 1. – Москва: РАС, 2019. – С. 276-281.

129. Петров, А.В. Влияние температур на упругие характеристики рельсовых скреплений безбалластного верхнего строения пути [Текст]// Транспортное строительство: сборник статей Второй всероссийской научно-технической конференции. – М. – 2021. – С. 215-221.

130. Распоряжение «Об образовании рабочей группы по вопросу разработки нормативно-технической документации и укладки инновационных конструкций железнодорожного пути». Утверждено ОАО «РЖД» от 10.01.2014 №10р.

131. Петров, А.В. Рельсовые скрепления безбалластных конструкций пути на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» [Текст] / А.В. Петров, А.В. Савин, А.В. Лебедев // Путь и путевое хозяйство. – 2015. - №12. – С. 2-5.

132. Савин А.В. Рельсовые скрепления в безбалластных конструкциях пути на Экспериментальном кольце ОАО "ВНИИЖТ". Часть 1 [Текст]/ А.В. Савин, А.В. Лебедев, А.В. Петров // РСП Эксперт. – 2016. – № 9. – С. 16–18.

133. Савин А.В. Рельсовые скрепления в безбалластных конструкциях пути на Экспериментальном кольце ОАО "ВНИИЖТ". Часть 2 [Текст]/ А.В. Савин, А.В. Лебедев, А.В. Петров. // РСП Эксперт. – 2016. – № 10. – С. 27–29.

134. Липко, Ц. Безбалластные системы верхнего строения пути [Текст] / Ц. Липко // Путь и путевое хозяйство. – 2012. - №1. – С. 25-26.

135. Безбалластный путь по технологии NBT [Текст] // Железные дороги мира. – 2015. - №12. – С. 58-62.

136. Плитное основание пути системы Vogl на новой линии Нюрнберг – Ингольштадт [Текст] // Железные дороги мира. – 2006. - №12. – С. 63-65.

137. Betonschwellen. Feste Fahrbahn. Fertigteiltragplatten. Komponenten [Text] // Betonschwellenindustrie e.V. – im Netz der Deutschen Bahn AG, Berlin, 2017. – 87 p.

138. Дорошкевич, А.А. Испытания конструкции LVT [Текст] / А.А. Дорошкевич, М.Ю. Хвостик, Н.В. Рессина и др. // Путь и путевое хозяйство. – 2013. - №10. – С. 22-23.

139. Яновский, А.С. Новой станции - новая конструкция пути [Текст] / А.С. Яновский // Путь и путевое хозяйство. – 2015. - №1. – С. 19-21.

140. Программа и методика сравнительных полигонных испытаний безбалластных конструкций пути (БКП) четырех типов (Tines, Alstom, MaxVoegl, LVT) включая сбор данных о трудозатратах на текущее содержание. Утверждена: Начальником центра организации скоростного и высокоскоростного движения ОАО «РЖД» Петрушенко Г.В., Москва, 2014.

141. Schilder, R. Installation Quality of Slab Track – A Decisive Factor for P. Maintenance [Текст] / R. Schilder, D. Diederich // RTR Special. – Austria: July 2007. – 76–78.

142. Петров, А.В. Изменение параметров рельсовой колеи безбалластного пути на участках с различными типами рельсовых креплений [Текст]/ А.В. Петров. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. / Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II. – Москва, 2016. – С. 173-175.

143. Савин, А.В. Переходные участки после пропуска 1,1 млрд т груза брутто [Текст]/ А.В. Савин, К.И. Третьяков, А.В. Петров // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 8. – С. 25-28.

144. Савин, А.В. Переходные участки после пропуска 1,1 млрд т брутто /А.В. Савин, К.И. Третьяков, А.В. Петров [Текст]// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2019. – Т. 14. – С. 57-63.

145. Савин, А.В. Исследования безбалластной конструкции верхнего строения пути [Текст] / А.В. Савин, А.М. Бржезовский, В.В. Третьяков [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – № 6. – С. 23–32.

146. Разуваев, А.Д. Пути повышения эффективности строительства ВСМ [Текст] / А.Д. Разуваев, Д.С. Зандарашвили, А.Э. Саркисов // Экономика железных дорог. – 2016. - №3. – С. 86-94.

147. ГОСТ Р 56291-2014. Прокладки рельсовых креплений железнодорожного пути. Технические условия [Текст]. Введ. 2015-05-01 – М.: Стандартинформ, 2014. – 31 с.

148. EN 13481-2:2012 - Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 2: Fastening systems for concrete sleepers.

149. EN 13481-3:2012 - Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 3: Fastening systems for wood sleepers.

150. EN 13481-4:2012 - Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 4: Fastening systems for steel sleepers.

151. EN 13481-5:2012 - Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 5: Fastening systems for slab track with rail on the surface or rail embedded in a channel.
152. EN 13481-7:2012 - Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 7: Special fastening systems for switches and crossings and check rails.
153. EN 13146-1:2012 - Railway applications - Track - Test methods for fastening systems.
154. EN 13481-1:2012 - Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 1: Definitions.
155. EN 13146-1:2012 - Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 1: Determination of longitudinal rail restraint.
156. EN 13146-2:2012 - Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 2: Determination of torsional resistance.
157. EN 13146-3:2012 - Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 3: Determination of attenuation of impact loads.
158. EN 13146-4:2012 - Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 4: Effect of repeated loading.
159. EN 13146-5:2012 - Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 5: Determination of electrical resistance.
160. EN 13146-6:2012 - Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 6: Effect of severe environmental conditions.
161. EN 13146-7:2012 - Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 7: Determination of clamping force.
162. EN 13146-8:2012 - Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 8: In service testing.
163. EN 13146-9:2009+A1:2011 - Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 9: Determination of stiffness.
164. AREMA. Chapter 30. Ties, 2013.
165. AREA. Chapter 3. Ties and Wood Preservatives, 1976.

166. AREA. Chapter 10. Concrete Ties, 1976.
167. Freudenstein, S. Feste Fahrbahn in Betonbauweise [Text] / S. Freudenstein, K. Geisler, T. Mölter and others // Beton-Kalender 2015: Schwerpunkt: Bauen im Bestand, Brücken. – 2015. – PP. 529-584.
168. Уланов, И.С. О проектировании высокоскоростных магистралей [Текст] / И.С. Уланов // Путь и тугевое хозяйство. – 2022. - №10. – С. 2-6.
169. Wu, S. Dynamic Analysis of the High Speed Train and Slab Track Nonlinear Coupling System with the Cross Iteration Algorithm [Text] / S. Wu, B. Zhang, X. Lei // Journal of Nonlinear Dynamics. – 2016. – Vol. 2016. – 18 p.
170. Петров, А.В. Жесткость рельсовых креплений безбалластной конструкции пути [Текст] / А.В. Петров, С.В. Михайлов, А.В Савин // Путь и тугевое хозяйство. – 2022. – №1. – С. 8-10.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг программы для проведения расчетов

```
function [] = Progib()

function pr=fun(x,zz,LL,QQ,aa,cc)
    ksi =abs(x-zz)/LL;
    n=(sin(ksi)+cos(ksi))./exp(ksi);
    pr=QQ*aa*sum(n)/2/cc/LL;
end

%Тип движения 1-грузовой, 2-пассажирский
Dtype=1;
%Тип расчета 1-статический 2-динамический
Ctype=1;
%Тип рельса 1-P50 2-P65 3-P75
Rtype=2;
%Исходные данные
l1=1850;
l2=3420;

Q=125000;
v=70;
T=23;
E=2.1*10^5;

if Rtype==1
    I=2011*10^4;
    W=285*10^3;
```

```

end
if Rtype==2
    I=3540*10^4;
    W=435*10^3;
end
if Rtype==3
    I=4491*10^4;
    W=509*10^3;
end

a=650;
Cstat1=27500;

Cstat_pr=500*10^3;
Tstati=7.8461435*10^(-8)*T^4-2.1589837*10^(-6)*T^3-4.6248312*10^(-5)*T^2-
0.0060841*T+1.1682203;
Cstat_epTi=Cstat1*Tstati;
Cstat=Cstat_pr*Cstat_epTi/(Cstat_pr+Cstat_epTi);

Cdyn_pr=1500*10^3;
if v<60
    fi=1;
end
if Dtype==1
    if v>=60 && v<140
        fi=1+0.5*(v-60)/80;
    end
end
if Dtype==2
    if v>=60 && v<300

```

```

    fi=1+0.5*(v-60)/190;
end
end
Tdyni=1.4143302*10^(-9)*T^6-2.6912765*10^(-8)*T^5-2.652357*10^(-6)*T^4-
1.2417948*10^(-6)*T^3+0.0010553*T^2+0.0074826*T+1.103679;
Kdyn=1+0.45*fi;
Cdyn_epTi=Cstat_epTi*Tdyni;
Cdyn=Kdyn*Cdyn_pr*Cdyn_epTi/(Cdyn_pr+Cdyn_epTi);

if Ctype==1
    c=Cstat;
end
if Ctype==2
    c=Cdyn;
end

%Расчет статический
L=(4*E*I*a/c)^0.25;
z=[-11-12/2,-12/2,12/2,11+12/2];
R=[-11-12/2,-11/2-12/2,-12/2,0];
y=zeros(4,1);
for i=1:4
    y(i)=fun(R(i),z,L,Q,a,c);
end
ct=0;
for i=-12*10:12*10
    ct=ct+1;
    XXs(ct)=i;
    YYs(ct)=fun(i,z,L,Q,a,c);
end

```

```
plot(XXs,YYs)
hold on
Sstat=c*y;

%Расчет динамический
if Ctype==2
    c=Cstat;
end
if Ctype==1
    c=Cdyn;
end
L=(4*E*I*a/c)^0.25;
z=[-11-l2/2,-l2/2,l2/2,11+l2/2];
R=[-11-l2/2,-11/2-l2/2,-l2/2,0];
y=zeros(4,1);
for i=1:4
    y(i)=fun(R(i),z,L,Q,a,c);
end

ct=0;
for i=-12*10:12*10
    ct=ct+1;
    XXd(ct)=i;
    YYd(ct)=fun(i,z,L,Q,a,c);
end

plot(XXd,YYd)
Sdyn=c*y;

end
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Лабораторные испытания упругих прокладок

Статические характеристики упругих прокладок при температуре -50°C .

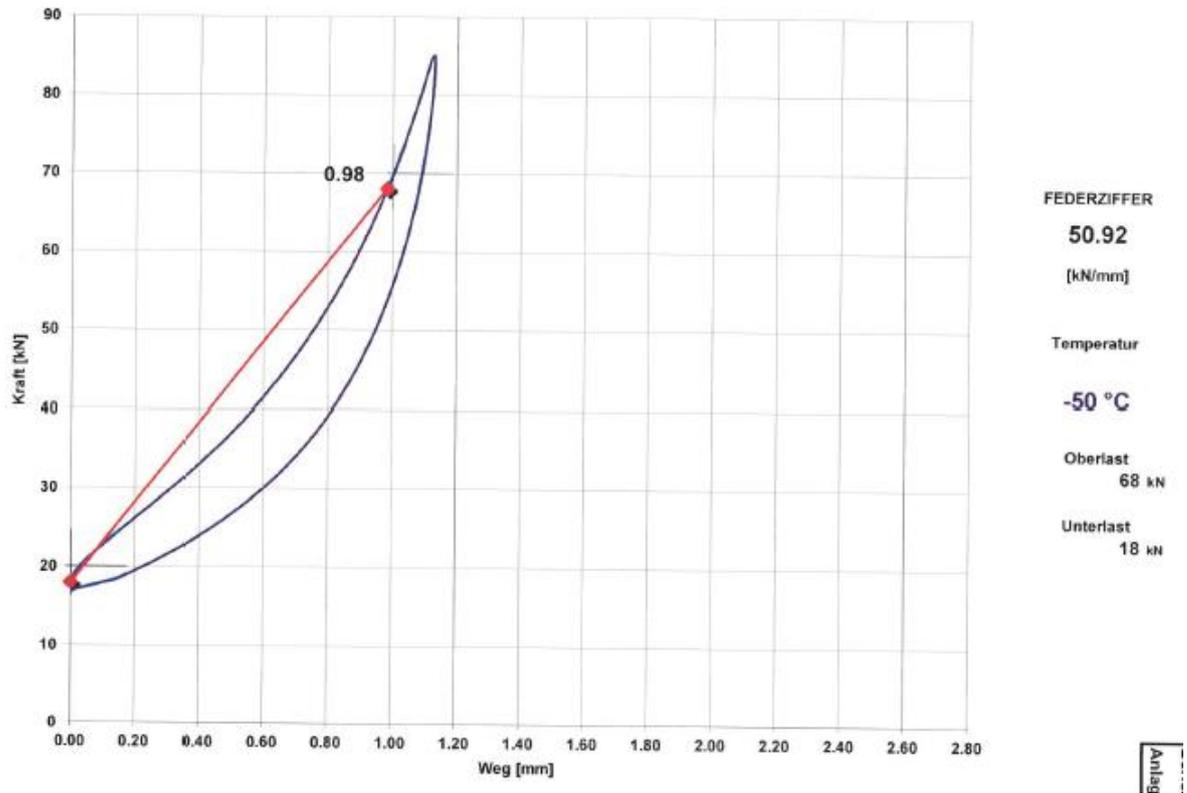


Рисунок Б.1 – 1 Образец 1

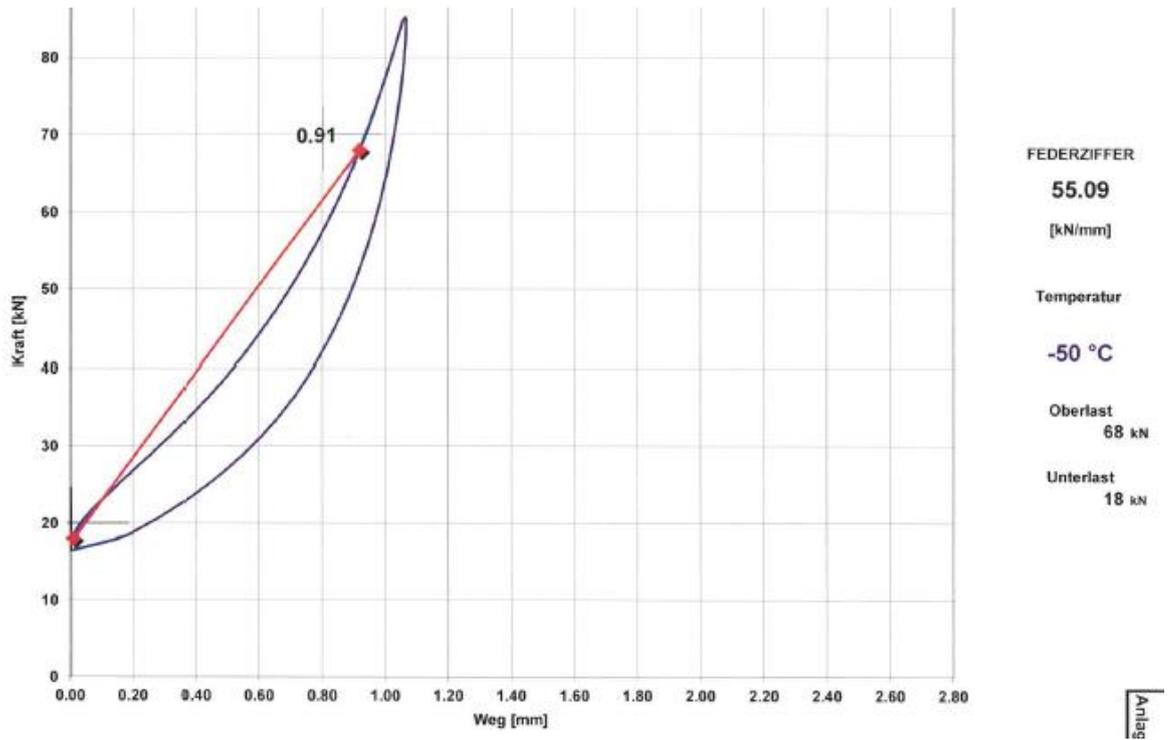


Рисунок Б.2 – Образец 2

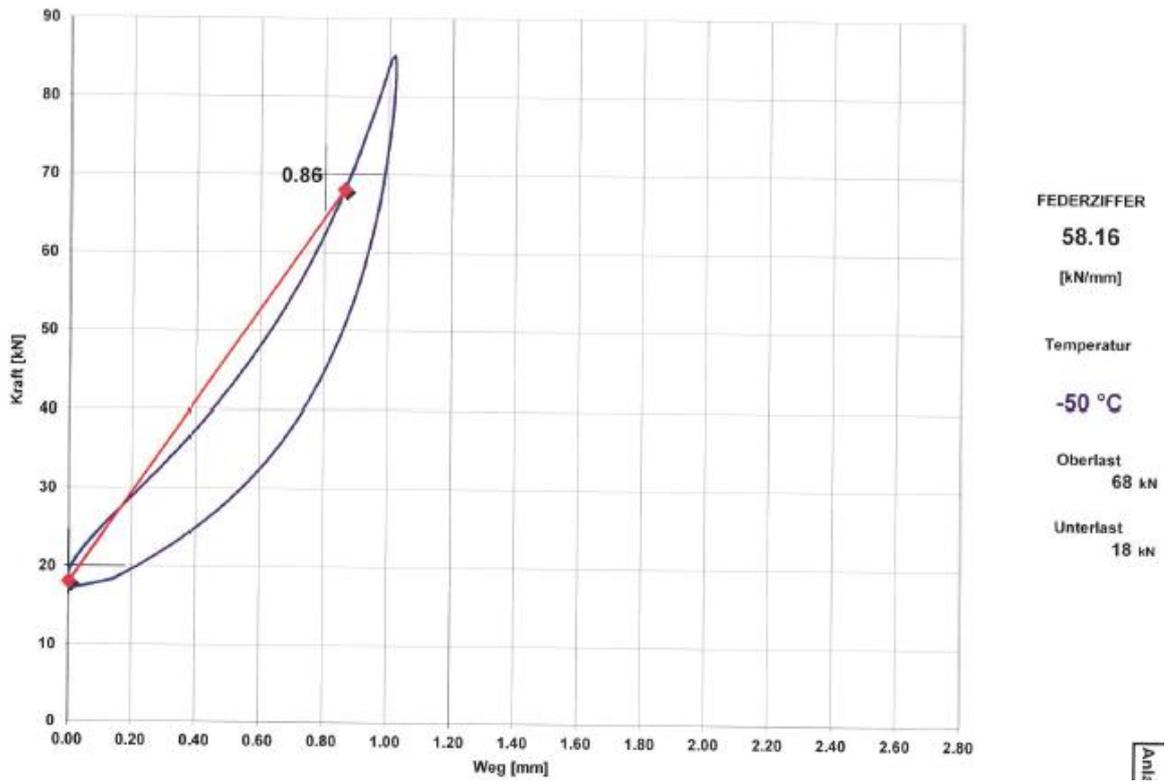


Рисунок Б.3 – Образец 3

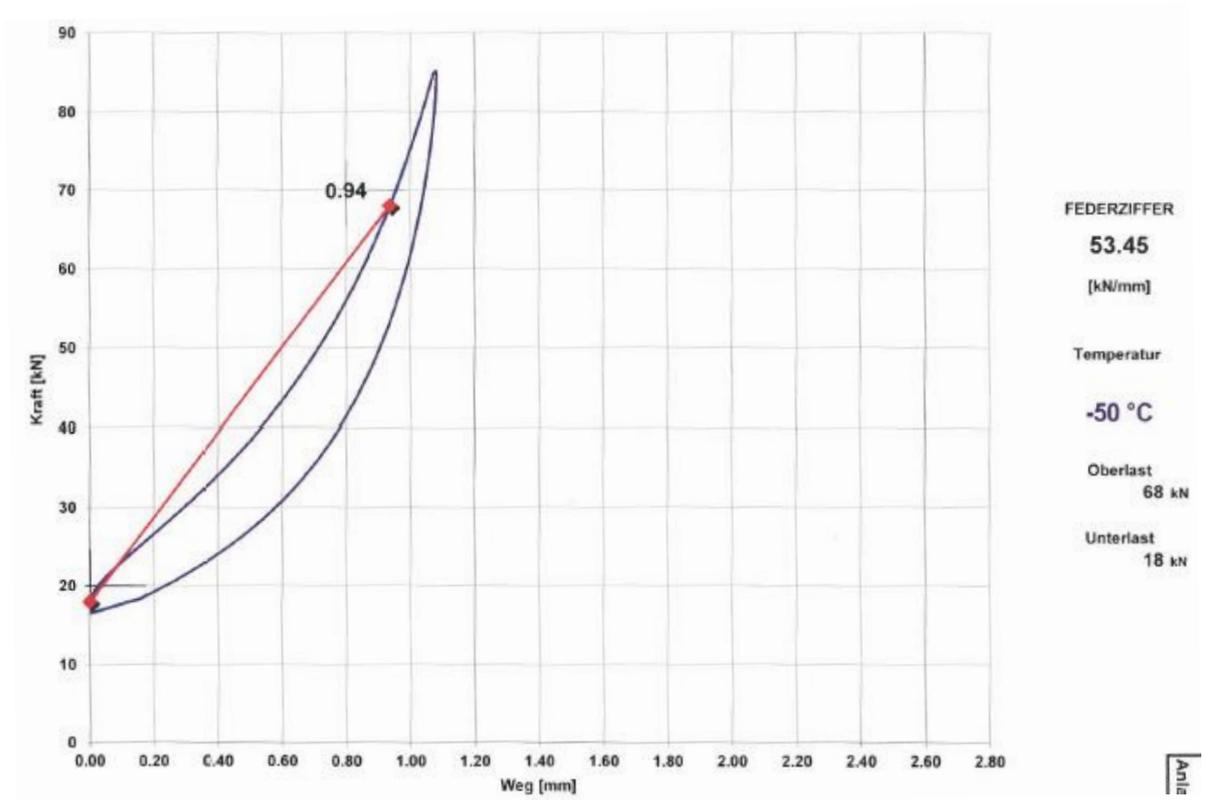


Рисунок Б.4 – Образец 4

Статические характеристики упругих прокладок при температуре $+70\text{ °C}$.

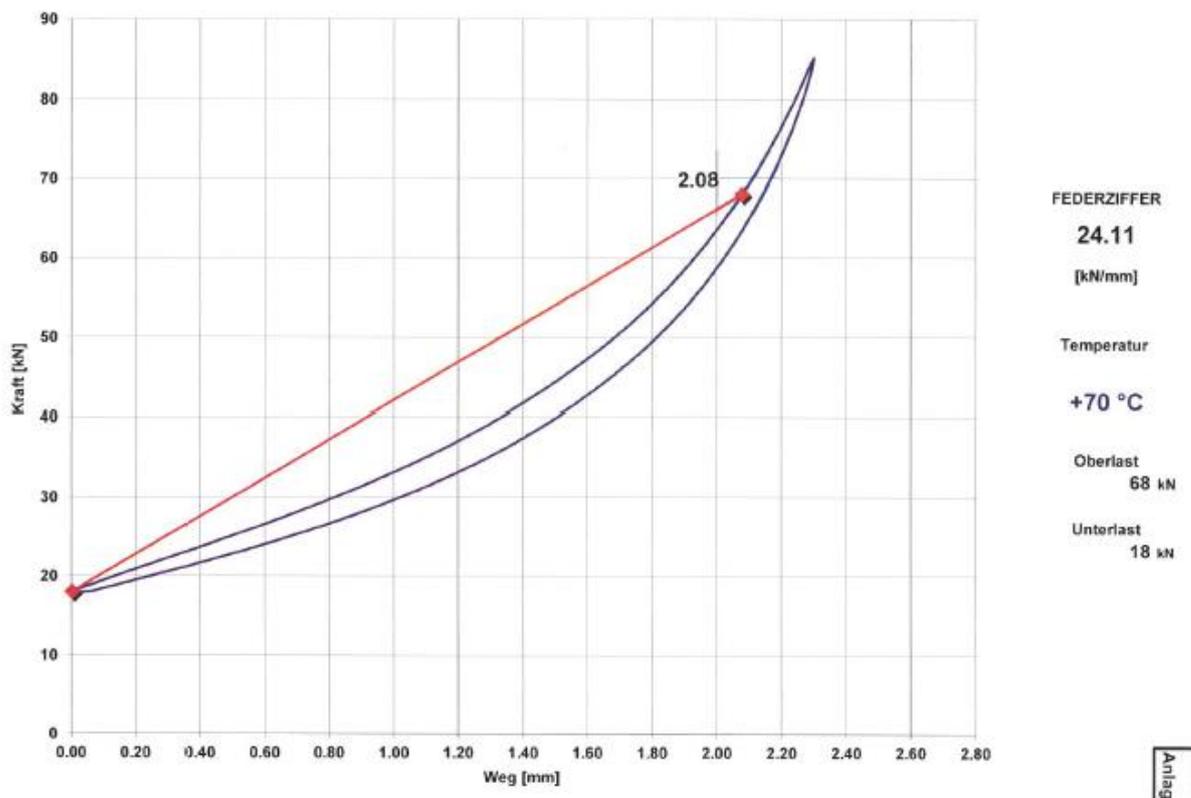


Рисунок Б.5 – Образец 1

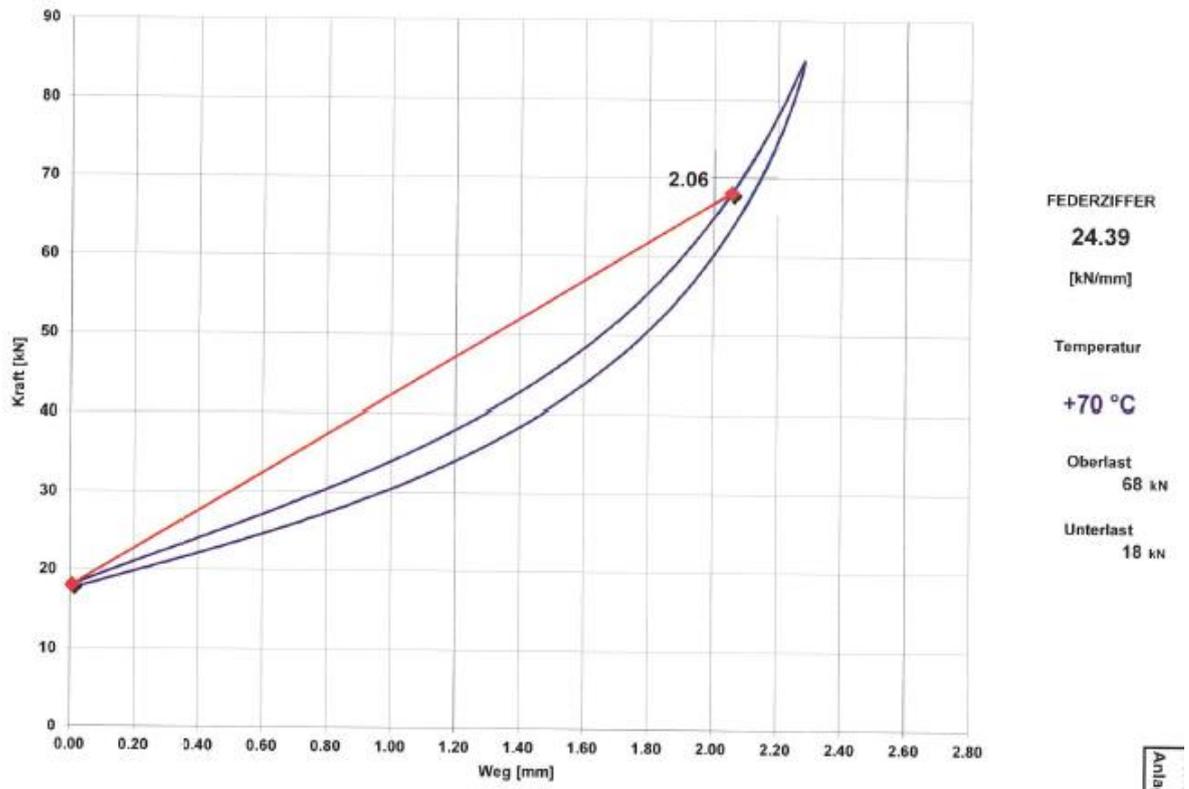


Рисунок Б.6 – Образец 2

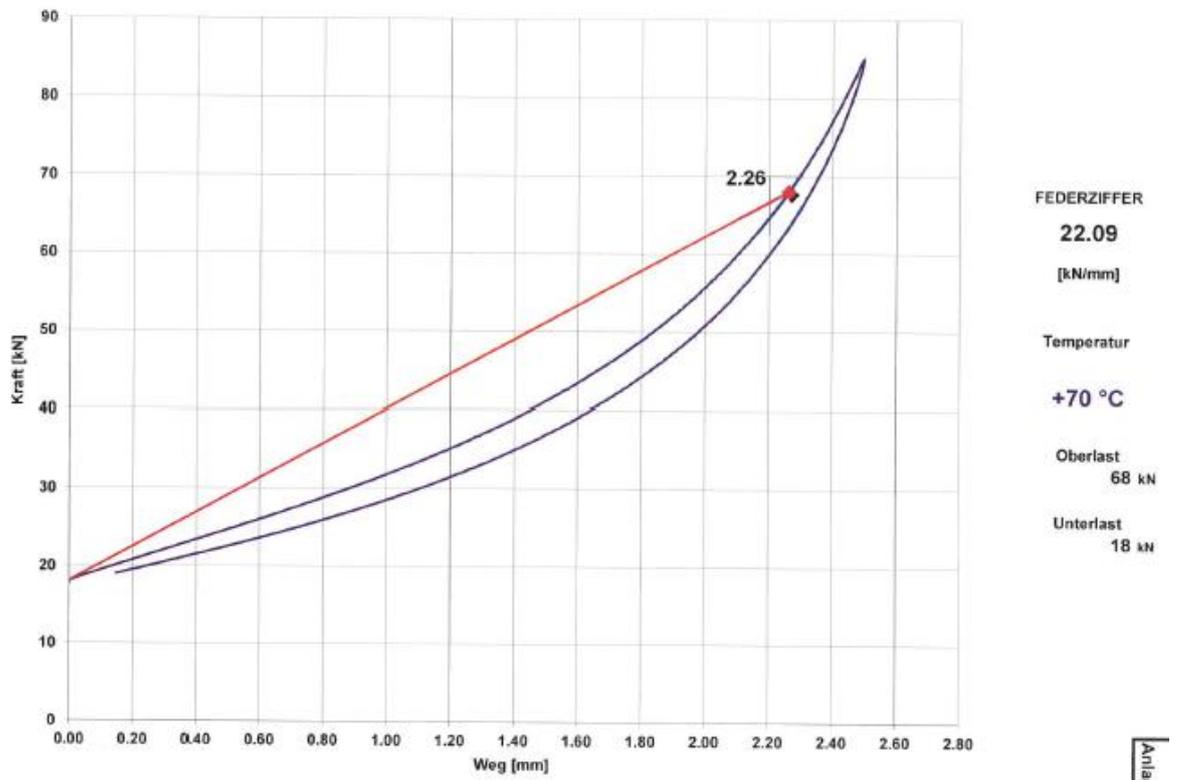


Рисунок Б.7 – Образец 3

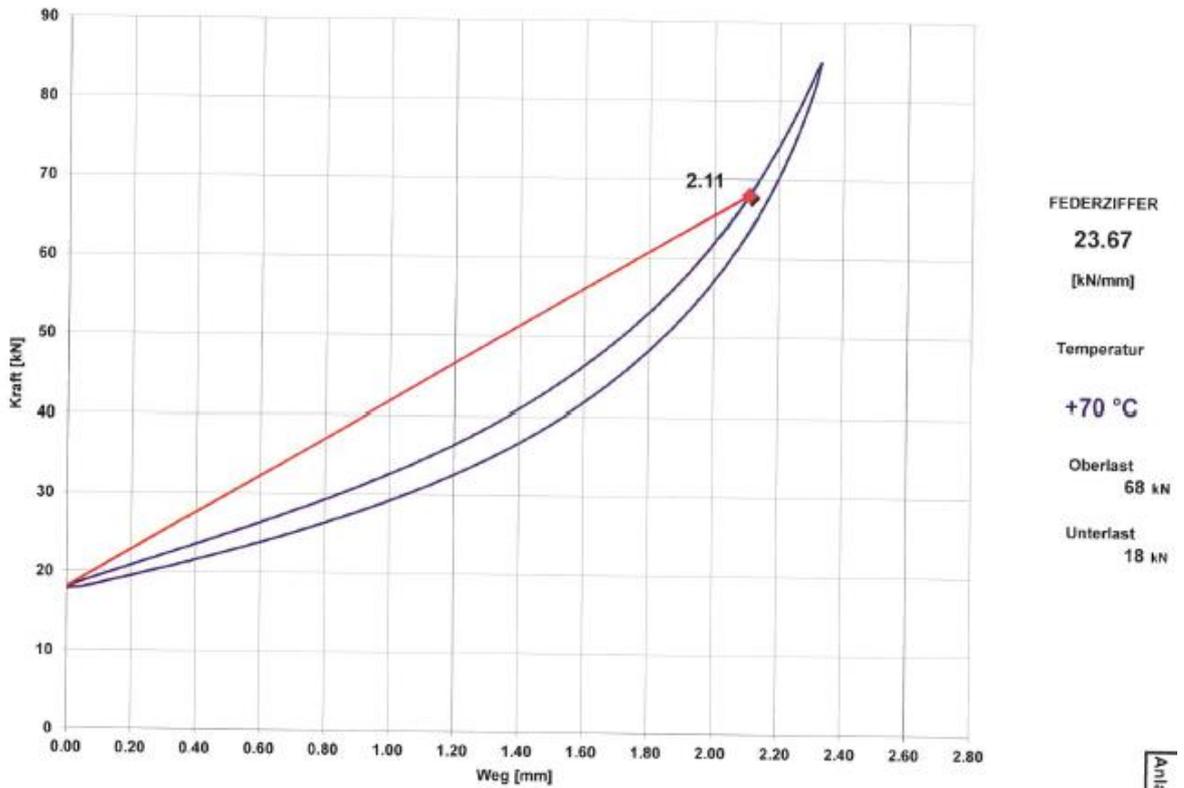


Рисунок Б.8 – Образец 4

Статические характеристики упругих прокладок при температуре +100°C.

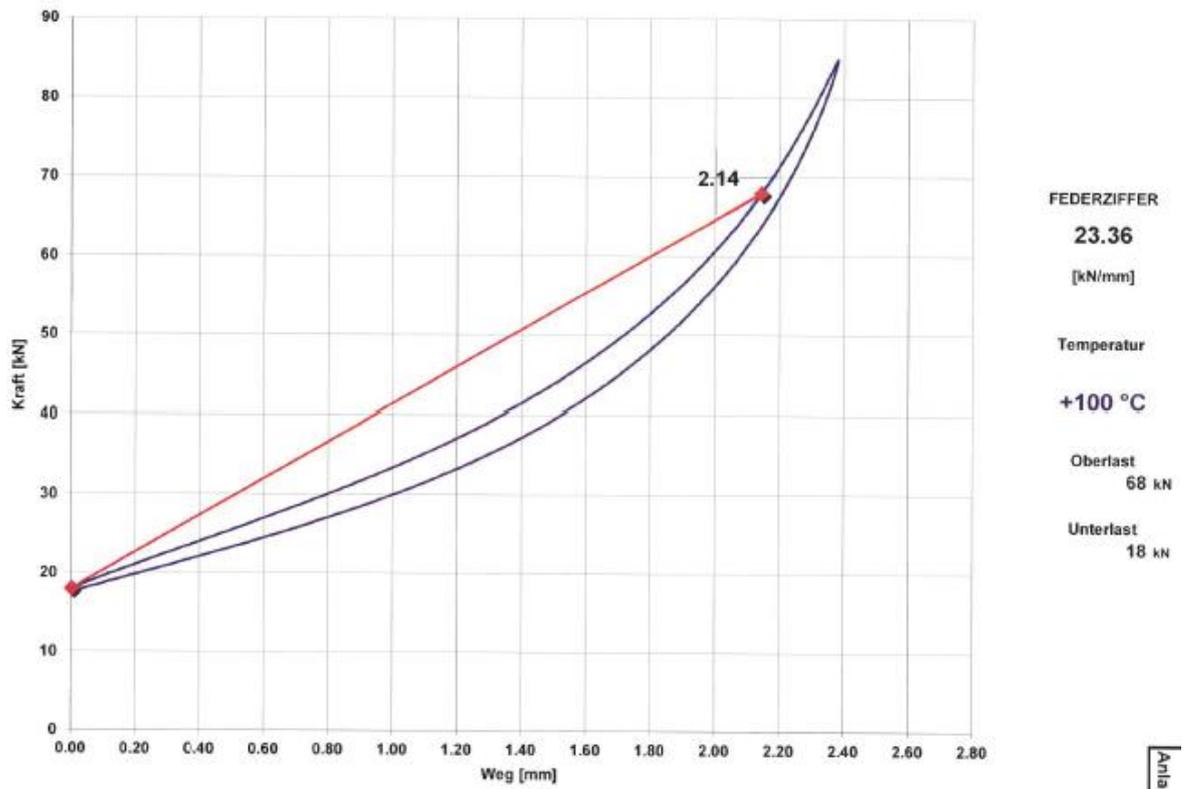


Рисунок Б.9 – Образец 1

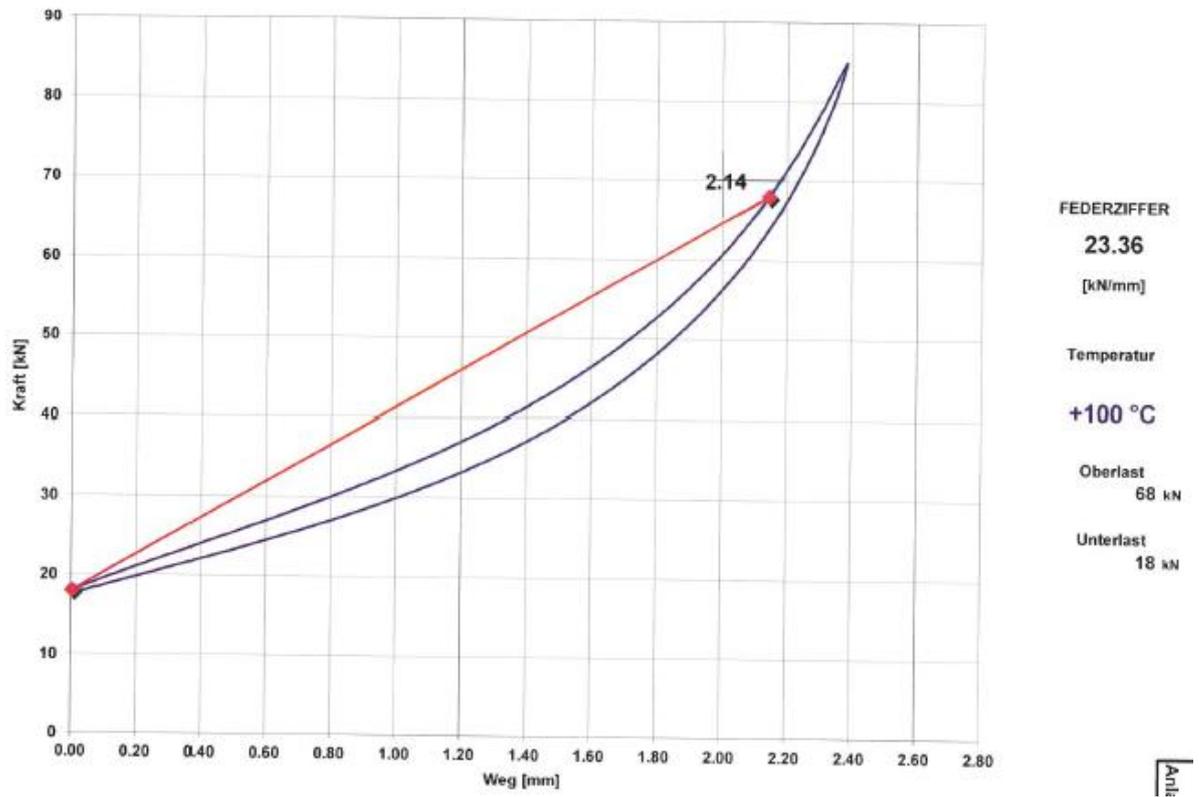


Рисунок Б.10 – Образец 2

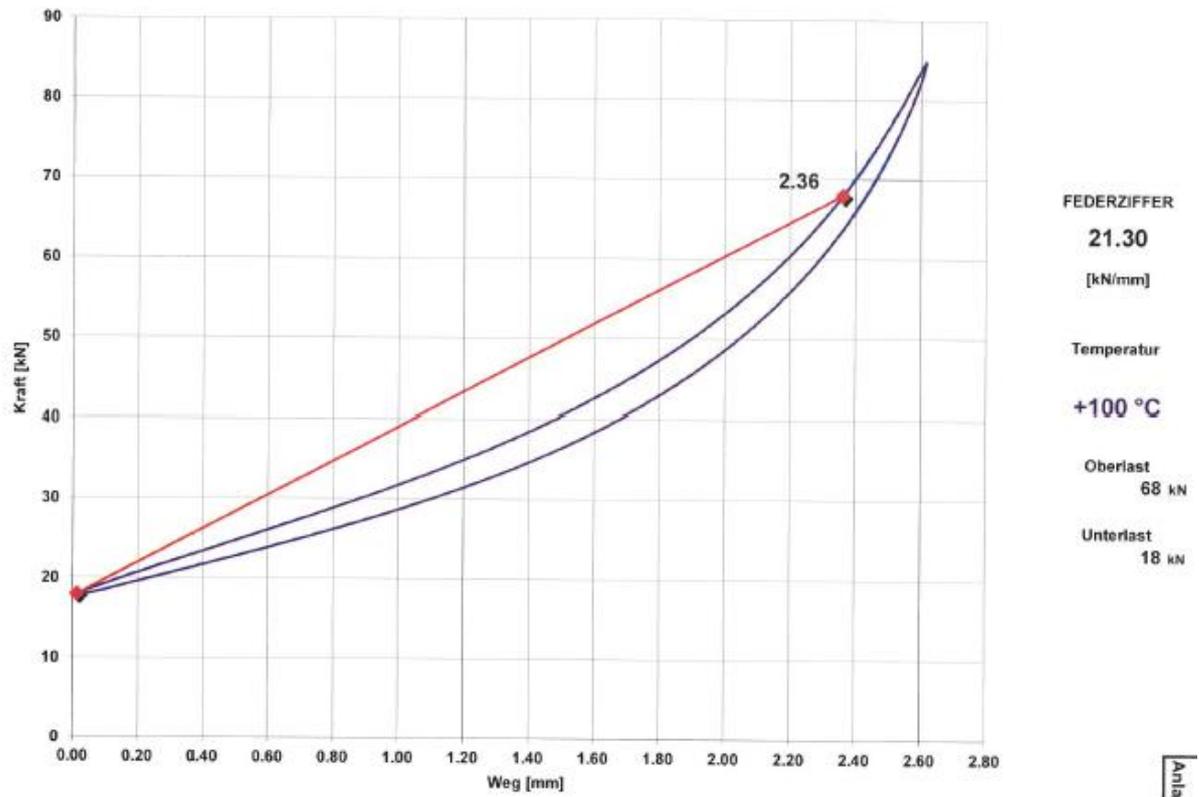


Рисунок Б.11 – Образец 3

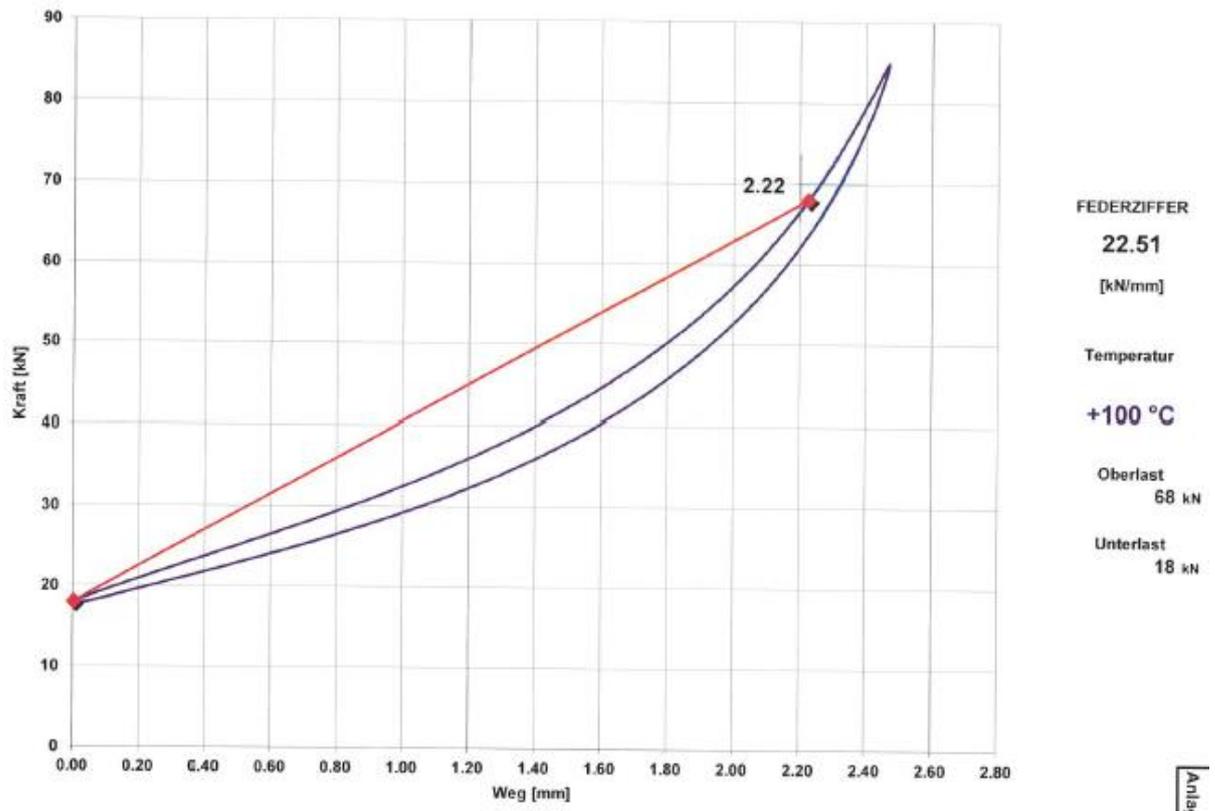


Рисунок Б.12 – Образец 4

Статические характеристики упругих прокладок при температуре +23 °C.

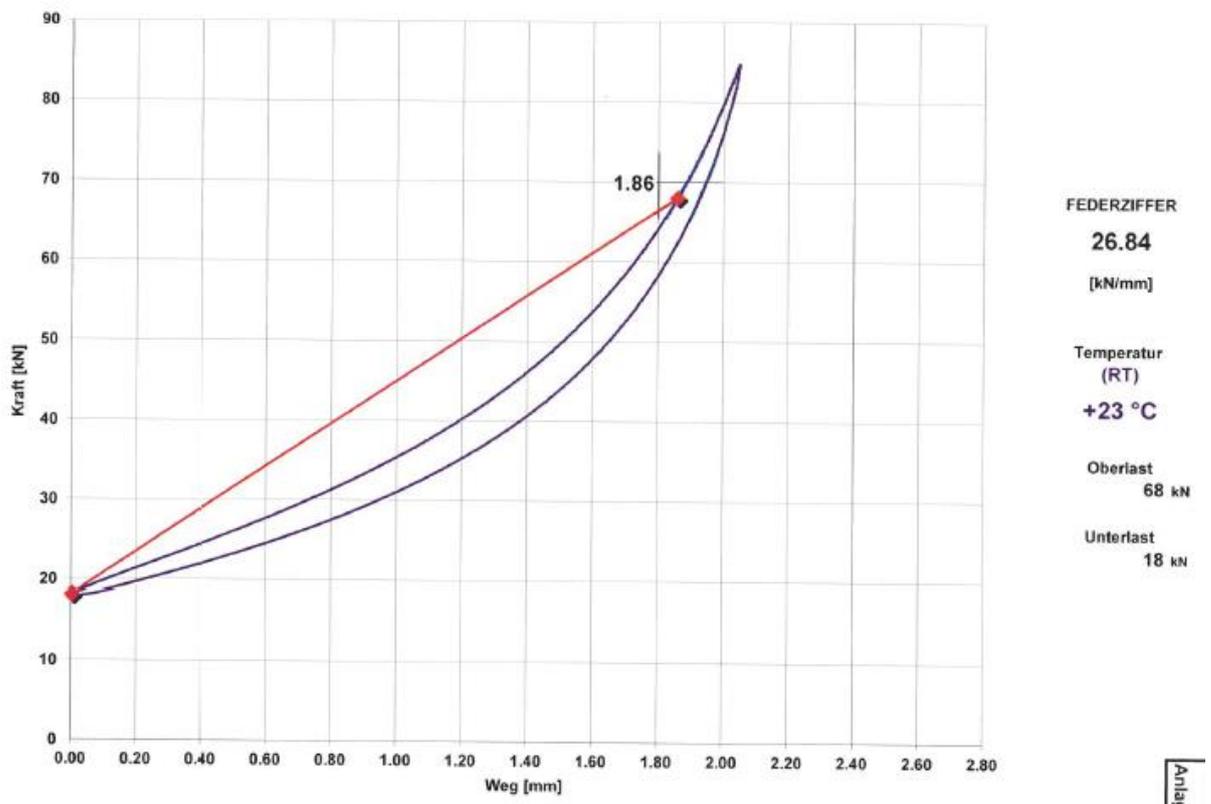


Рисунок Б.13 – Образец 1

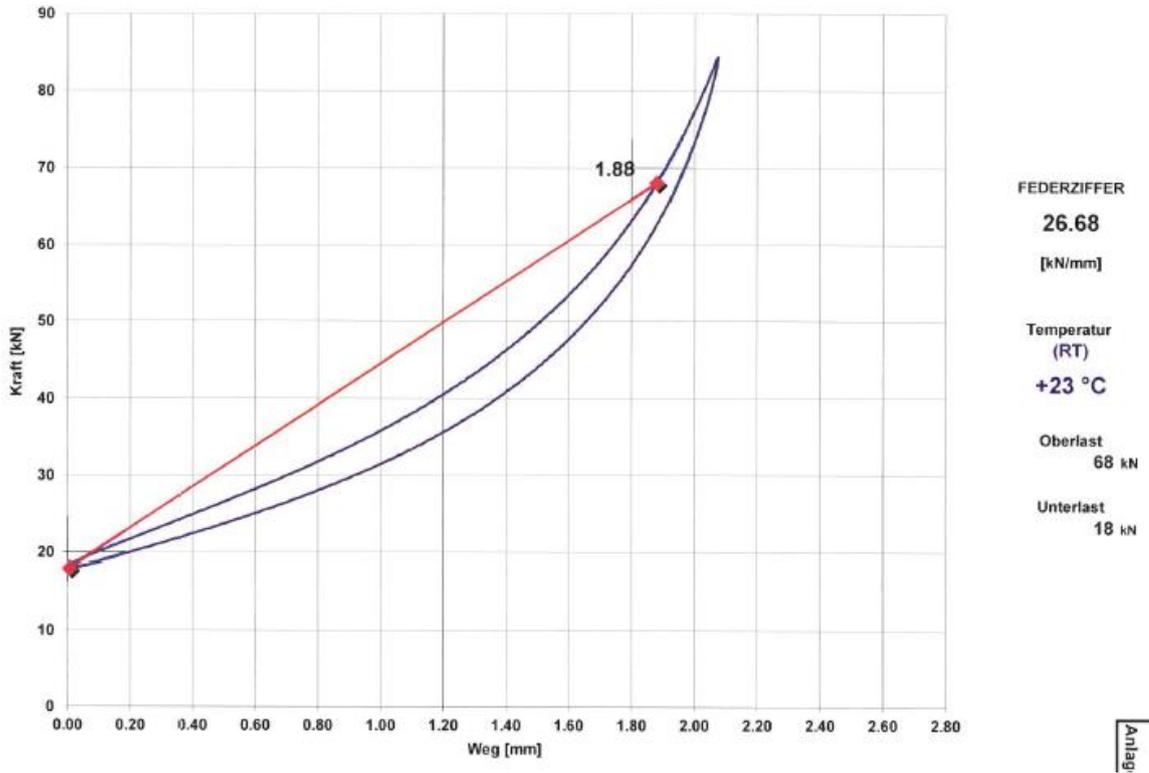


Рисунок Б.14 – Образец 2

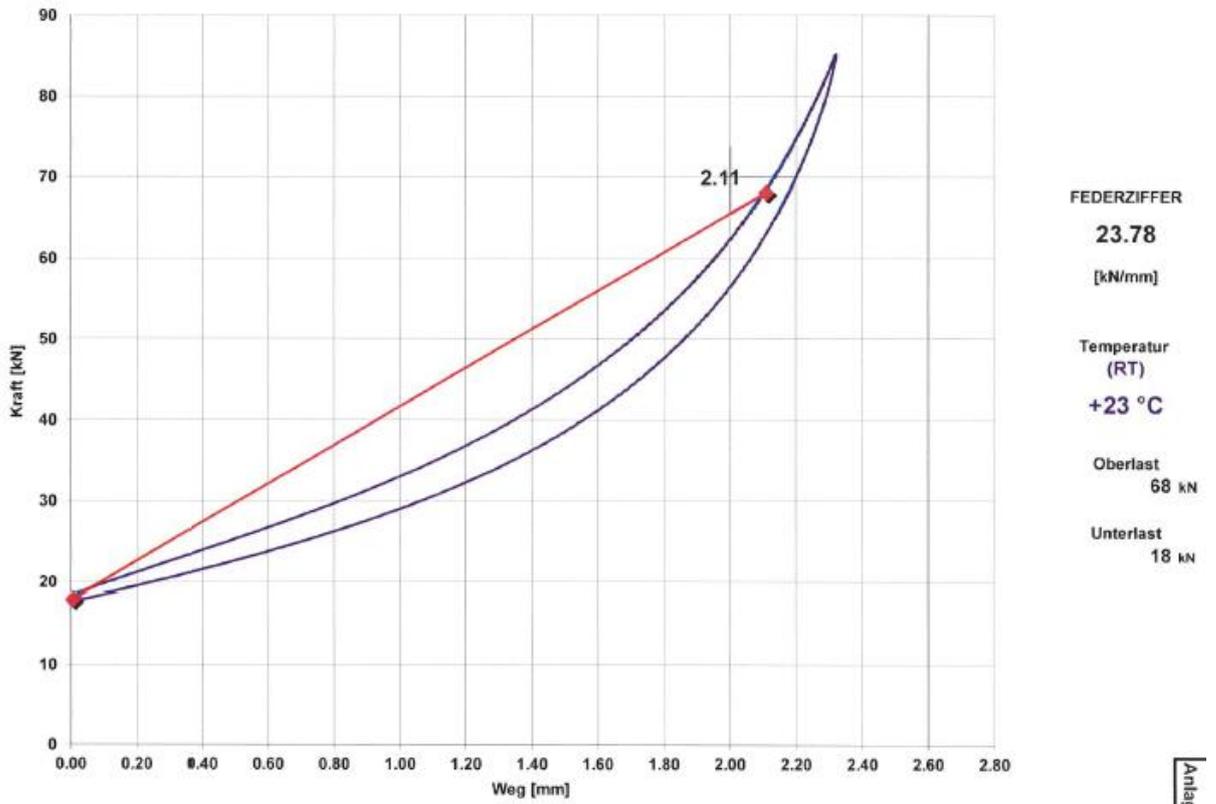


Рисунок Б.15 – Образец 3

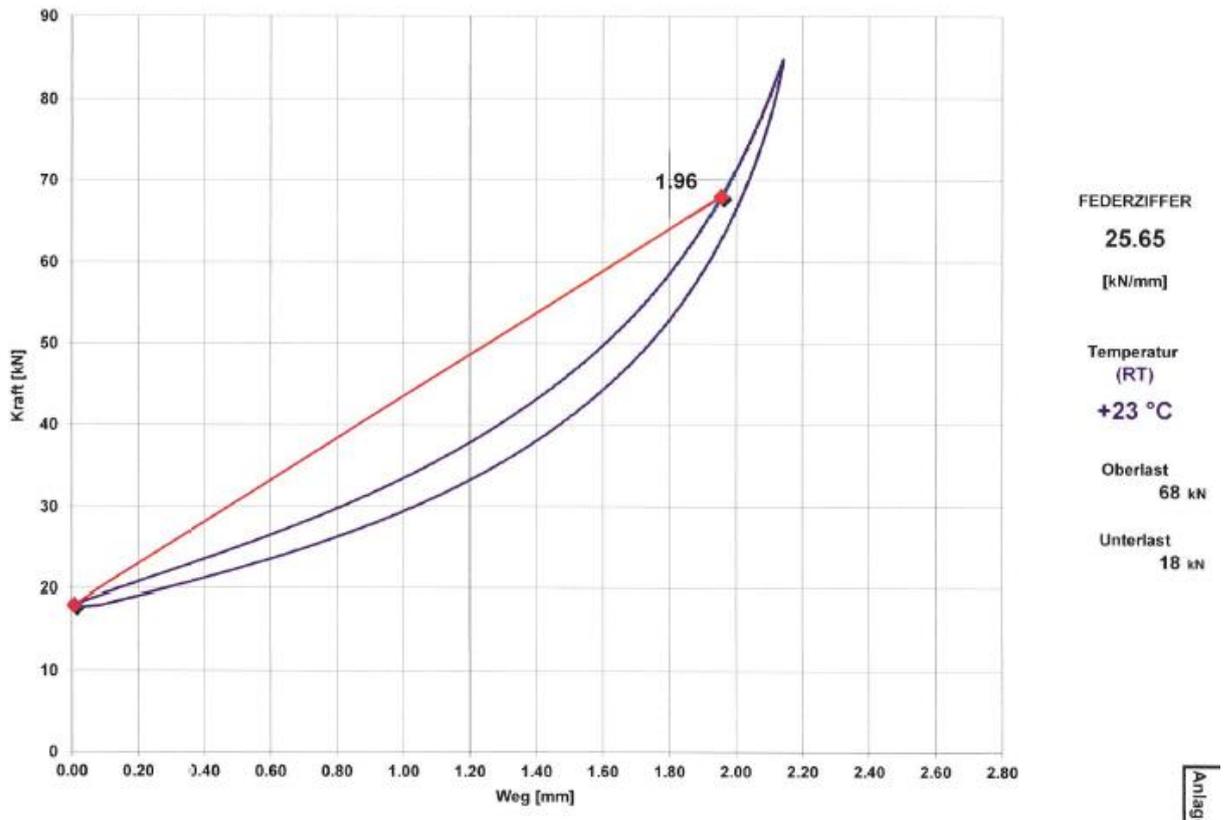


Рисунок Б.16 – Образец 4

Статические характеристики упругих прокладок при температуре -20°C.

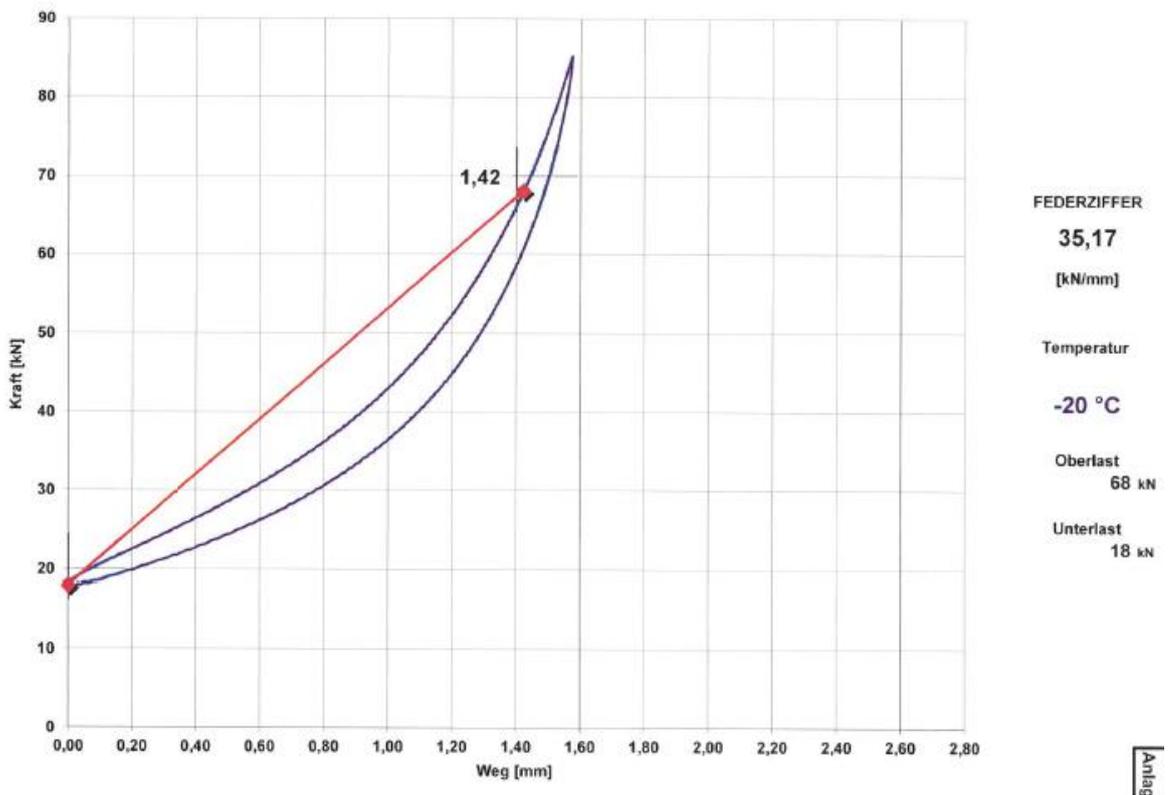


Рисунок Б.17 – Образец 1

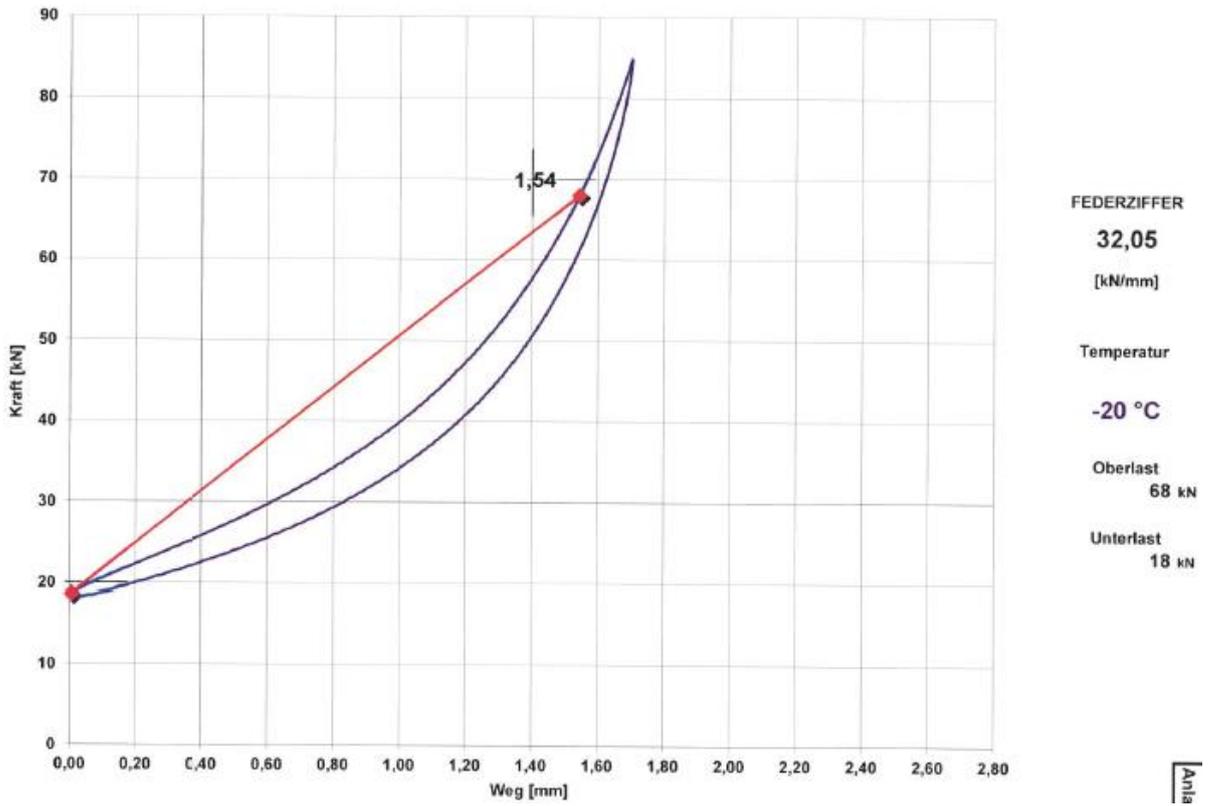


Рисунок Б.18 – Образец 2

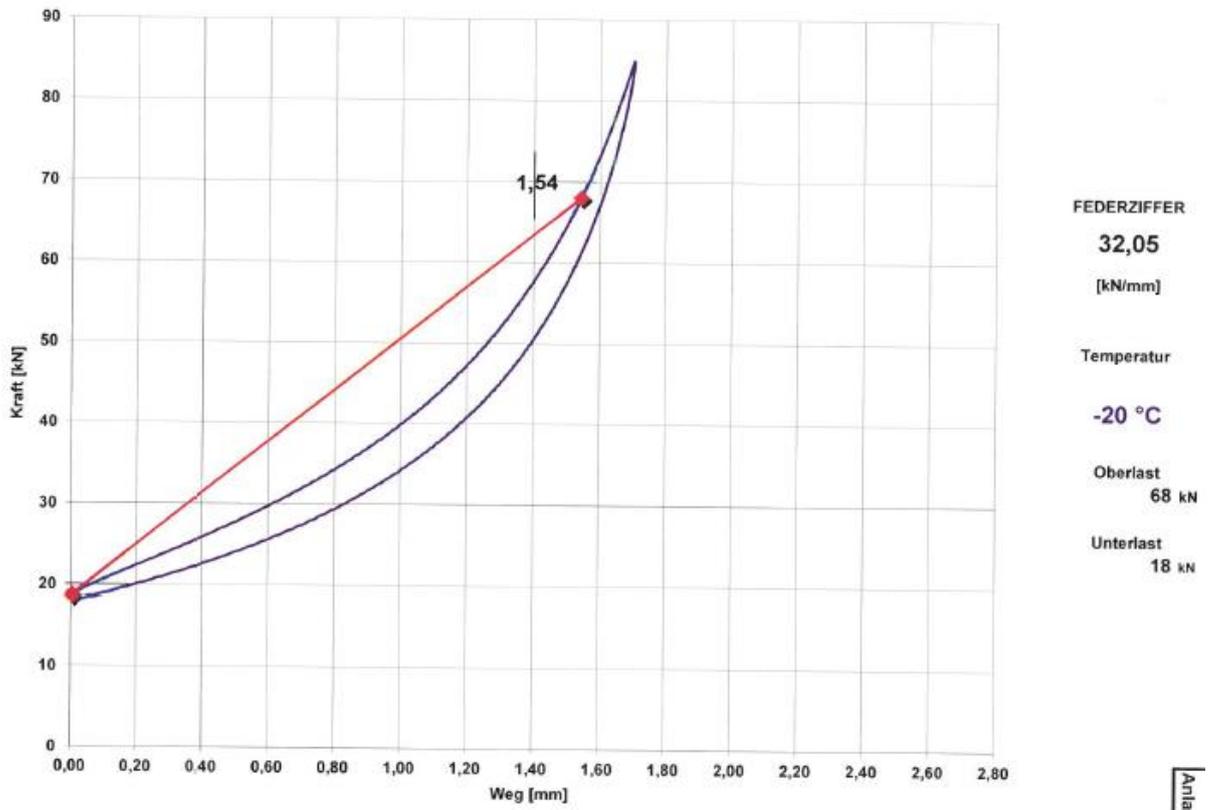


Рисунок Б.19 – Образец 3

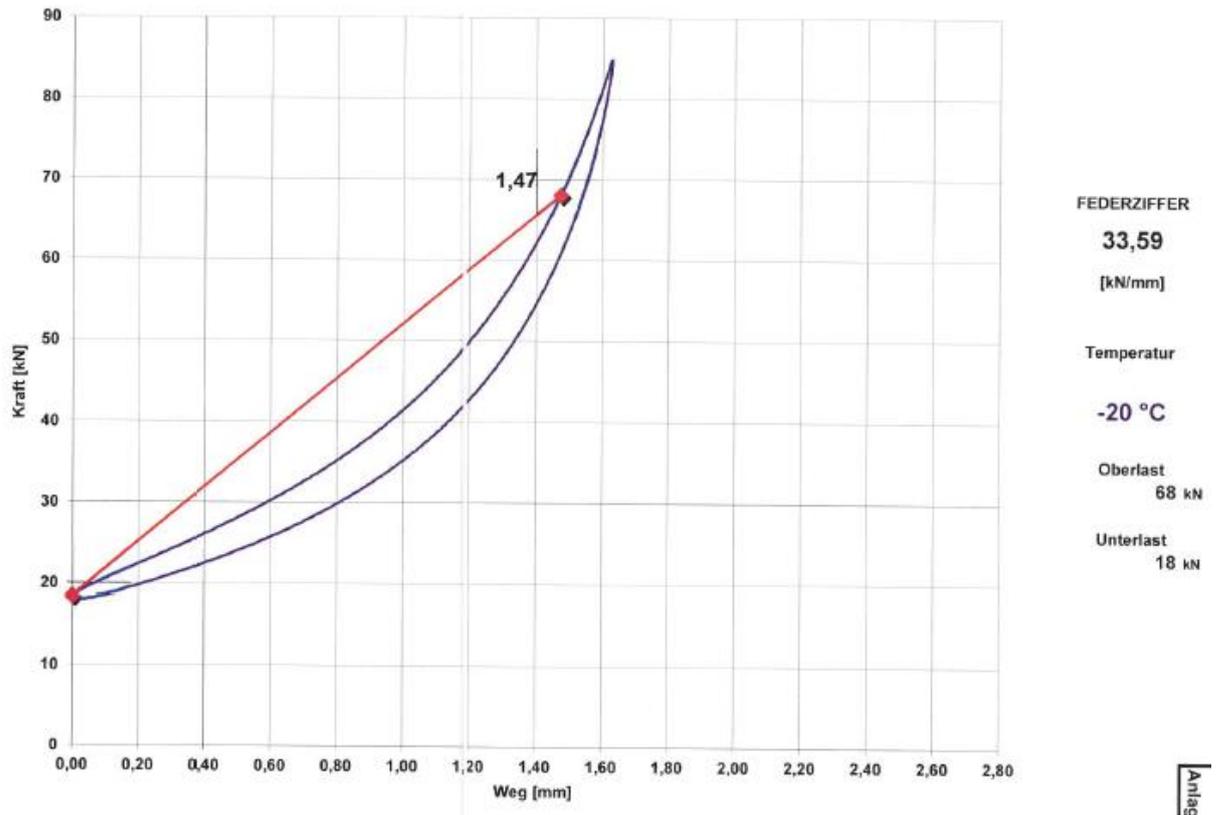


Рисунок Б.20 – Образец 4

Статические характеристики упругих прокладок при температуре -10 °C .

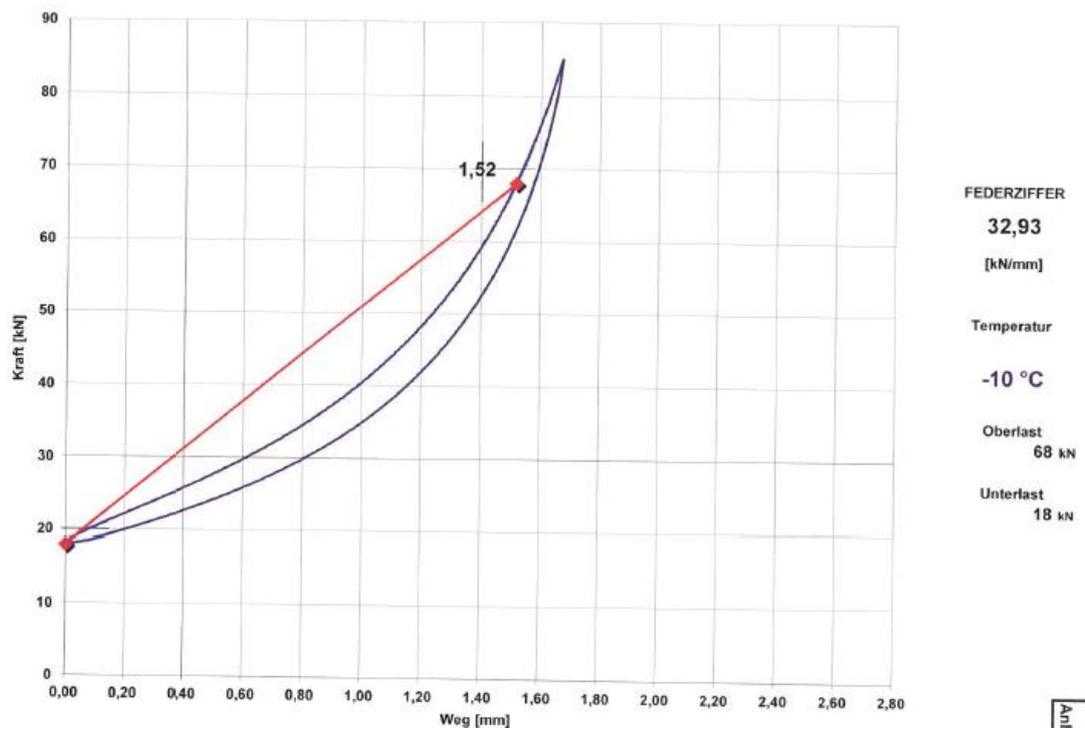


Рисунок Б.21 – Образец 1

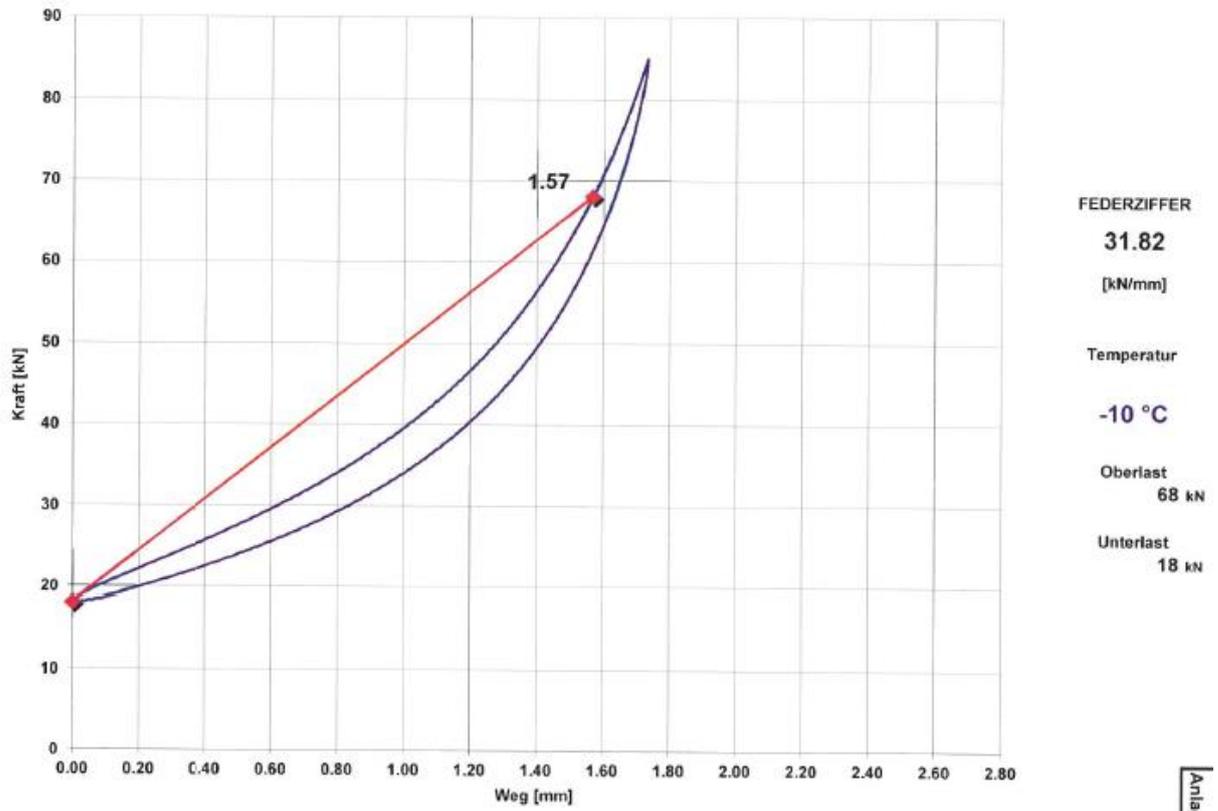


Рисунок Б.22 – Образец 2

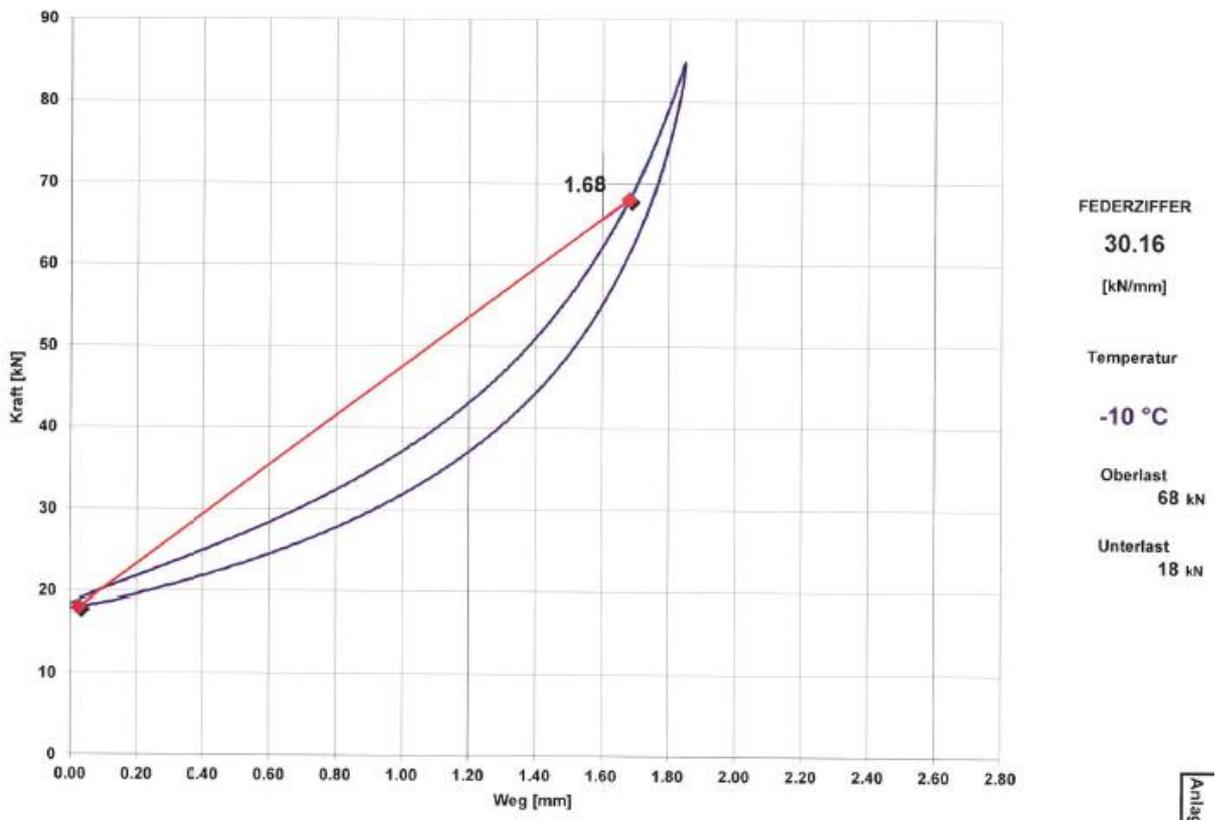


Рисунок Б.23 – Образец 3

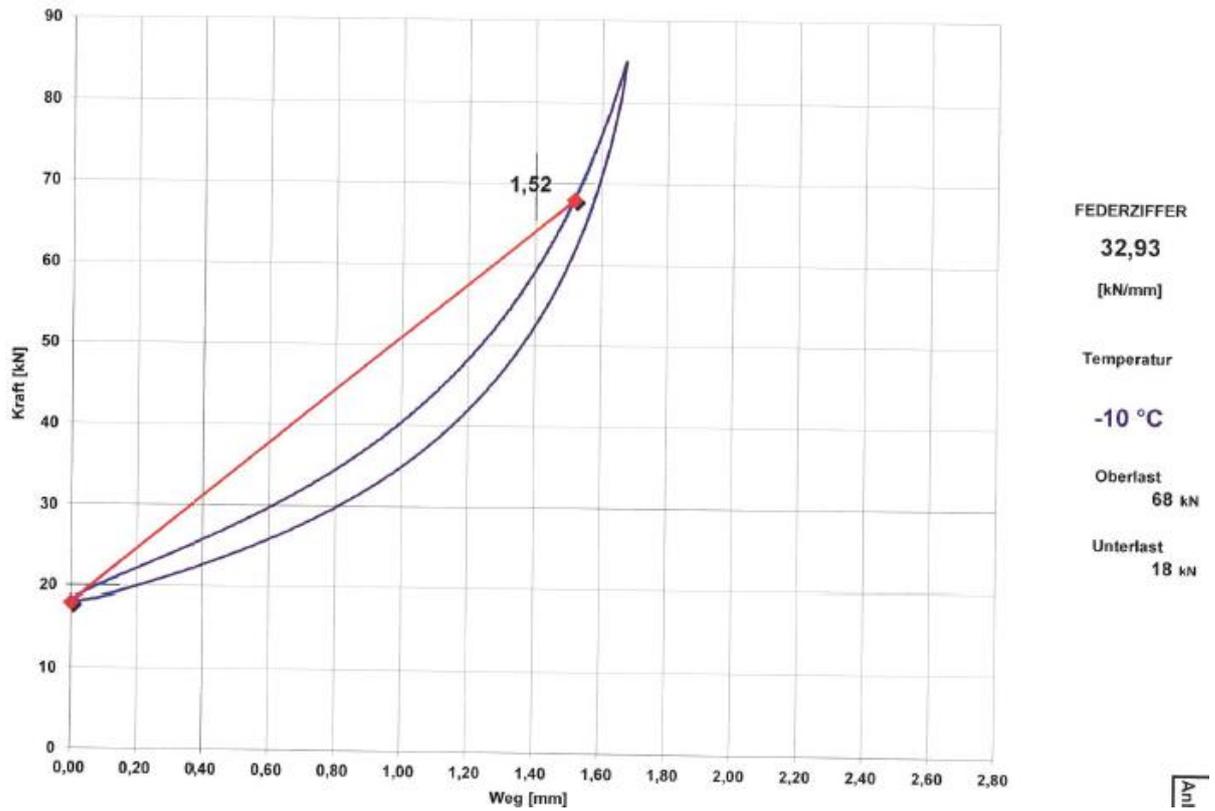


Рисунок Б.24 – Образец 4

Статические характеристики упругих прокладок при температуре 0 °C .

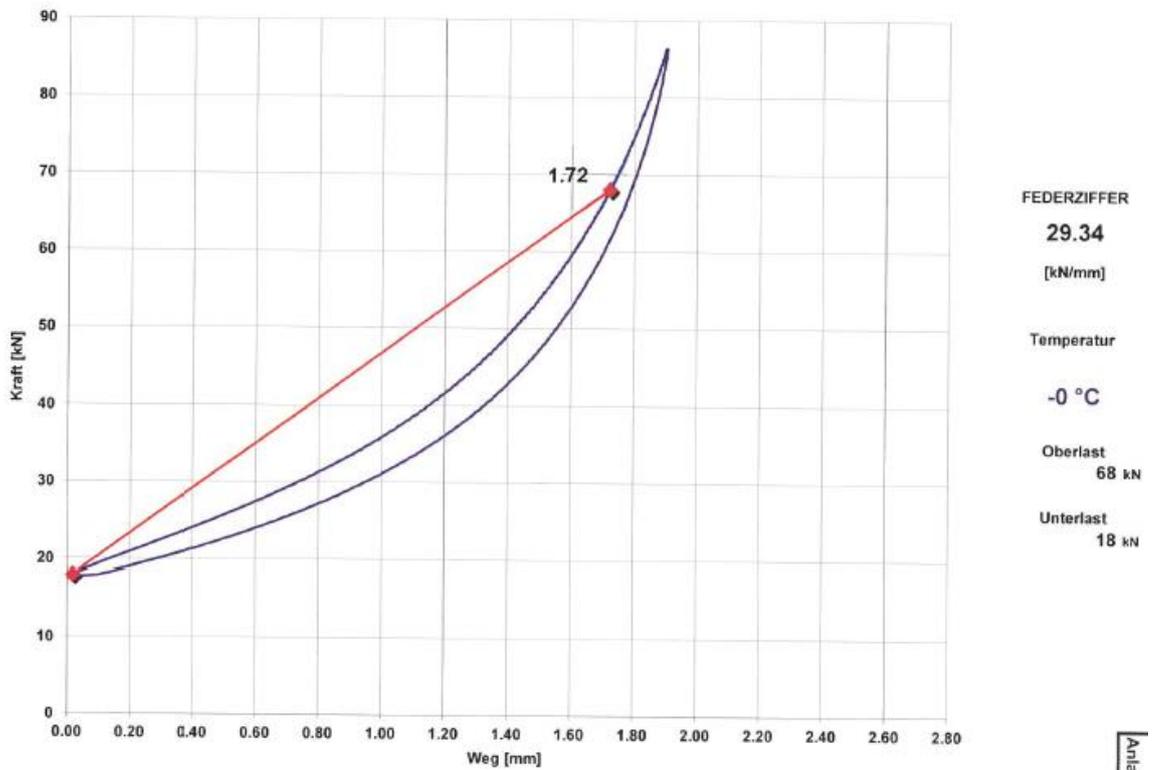


Рисунок Б.25 – Образец 1

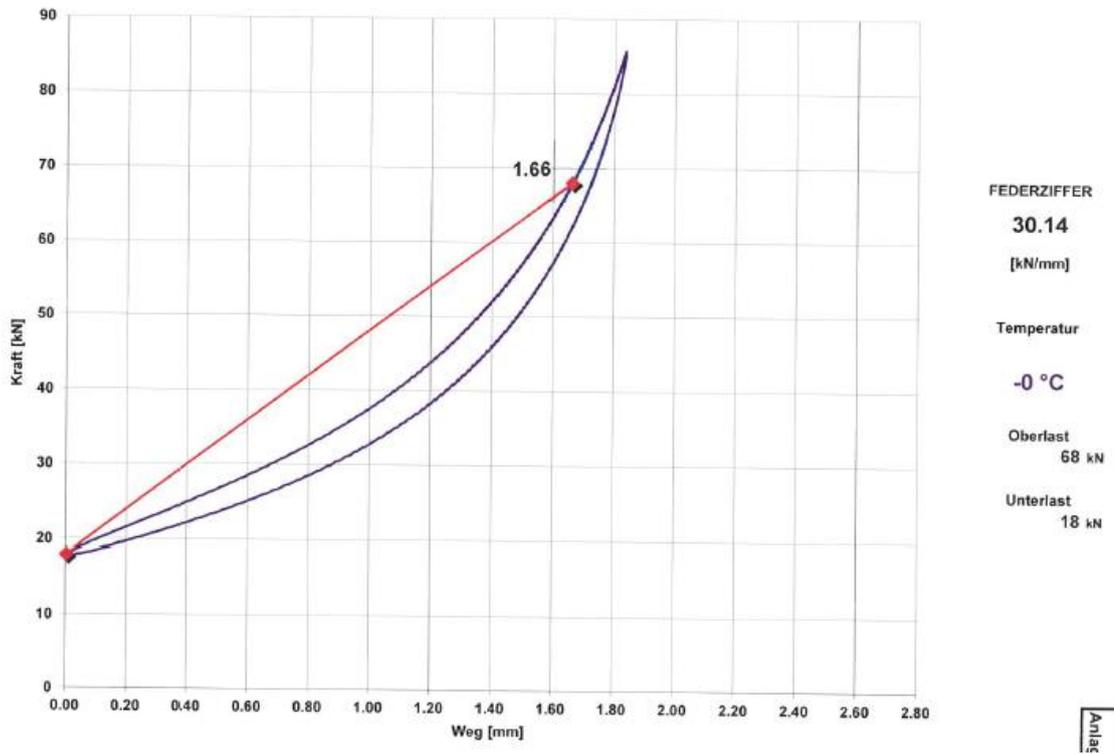


Рисунок Б.26 – Образец 2

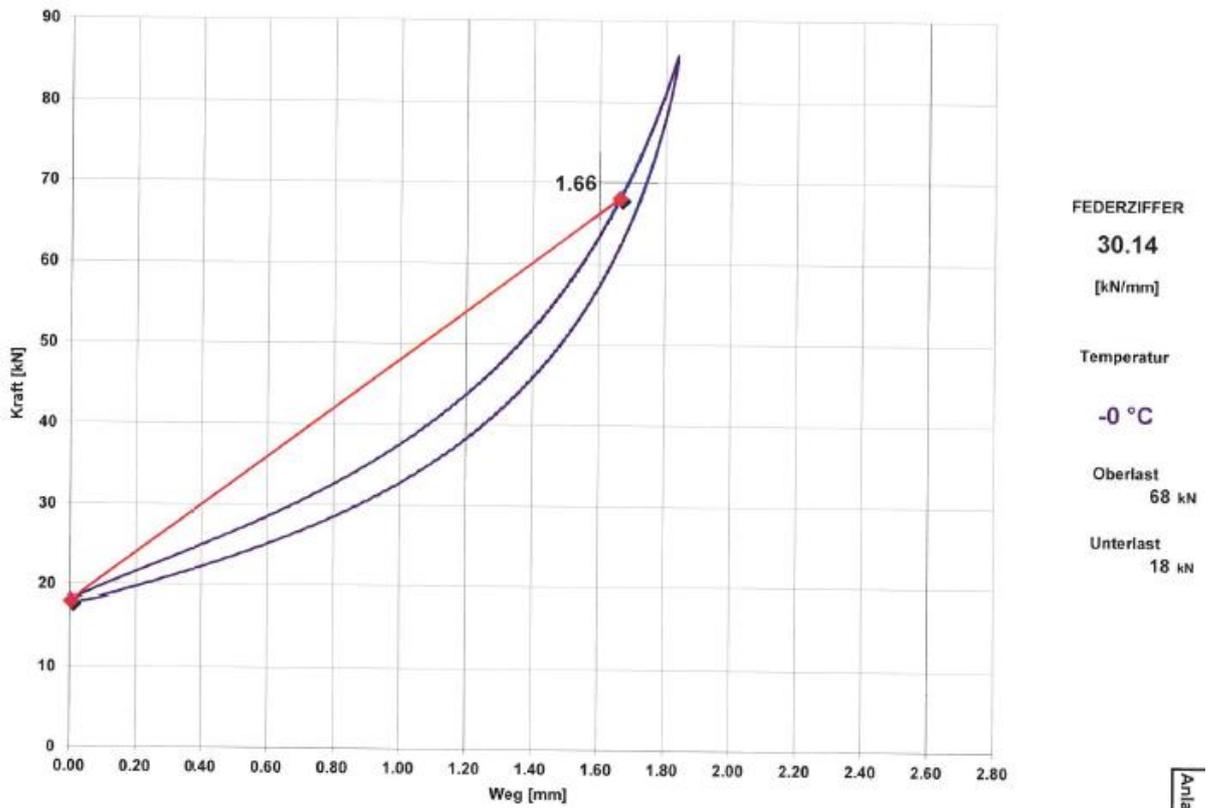


Рисунок Б.27 – Образец 3

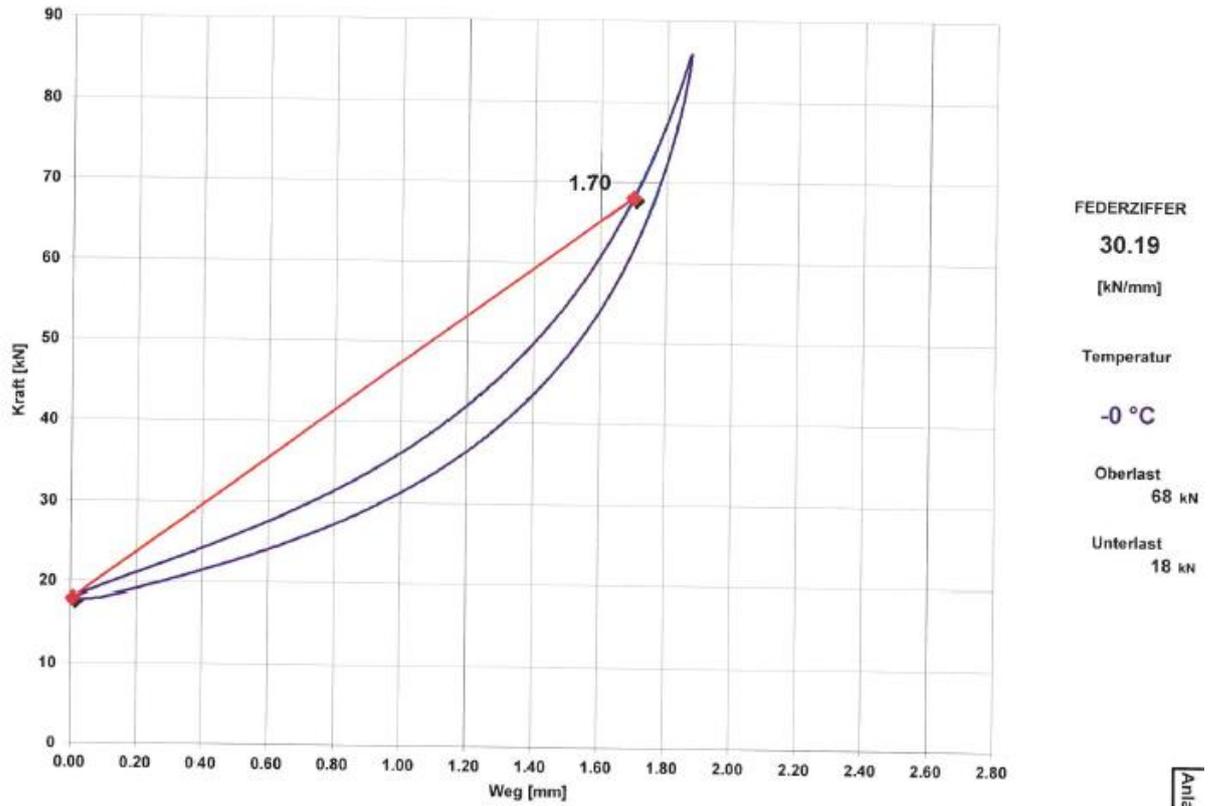


Рисунок Б.28 – Образец 4

Статические характеристики упругих прокладок при температуре $+50\text{ °C}$.

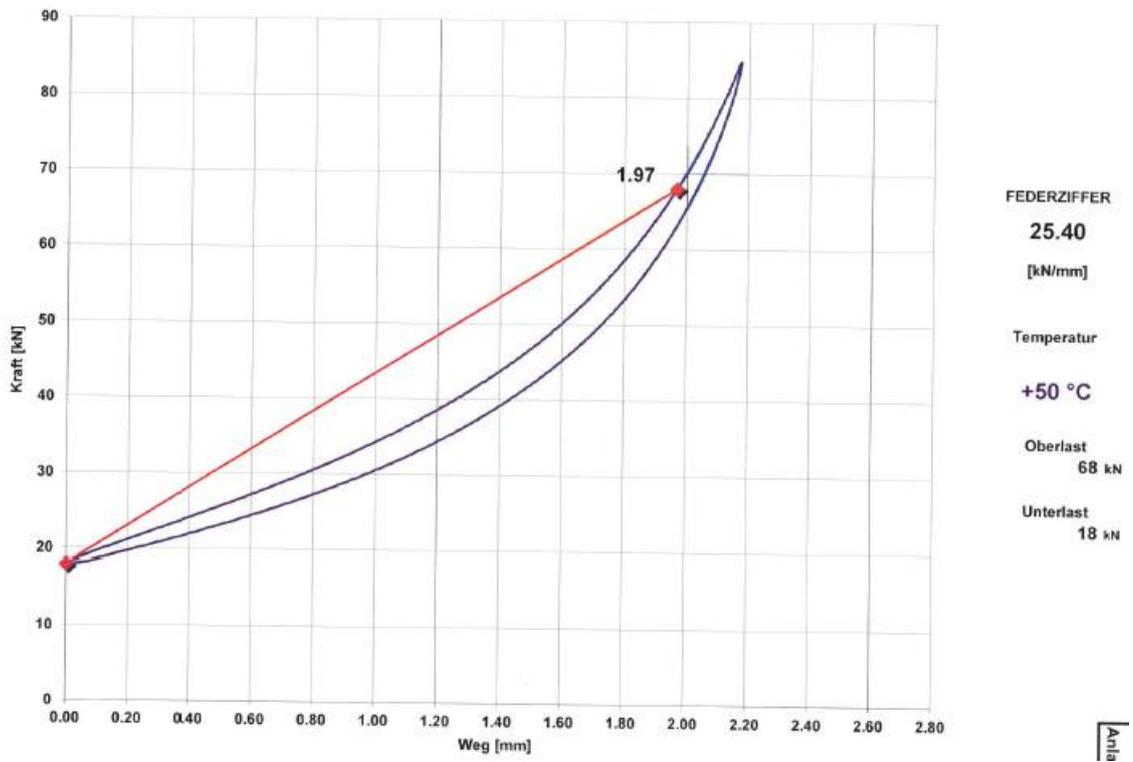


Рисунок Б.29 – Образец 1

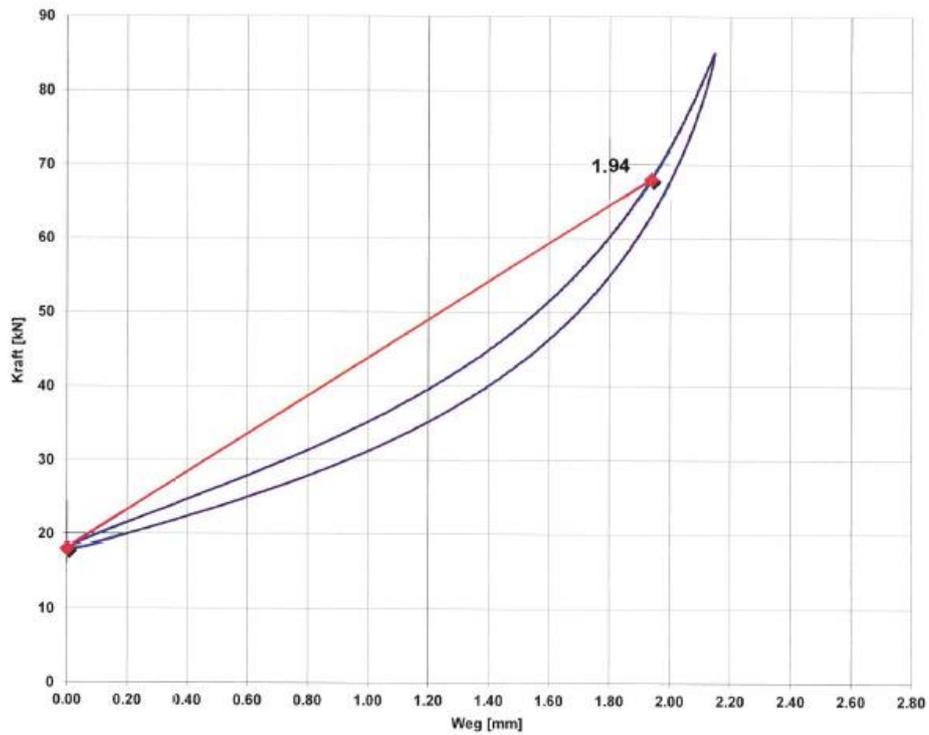


Рисунок Б.30 – Образец 2

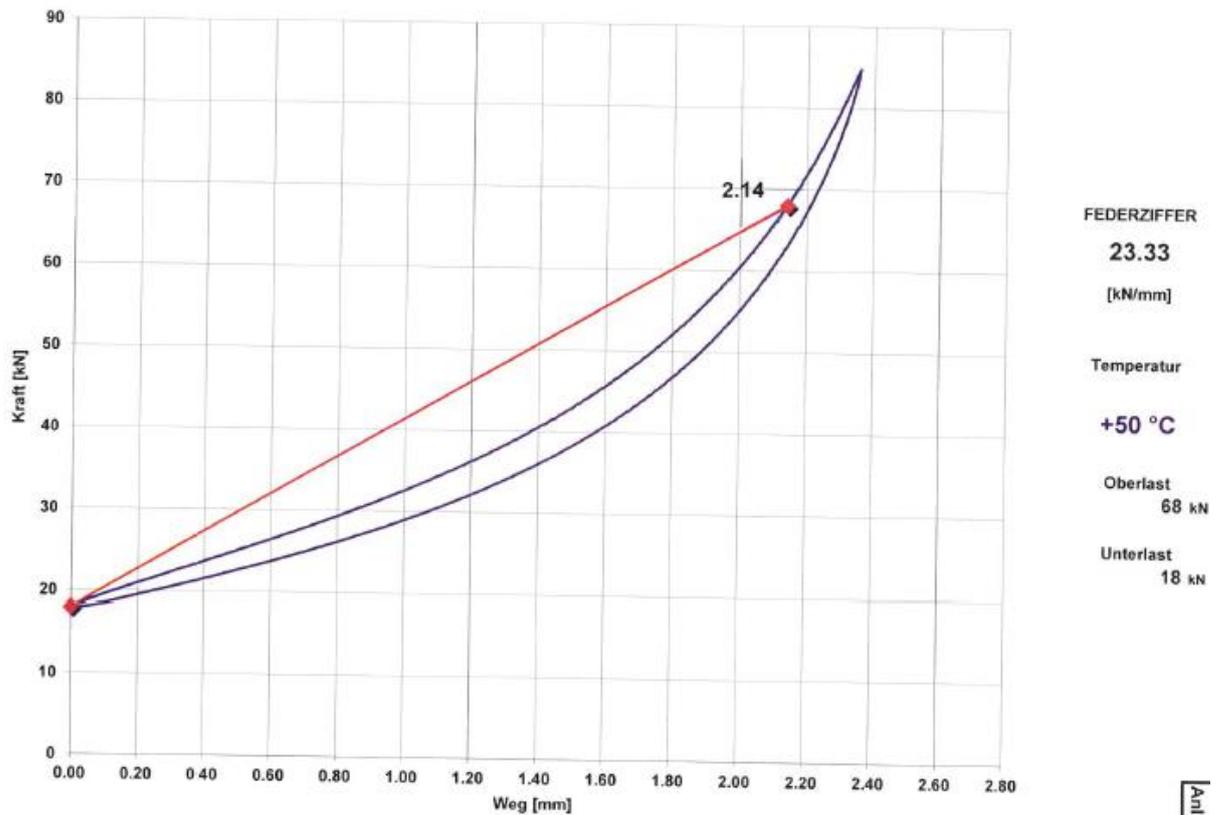


Рисунок Б.31 – Образец 3

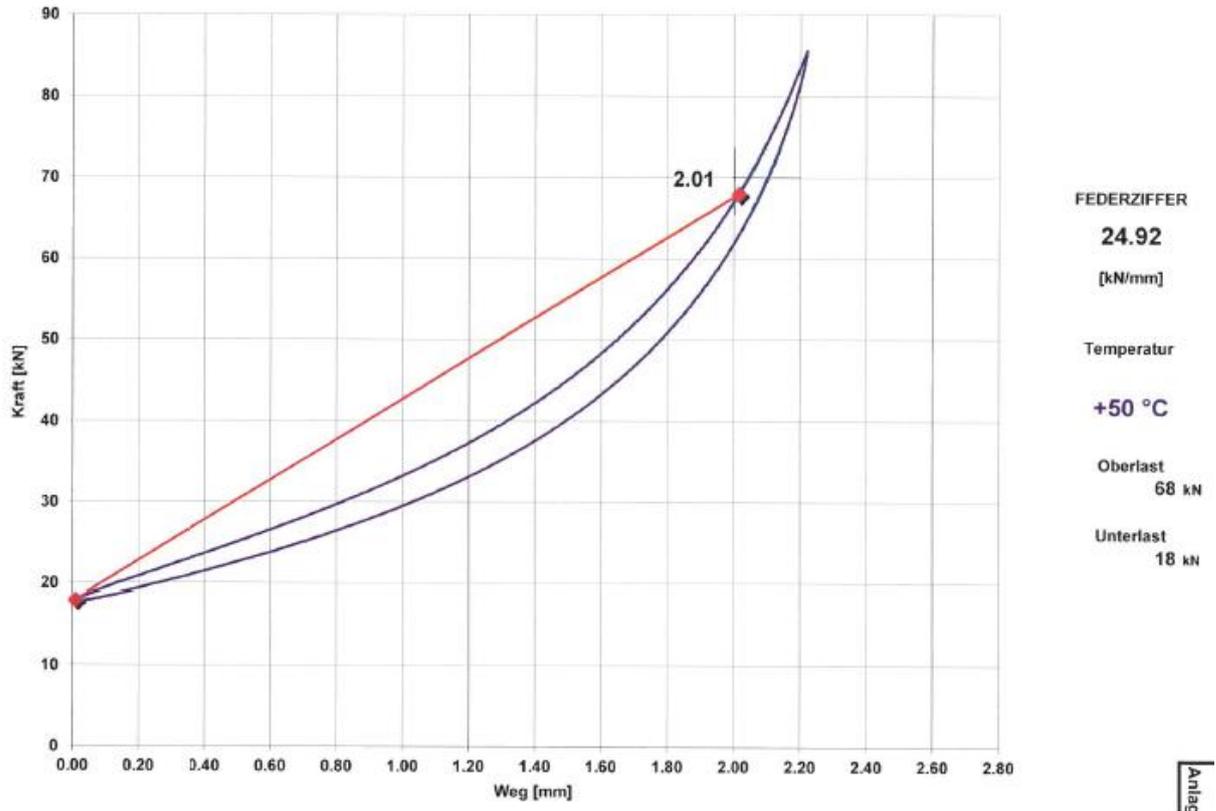


Рисунок Б.32 – Образец 4

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты измерений состояния ширины рельсовой колеи БКП

Таблица В.1 – Состояние ширины рельсовой колеи из выкопировки данных вагона-путеизмерителя БКП EBS, мм

Пропущенный тоннаж, млн. т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Среднее	СКО
0	1523,62	1522,17	1522,57	1523,48	1521,55	1521,53	1522,00	1522,00	1521,03	1520,52	1521,27	1522,10	1522,08	1522,10	1522,58	1522,15	1522,57	1522,08	0,7620
12	1522,31	1519,57	1520,67	1520,59	1520,41	1520,28	1520,30	1520,47	1520,98	1521,48	1521,79	1522,30	1521,36	1521,43	1521,19	1521,01	1520,00	1520,95	0,7493
100	1523,09	1521,84	1522,00	1524,00	1521,00	1521,49	1521,58	1521,60	1521,59	1521,74	1521,27	1522,00	1522,85	1522,71	1523,51	1522,29	1522,96	1522,21	0,8181
200	1521,23	1520,54	1519,52	1519,03	1518,82	1519,60	1519,39	1519,30	1521,68	1521,58	1522,24	1522,43	1521,88	1521,76	1521,66	1521,66	1522,15	1520,85	1,2377
300	1522,42	1520,22	1520,42	1519,55	1519,28	1519,24	1520,61	1520,17	1521,46	1521,89	1521,73	1522,73	1522,20	1521,46	1521,94	1521,71	1521,87	1521,11	1,0859
400	1522,62	1520,26	1519,53	1518,73	1518,74	1518,77	1519,37	1519,47	1521,47	1521,51	1521,77	1522,13	1521,77	1521,27	1521,44	1521,54	1521,52	1520,70	1,2796
500	1523,49	1522,69	1522,04	1523,41	1520,50	1520,91	1520,68	1519,51	1520,24	1521,48	1521,11	1522,31	1522,72	1522,55	1522,82	1523,23	1523,02	1521,92	1,1939
600	1522,82	1522,98	1523,16	1522,07	1523,41	1520,95	1521,89	1520,89	1520,55	1520,80	1522,70	1522,19	1522,41	1523,07	1523,31	1524,32	1523,31	1522,40	1,0496

Таблица В.2 – Состояние ширины рельсовой колеи из выкопировки данных вагона-путеизмерителя БКП NBT, мм

Пропущенный тоннаж, млн. т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Среднее	СКО
0	1521,39	1523,02	1522,44	1522,65	1524,62	1524,49	1522,82	1523,09	1523,09	1523,08	1523,52	1522,43	1522,60	1523,07	1523,16	1523,46	1523,29	1523,07	0,7229
12	1523,00	1522,55	1522,00	1520,84	1521,91	1520,91	1521,14	1522,00	1520,66	1520,85	1521,10	1521,49	1521,65	1521,74	1521,00	1521,05	1520,90	1521,46	0,6457
100	1525,43	1524,77	1522,35	1523,14	1522,96	1522,50	1524,24	1522,78	1522,73	1522,88	1523,43	1524,13	1524,00	1523,60	1522,64	1523,10	1521,84	1523,32	0,9055
200	1525,41	1524,78	1523,64	1524,27	1523,60	1523,71	1525,01	1523,90	1522,74	1522,07	1522,28	1522,78	1522,93	1522,61	1522,28	1521,74	1523,26	1523,35	1,0420
300	1522,88	1524,49	1524,15	1523,47	1523,83	1522,93	1522,72	1524,36	1523,69	1522,75	1521,89	1521,57	1522,29	1522,22	1522,30	1521,91	1522,90	1522,96	0,8746
400	1524,54	1524,00	1523,19	1524,00	1522,71	1522,75	1524,35	1523,63	1522,71	1522,32	1521,48	1522,16	1522,05	1522,28	1521,98	1522,20	1521,73	1522,83	0,9251
500	1525,04	1523,20	1523,35	1525,59	1524,26	1525,29	1525,75	1524,86	1525,30	1525,12	1523,22	1523,83	1523,95	1523,92	1523,67	1523,60	1522,80	1524,28	0,9124
600	1524,14	1523,88	1526,48	1525,30	1525,75	1526,00	1524,46	1526,09	1526,21	1524,70	1525,40	1526,14	1524,23	1524,23	1524,43	1524,45	1523,61	1525,03	0,9094

Таблица В.3 – Состояние ширины рельсовой колеи из выкопировки данных вагона-путеизмерителя БКП FFB, мм

Пропущенный тоннаж, млн. т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Среднее	СКО
0	1525,09	1525,69	1525,30	1525,08	1522,88	1521,81	1521,77	1521,90	1521,81	1521,82	1521,66	1521,21	1521,40	1521,17	1521,22	1521,20	1521,20	1522,48	1,6108
12	1523,25	1521,52	1520,52	1520,27	1520,32	1520,23	1520,25	1520,22	1519,57	1519,79	1520,19	1520,17	1519,83	1520,15	1520,15	1520,18	1520,14	1520,40	0,8120
100	1522,66	1521,67	1521,74	1521,63	1521,73	1521,27	1521,36	1520,73	1521,08	1521,12	1520,82	1520,95	1521,18	1521,00	1521,02	1521,14	1523,61	1521,45	0,7016
200	1524,23	1523,65	1521,97	1521,67	1522,12	1522,16	1521,54	1521,05	1521,13	1521,06	1521,31	1521,54	1521,25	1521,08	1521,17	1521,49	1523,74	1521,89	0,9844
300	1524,23	1522,49	1521,83	1521,77	1521,81	1521,72	1521,38	1521,02	1521,31	1521,27	1521,44	1521,43	1521,45	1521,20	1521,28	1520,83	1522,12	1521,68	0,7473
400	1524,50	1521,61	1521,27	1521,53	1521,48	1521,42	1521,25	1520,69	1520,99	1521,01	1520,96	1521,31	1521,04	1521,01	1520,92	1521,56	1523,39	1521,53	0,9375
500	1524,70	1523,75	1522,70	1522,04	1522,03	1522,64	1522,02	1521,54	1521,33	1521,37	1521,59	1521,59	1522,07	1521,89	1522,07	1521,55	1522,40	1522,19	0,8550
600	1525,39	1525,91	1523,92	1523,06	1523,07	1523,47	1523,03	1522,75	1522,41	1522,40	1522,46	1522,78	1523,30	1523,07	1523,03	1523,02	1522,77	1523,29	0,9429

Таблица В.4 – Состояние ширины рельсовой колеи из выкопировки данных вагона-путеизмерителя БКП LVT, мм

Пропущенный тоннаж, млн. т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	1522,73	1522,18	1522,58	1523,27	1523,28	1523,27	1522,77	1522,00	1522,93	1522,58	1523,70	1523,86	1523,15
12	1520,96	1521,59	1521,56	1521,57	1521,59	1520,81	1521,67	1521,24	1521,57	1521,81	1522,11	1521,41	1521,95
100	1523,65	1521,00	1521,00	1521,00	1521,56	1520,47	1522,11	1522,83	1521,81	1522,14	1522,60	1521,14	1522,61
200	1523,19	1519,44	1519,39	1520,71	1518,70	1521,43	1521,31	1521,92	1520,88	1521,93	1519,45	1519,67	1520,51
300	1524,00	1521,00	1519,54	1519,50	1520,31	1520,75	1523,60	1523,11	1523,26	1523,00	1523,63	1520,40	1519,64
400	1521,99	1519,01	1518,43	1519,48	1519,27	1522,55	1522,06	1522,02	1521,82	1522,32	1518,81	1518,70	1519,12
500	1524,34	1520,78	1518,72	1517,96	1518,99	1518,63	1523,79	1523,50	1523,59	1522,93	1523,71	1521,12	1518,91
600	1525,06	1520,56	1518,90	1518,61	1519,10	1519,70	1523,54	1524,45	1523,59	1523,50	1524,00	1520,60	1519,47
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Среднее	СКО
0	1523,10	1523,91	1523,13	1522,31	1522,14	1522,90	1523,29	1521,98	1524,17	1522,01	1522,59	1522,91	0,6172
12	1521,76	1521,15	1520,92	1521,05	1521,52	1521,71	1520,87	1522,16	1520,19	1521,18	1521,09	1521,39	0,4513
100	1521,73	1521,24	1521,47	1521,38	1524,61	1520,40	1522,17	1521,50	1520,33	1520,71	1525,95	1521,89	1,3110
200	1520,72	1521,23	1520,59	1522,52	1518,84	1519,43	1518,30	1519,49	1520,80	1521,56	1523,87	1520,66	1,3969
300	1521,23	1520,96	1521,23	1521,20	1523,65	1520,47	1520,53	1521,00	1520,96	1521,81	1522,49	1521,55	1,3929
400	1520,45	1519,40	1520,58	1522,02	1520,74	1520,53	1520,76	1520,69	1522,38	1522,14	1527,11	1520,93	1,8534
500	1521,25	1520,93	1520,45	1520,48	1521,86	1521,92	1520,90	1519,65	1519,64	1518,20	1522,25	1521,02	1,9019
600	1522,13	1521,26	1521,52	1521,63	1524,00	1521,99	1521,42	1520,79	1520,22	1518,29	1523,76	1521,59	1,9830

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Сравнительный анализ нормативной базы к рельсовым скреплениям для БВСП

Таблица Г.1 – Сравнение показателей и требований к рельсовым скреплениям для БВСП

СТУ №2	EN 13481-5:2012	ТВ/Т 3395.1-2015
<i>1) Силовые характеристики узла и его элементов</i>		
1.1) Усилие прижатия рельса к основанию не менее 20 кН. 1.2) Отсутствует; 1.3) Отсутствует;	1.1) Отсутствует минимальное числовое значение. 1.2) Отсутствует; 1.3) Отсутствует;	1.1) Усилие прижатия рельса к основанию не менее 18 кН; 1.2) Расчетное усилие от одной клеммы не менее 9 кН; 1.3) Расчетный упругий ход рабочих рукавов клеммы не менее 12 мм.
<i>2) Испытания с приложением продольной нагрузки</i>		
2.1) Сопротивление продольному перемещению рельса не менее 14 кН.	2.1) Сопротивление продольному перемещению рельса, кН, не менее: - 7,0; - 9,0 (для скоростей >250 км/ч).	2.1) Сопротивление продольному перемещению рельса не менее 9 кН.
<i>3) Циклические испытания</i>		
3.1) Удерживающая способность узла скрепления при действии циклических нагрузок на базе 4 млн. циклов, 5-10 Гц. Угол приложения нагрузки 27° 3.1.1) Остаточное перемещение головки рельса не более 3 мм; 3.1.2) Остаточное перемещение подошвы рельса не более 2 мм; 3.1.3) Не допускается наличие трещин, разрушения элементов рельсового	3.1) Изменение показателя после воздействия циклической нагрузки на базе 3 млн. циклов, 4Гц. Углы приложения нагрузки, понижение головки рельса и вертикальная сила зависит от категории скрепления А-Е и низкочастотной динамической жесткости скрепления. 3.1.1) Отсутствует; 3.1.2) Отсутствует; 3.1.3) Не допускается выход элементов	3.1) Изменение показателя после воздействия циклической нагрузки на базе 3 млн. циклов, 4Гц. Угол приложения нагрузки 26°. Для рельсовых скреплений при максимальной расчетной высоте регулировки рельса должны выполняться требования 3.1.3 и 3.1.7. 3.1.1) Отсутствует; 3.1.2) Отсутствует; 3.1.3) Не допускается повреждений и выхода

Продолжение таблицы Г.1

<p>скрепления и шпалы; 3.1.4) Отсутствует; 3.1.5) Отсутствует; 3.1.6) Отсутствует; 3.1.7) Отсутствует; 3.2) Отсутствует; 3.2.1) Отсутствует; 3.2.2) Отсутствует.</p>	<p>скрепления; 3.1.4) Изменение продольного сопротивления рельса или продольной жесткости – не более 20%*; 3.1.5) Изменение вертикальной статической жесткости – не более 25%*; 3.1.6) Изменение усилия прижатия рельса – не более 20%*. 3.1.7) Отсутствует; 3.2) Отсутствует; 3.2.1) Отсутствует; 3.2.2) Отсутствует.</p>	<p>элементов креплений; 3.1.4) Коэффициент изменения продольного сопротивления рельса не должен превышать 20%; 3.1.5) Коэффициент изменения вертикальной статической жесткости не должен превышать 25%; 3.1.6) Коэффициент изменения усилия прижатия рельса не должен превышать 20%; 3.1.7) Уширение рельсовой колеи не должно превышать 6 мм. 3.2) Усталостные испытания элементов крепления 3.2.1) Не допускается выхода прижимных деталей после приложения циклической нагрузки на базе 5 млн. циклов с амплитудой колебаний (-2,0/+0,5 мм); 3.2.2) После приложения 3 млн. циклов нагружения не должно быть повреждений упругих прокладок, необратимая деформация не должна превышать 10%, а изменение статической жесткости не должно превышать 20%.</p>
<p>4) <i>Упругие характеристики узла крепления</i></p>		
<p>4.1) Вертикальная жесткость узла рельсового крепления, МН/м – 50-150; 4.2) Поперечная жесткость (по подошве рельса), не менее МН/м – 30; 4.3) Отсутствует; 4.4) Отсутствует; 4.5) Отсутствует; 4.6) Рекомендуются применять упругие элементы, имеющие обратимое увеличение жесткости при низких температурах не более</p>	<p>4.1) Статическая жесткость узла крепления – требование определяет заказчик в зависимости от сферы применения; 4.2) Отсутствует; 4.3) Динамическая низкочастотная жесткость - требование определяет заказчик в зависимости от сферы применения; 4.4) Динамическая высокочастотная жесткость (исключительно по требованию заказчика) - требование определяет заказчик</p>	<p>4.1) Упругость крепления выражается через показатель жесткости упругой прокладки. Статическая жесткость должна находиться в диапазоне 20-30 кН/мм;Отсутствует; 4.3) Отсутствует; 4.4) Отсутствует; 4.5) Отсутствует; 4.6) Изменение статической жесткости упругих прокладок при температуре</p>

Продолжение таблицы Г.1

<p>2 раз; 4.7) Отсутствует.</p>	<p>в зависимости от сферы применения; 4.5) Определение коэффициента затухания ударной нагрузки рельсового скрепления: - Средний 15-30%, - Высокий >30%. 4.6) Отсутствует; 4.7) Отсутствует.</p>	<p>испытаний -35°C, эксплуатируемых в условиях низких температур, не должно превышать 20%; 4.7) Коэффициент соотношения динамической и статической жесткости не более 1,5.</p>
<p>5) <i>Электрическое сопротивление</i></p>		
<p>5.1) Электрическое сопротивление узла рельсового скрепления, кОм, не менее – 10.</p>	<p>5.1) Электрическое сопротивление узла рельсового скрепления, кОм, не менее - 5.</p>	<p>5.1) Электрическое сопротивление узла рельсового скрепления, кОм, не менее - 5.</p>
<p>б) <i>Дополнительные требования</i></p>		
<p>6.1) Отсутствует; 6.2) Отсутствует; 6.3) Отсутствует; 6.4) Скрепления должны обеспечивать регулировку рельсов в плане до ±4 мм; 6.5) Отсутствует; 6.6) Отсутствует; 6.7) Скрепления должны обеспечивать регулировку по высоте не менее 10 мм.</p>	<p>6.1) Воздействие агрессивной окружающей среды (испытания в солевой камере) – проверяется демонтаж скрепления без нарушения работоспособности элементов; 6.2) Сопротивление вырыванию замоноличенных и вклеенных закладных элементов нагрузкой не менее 60кН в течение 3 мин, - Отсутствие трещин, разрушений элементов рельсового скрепления и шпалы; 6.3) Уменьшение интенсивности шума и вибрации – требование определяет заказчик; 6.4) Влияние допусков элементов скрепления в сборке на величину ширины колеи, мм - ±1; 6.5) Габаритные размеры скрепления относительно поверхности катания и оси рельса, не менее - от поверхности катания рельса — 70 мм; - от оси рельса — 220; 6.6) Полигонные испытания (пропущенный тоннаж не менее 20 млн. т.</p>	<p>6.1) После проведения испытаний в солевом тумане длительностью 300 часов узлы скрепления должны разбираться и собираться ручным монтажным инструментом без разрушения; 6.2) Сопротивление вырыванию замоноличенных и вклеенных закладных элементов нагрузкой не менее 60кН в течение 3 мин, - Отсутствие трещин, разрушений элементов рельсового скрепления и шпалы; 6.3) Отсутствует; 6.4) Минимальный диапазон регулировки положения рельса по горизонтали ±5 мм, минимальный диапазон регулировки ширины рельсовой колеи ±10 мм. 6.5) Отсутствует; 6.6) Отсутствует; 6.7) Минимальный диапазон регулировки положения рельса по высоте от -4 мм до +26 мм с шагом 1мм.</p>

Продолжение таблицы Г.1

	брутто и не менее 1 года категории С, D и E) – требование определяет заказчик; 6.7) Отсутствует;	
--	--	--

* Изменение показателя до и после циклических испытаний.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Предложения по изменению ГОСТ 32698-2014 Крепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля нормативной базы к рельсовым креплениям для БВСП

vossloh
Russia & CIS

Общество с ограниченной ответственностью
«Фоссло Бан-унд Феркерстехника»
Россия 123610, Москва, Краснопресненская наб., 12
Подъезд 3, офис 609
Телефон/факс: +7 (495) 308 92 10

Limited Liability Company
"Vossloh Bahn- und Verkehrstechnik"
Krasnopresnenskaya emb., 12
Entrance 3, office 609, Moscow, Russia
Phone/fax: +7 (495) 308 92 10
www.vossloh.com

Заместителю Генерального директора-
начальнику ИЦЖТ АО «ВНИИЖТ»
Савину А.В.

№ Исх.: 42-02/17 от 14.02.17

Тема: Предложение по внесению
изменений в ГОСТ на крепления

Уважаемый Александр Владимирович!

Специалистами нашей компании рассмотрен направленный Вами в наш адрес проект межгосударственного стандарта ГОСТ «Крепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Общие технические условия».

Основываясь на нашем многолетнем опыте по проектированию и производству систем рельсовых креплений, а также на положительных результатах эксплуатационной работы в реальных условиях в различных климатических зонах и различных условиях, направляем Вам наши замечания и предложения.

Приложение:

Предложения по внесению изменений в проект межгосударственного стандарта ГОСТ «Крепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Общие технические условия» на 3 листах.



Заместитель генерального
директора

М.П.Политыко

Исп. Петров А.В.
+7-495-308-92-10

Рисунок Д.1 – Письмо № 42-02/17 от 14.02.2017

Предложения компании ООО «Фоссло Бан- унд Феркертехник» по внесению изменений в проект межгосударственного стандарта ГОСТ «Скрепление рельсового промежуточного железнодорожного пути. Общие технические условия».

Таблица 1 Изменения

№ п/п	Предыдущая версия	Предложение	Примечание (Обоснование)
1	<p>2</p> <p>4 Классификация Скрепления подразделяют по типу конструкции, категории применения, климатическому исполнению и коррозионной стойкости покрытия: а) по типу конструкции: 1) вид прикреплениа: - нераздельное прикреплениа, при котором подкладкa к опоре и релъе к подкладке прикреплениаются одними и теми же прикреплителями (НП); - раздельное прикреплениа, при котором подкладкa к опоре и релъе к подкладке прикреплениаются различными прикреплителями (РП); - смешанное прикреплениа, при котором релъе через подкладкa непосредственно крепится к опорам, кроме того, подкладкa дополнительно крепится к опорам (СП); 2) наличие подкладок: - подкладочное (ПП); - бесподкладочное (БП); 3) тип прикреплителя к опоре: - анкеровое (АН); - шурупно-диабельное (ШД); - болтовое (БЛ); б) по категориям (см. приложение А); в) по климатическим зонам эксплуатации: 1) регион с температурными интервалами менее 110 °С (А); 2) регион с температурными интервалами более</p>	<p>3</p> <p>4 Классификация Скрепления подразделяют по климатическому исполнению и коррозионной стойкости: а) по климатическим зонам эксплуатации: 1) регион с температурными интервалами менее 110 °С (А); 2) регион с температурными интервалами более или равными 110 °С (Б); б) по коррозионной стойкости: 1) антикоррозийное покрытие (АП); 2) без антикоррозийного покрытия (БА).</p>	<p>4</p> <p>Классификация рельсовых скреплений по типу конструкции носит факультативный характер и не несёт смысловой нагрузки в ГОСТе. Нецелесообразно классифицировать скрепления по категории линий, т.к., ввиду его действия на территории стран СНГ, классификация линий на железных дорогах может отличаться от классификации установленной на ОАО «РЖД».</p>

Рисунок Д.2 – Письмо № 42-02/17 от 14.02.2017

№ ш/п	Предыдущая версия	Предложение	Примечание (Обоснование)
1	<p>2</p> <p>или равными 110 °С (Б); г) по коррозионной стойкости: 1) антикоррозийное покрытие (АП); 2) без антикоррозийного покрытия (БА).</p>	<p>3</p>	<p>4</p>
2	<p>5.2.5 Вертикальная статическая жёсткость в узле скрепления должна быть равной: - от 50 до 100 МН/м для I категории скреплений; - от 100 до 200 МН/м для II и III-1 категорий скреплений; - от 150 до 200 МН/м для III-2 и IV категорий скреплений (укладку скрепления с вертикальной жёсткостью более 200 МН/м выполняют по требованию заказчика). Вертикальную статическую жёсткость в узле скрепления определяют методом контроля, установленным в 7.6.</p>	<p>5.2.5 Вертикальная статическая жёсткость в узле скрепления должна быть равной: - от 30 до 150 МН/м для линий I категории; - от 85 до 200 МН/м для линий II и III-1 категорий; - от 150 до 300 МН/м для линий III-2 и IV категорий (укладку скрепления с вертикальной жёсткостью более 300 МН/м выполняют по требованию заказчика). Вертикальную статическую жёсткость в узле скрепления определяют методом контроля, установленным в 7.6.</p>	<p>Мировой опыт показывает, что оптимальная расчётная статическая жёсткость узла рельсового скрепления, применённого в конструкции безбалластного пути, равна 30 МН/м. Т.к. в перспективах строительства ВСМ Москва-Казань предусматривается безбалластная конструкция пути, то имеет смысл учесть снижение параметра до 30 МН/м.</p>
3	<p>5.3 Маркировка В маркировке скрепления указывают: наименование скрепления в соответствии с комплектом конструкторской документации и условное обозначение согласно классификации, установленной в разделе 4. Пример маркировки скрепления (ЖБР-65)НП:БП:ШД:Ш-1:Б:А, где ЖБР-65 – наименование скрепления; НП – нераздельное прирелпление; БП – бесподкладочное; ШД – шурупно-двобельное; Ш-1 – категория (согласно приложению А); Б – климатическая зона; АП – антикоррозийная обработка. На каждую упаковку скреплений наносят ярлык с его условным обозначением (метод контроля 7.12). Маркировка элементов скрепления должна</p>	<p>5.3 Маркировка Маркировка элементов скрепления должна содержать маркировку, обеспечивающую идентификацию элементов, в том числе: - наименование предприятия-изготовителя; - обозначение стандарта или иного нормативного документа, по которому изготовлен и принят элемент скрепления; - дату изготовления; - знак обращения на рынке.</p>	<p>Маркировка согласно установленной в разделе 4 классификации является избыточной и нецелесообразна, т.к. несёт дополнительные расходы, что в свою очередь влечёт на удорожание готовой продукции.</p>

Рисунок Д.3 – Письмо № 42-02/17 от 14.02.2017

№ п/п	Предыдущая версия	Предложение	Примечание (Обоснование)
1	2 содержать маркировку, обеспечивающую идентификацию элементов, в том числе: - наименование предприятия-изготовителя; - обозначение стандарта или иного нормативного документа, по которому изготовлен и принят элемент скрепления; - дату изготовления; - знак обращения на рынке.	3	4
4	6 Правила приёма		Пояснить, каким образом будут осуществляться приёмо-сдаточные испытания узла скрепления при комплектной и поэлементной поставках.



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**РОССИЙСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА
РУТ (МИИТ)**

ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, ГСП-4, 127994
Тел./факс: (495) 681-13-40, e-mail: info@rut-miit.ru
ИНН/КПП 7715027733/771501001
ОГРН 1027739733922

27.05.2022 № 073/7599
На № _____ от _____

Исполнительному директору
АО «ВНИИЖТ»

К.П. Шенфельду

Уважаемый Константин Петрович!

В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года предполагается строительство высокоскоростной железнодорожной магистрали (далее ВСМ) Москва – Санкт-Петербург. Одним из проектных решений данной ВСМ является безбалластное верхнее строение пути. Необходимо отметить, что в техническом регулировании РФ отсутствует нормативно-правовая база, регламентирующая требования к рельсовым скреплениям, применяемым в безбалластных конструкциях пути.

АО «ВНИИЖТ» является разработчиком межгосударственного стандарта ГОСТ 32698-2014 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля». Исходя из вышеизложенного направляем Вам предложение по внесению дополнений в указанный межгосударственный стандарт касательно требований к рельсовым скреплениям для безбалластного верхнего строения пути.

Приложение: 1. Предложения «Требования к узлу рельсового скрепления безбалластной конструкции пути» на 2 л. в 1 экз.

Проректор

А.В. Савин

Исцова Алина Александровна
+7 (495) 684-40-77

Требования к узлу рельсового скрепления безбалластной конструкции пути

1. Силовые характеристики узла и его элементов

- 1.1 Усилие прижатия рельса к основанию не менее 20 кН;
- 1.2 Расчетное усилие от одной клеммы не менее 9 кН;
- 1.3 Монтажный упругий ход рабочих рукавов клеммы не менее 12 мм.

2. Испытания с приложением продольной нагрузки

- 2.1 Сопротивление продольному перемещению рельса не менее 14 кН.

3. Циклические испытания

3.1 Удерживающая способность узла скрепления при действии циклических нагрузок на базе 4 млн. циклов с частотой нагружения 4Гц. Угол приложения нагрузки 27°.

3.1.1 Остаточное перемещение головки рельса не более 3 мм;

3.1.2 Не допускается повреждений и выхода элементов скреплений;

3.1.3 Коэффициент изменения продольного сопротивления рельса не должен превышать 20%;

3.1.4 Коэффициент изменения вертикальной статической жесткости не должен превышать 25%;

3.1.5 Коэффициент изменения усилия прижатия рельса не должен превышать 20%;

3.2 Усталостные испытания элементов скрепления

3.2.1 Не допускается выхода прижимных деталей после приложения циклической нагрузки на базе 5 млн. циклов с амплитудой колебаний (-2,0/+0,5 мм);

3.2.2 После приложения 3 млн. циклов нагружения не должно быть повреждений упругих прокладок, необратимая деформация не должна превышать 10%, а изменение статической жесткости не должно превышать 20%.

4. Упругие характеристики узла скрепления

4.1 Вертикальная статическая жесткость узла рельсового скрепления должна находиться в диапазоне 16-27 кН/мм;

4.2 Изменение статической жесткости эластичных прокладок, эксплуатируемых в условиях низких температур (от -50 °С до +23°С), не должно превышать коэффициент 4;

5. Электрическое сопротивление

5.1 Электрическое сопротивление узла рельсового скрепления, кОм, не менее – 10.

6. Дополнительные требования

- 6.1 После проведения испытаний в солевом тумане длительностью 300 часов узлы крепления должны разбираться и собираться ручным монтажным инструментом без разрушения;
- 6.2 Сопротивление вырыванию замоноличенных и клеенных закладных элементов нагрузкой не менее 60кН в течение 3 мин. Отсутствие трещин, разрушений элементов рельсового крепления и зоны подрельсового основания;
- 6.3 Минимальный диапазон регулировки положения рельса в плане ± 5 мм с шагом 1мм;
- 6.4 Минимальный диапазон регулировки положения рельса в профиле от -4 мм до +26 мм с шагом 1мм.

Исполнители:

Петров Александр Владимирович



Михайлов Сергей Владимирович





МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**РОССИЙСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА
РУТ (МИИТ)**

ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, ГСП-4, 127994
Тел./факс: (495) 681-13-40, e-mail: info@rut-miit.ru
ИНН/КПП 7715027733/771501001
ОГРН 1027739733922

06.10.2022 № 073/12938

На № _____ от _____

Исполнительному директору
АО «ВНИИЖТ»

К.П. Шенфельду

Уважаемый Константин Петрович!

АО «ВНИИЖТ» является разработчиком межгосударственного стандарта ГОСТ 32698-2014 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля». Ранее Вам были направлены наши предложения по внесению дополнений в указанный межгосударственный стандарт (исх.№073/7599 от 27.05.2022). Настоящим письмом направляем Вам уточнённые предложения по внесению дополнений касательно требований к упругим характеристикам рельсовых скреплений для безбалластной конструкции пути.

Приложение: Предложения «Требования к упругим характеристикам узла рельсового скрепления безбалластной конструкции пути» на 1 л. в 1 экз.

Проректор

А.В. Савин

Исаева Алина Александровна
+ 7 (495) 684-40-77

Приложение №1 к исх. _____

**Требования к упругим характеристикам
узла рельсового скрепления
безбалластной конструкции пути**

- 1.1 Вертикальная статическая жесткость узла рельсового скрепления должна находиться в диапазоне 16-27 кН/мм;
- 1.2 Изменение статической жесткости эластичных прокладок, эксплуатируемых в условиях низких температур (от -50 °С до +23°С), не должно превышать коэффициент 4;
- 1.3 соотношение динамической жёсткости к статической жесткости эластичных прокладок, не должно превышать коэффициент:
- при температуре 0 °С – 2,0
 - при температуре -10 °С – 2,5
 - при температуре -20 °С – 3,0
 - при температуре -30 °С – 3,5
 - при температуре -40 °С – 5,0
 - при температуре -50 °С – 18,0

Исполнитель:

Петров Александр Владимирович



**Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение**



**«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)**

Бережовская наб., д. 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП - 3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

01.09.2022	W22050343	2022123431																																				
<i>Дата поступления (дата регистрации)</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>																																				
<table border="1"> <tr> <td> ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (или регистрации) принятия заявления </td> <td> РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № </td> <td> ВХОДЯЩИЙ № </td> </tr> <tr> <td colspan="3"> ДАТА ПЕРЕВОДА (аккривирован) (или из иностранного файла) </td> </tr> <tr> <td> <input type="checkbox"/> (186) интеллектуальной собственности (или в том числе интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) </td> <td colspan="2"> АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕВОДА (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) </td> </tr> <tr> <td> <input type="checkbox"/> (187) интеллектуальной собственности (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) </td> <td colspan="2"> АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕВОДА (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) </td> </tr> <tr> <td> <input type="checkbox"/> (188) интеллектуальной собственности (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) </td> <td colspan="2"> Телефон: 79712528564 Факс: Адрес электронной почты: info@fips@rosintel.com </td> </tr> <tr> <td> <input type="checkbox"/> (189) интеллектуальной собственности (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) </td> <td colspan="2"> АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕВОДА (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) </td> </tr> <tr> <td align="center"> ЗАЯВЛЕНИЕ в выдаче патента Российской Федерации на изобретение </td> <td align="center" colspan="2"> В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережовская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация </td> </tr> <tr> <td colspan="3"> 54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ Российское название </td> </tr> <tr> <td> (71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование (сокращенное) должно совпадать с тем, каким записано в Едином государственном реестре юридических лиц) Публичное акционерное общество «Сверсталь» (ПАО «Сверсталь») (Public shareholding company «Sverstal» (PAO «Sverstal»)) 162508, Вологодская обл., г. Череповец, ул. Мера, 30 (162608, Vologodskaya obl., g. Cherepovets, ul. Mera, 30) </td> <td align="center" colspan="2"> ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1023501230801 ИНН 597550001 ИНН 5328000097 СНИЛС ДОКУМЕНТ (серия, номер) КОД СТРАНЫ (если он отличается от RU) </td> </tr> <tr> <td> <input type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> юридическим заказчиком исполнитель работ (укажите наименование) </td> <td colspan="2"> <input type="checkbox"/> исполнитель работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> гражданскому контракту, заказчик работ (укажите наименование) </td> </tr> <tr> <td> Контракт от №: </td> <td colspan="2"> (71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное) </td> </tr> <tr> <td colspan="3"> ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ </td> </tr> </table>			ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (или регистрации) принятия заявления	РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №	ВХОДЯЩИЙ №	ДАТА ПЕРЕВОДА (аккривирован) (или из иностранного файла)			<input type="checkbox"/> (186) интеллектуальной собственности (или в том числе интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕВОДА (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)		<input type="checkbox"/> (187) интеллектуальной собственности (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)	АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕВОДА (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)		<input type="checkbox"/> (188) интеллектуальной собственности (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)	Телефон: 79712528564 Факс: Адрес электронной почты: info@fips@rosintel.com		<input type="checkbox"/> (189) интеллектуальной собственности (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)	АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕВОДА (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)		ЗАЯВЛЕНИЕ в выдаче патента Российской Федерации на изобретение	В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережовская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация		54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ Российское название			(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование (сокращенное) должно совпадать с тем, каким записано в Едином государственном реестре юридических лиц) Публичное акционерное общество «Сверсталь» (ПАО «Сверсталь») (Public shareholding company «Sverstal» (PAO «Sverstal»)) 162508, Вологодская обл., г. Череповец, ул. Мера, 30 (162608, Vologodskaya obl., g. Cherepovets, ul. Mera, 30)	ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1023501230801 ИНН 597550001 ИНН 5328000097 СНИЛС ДОКУМЕНТ (серия, номер) КОД СТРАНЫ (если он отличается от RU)		<input type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> юридическим заказчиком исполнитель работ (укажите наименование)	<input type="checkbox"/> исполнитель работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> гражданскому контракту, заказчик работ (укажите наименование)		Контракт от №:	(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное)		ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ		
ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (или регистрации) принятия заявления	РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №	ВХОДЯЩИЙ №																																				
ДАТА ПЕРЕВОДА (аккривирован) (или из иностранного файла)																																						
<input type="checkbox"/> (186) интеллектуальной собственности (или в том числе интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕВОДА (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)																																					
<input type="checkbox"/> (187) интеллектуальной собственности (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)	АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕВОДА (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)																																					
<input type="checkbox"/> (188) интеллектуальной собственности (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)	Телефон: 79712528564 Факс: Адрес электронной почты: info@fips@rosintel.com																																					
<input type="checkbox"/> (189) интеллектуальной собственности (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)	АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕВОДА (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности) (или интеллектуальной собственности)																																					
ЗАЯВЛЕНИЕ в выдаче патента Российской Федерации на изобретение	В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережовская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация																																					
54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ Российское название																																						
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование (сокращенное) должно совпадать с тем, каким записано в Едином государственном реестре юридических лиц) Публичное акционерное общество «Сверсталь» (ПАО «Сверсталь») (Public shareholding company «Sverstal» (PAO «Sverstal»)) 162508, Вологодская обл., г. Череповец, ул. Мера, 30 (162608, Vologodskaya obl., g. Cherepovets, ul. Mera, 30)	ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1023501230801 ИНН 597550001 ИНН 5328000097 СНИЛС ДОКУМЕНТ (серия, номер) КОД СТРАНЫ (если он отличается от RU)																																					
<input type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> юридическим заказчиком исполнитель работ (укажите наименование)	<input type="checkbox"/> исполнитель работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> гражданскому контракту, заказчик работ (укажите наименование)																																					
Контракт от №:	(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное)																																					
ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ																																						
Общее количество документов в листах	26	Лито, зарегистрировавшее документы																																				
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)		Автоматизированная система																																				
Количество платёжных документов																																						
<i>Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/registers-web</i>																																						

Рисунок Е.2 – Заявка на патент № 2022123431