

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Курзина Елена Геннадьевна

Совершенствование демпфирующих упругих полимерных элементов
ходовых частей грузового вагона

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация

05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Филиппов Виктор Николаевич

Научный руководитель

член-корреспондент Российской академии наук,

доктор технических наук

Колмаков Алексей Георгиевич

Москва 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	14
1.1 Обзор работ по совершенствованию ходовых частей грузовых вагонов и применяемых в них амортизирующих элементов	14
1.2 Обзор работ по исследованию взаимодействия пути и подвижного состава	33
1.3 Обзор работ по совершенствованию амортизирующих элементов рельсовых креплений железнодорожного пути	37
1.4 Применение полимерных композиционных материалов для снижения динамических разночастотных колебаний и вибраций	56
1.5 Современные способы оптимизации свойств полимерных композиционных материалов.....	65
Выводы по первому разделу. Постановка целей и задач исследований....	76
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОМАССОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (ВАГОН – ПУТЬ).....	80
Выводы по второму разделу.....	83
3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УПРУГО-ГИСТЕРЕЗИСНЫХ СВОЙСТВ ДЕМПФИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ (ЭЛАСТОМЕРОВ)	85
3.1 Определение показателей (оценочных характеристик) упруго-гистерезисных свойств демпфирующих материалов.....	85
3.2 Метод экспериментальных исследований упруго-гистерезисных характеристик материалов	90
3.3 Выбор материалов для исследования упругогистерезисных свойств амортизаторов железнодорожного транспорта.....	93
Выводы по четвертому разделу	98

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АМОРТИЗАТОРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА	99
4.1 Влияние геометрических параметров на упруго-гистерезисные свойства амортизаторов.....	99
4.2 Влияние типа демпфирующего материала на упруго-гистерезисные свойства амортизаторов.....	116
Выводы по четвертому разделу	130
5 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ АМОРТИЗАТОРОВ ТИПА «СЭНДВИЧ» НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЯВЛЯЮЩИХСЯ ЕГО КОМПОНЕНТАМИ. 133	
5.1 Теоретические основы проектирования «сэндвичей»	133
5.2 Выбор исходных компонентов и вариантов сборки	136
5.3 Результаты статических и динамических испытаний компонентов «сэндвича».....	137
5.4 Анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований сэндвичей. Определение сходимости применяемых методов.....	140
Выводы по пятому разделу	159
6 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА УПРУГО-ГИСТРЕЗИСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ АМОРТИЗАТОРОВ И ЕЕ АПРОБАЦИЯ.....	160
6.1 Методика выбора упруго-гистрезисных характеристик материалов сэндвичей для проектирования амортизаторов	160
6.2 Апробация методики выбора упруго-гистрезисных характеристик материалов сэндвичей на примере проектирования прокладок рельсовых скреплений железнодорожного пути	164
Выводы по шестому разделу	175

7 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ВЫБОРА УПРУГО-ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АМОРТИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ МНОВОВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ МНОГОМАССОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (ВАГОН – ПУТЬ)	177
7.1 Анализ результатов многовариантных расчетов многомассовой колебательной системы (вагон – путь) с использованием вариации упруго-гистерезисных свойств одного их элементов.....	177
7.2 Оптимизация динамических процессов общей многомассовой колебательной системы (вагон – путь) путем применения сэндвич-амортизаторов	190
Выводы по седьмому разделу	192
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	194
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	198
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	200
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	203

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Этап динамичного развития железнодорожного транспорта, определяемый Стратегией развития до 2030 г., связан с расширением полигона эксплуатации для создания новых точек экономического роста в стране, повышением провозных и пропускных способностей участков дорог, увеличением маршрутной скорости движения поездов. Причем, грузопотоки в значительной степени переориентированы к портам Северо-Западного и Восточносибирского регионов, районы с резко-континентальным климатом.

Увеличение веса и скоростей движения поездов неразрывно связано с решением задач улучшения динамических качеств вагонов и локомотивов во взаимодействии с верхним строением железнодорожного пути. При этом обеспечить прочность и устойчивость подвижного состава против схода с рельсов в различных климатических зонах необходимо при минимизации эксплуатационных расходов. Анализ надежности и работоспособности общей системы возможен на основе проведения многовариантных расчетов математических моделей взаимодействия подвижного состава и пути, составленных с использованием экспериментальных данных. По результатам анализа определяют оптимальные значения параметров системы и отдельных элементов.

Для реализации требований Стратегии многие отечественные научно-исследовательские и конструкторские организации занимаются созданием инновационного грузового вагона с новыми, прогрессивными моделями тележек, а также модернизацией существующего парка. Причем, в условиях интенсивного роста объема перевозок необходимо предусматривать дополнительные меры по снижению износа основных узлов и деталей с учетом дальнейшего увеличения вибронагруженного состояния ходовых частей.

Одним из наиболее экономически эффективных решений данной проблемы является применение дополнительных амортизирующих элементов из материалов

с повышенными демпфирующими свойствами, способными работать в широком диапазоне климатических температур.

В настоящее время полимерные композиционные материалы достаточно широко используются в различных отраслях промышленности. Такая популярность связана с возможностью получения композитов, обладающих комплексом необходимых эксплуатационных свойств, благодаря развитию полимерной химии и методов изучения структуры и морфологии полимерных матриц. Наиболее эффективным вариантом достижения поставленной задачи является направленное регулирование взаимодействия в системе полимерное связующее - полимерный наполнитель, путем химической или физической модификации химических волокон и полимерных связующих, применения новых армирующих систем.

В современном материаловедении перспективным направлением также является создание «гибридов» - материалов, состоящих из нескольких, часто совершенно разнородных, компонентов, которые дают сочетание нужных свойств во вновь созданном материале. При этом главное внимание уделяют микроструктуре и взаимному расположению отдельных компонентов, то есть внутренней архитектуре гибрида, которая управляет свойствами получаемого материала.

Альтернативным способом получения необходимых эксплуатационных свойств является создание эффективных многослойных композиций из различных совокупностей материалов, так называемых «сэндвичей».

Технические требования, предъявляемые к современным конструкциям амортизаторов для железнодорожного транспорта, обусловлены условиями их эксплуатации, которые подразумевают надежную работу при статических, циклических и ударных нагрузках, при низких и высоких температурах, в контакте с окружающей средой, что во многом зависит от типа демпфирующего материала.

Следует отметить, что, несмотря на большой опыт исследования физико-механических свойств полимерных композиционных материалов,

малоизученными остаются вопросы выбора упруго-гистерезисных характеристик, а также моделирования их в статических и динамических расчетах.

Из вышеизложенного вытекает **актуальность** работы, которая заключается в необходимости разработки эффективных амортизаторов ходовых частей грузового вагона путем направленного регулирования структуры и свойств демпфирующих полимерных материалов для удовлетворения комплексу эксплуатационных требований.

Степень разработанности темы исследования. Изучением сложных динамических процессов, протекающих в вагоне и поезде при движении по железнодорожному пути, на протяжении долгих лет занимались многие российские ученые, такие как, А.П. Бородин, А.М. Годыцкий-Цвирко, Н.Е. Жуковский, В.И. Лопушинский, Б.Б. Сушинский, Н.П. Петров, П.М. Супруненко, Г.М. Шахунянц, С.П. Тимошенко, В.Б. Медель, А.Я. Коган, а также зарубежные – П.Аппель, Г. Марье, Х.Хейман, Ж. Калкер, Крейг Р.Р. и др.

Основной задачей исследований являлось определение оптимальных параметров колебательной системы «вагон-путь» (массы, жесткости, геометрических размеров составляющих элементов), при которых снижаются динамические силы, колебания и вибрации, отрицательно влияющие на конструкции подвижного состава и пути.

Тенденция увеличения осевых нагрузок и скоростей движения вызвала необходимость применения дополнительных упругих полимерных элементов в узлах грузовых вагонов, а также совершенствования амортизирующих элементов, расположенных под рельсом.

В результате в конструкциях вагонов появились упругие резиновые прокладки в местах опор амортизаторов, между надрессорной балкой и боковыми рамами, скользуны с полиуретановыми прокладками, износостойкие пластины в подпятниковом узле, упругие скользуны с эластомерной пружиной внутри литого износостойкого корпуса, адаптеры с полиуретано-металлическими амортизаторами, эластомерные пружины и другие технические решения,

разработкой которых занимались многие отраслевые и академические институты: ВНИИЖТ, ПГУПС, МИИТ, ВНИКТИ и ряд других учебно-научных организаций.

Вопросы оптимизации упругих характеристик рельсовых скреплений за счет варьирования геометрическими параметрами и материалом рассматривали ученые МИИТ, ВНИИЖТ, СГУПС, а также подразделений ОАО «РЖД».

В настоящее время широкое распространение получили численные методы моделирования динамики подвижного состава при движении по железнодорожному пути. Основы таких методов заложены в работах В.Д. Хусидова, Ю.С. Ромена, В.Н. Филиппова, Г.И. Петрова, Д.Ю. Погорелова, В.Ф. Ушкалова, А.А. Хохлова, Г.П. Бурчака, В.С. Коссова, Т.А. Тибилова, П.К. Мюллера, Ю.П. Бороненко, А.М. Орловой.

Существующие программно-вычислительные комплексы позволяют решать задачи по прогнозированию, оптимизации, оценке чувствительности к изменению условий эксплуатации железнодорожных конструкций и их элементов. Главные трудности при использовании численных методов, сводятся к построению достаточно адекватных математических моделей, описывающих процессы взаимодействия подвижного состава на пути.

Эффективность работы амортизирующих полимерных элементов железнодорожных конструкций во многом зависит от типа применяемого материала и возможностью управления его свойствами.

Получение комплекса необходимых свойств возможно путем модификации существующих полимерных материалов, которая позволяет сохранить полезные свойства, устранить нежелательные и одновременно добавить новые.

Большой вклад в изучении различных направлений модификации внесли С.Д. Разумовский, А.М. Кочнев, Г.Е. Заиков, О.И. Тужиков, А.Н. Озерин, С.Г. Калганова, Д.О. Завражин, Н.С. Ениколопов, А.А. Попов, Ц. Сяопин, Х.К. Кву, Р. Дагостино и другие.

Наибольшее распространение в настоящее время получила композитная модификация: образование двух или многокомпонентных смесей полимеров с

неорганическими или органическими модифицирующими добавками определенной геометрии (волокна, чешуйки, шарики и гранулы)

Другим перспективным методом модификации свойств полимеров в настоящее время является разработка гибридных материалов и создание «сэндвичей» из различных материалов. Смешение (физическое и механическое) разнородных по свойствам полимеров дает возможность получать материалы, сочетающие в себе свойства всех компонентов системы.

Однако современные исследования направлены в основном на улучшение физико-механических свойств полимеров (прочности, морозостойкости, маслобензостойкости и др.) и не затрагивают упруго-гистерезисные свойства при сжатии, являющиеся основными характеристиками работы амортизаторов для железнодорожного транспорта.

Цель и задачи исследования. Целью работы является оценка динамических процессов возникающих в многомассовой колебательной системе «вагон-путь», выбор типа и конструкции амортизирующего полимерного элемента на основе комплексного анализа упруго-гистерезисных свойств современных демпфирующих композиционных материалов, проведение многовариантных расчетов математической модели многомассовой колебательной системы для определения рациональных параметров проектируемых амортизирующих элементов.

Цель работы обуславливает необходимость решения следующих задач:

- разработать математическую модель многомассовой колебательной системы (вагон – путь) с учетом возможности аппроксимации упруго-гистерезисных характеристик реальных амортизирующих материалов и варьирования ими;
- разработать методы экспериментальных исследований упруго-гистерезисных характеристик амортизирующих материалов;
- провести экспериментальные исследования различных полимерных композиционных материалов для определения влияния конструктивных, физико-

химических, температурных параметров на упруго-гистерезисные свойства амортизаторов;

- разработать методику проектирования амортизирующих элементов;
- выполнить верификацию методики на основе многовариантных расчетов математической модели многомассовой колебательной системы (вагон – путь) и экспериментальных исследований для определения рациональных параметров амортизирующих элементов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработана математическая модель многомассовой системы «вагон-путь», позволяющая оценить эффективность предлагаемых решений для снижения динамической нагруженности элементов ходовых частей грузовых вагонов;
- получены экспериментальные характеристики упруго-гистерезисных свойств различных полимерных композиционных материалов при положительных и отрицательных температурах в зависимости от типа материала и его габаритных размеров;
- разработаны методы экспериментальных исследований упруго-гистерезисных свойств полимерных композиционных материалов;
- разработана методика выбора упруго-гистерезисных характеристик материалов сэндвичей для проектирования амортизаторов и проведена ее апробация;
- предложены рациональные параметры амортизирующих элементов для снижения динамических усилий в элементах ходовых частей грузового вагона на основе многовариантных расчетов математической модели многомассовой колебательной системы (вагон – путь) и экспериментальных исследований.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработана математическая модель многомассовой колебательной системы «вагон-путь» и программа расчета, которая позволяет оценить эффективность конструкций и материалов амортизирующих полимерных элементов;

- выбраны материалы для конструкций амортизаторов, способные эффективно рассеивать кинетическую энергию динамических колебаний подвижного состава в диапазоне температур эксплуатации;
- разработаны методы экспериментальных исследований упруго-гистерезисных свойств полимерных композиционных материалов, применение которых позволяет выбрать соответствующий эксплуатационным требованиям материал или группу материалов для проектирования сэндвичей;
- разработана методика выбора упруго-гистерезисных характеристик материалов сэндвичей для проектирования амортизаторов и проведена ее апробация;
- предложены сэндвичи, позволяющие оптимизировать динамические процессы в многомассовой колебательной системе «вагон-путь»;
- получен патент на изобретение № 2695944 «Анкерное рельсовое крепление, подклепная подкладка и амортизирующая подрельсовая прокладка анкерного рельсового крепления (варианты)».

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось проведением экспериментальных исследований упруго-гистерезисных свойств различных полимерных композиционных материалов на основе анализа существующих методов и подходов, а также расчетных методов, базирующихся на классических уравнениях аналитической механики (Даламбера-Лагранжа), аналитических и численных методов интегрирования дифференциальных уравнений, математической статистики и теории вероятности, а также анализе результатов отечественных и зарубежных научно-исследовательских работ по данной тематике.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель многомассовой системы «вагон-путь» для оценки эффективности применения различных полимерных композиционных материалов амортизирующих элементов;

- зависимости упруго-гистерезисных свойств различных полимерных композиционных материалов от температуры, типа материала и его габаритных размеров;
- методика определения и оценочные показатели упруго-гистерезисных свойств амортизаторов;
- зависимости реактивных сил и отклонений в элементах многомассовой колебательной системы (вагон – путь) от типа материала, конструкции амортизатора и температурного воздействия;
- методика выбора рациональных упруго-гистерезисных характеристик материалов сэндвич-амортизаторов и результаты ее апробации;
- разработка технических решений для снижения динамических усилий в элементах ходовых частей грузового вагона и повышения безопасности движения поездов.

Степень достоверности и апробация результатов и основных выводов подтверждается использованием поверенных средств измерений и аттестованного испытательного оборудования, апробированных и широко используемых в инженерной практике программных продуктов, достаточным объемом экспериментальных данных, использованием классических положений теории динамических колебаний вагона, теории вероятности и математической статистики, достаточной сходимостью полученных результатов с имеющимися данными российских и зарубежных исследователей.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждены и одобрены: на IX, XI, XIII, XVII научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов» в 2008, 2010, 2012, 2016 годах, Москва, МГУПС (МИИТ); на заседаниях кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Института транспортной техники и систем управления, Москва, РУТ (МИИТ) в 2018 и 2019 годах; на научно-технической конференции с Международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», Москва, МГУПС (МИИТ), 2015 году; на VII, VIII Международных конференциях «Деформация и

разрушение материалов и наноматериалов» в 2017 и 2019 годах, Москва, ИМЕТ РАН; на Международных Научных чтениях им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов», Москва, ИМЕТ РАН в 2018 году; на 19-том Международном научно-техническом семинаре «Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» г. Киев, АТМ Украины, в 2019 году; на 19-й Международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий», Киев, АТМ Украины в 2019 году, на International conference «Materials science of the future: research, development, scientific training», Nizhny Novgorod, Russia в 2019 году.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 23 печатных работах, в том числе в 7 изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации и 2 изданиях, индексируемых и реферируемых в Academic OneFile, Astrophysics Data System (ADS), ChemWeb, EI-Compendex, Gale, Google Scholar, INIS Atomindex, INSPEC, OCLC, SCImago, SCOPUS, Summon by Serial Solutions.

Получен патент на изобретение № 2695944.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 228 страницах в том числе: страниц 192 основного текста, 88 рисунка, 25 таблиц. Список литературы содержит 225 наименования.

1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1 Обзор работ по совершенствованию ходовых частей грузовых вагонов и применяемых в них амортизирующих элементов

Тенденция увеличения осевых нагрузок и скоростей движения грузовых вагонов это закономерное развитие железнодорожной отрасли не только в нашей стране, но и за рубежом. Основными критериями модернизации являлись: улучшение плавности хода, показателей долговечности и безопасности движения, а также снижение воздействия на железнодорожный путь.

Повышение осевых нагрузок, скоростей движения, уменьшение динамических воздействий на перевозимые грузы и путевую инфраструктуру, в значительной мере отражаются на ходовых частях вагонов.

Следует отметить, что наиболее интенсивному совершенствованию подвергались тележки вагонов, особенно такие узлы, как рессорное подвешивание, буксовые узлы и фрикционные элементы.

Одной из первых отечественных модификаций двухосной тележки с литыми боковыми рамами является модификация МТ-50 (рисунок 1.1) [1-3], которая заменила поясные типы тележек, рессорный комплект которых состоял из 4-6 двухрядных пружин, а позднее – из четырех двойных пружин и одной эллиптической. Применение комбинированного рессорного подвешивания позволило значительно уменьшить колебания вагона в вертикальном направлении. Однако установка листовой рессоры препятствовала полному использованию поперечной упругости пружин для смягчения горизонтальных поперечных толчков, вследствие чего плавность хода тележки в горизонтальном направлении ухудшилась. Также тележки МТ-50 имели малый статический прогиб и малую величину относительного трения, что обуславливало высокие значения динамических перегрузок и ограничение скорости движения до 80 км/ч.

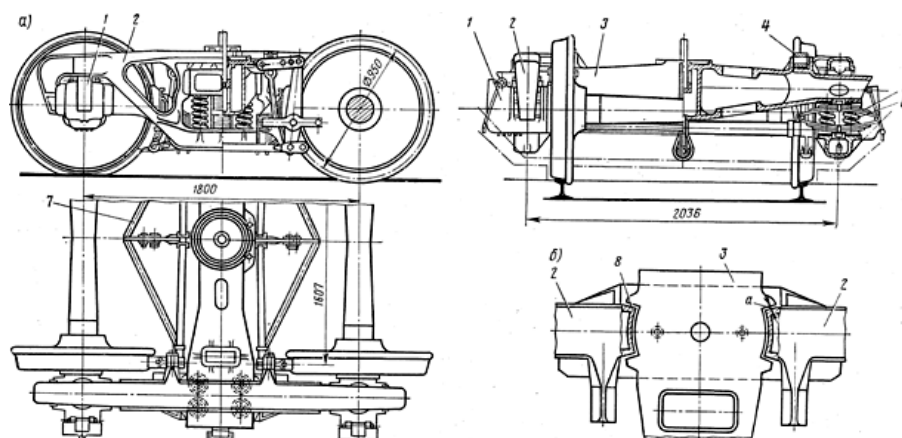


Рисунок 1.1 – Тележка МТ-50

В связи с чем, Уральским вагоностроительным заводом совместно с ЦНИИ МПС была создана новая усовершенствованная тележка ЦНИИ-ХЗ (18-100) (рисунок 1.2) [1-3]. Тележка имела одну ступень подвешивания – центральную, состоящую из 7 двухрядных пружин и фрикционного клинового гасителя колебаний (по два клина на каждую боковую раму).

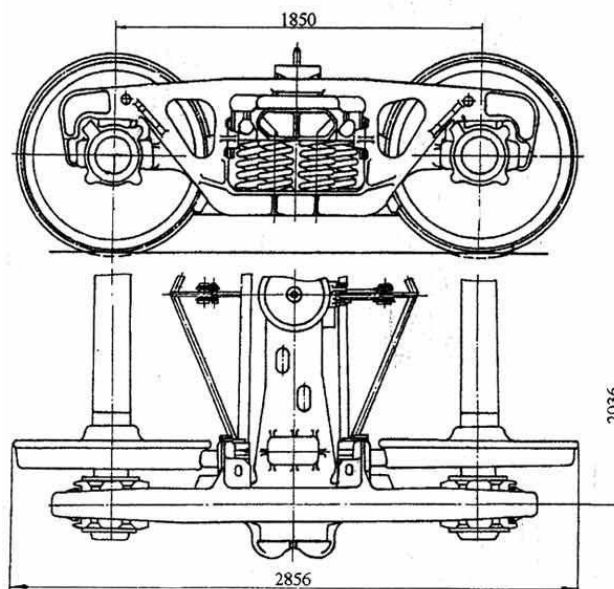


Рисунок 1.2 – Тележка ЦНИИ-ХЗ (18-100)

Однако при поездных испытаниях были выявлены некоторые конструкционные и технологические недостатки: смещение клиньев

фрикционных амортизаторов, образование в них трещин от углов отверстий в боковых стенках и переходящие на наклонную рабочую поверхность, смятие боковых поверхностей с образованием заусенцев.

В последующие годы на Уральском вагоностроительном заводе проведена существенная доработка конструкции тележки ЦНИИ-ХЗ (18-100) путем улучшения технологии изготовления, подбора износостойких трущихся пар, конструктивного улучшения отдельных узлов.

С 1956 года грузовые вагоны оборудуют тележками ЦНИИ-ХЗ-О, рессорный комплект которой состоял из двухрядных пружин и клиновых гасителей колебаний. Статический прогиб рессорных комплектов составил 45-48 мм, а коэффициент относительного трения 8-10%, что обеспечивало скорость движения грузовых поездов до 120 км/ч по железнодорожному пути с хорошим содержанием.

Однако недостатками тележки ЦНИИ-ХЗ-О являлись малый прогиб рессорного подвешивания порожнего вагона или с малой загрузкой, приводящий к снижению запаса устойчивости при скоростях движения более 100 км/ч, значительный вес неподрессоренных частей и, как следствие, увеличение динамического воздействия на путь и повышенный износ гребней колес, отсутствие противоюзной системы, трудоемкость ремонта.

В 1955-56г.г. Уральским вагоностроительным заводом (УВЗ) спроектированы 2-осные тележки с двойным рессорным подвешиванием (УВЗ-1, УВЗ-2) и значительно сниженным весом неподрессоренных частей (рисунок 1.4) [4]. Однако скорость движения грузовых экипажей с данными тележками ограничивалась 80 км/ч, поэтому впоследствии проведены работы по их уточнению и созданию новых модификаций: УВЗ-3, УВЗ-3А, УВЗ-4, УВЗ-5, УВЗ-6 (рисунок 1.3) [4, 5].

Разработанная в 1959 г. тележка УВЗ-3А имела Н-образную раму, одинарное надбуксовое подвешивание, тормозную систему с односторонним нажатием колодок, а также предусматривала возможность регулировки зазоров в челюстях установкой прокладок. Рессорное подвешивание осуществлено в двух

вариантах (типа УВЗ и конструкции Гуляева, различающиеся по конструкции фрикционного амортизатора).

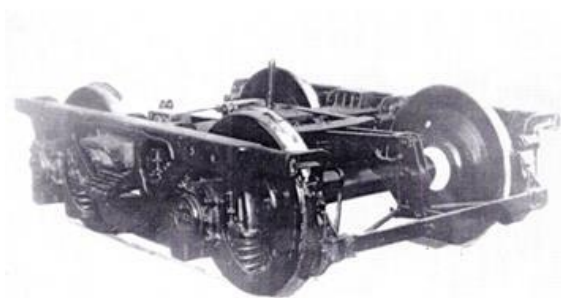
В груженом режиме работы тележки УВЗ-3А показали лучшие, чем тележки ЦНИИ-ХЗ-О динамические (ходовые) качества, а в порожнем режиме по уровню боковых сил – равноценные результаты. Однако вертикальная динамика для 9-ти тонного и порожнего режимов оказалась хуже, чем тележки ЦНИИ-ХЗ-О, вследствие неравномерного загрузки рессорных комплектов и амортизаторов трения.

Амортизаторы конструкции Гуляева показали значительно худшие результаты, чем амортизаторы УВЗ, поэтому не были рекомендованы к применению.

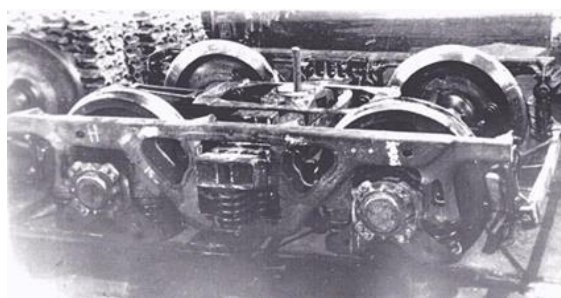
Другим направлением повышения эксплуатационной надежности тележек ЦНИИ-ХЗ-О являлось ограничение взаимных перемещений надрессорной балки и фрикционных клиньев по наклонным поверхностям для увеличения плеча приложения сил трения и момента сопротивления перекосу рамы тележки в плане. С этой целью Абашиним В.В. был предложен пространственный фрикционный клин, что привело к увеличению долговечности роликовых подшипников.

Данные модификации предусматривали амортизаторы со сравнительно стабильным коэффициентом относительного трения, увеличенный статический прогиб рессорных комплектов, а также установку в местах опор амортизаторов резиновых прокладок, для снижения динамических воздействий.

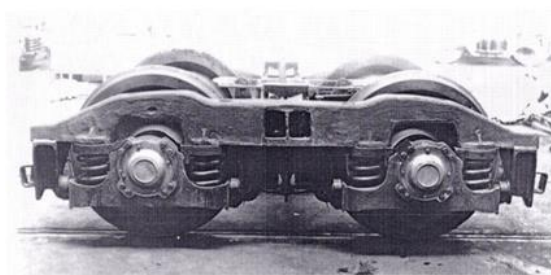
Тележка УВЗ-5 имела составную раму из двух литых боковин и шкворневой балки, а также двойное рессорное подвешивание: надбуксовое и центральное. Причем, центральное подвешивание состояло из двухрядных пружин и фрикционных амортизаторов переменного трения, а надбуксовое - из пружин, внутри которых располагались резино-металлические упругие элементы, что привело к увеличению статического прогиба.



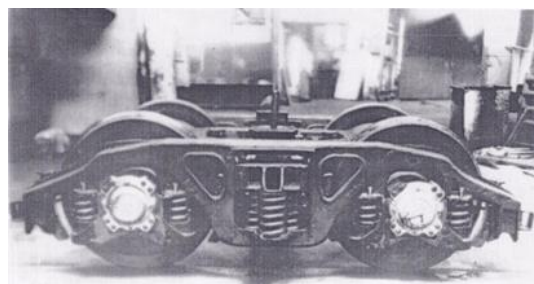
а)



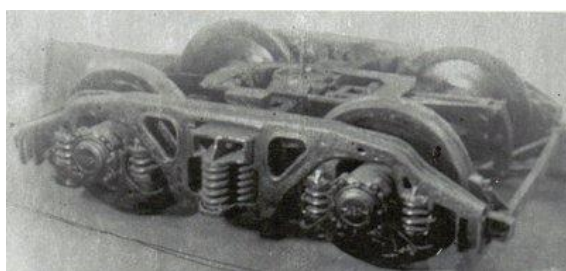
б)



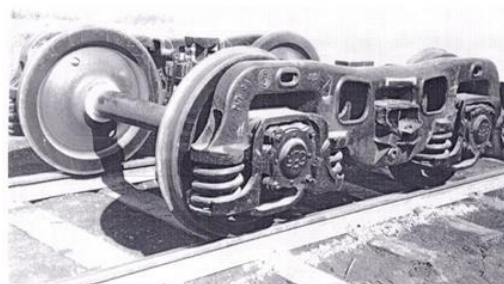
в)



г)



д)



е)

а) UBZ-1; б) UBZ-2; в) UBZ-3; г) UBZ-4; д) UBZ-5; е) UBZ-6

Рисунок 1.3 – Тележки UBZ

Динамические испытания грузовых вагонов с тележками данного типа показали уменьшение динамических перегрузок шкворневой балки и рессорных комплектов. По сравнению с тележкой ЦНИИ-ХЗ-О.

Однако тележка показала неудовлетворительные результаты по динамическим (ходовым) качествам (увеличение коэффициента динамической перегрузки шкворневой балки и рессорного комплекта, большой крен вагона при прохождении кривых на скоростях 80-90 км/ч, худшая плавность хода в порожнем режиме) и более сложна в конструкции.

В 1965 г. Уральским вагоностроительным заводом спроектированы 2-осные тележки УВЗ-С с центральным подвешиванием и УВЗ-6 – с надбуксовым подвешиванием. Модернизация рессорного комплекта тележки УВЗ-С заключалась в том, что вместо клиновой системы гашения колебаний применили по одному гасителю колебаний в каждом комплекте, имеющие по одной пружине с диаметром витка 24 мм. Для обеспечения достаточной горизонтальной жесткости ввели дополнительную упругую шарнирно-тяговую связь из четырех тяг. Крепление тяг к кронштейнам осуществлялось через резинометаллические элементы. Такие типы тележек были предназначены для эксплуатации со скоростями движения 120 км/ч.

Однако тележка УВЗ-С при ходовых испытаниях показала плохие динамические качества из-за недостаточного демпфирования колебаний в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Тележка УВЗ-6 имела двойное рессорное подвешивание: надбуксовое и центральное. В надрессорном проеме боковой рамы располагали по два резино-металлических элемента, ориентированных под углом 20° к горизонтальной плоскости. Для обеспечения возможности перемещений надрессорной балки в вертикальном направлении при порожнем режиме движения и под нагрузкой 9 т был предусмотрен зазор между опорными поверхностями надрессорной балки и боковой рамы. Регулировку зазора проводили набором прокладок соответствующей толщины. Гашение колебаний в вертикальной плоскости осуществлялось с помощью фрикционных гасителей в надбуксовом подвешивании с пластмассовыми поверхностями.

Применение упругой прокладки между надрессорной балкой и боковыми рамами уменьшил уровень ускорений порожнего вагона на 30-40%. Однако, в груженом режиме влияние упругих скользунов на колебательный процесс было незначительным.

С целью увеличения грузоподъемности вагонов на основе двухосной тележки 18-100 впоследствии были разработаны трехосная тележка 18-102 (УВЗ-9М) для грузовых вагонов грузоподъемностью 93-95 т и для специального

подвижного состава, а также четырехосная тележка 18-101 для восьмиосных вагонов грузоподъемностью 125-130 т, состоящая из двух тележек 18-100, связанных между собой соединительной балкой.

Тенденция применения различных упругих полимерных элементов в узлах тележек грузовых вагонов получила широкое распространение в дальнейших конструктивных модернизациях.

Уральским вагоностроительным заводом была разработана двухосная тележка модели 18-115 (рисунок 1.4) [3] с улучшенными динамическими качествами для специализированных грузовых вагонов, эксплуатирующийся со скоростью до 140 км/ч. Отличительными особенностями конструкции тележки 18-115 от стандартной тележки ЦНИИ-ХЗ-0 являлись повышенная гибкость рессорного подвешивания, использование схемы одновременного опирания кузова на тележку через подпятник и упруго-фрикционные скользуны с установкой резиновых элементов между боковыми рамами тележки и буксами. Применение в тележке упругих скользунов позволило вагону обеспечить более высокие ходовые качества за счет гашения боковых колебаний кузова и снижения виляющего движения тележки.

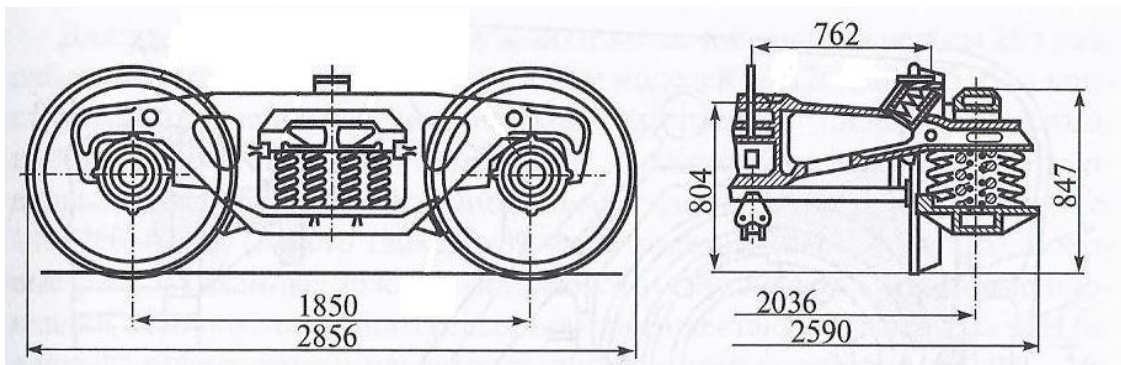


Рисунок 1.4 – Тележка модели 18-115

Для равномерного распределения нагрузок между роликами и повышению надежности работы буксового узла на потолочную часть корпуса буксы была установлена резиновая прокладка переменной толщины.

Рессорный комплект включал семь тройных пружин (во втором варианте двойных) и два клиновых гасителя колебаний. Коэффициент относительного трения гасителя колебаний увеличен и составляет 0,0785.

Скользуны-демпферы позволили снизить динамические нагрузки на шкворневые узлы и уменьшить влияние тележки.

В 2004 г. в результате проведенной комплексной модернизации массовой тележки модели 18-100 Уралвагонзавод разработал тележку 18-578 [3], предназначенную для осевой нагрузки 23,5 тс (рисунок 1.5).

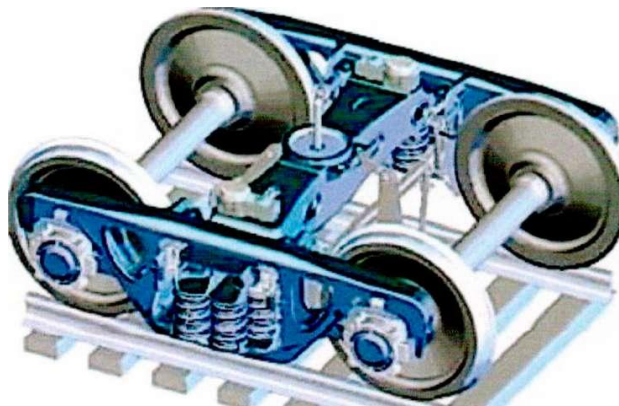


Рисунок 1.5 — Грузовая тележка 18-578

С целью повышения износостойкости узлов трения применены скобы на опорных поверхностях буксовых проемов, износостойкая чаша в подпятнике надрессорной балки, составная фрикционная планка, а также увеличена твердость колес.

Для улучшения динамики порожних и малозагруженных вагонов рессорное подвешивание тележки 18-578 выполнено из пружин меньшей, по сравнению с тележкой 18-100, жесткости. В тележке устанавливают съемные скользуны упруго-каткового типа, чугунные термоупрочненные клинья с уретановыми накладками.

В тележке 18-9771 (рисунок 1.6) [13] (аналог модели 18-578) используют упругие скользуны ОАО «Вагонмаш» по технологии фирмы Miner (США) с эластомерной пружиной внутри литого износостойкого корпуса.



Рисунок 1.6 – Тележка модели 18-9771

Проведенная модернизация, в том числе за счет применения упругих эластомерных элементов, позволила увеличить пробег до 500 тыс. км, а гарантийный срок эксплуатации до 4 лет.

Для увеличения грузоподъемности грузовых вагонов Уралвагонзавод разработал тележку модели 18-194 (рисунок 1.7) [16], эксплуатируемую на магистральных железных дорогах с осевой нагрузкой 245 кН/ось (25 тс/ось). Новая тележка имеет центральное подвешивание, выполненное из витых цилиндрических двухрядных пружин повышенной гибкости с билинейной характеристикой, что позволяет улучшить динамические качества вагона. Клиновой гаситель колебаний, встроенный в узел рессорного подвешивания, имеет износостойкие элементы, что позволяет уменьшить износы в этом узле и обеспечивает условия для поддержания стабильных параметров тележки в эксплуатации. Передача нагрузки от рамы тележки на буксовый узел происходит через сменную износостойкую накладку и адаптер.



Рисунок 1.7 – Тележка модели 18-194

В подпятниковом узле увеличенного диаметра также установлены износостойкая пластина. В тележке устанавливают скользуны упруго-каткового типа, применение которых снижает взаимные угловые перемещения кузова и тележки, колебания перевалки кузова, горизонтальных ускорений кузова, износ подпятника.

Таким образом, тележка модели 18-194 имеет существенные преимущества перед ранее созданной тележкой модели 18-100, направленные на улучшение динамических показателей и увеличение межремонтных пробегов.

Используя опыт американских железных дорог для осевых нагрузок 27 тс разработана тележка модели 18-9829 [6], рессорный комплект которой состоит из девяти двухрядных пружин и клиновых фрикционных гасителей колебаний. Уменьшая количество двухрядных пружин можно обеспечить унификацию тележек для осевых нагрузок 23,5 и 20 тс. Фрикционные клинья имеют пространственную конструкцию наклонных поверхностей. Боковая рама опирается на кассетные подшипники через сдвоенные резинометаллические элементы. На каждой надрессорной балке размещены две пары горизонтальных съемных скользунов для подкатки тележки под сочлененные вагоны-платформы грузоподъемностью 90 т и длиной по осям сцепления автосцепок 28,8 м.

Разработанная в настоящее время тележка модели 18-1711 имеет сварные раму и надрессорную балку с рессорными комплектами повышенной гибкости. Буксовый узел тележки выполнен с кассетным подшипником и адаптером

сложной формы, на который устанавливают полимерную прокладку, обеспечивающую упругодемпфирующую связь между колесными парами и боковыми рамами. В центральном рессорном подвешивании применены клиновые фрикционные гасители колебаний пространственного действия, на наклонных поверхностях которых установлены износостойкие полимерные прокладки. В подпятнике надрессорной балки установлена сменная вставка, которая обеспечивает повышенную износостойкость и ремонтпригодность данного узла.

Для вагонов нового поколения специалистами ОАО «ВНИКТИ» разработана тележка модели 26.В.503 (рисунок 1.8) [6] с осевой нагрузкой 25 тс/ось и рассчитанная на скорости движения до 120 км/ч.

В тележке предусмотрено одноступенчатое (центральное) рессорное подвешивание с фрикционными клиновыми гасителями колебаний. Опирающие боковых рам на колесные пары осуществляется через адаптеры с упругими элементами и кассетные буксы. Фрикционные клинья выполнены с уширенной рабочей поверхностью, на которую крепятся полиуретановые накладки. Тележка комплектуется упругими скользунами постоянного контакта.

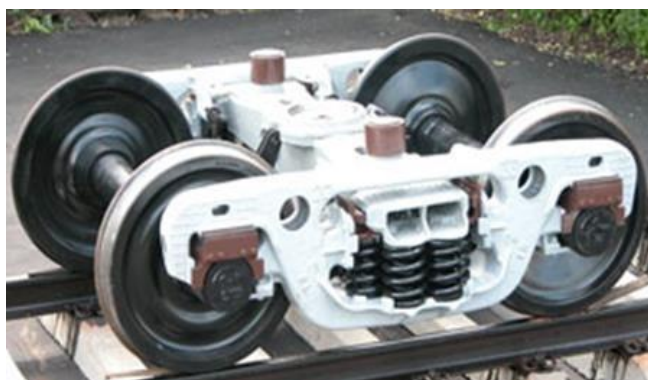


Рисунок 1.8 – Тележка модели 26.В.503

Конструкторами ПГУПС и ОАО «НВЦ Вагоны» разработана тележка модели 18-9750 (рисунок 1.9) [9] с осевой нагрузкой 25 тс/ось. В центральном рессорном подвешивании применяют фрикционные клинья с полимерными накладками на наклонных поверхностях. Вертикальная нагрузка с боковых рам передается на колесные пары через адаптеры с полиуретано-металлическими

амортизаторами и кассетные буксы. Снизу челюстного проема имеется блокиратор, препятствующий выпадению адаптера. На тележке установлены бесконтактные скользуны.

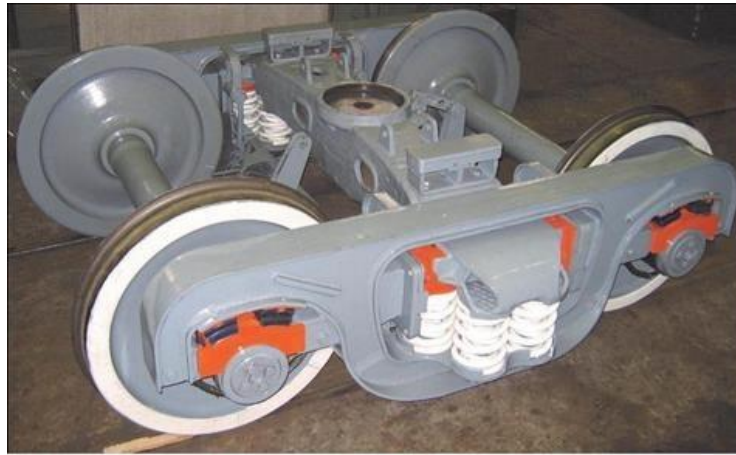


Рисунок 1.9 – Тележка модели 18-9750

Кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» МИИТа совместно с ФГУП «ЦКБ ТМ» и ОАО «Алтайвагон» разработана тележка модели 18-9945 (рисунок 1.10) [16]. В тележке применен принцип раздельного гашения колебаний в вертикальной и поперечной плоскостях, а также увеличен статический прогиб рессорного подвешивания (30 мм в порожнем состоянии и 85 мм в груженом). В связи, с чем значительно улучшены динамические качества этой тележки по сравнению с типовой - модели 18-100.



Рисунок 1.10 – Тележка модели 18-9945

Рама тележки штамповая. Между боковыми рамами имеется специальная связь, выполненная в виде перекрещивающихся стержней с упругой заделкой, что уменьшает забегание боковых рам друг относительно друга при проходе вертикальных неровностей рельсового пути. Демпфирование вертикальных колебаний осуществляется вертикально расположенными гасителями с упругой беззазорной заделкой, горизонтальных - фрикционными демпферами постоянного трения. В рессорном комплекте тележки предусмотрена установка гидравлических гасителей колебаний или эластомерных амортизаторов. В конструкции тележки введены связи между надрессорной балкой и боковыми рамами тележки в виде упругих продольных поводков.

Заслуживают отдельного внимания разработки зарубежных конструкторов тележек.

В Европейских странах широкое распространение получили тележки типа Y25 [7] (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 - Грузовая тележка Y-25

Штамповая рама тележки представляет собой замкнутую конструкцию. Рессорное подвешивание одноступенчатое надбуксовое с двухрядными

цилиндрическими пружинами и фрикционным клиновым гасителем колебаний. Тележка укомплектована подпружиненными скользящими контактами постоянного контакта.

На базе тележки Y-25 созданы тележки Y-31 и Y-37 с улучшенными динамическими качествами.

Штампованная рама типа Y37/VR (рисунок 1.12) [12] представляет собой незамкнутую конструкцию. Для снижения уровня вертикальных колебаний, возникающих при высоких скоростях движения, шкворневая балка тележки крепится к раме через люльчатое подвешивание.

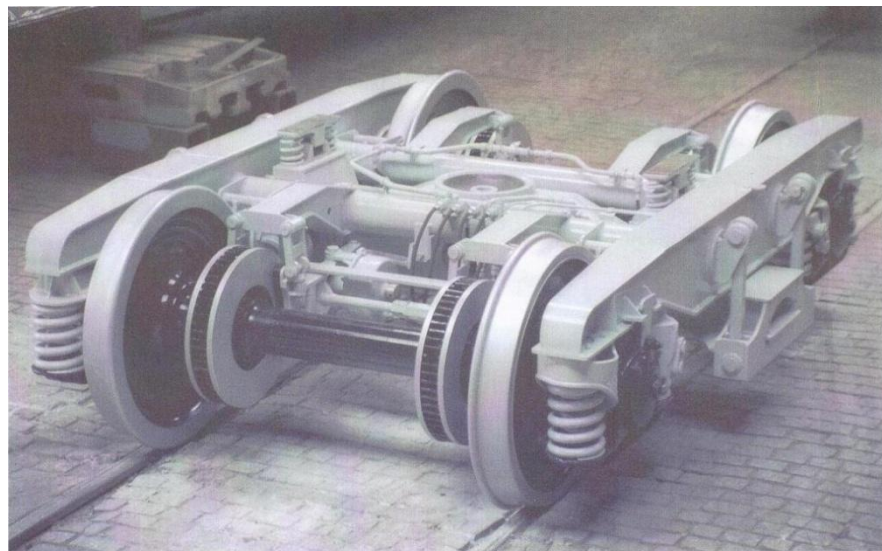


Рисунок 1.12 - Тележка типа Y37/VR.

Рессорное подвешивание в тележке Y37/VR одноступенчатое надбуксовое, аналогичное тележки Y-25. На тележке установлены упругие скользящие контакты постоянного контакта, подпятник выполнен сферическим.

Тележка типа Y31/Li (рисунок 1.13) [12], применяемая для подкатки под автотрейлеры, имеет изогнутую поперечную балку с утопленным подпятником. Опоры скользящих контактов вынесены за боковые рамы. Рессорное подвешивание одноступенчатое надбуксовое, аналогичное тележке Y-25.

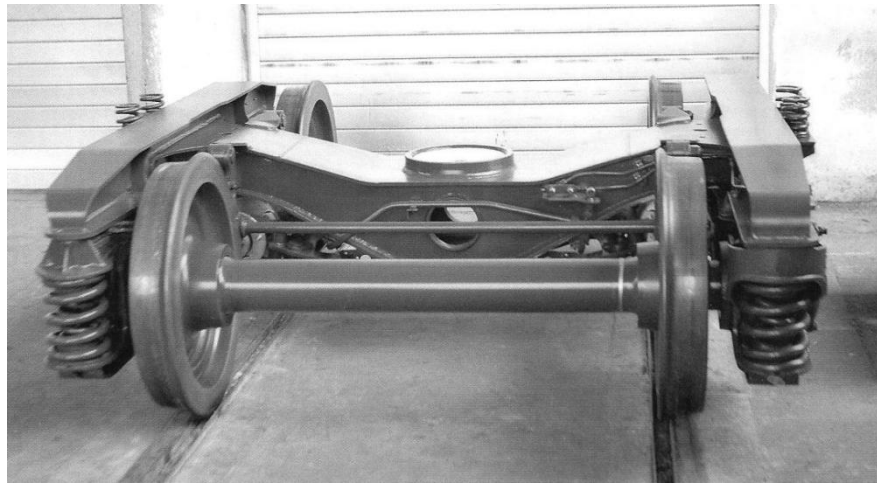


Рисунок 1.13 - Тележка типа Y31/Li.

В Великобритании изготовлена тележка VTF-25 для повышенных осевых нагрузок до 25,5 т/ось и скорости 120 км/ч. Пружины надбуксового подвешивания установлены на потолках букс, параллельно расположены гидравлические гасители колебаний. Применение специальных резинометаллических комплектов повысило упругость скользунов. Подпятник также имеет упругую подкладку, образуя вместе со скользунами вторую ступень подвешивания тележки.

В настоящее время во многих странах мира (например, в Японии) в подвешивании вагонов получили широкое распространение пневматические упругие элементы, которые устанавливают в тележках не только пассажирских, но и грузовых вагонов.

Наиболее известна тележка с пневматическим подвешиванием модели ДТ-200 вагонов скоростного поезда линии Нью-Токайдо (Япония), предназначенных для движения со скоростями до 240 км/ч. Подвешивание в тележках двойное:

- буксовое из витых пружин с гидравлическими гасителями колебаний;
- центральное безлюльное из диафрагменных упругих пневмоэлементов, воспринимающих как вертикальные, так и горизонтальные (боковые) усилия. Вертикальные колебания в центральном подвешивании гасятся при помощи дросселей, установленных между упругими пневмоэлементами и дополнительными резервуарами. Горизонтальные колебания гасятся горизонтальными гидравлическими гасителями телескопического типа.

В последние годы на сети железных дорог РФ стали внедряться тележки иностранного производства, например, американская тележка Barber S-2-R с осевой нагрузкой 23,5 тс/ось, получившая обозначение 18-9810 (рисунок 1.14) [13].

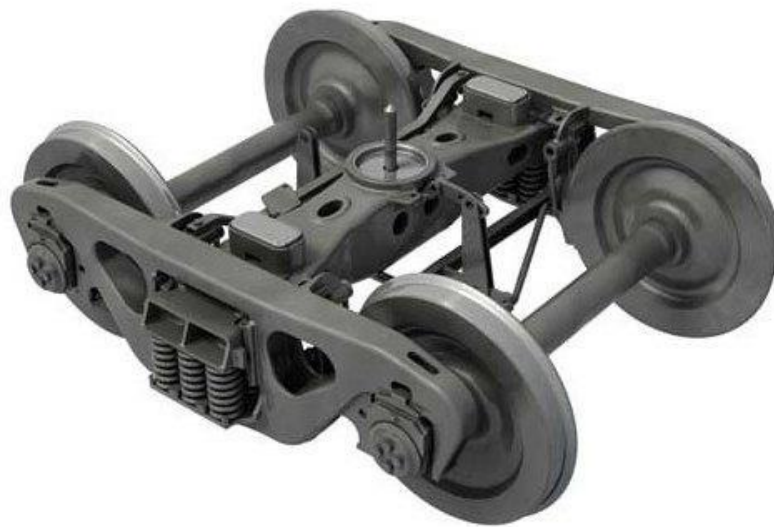


Рисунок 1.14 - Тележка модели 18-9810 (Barber S-2-R)

Рессорный комплект боковой рамы состоит из девяти двухрядных цилиндрических пружин различной жесткости и двух пар фрикционных клиньев. Боковая рама тележки опирается на наружное кольцо кассетной буксы через стальной адаптер, между которым и опорной поверхностью боковой рамы располагают износостойкую прокладку, которая крепится к технологическим отверстиям. В тележке используют упругие скользяны постоянного контакта.

Для вагонов с увеличенной грузоподъемностью внедряется тележка американской фирмы «Motion Control» с осевой нагрузкой 25 тс/ось, получившая обозначение 18-9836 (рисунок 1.15) [13].

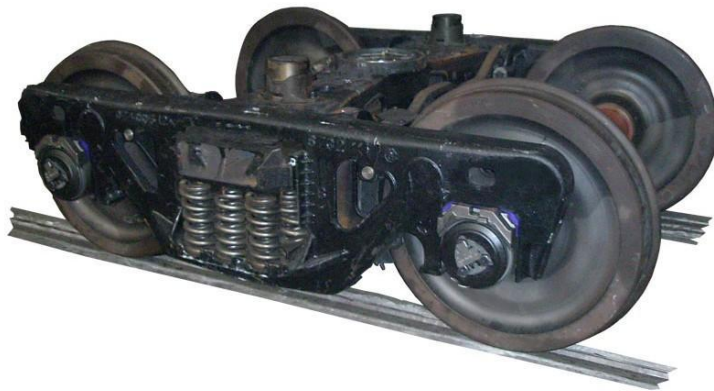


Рисунок 1.15 - Тележка Motion Control (модель 18-9836)

Рессорный комплект боковой рамы состоит из девяти двухрядных цилиндрических пружин разной жесткости и двух стальных фрикционных клиньев с увеличенной площадью рабочей поверхности. Боковая рама тележки опирается на наружное кольцо кассетной буксы через стальной адаптер с полимерной вставкой, которые крепятся через технологические отверстия. В тележке модели 18-9836 предусмотрены упругие скользящие элементы постоянного контакта.

Требования к тележкам вагонов нового поколения на основе отечественного и зарубежного опыта сформулированы в работах Ю.П. Бороненко, С.И. Порядина, А.М. Орловой [8-12].

Обзор конструктивных решений тележек грузовых вагонов показал, что рост осевых нагрузок потребовал оптимизации рессорных комплектов, введения дополнительных амортизирующих элементов в опорные поверхности букс, буксовые проемы боковой рамы, зону подпятника и др.

Так, в опорных поверхностях букс инновационных тележек с нагрузкой 25 тонн на ось стали применять адаптеры с упругими прокладками (тележка 18-194-01, SF Motion Control), а также адаптеры с демпфирующими элементами, установленными под углом к вертикали, вдоль и поперек буксового узла «рычаг Шеффеля», а также с опорой буксового проема на резинометаллические элементы.

В начале 2000-х годов на сети железных дорог России стали применять тележки модели 18-194-1 [13] с упруго-катковыми скользунками фирмы «А.Стаки», в которых предусмотрена установка дополнительного упругого элемента из полиуретана. В последствие ООО «Вагонмаш» совместно с американской фирмой «Miner Enterprisses Inc» разработали безззорные скользунки с упругим элементом 15 мм из морозостойкой резины для тележек модели 18-578.

Эксплуатационные недостатки трехэлементных тележек грузовых вагонов специалистами Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения предложено решить введением упругой связи боковых рам и подшипников, которая обеспечит параллельность и соседность колесных пар в тележке, а также возможность их самоустановки при прохождении прямых и кривых участков пути [14, 15]. При этом, гашение колебаний достигается за счет диссипации энергии в материале эластомерно-металлических комплектов буксового подвешивания.

Различные конструктивные решения по модернизации узлов тележек грузовых вагонов с целью увеличения скоростей и межремонтного пробега вагонов представлены специалистами Московского университета путей сообщения и Управления вагонного хозяйства ОАО «РЖД» [16, 17].

Конструкторами предложена замена прокладок типового буксового узла по проекту М1698 ПКБ ЦВ на износостойкие поглотители вибрации в виде сэндвич-прокладки [18-20], при этом добились улучшения ходовых и динамических свойств тележки в диапазоне эксплуатационных скоростей на 6,4%, а в диапазонах конструкционных скоростей движения на 5,5%.

Однако опыт использования полимерных прокладок в узлах ходовых частей вагонов показал недостаточный ресурс материала, чтобы обеспечить безотказную работу в течение всего межремонтного периода.

Значительный рост осевых нагрузок в последнее время привел к необходимости выделения новой категории – особогрузонапряженное движение. При этом увеличение интенсивности грузопотоков диктует повышение скоростей

движения. Поэтому, очевидно, что в настоящее время актуальной задачей является снижения динамических сил, действующих на ходовые части вагонов путем применения дополнительных демпфирующих элементов в различных элементах тележки: рессорном подвешивании, опорных поверхностях букс, буксовых проемов боковой рамы, зоне подпятника и боковых скользунов. При этом демпфирующие элементы должны продолжительно и надежно работать в различных климатических условиях. В связи, с чем необходимо провести дополнительные исследования упруго-гистерезисных свойств материалов демпфирующих элементов при различном температурном воздействии.

1.2 Обзор работ по исследованию взаимодействия пути и подвижного состава

Железнодорожный путь и подвижной состав представляют собой единую термодинамическую систему, в которой они взаимодействуют и зависят друг от друга. Главной задачей исследований динамических процессов в системе «подвижной состав - железнодорожный путь» является определение оптимальных значений этой системы (габаритных размеров, массы, жесткости, коэффициентов вязкого трения и др.), при которых снижаются колебания и динамические силы, отрицательно влияющие на надежность и долговечность конструкций подвижного состава и пути [21].

Задачи взаимодействия подвижного состава и пути решались многими российскими учеными, такими как, А.П. Бородин, А.М. Годыцкий-Цвирко, Н.Е. Жуковский, Н.П. Петров, Г.М. Шахунянц, В.Б. Медель [22], А.Я. Коган, а также зарубежными – П.Аппель [23, 24], Г. Марье, Х.Хейман [25], Ж. Калкер [26], Крейг Р.Р. [27] и др.

А.П. Бородин на основе изучения колебаний паровоза на катках в последствие разработал методику линейных испытаний паровозов.

Н.П. Петров занимался изучением вертикальных сил, возникающих от колебаний надрессорного строения. На основе гипотезы акад. Н.П. Петрова, предполагающей идентичность формы упругой линии изгиба рельса при статическом и динамическом воздействии был решен ряд задач по взаимодействию подвижного состава и пути. Г.М. Шахунянц [28] предположил, что упругая линия изгиба балки, колеблющейся от произвольной динамической нагрузки, в любой момент времени соответствует форме, возникающей при воздействии движущейся постоянной нагрузки, численно равной значению динамической нагрузки, взятой на тот же момент времени.

Н.Е. Жуковский [29, 30] разделил колебания на два вида и сформулировал принципы определения частот свободных колебаний надрессорной части

железнодорожного экипажа, а также описал трение бандажей железнодорожных колес о рельсы.

В своих исследованиях Стокс описал движение груза определенной массы без учета массы балки, а А.Н. Крылова [31] наоборот рассмотрел движение постоянной силы по массивной балке. Процессы колебания балки с распределенной массой на упругом основании под действием постоянной силы, свободные и вынужденные колебания железнодорожного экипажа с двумя степенями свободы описал С.П. Тимошенко [32-34].

Зарубежные исследователи изучили движение постоянного груза, обладающего массой, по балке с распределенной массой [35], а также движение постоянных безынерционных сил на балке с распределенными массой и демпфированием [36].

Ф.Картер [37] впервые выдвинул гипотезу о наличии зоны упругого скольжения колес –псевдоскольжения (крип), что в последствие позволило описать движение колесной пары дифференциальными уравнениями.

Вопросы трибологии, а именно роль трения, как гасителя колебаний подробно изучил Г. Марье [38].

Изучению периодических вертикальных сил, действующих на путь посвящены работы А.Я.Когана [39]. Ученым выведены частотные характеристики и импульсные переходные функции. В качестве возмущающих факторов в расчетах приняты неровности на пути и колесах экипажа, выбоины на поверхности катания рельсов, люфты между рельсом и подрельсовым, влияющие на величины динамических сил на контактах колес и рельсов при прохождении экипажа по пути.

Моделированию расчетных схем динамического взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути посвящено большое количество работ [40-42], в которых введены упрощенные схемы (приведенные массы колеса и пути) в зависимости от вида возмущающих факторов и целей исследования.

В работах В.Ф. Яковлева приведены уточненные расчетные схемы с учетом нелинейных односторонних связей и переменных масс [43], которые позволили

более точно описать динамические процессы в течение всего периода взаимодействия. Большим вкладом ученого является верификация расчетных моделей при экспериментальных исследованиях в эксплуатационных условиях [44-48]. Проведена классификация геометрических неровностей рельсовых путей по уровню сил и ускорений: с повышенным уровнем вибродинамических эффектов (стыковые неровности и неровности в крестовинах), и с низким уровнем динамических эффектов (неровности типа плавного волнообразного износа рельсов, впадины и горбы в местах сварки бесстыкового пути, плавные неровности в стрелках и др), а также проанализировано их влияние на составляющие элементы системы «колесо-рельс» и контактную зону.

Российские ученые под руководством С.В. Вершинского [49] и Л.А. Шадура [50] рассмотрели влияние отступлений геометрии пути, отклонения от норм содержания ходовых частей, несимметричное расположение крупногабаритного груза на динамику подвижного состава и безопасность движения.

М.Ф. Веригу подробно изучил взаимодействие необрессоренных масс вагона и пути, в том числе в кривых малого радиуса, предложил методы уменьшения бокового износа рельсов и гребней колес [51-53].

Вопросам снижения интенсивности износа гребней колес и бокового износа рельсов посвящены работы В.М. Богданова [54, 55], Л.О. Грачевой [56],

Влияние отступлений геометрии пути на динамику грузового вагона подробно изучил Г.И. Петров [57-59].

Однако силы взаимодействия и ускорения элементов пути и подвижного состава зависят не только от геометрических параметров неровностей, скорости и направления движения подвижного состава, но и от расчетных характеристик элементов пути и колес (жесткости шейки рельса, контактной жесткости, массы пути, жесткости основания рельсовой нити, коэффициента вязкого трения, жесткости диска колеса, жесткости рессорного подвешивания), т.е. упруго-динамических характеристик рельсовых нитей и динамико-кинематических характеристик подвижного состава) [60].

Изменение жесткости пути в пределах, соответствующих ее значениям на обычном пути со шпальным и монолитным подрельсовым основанием, приводит к увеличению динамических сил в контакте колеса и рельса и изменению расположения и протяженности зон отрывов колеса от рельса. Причем, зависимость сил взаимодействия от величины жесткости пути является нелинейной. С увеличением жесткости интенсивность ее влияния уменьшается. Критические скорости зависят не только от размеров геометрической неровности, но и от расчетных характеристик системы «колесо-рельс». С увеличением массы пути возрастают силы взаимодействия и длины зон отрыва колеса от рельса.

В тоже время увеличение жесткости диска колеса повышает уровень сил взаимодействия в контакте. Поэтому целесообразно проводить конструктивные мероприятия по ее снижению, в частности, за счет упругих элементов.

Также на износ колес и рельсов влияют собственно конструкции и параметры тележек [62].

Применение различных полимерных амортизаторов в ходовых частях вагона улучшает динамику взаимодействия колеса и рельса [62-64].

В настоящее время широкое распространение получили численные методы моделирования динамики подвижного состава при движении по железнодорожному пути. Основы таких методов заложены в работах В.Д. Хусидова, Ю.С. Ромена, В.Н. Филиппова, Г.И. Петрова, В.Ф. Ушкалова, А.А. Хохлова, Г.П. Бурчака, В.С. Коссова, Т.А. Тибилова, П.К. Мюллера, Ю.П. Бороненко, А.М. Орловой [65-80].

Особое внимание заслуживает метод компьютерного моделирования динамики подвижного состава при движении по железнодорожному пути – «Универсальный механизм» (УМ), разработанный на базе пакета прикладных программ под руководством Д.Ю. Погорелова [81, 82]. Комплекс позволяет выполнять многовариантные расчеты в соответствии с заданным планом численных экспериментов, решать задачи оптимизации, прогнозирования, оценки чувствительности к изменению условий эксплуатации.

Для построения адекватных математических моделей и последующей их верификации необходимо наличие входных экспериментальных данных и натурных испытаний.

Таким образом, анализ накопленного научного опыта по исследованию взаимодействия пути и подвижного состава показал наличие множества факторов неблагоприятно влияющих на динамику процесса, которые необходимо решать, опираясь на достигнутые результаты, с помощью различных теоретических и экспериментальных методов, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

1.3 Обзор работ по совершенствованию амортизирующих элементов рельсовых скреплений железнодорожного пути

Безопасность движения поездов, плавность хода, бесперебойность и эффективность работы железнодорожного транспорта существенно зависят не только от конструкции подвижного состава, но и от конструкции рельсового пути. Вопросы поиска оптимальных конструктивных решений в настоящее время становятся особенно актуальными, в связи с введением специализации железнодорожных линий (скоростных, пассажирских, смешанных, грузонапряженных и осбогрузонапряженных), а также географическим расширением полигона эксплуатации в различных климатических зонах нашей страны.

На протяжении многих лет модернизация рельсов была направлена на увеличение массы (переход от рельсов Р50 к Р65 и Р75) с целью пропуска поездов с постоянно растущей осевой нагрузкой, а также оптимизацию технологического процесса их изготовления.

Модернизацию рельсовых скреплений проводили в основном за счет конструктивных и технологических решений прижимных элементов (клемм), упругих, амортизирующих элементов (прокладок), а также закладных или монолитных прикрепителей к рельсовой опоре.

Основными требованиями, предъявляемые к промежуточным рельсовым скреплениям являются [83]:

- 1) длительное обеспечение неизменности рельсовой колеи;
- 2) высокое сопротивление уgonу рельсов;
- 3) высокие амортизирующие (пружинящие) свойства, обеспечивающие оптимальную пространственную упругость пути и надежную упругую связь рельсов с опорами;
- 4) надежность и экономичность.

Необходимое сопротивление уgonу рельсов достигают путем увеличения силы прижатия рельсов к опорам клеммами и коэффициента трения подрельсовых прокладок, а также установкой противоугонов для предотвращения угонов рельсов вместе со шпалами.

Совершенствование амортизирующих свойств рельсовых скреплений, особенно актуально для пути с тяжелым и жестким железобетонным подрельсовым основанием для эффективной упругой переработки вертикальных и горизонтальных поперечных ударных и динамических воздействий колес на рельсы, гашения высокочастотных вибраций, создания оптимальной пространственной упругости пути, постоянной по его протяжению во всех направлениях.

Упругими элементами рельсовых скреплений, отделяющих массу рельса от остальной части пути, являются упругие клеммы и подрельсовые прокладки-амортизаторы, действие которых аналогично рессорам и гасителям колебаний подвижного состава, отделяющих массу экипажа от массы ходовых частей. При этом существенно снижаются инерционные силы, образующиеся при проходе колесом различных неровностей, так как возникающие при этом ускорения действуют лишь на необрессоренную массу подвижного состава, приходящуюся на одно колесо, и необрессоренную массу пути (приведенную массу рельса). Однако при большой вертикальной и горизонтальной поперечной упругости опор увеличиваются статический изгиб рельсовых нитей и статическое давление на опору, что может привести к уgonу пути.

Следовательно, оптимизация упругости пути в самых верхних его элементах (рельсовых скреплениях) всегда являлась актуальной задачей научных исследований.

Первоначально применяли отдельные, нераздельные и смешанные промежуточные рельсовые скрепления на деревянных шпалах.

Костыльное скрепление типа ДО (рисунок 1.16) [83] не имело амортизирующих прокладок и других упругих элементов, поэтому не обеспечивало упругую связь рельсов со шпалами, плохо сопротивлялось утону пути и нуждалось в частой перешивке костылей, вследствие отжатия рельсовых нитей. Вибрация металлических подкладок, происходящая вследствие динамического воздействия колес на рельсы, усиливала механический износ шпалы под подкладкой. Для уменьшения интенсивности износа шпал между подкладкой и шпалой стали укладывать прокладки толщиной от 6 до 10 мм из резины, резинокорда, гомбелита (прессованные кордные нити, пропитанные смолой). Наименьший износ шпал наблюдался при использовании прокладок из резины, особенно имеющих рифления.

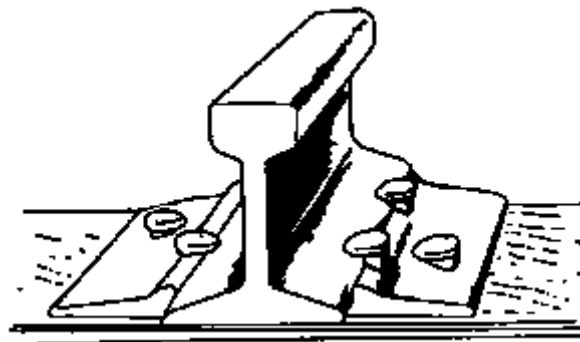
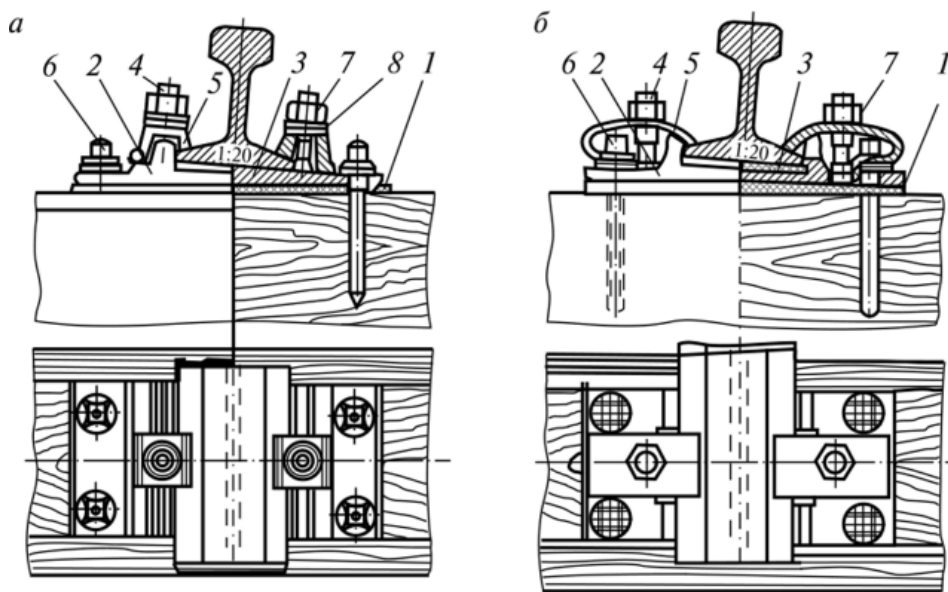


Рисунок 1.16 - Костыльное скрепление типа ДО

Раздельные скрепления типа КД (рисунок 1.17), в котором рельс прижат к металлической подкладке двумя жесткими П-образными клеммами имели две амортизирующие прокладки, устанавливаемые под металлическую подкладку и под рельс. Скрепления обладали невысокой вертикальной жесткостью, вследствие чего увеличивался статический прогиб рельсовых нитей и давление на

деревянную опору. Во избежание смятия древесины под подкладки укладывали резиновые или резинокордовые прокладки.

Скрепление Д4 (рисунок 1.17б) [83] позволяло производить регулировку положения рельсов по высоте до 14 мм за счет изменения толщины подрельсовых прокладок. Однако, быстрое ослабление натяжения клеммных болтов, особенно в кривых участках пути, обуславливала необходимость их постоянного подтягивания для предотвращения угона пути.



а — типа КД; б — типа Д4

1 - прокладка под подкладку; 2 - подкладка; 3 - подрельсовая прокладка; 4 - клеммный болт; 5 - клемма; 6 - шуруп; 7 - гайка; 8 - двухвитковая шайба

Рисунок 1.17 - Раздельное крепление для деревянных шпал

С ростом осевых нагрузок возникла необходимость применения более мощных и жестких рельсовых опор: железобетонных шпал [84].

Железобетон достаточно электропроводен, поэтому потребовалась электроизоляция рельсов путем установки в креплениях электроизолирующих, амортизирующих прокладок. С этого времени к прокладкам стали применять требования к контролю электрического объемного сопротивления.

Следует также отметить, что величина динамических сил, передаваемых на подшпальное основание и необрессоренную массу вагона, при прочих равных условиях, зависит от жесткости связи между балластом и рельсом, так

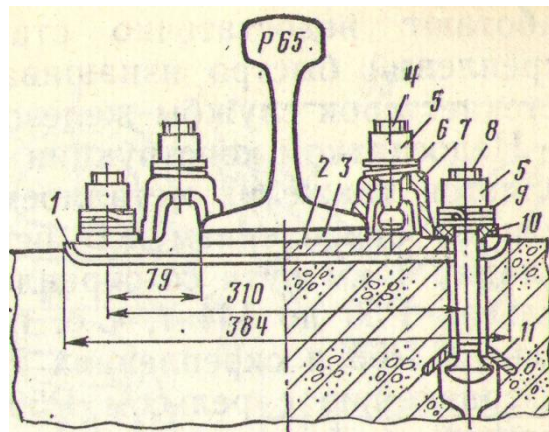
называемой жесткостью шпалы с промежуточным скреплением. На железобетонных шпалах жесткость этой связи значительно выше, чем на деревянных, поэтому наблюдается увеличение модуля упругости пути [85, 86].

Неблагоприятное влияние вибраций сказывается и на сопротивляемости пути поездным нагрузкам в продольном и поперечном направлениях (угон, изменение положения в плане и ширины колеи) [87-90].

При одинаковых по форме и размерам неровностях на жестком пути (железобетонные шпалы) динамические силы взаимодействия колеса и рельса значительно выше, чем на упругом (деревянные шпалы), что влияет на рост дефектности рельсов и колес подвижного состава [91]. Наблюдается более интенсивное образование волнообразного износа рельсов, а также выщербины, неравномерный прокат колес.

В связи с чем, с переходом на железобетонные шпалы ввели ограничения на параметры вертикальной жесткости рельсовых скреплений (50-100 МН/м).

Самым распространенным типом скрепления для железобетонных шпал на сети железных дорог РФ является раздельное скрепление типа КБ (рисунок 1.18) [83] с жесткими клеммами, двумя клеммными болтами, металлической подкладкой, прикрепляемой к шпале двумя закладными болтами. Под подкладкой располагается упругая электро- и виброизолирующая нашпальная прокладка, толщиной 6-8 мм, а под рельсом - подрельсовая прокладка, толщиной 12-14 мм для регулировки положения рельса по высоте. Первоначально прокладки изготавливали из резиновой смеси, а в последние 10 лет стали применять термоэластопласты. Применение нашпальных и подрельсовых прокладок повышенной упругости и долговечности позволило снизить вертикальную жесткость пути и сократить эксплуатационные расходы. Однако в процессе эксплуатации происходит постепенное смятие прокладок, особенно в кривых участках пути, что при наличии жестких клемм приводит к ослабеванию степени натяжения клеммных и закладных болтов и требует регулярной и частой проверки, смазки и подтяжки гаек болтов.



1 – прокладка под подкладку (нашипальная); 2 – подкладка; 3 – подрельсовая прокладка;
 4 – клеммный болт; 5 – гайка; 6 – двухшлицевая шайба; 7 – клемма; 8 – закладной болт;
 9 – скоба для изолирующей втулки; 10 – изолирующая втулка

Рисунок 1.18 - Раздельное крепление типа КБ

Поэтому в дальнейшем стали разрабатывать и применять крепления с упругими клеммами. Такой вариант подкладочного крепления КБ получил название БП (рисунок 1.19) [83]. Однако вертикальная жесткость данного типа крепления - не высока вследствие большой толщины амортизирующих прокладок (18 мм), что на фоне постоянного роста осевых нагрузок приводило к расстройству ширины колеи. В связи, с чем последующая модернизация рельсовых креплений была направлена, в том числе на уменьшение толщины амортизирующих прокладок и увеличение жесткости применяемого для их изготовления материала.

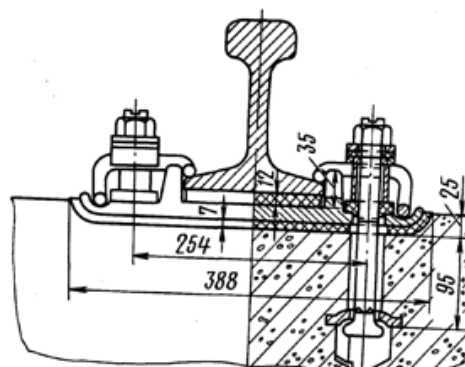
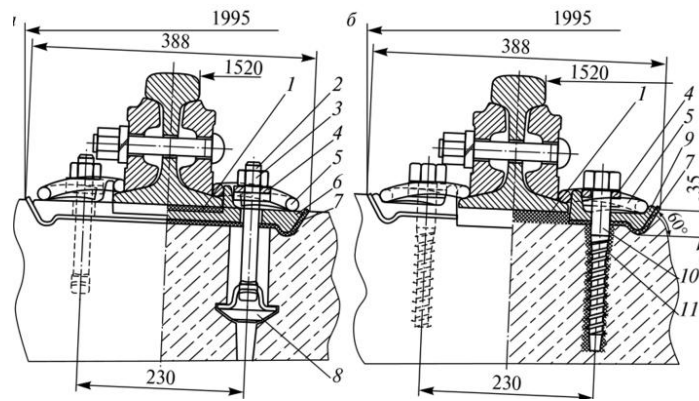


Рисунок 1.19 – Подкладочное крепление с упругими клеммами типа БП

Российские ученые вели разработки конструкций рельсовых креплений в двух основных направлениях: с резьбовым креплением к шпале (ЖБР) и анкерным (АРС).

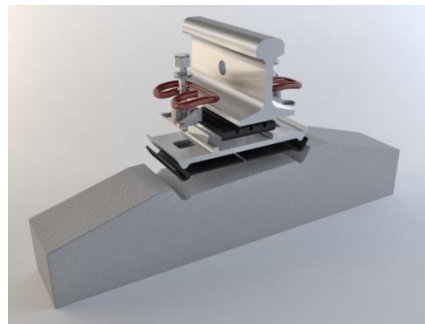
Разновидности упругих креплений ЖБР представлены как подкладочные: ЖБР-65П (с металлической подкладкой и закладными болтами) (рисунок 1.20а) [83], ЖБР-65ПШМ (шурупно-дюбельное с металлической подкладкой) (рисунок 1.21а), ЖБР-65ПШР (шурупно-дюбельное с полимерной подкладкой различной конфигурацией) (рисунок 1.21б), так и бесподкладочные ЖБР-65 (с закладными болтами) (рисунок 1.22), ЖБР-65Ш (рисунок 1.20б). Сначала в семействе *креплений* ЖБР применяли амортизирующую прокладку толщиной 14 мм, а вместо нашпальной прокладки (в подкладочных вариантах) – две упругие полиамидные прокладки с более низкими демпфирующими свойствами. Для стабилизации ширины колеи в кривых участках пути под воздействием растущих осевых нагрузок (уменьшение давления на боковые полимерные элементы крепления) стали применять подрельсовую амортизирующую прокладку толщиной 10 мм. Для поддержания стабильности параметров рельсовой колеи, особенно в кривых участках пути, возможно, данное решение оправдано. Однако повышение жесткости приводит к большей интенсивности просадок подшпального основания и увеличению реакционных сил на колесе подвижного состава.



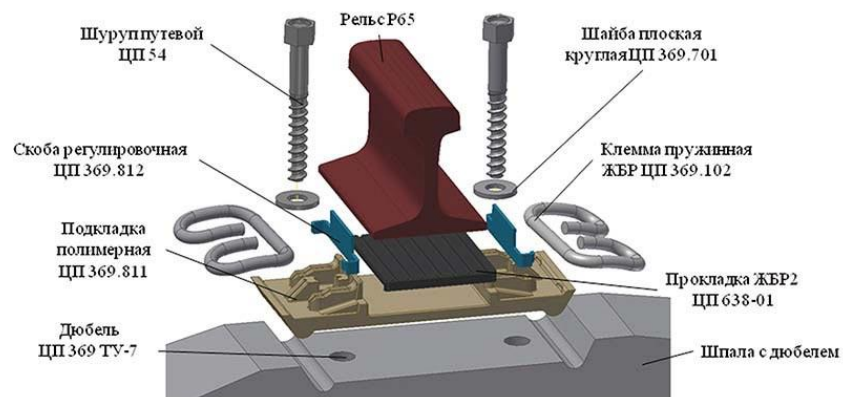
а – подкладочное ЖБР-65П; б- ЖБР-65Ш

*1 - подрельсовая прокладка; 2 – закладной болт; 3 – гайка; 4 – шайба пружинная;
5 – пружинная клемма; 6 – подкладка; 7 – нашипальная прокладка; 8 – скоба упорная;
9 – полимерный вкладыш; 10 – шуруп; 11 – дюбель*

Рисунок 1.20 – Промежуточные рельсовые крепления ЖБР



а)



б)

а) с металлической ЖБР-65ПШМ; б) с полимерной подкладкой ЖБР-65ПШР

Рисунок 1.21 – Подкладочные шурупно-дюбельные крепления ЖБР

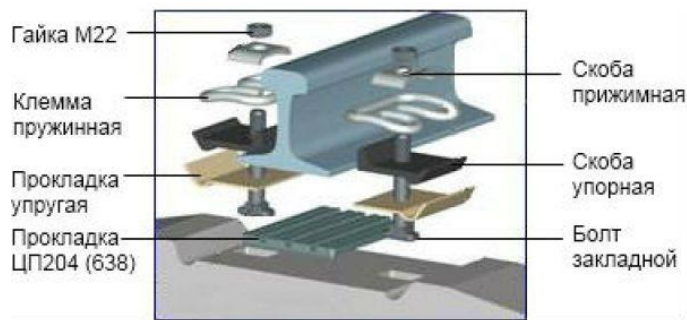


Рисунок 1.22 – Бесподкладочное крепление ЖБР-65

В Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ) разработано безболтовое анкерное рельсовое крепление АРС [92-97] (рисунок 1.23), основным элементом которого является замоноличенный в шпалу анкер рамноарочного типа. Применение анкерного крепления устраняет необходимость регулярно подкручивать и смазывать болты и гайки, а также увеличивает срок службы железобетонных шпал, т.к. анкер является дополнительным армирующим элементом в подрельсовой зоне. Крепление АРС гарантирует равножесткость рельсового пути, т.к. прижатие клемм обеспечивается положением монорегулятора с эксцентриситетом, а не затяжкой резьбовых крепежителей, поэтому является постоянным по всей длине плети. Конструкция модернизированной подрельсовой прокладки имеет оптимальную конфигурацию, уменьшенные рифли, толщину 14 мм. Применение морозостойкого композита на основе резиновой смеси позволило эффективно эксплуатировать крепление в Северных и Восточных регионах [98-100].

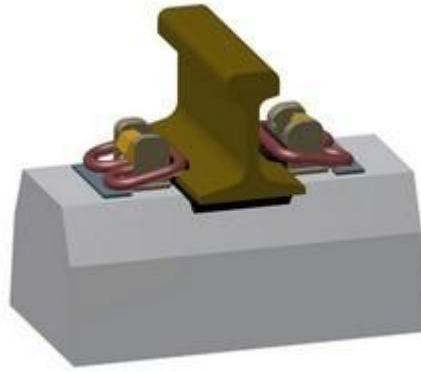
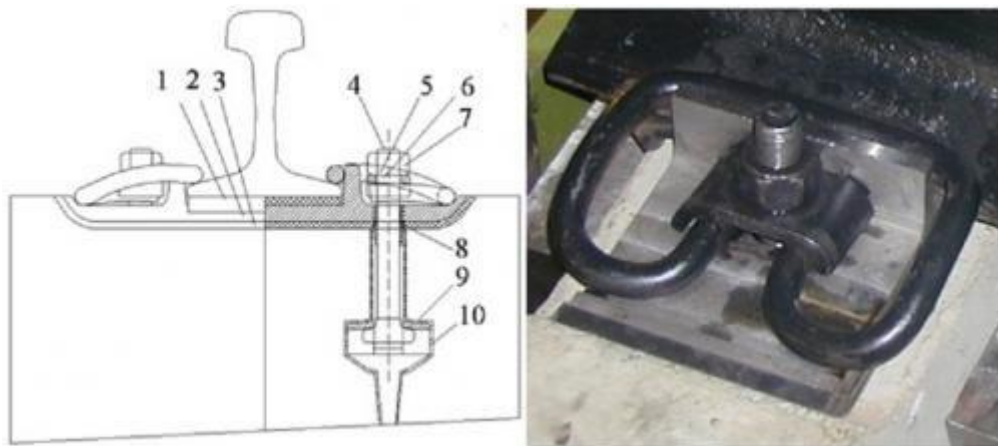


Рисунок 1.23 – Анкерное рельсовое крепление АРС

В настоящее время протяженность путей со креплением АРС на сети федеральных железных дорог России составляет более 3000 километров.

В Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПС, г. Новосибирск) под руководством доктора технических наук Н.И. Карпушенко создали и довели до укладки на опытных участках Западно- Сибирской дороги ряд креплений, наиболее доработанным из которых является подкладочное нераздельное болтовое крепление КНУ-65 (рисунок 1.24) [101, 102] Крепление является многодетальным и содержит две амортизирующие прокладки: нашпальную и подрельсовую. Фактически в КНУ-65 применяется заготовка подкладки КБ и соответствующие прокладки. Благодаря уплотнительным втулкам удается уменьшить разброс ширины колеи при монтаже, а за счет передачи части боковых сил в кривых на закладные болты — снизить силы перерезывания буртика нашпальной прокладки и повысить устойчивость ширины колеи. Упругая клемма - аналог клемм ЖБР-65 и АРС. Использование двух прокладок — подрельсовой и нашпальной — в сочетании с упругой клеммой достигается очень хорошее виброгашение. Однако крепление остается многодетальным, материалоемким, с резьбовыми соединениями, требующими обслуживания.



- 1 – упругая подрельсовая прокладка; 2 – металлическая подкладка;
 3 – напильная прокладка; 4 – закладной болт; 5 – упругая прутковая клемма; 6 – скоба;
 7 – гайка; 8 – заглушка резиновая; 9 – шайба седловидная;
 10 – изолирующий пустотообразователь

Рисунок 1.24 – Подкладочное рельсовое крепление КНУ-65

Из зарубежных креплений безболтового типа наибольшее распространение на железных дорогах РФ получили английское анкерное крепление Пандрол (Pandrol Fastclip) и немецкое шурупно-дюбельное системы Фоссло (Vossloh).

Конструкция Pandrol Fastclip (рисунок 1.25) [103] предусматривает закрепление рельса к подрельсовому основанию безболтовым способом с помощью анкера, забетонированного в шпалу, и двух пружинных прутковых клемм. На П-образном изгибе в средней части клеммы зафиксирован прижимной изолятор, обеспечивающий электроизоляцию подошвы рельса и анкера. Боковые изоляторы устанавливаются на анкера, обеспечивают стабильность ширины рельсовой колеи и электроизоляцию подошвы рельса от выступов анкеров. В узле крепления Пандрол-350 используется подрельсовая прокладка толщиной 10 мм, которая изготавливается из резины или термоэластопласта с выступами для препятствия ее смещению. Путь со креплением Пандрол-350 эксплуатируют в настоящее время на Северо-Кавказской, Юго-Восточной, Приволжской, Октябрьской железных дорогах.



Рисунок 1.25 – Рельсовое крепление Пандрол-350

С учетом российских требований специалисты «Фастенинг Системс» предложили несколько модификаций креплений Фоссло (Vossloh) [104]:

- W 30 применяется в смешанном пути, нагрузка на ось – 27 т, минимальный радиус кривой более 400 м, максимальная скорость 250 км/ч, статическая жесткость прокладок 85 МН/м, электрическое сопротивление более 5 кОм, количество компонентов – 5;

- W 30 HS применяется в высокоскоростном пути, нагрузка на ось – 22,5 т, минимальный радиус кривой более 800 м, максимальная скорость более 250 км/ч, статическая жесткость прокладок более 50 МН/м. электрическое сопротивление составляет – 5 кОм, количество компонентов – 5;

- W 30 HH применяется в тяжеловесном пути, нагрузка на ось – 35 т, минимальный радиус кривой менее 400 м, максимальная скорость 160 км/ч, упругая клемма Skl 30; статическая жесткость прокладок 160–400 [МН/м], электрическое сопротивление более 5 кОм, количество компонентов – 5;

- W 30 HH AP применяется в тяжеловесном пути, нагрузка на ось – 35 т, минимальный радиус кривой менее 400 м, максимальная скорость 160 км/ч, упругая клемма Skl 30; статическая жесткость прокладок 160–400 [МН/м], электрическое сопротивление составляет более 5 кОм, количество компонентов – 6;

– W 30 TW применяется в стрелочных переводах, нагрузка на ось – 35 т, упругая клемма Skl 30; статическая жесткость прокладок [МН/м], электрическое сопротивление составляет более 5 кОм, количество компонентов – 6.

Системы W 30 НН и W 30 НН АР сочетают в своих конструкциях пружинную клемму Skl 30 с подрельсовой прокладкой жесткостью 160–400 кН/мм для тяжеловесного или интенсивного грузового движения и имеют высокое сопротивление уgonу – 18 кН. Обе системы имеют углонаправляющую плиту трапецевидной формы – для минимизации боковых усилий за счет увеличенной площади прилегания.

W 30 НН АР дополнительно оснащена износостойкой пластиной из полиамида ПА-6, армированного стекловолокном, толщиной 2 мм, которая устанавливается между опорой и подрельсовой прокладкой для сокращения истирания рельсовой посадочной площадки. Пластина препятствует попаданию песка на поверхность опоры и защищает бетон от износа, так как устанавливается между шпалой и прокладкой.

В модификации W 30 (рисунок 1.26) подошва рельса укладывается на прокладку между двумя боковыми упорами, образующими точное посадочное место для рельса, который закреплен при помощи упругих клемм Skl 30 и путевых шурупов. Свободные концы клеммы прижимают подошву рельса, а центральная петля клеммы опирается на углонаправляющую плиту, препятствуя его опрокидыванию. В конструкции применена подрельсовая прокладка из термопластичного полиуретана и имеет жесткость 85 кН/мм.



Рисунок 1.26 – Рельсовое крепление W 30

В настоящее время на главных путях сети федеральных железных дорог России эксплуатируется только W 30 (протяженность свыше 600 километров).

Таким образом, одним из основных элементов, обеспечивающих вертикальную жесткость узла «рельс-шпала», является упругая прокладка, обязательно устанавливаемая во всех конструкциях рельсовых креплений [105-109]. Экспериментально установлено, что в диапазоне низких частот усилие, приложенное к верхней поверхности упругой прокладки, передается на нижнюю в неизменной форме. В диапазоне высоких частот упругая прокладка уменьшает это усилие. При частоте колебаний 550 Гц и выше, передаваемых от рельса на основание, перемещения становятся равными нулю, т.е. шпала становится практически неподвижной, что значительно уменьшает расстройство пути [110].

Следовательно, от упруго-гистерезисных характеристик амортизирующих подрельсовых прокладок зависит уровень динамических перемещений и сил, действующих на опоры. А вследствие того, что рельс жестко взаимодействует с колесом подвижного состава, то аналогичное силовое воздействие осуществляется и в обратном направлении (на необрессоренную массу подвижного состава).

В связи с чем, отечественные и зарубежные разработчики для управления вертикальной жесткостью прокладок варьировали геометрическими параметрами (толщиной (рисунок 1.27), рифлением (рисунок 1.28)), а также изменяли технологию производства (например, армирование) и тип материала (резина, термоэластопласты).



Рисунок 1.28 – Подрельсовые прокладки разной толщины

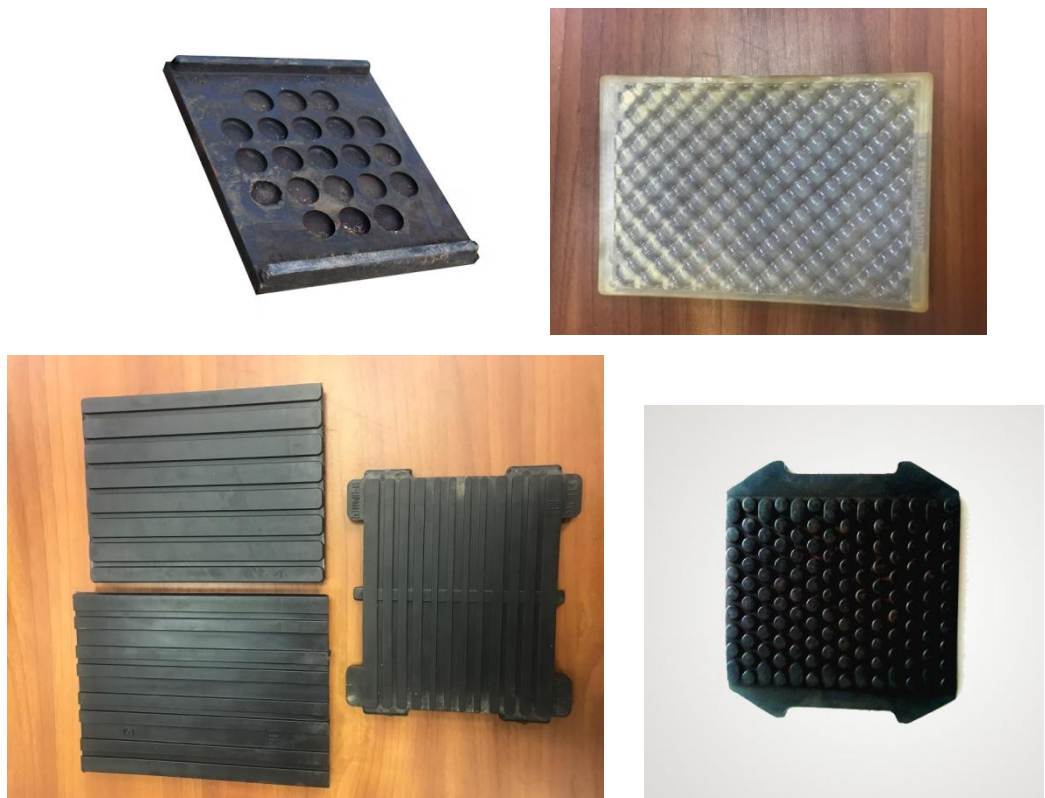


Рисунок 1.29 – Варианты рифлений подрельсовых прокладок

Прокладки увеличенной толщины и с глубокими рифлями обладают высокими демпфирующими свойствами и виброгашением, но хуже сохраняют пространственные параметры рельсовой колеи, в связи с чем возрастают затраты на текущее содержание пути.

Большинство отечественных прокладок рельсовых креплений имеют продольные рифли на опорной поверхности, отличающиеся шириной и глубиной.

Применяют также конструкции подрельсовых прокладок с двухсторонними рифлями [111], расположенными таким образом, что канавки на одной опорной поверхности находятся между канавками по центру на другой опорной поверхности, что способствует некоторому снижению жесткости при не больших осевых нагрузках.

В последние годы предложены модели прокладок с принципиально другой конфигурацией рифлей.

Авторами работы [112] предложены подрельсовые прокладки, представляющие собой прямоугольную пластину с чередующимися выступами и впадинами на верхней и нижней поверхностях, которые образуют гладкую зигзагообразную (синусоидальную) кривую (рисунок 1.29)

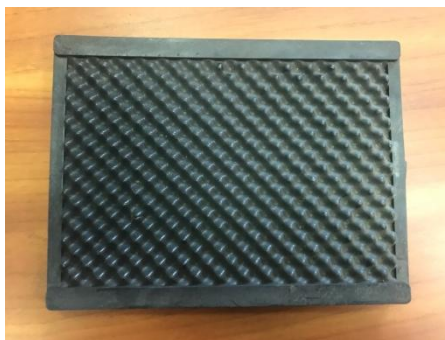


Рисунок 1.29 – Подрельсовая прокладка с синусоидальными выступами и впадинами

Аналогичное техническое решение описано в работе [113], в котором рифления выполнены в виде треугольников, образующие которых в поперечном сечении имеют также форму гладкой зигзагообразной кривой в виде синусоиды.

Однако данные конструкторские решения не предназначены для работы в условиях больших осевых нагрузок, т.к. малое сечение выступов не способно сопротивляться высокому уровню механических напряжений, в результате чего происходит их деформирование и смятие.

В патенте [114] предложена оригинальная конструкция подрельсовой прокладки, способствующая улучшению упруго-деформационных свойств и гарантирующая быстрое упругое восстановление элементов опорной поверхности при динамическом деформировании. Особенностью конструкции (рисунок 1.30) является наличие цилиндрических и прямоугольных выступов, возвышающихся относительно опорной поверхности, которые имеют неодинаковую высоту, что позволяет плавно наращивать сопротивление их деформированию по мере повышения уровня их динамической нагрузки, действующей на них до момента, когда высота выступов станет равной глубине углубления.

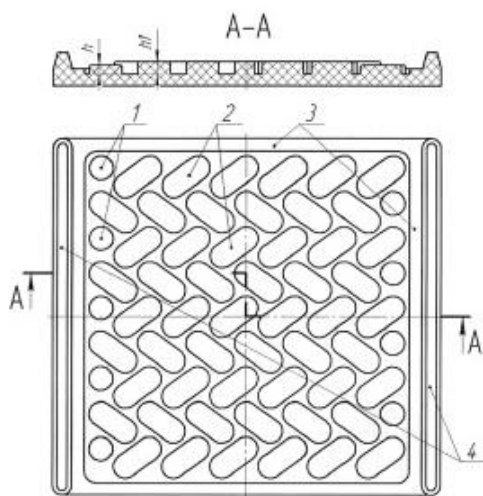


Рисунок 1.30 – Подрельсовая прокладка с рифлением из цилиндрических и прямоугольных выступов переменной высоты

Однако следует заметить, что прокладка в рельсовых скреплениях всегда находится в сжатом состоянии под действием прижимных элементов рельсовых скреплений, а также поездной нагрузки. При набегании колеса усилие прижатия клемм ослабевает, но прокладка не успевает восстановиться, т.к. рельс передает

ей нагрузку от колеса. Следовательно, любые конфигурации рифлей прокладки будут изначально достаточно сжаты, что уменьшает полезный эффект от различных технических решений рифления.

Необходимость управления жесткостными параметрами амортизирующих подрельсовых элементов продиктована условиями их эксплуатации.

На высокоскоростных магистралях, линиях с тяжеловесным движением, а также путях, где особенно важно снизить шум и вибрацию, используют прокладки из материалов с высокой упругостью. Жесткие прокладки, как правило, укладывают при невысоких скоростях движения [115].

На выбор жесткости прокладок влияет сама конструкция рельсового скрепления и особенности конкретного участка пути (профиль). В отечественных конструкциях скреплений с жесткими прикрепителями целесообразно применять более упругие подрельсовые прокладки, а в скреплениях с упругими клеммами можно использовать жесткие материалы; при этом в обоих случаях прокладка не должна иметь больших остаточных деформаций, чтобы сила прижатия рельса к основанию не падала ниже нормативной.

Однако отечественные модификации прокладок, а также прокладки, применяемые на железных дорогах Таможенного союза (Беларуси, Казахстана), разрабатывали применительно к смешанному железнодорожному движению (пассажирскому и грузовому). В то время как, зарубежные исследователи исходили из условий применения рельсовых скреплений, поэтому проектировали различные типы прокладок отдельно для пассажирского и грузового движения, а также работы в регионах с суровым и, наоборот, жарким климатом. В связи с чем, рельсовые скрепления Европейских стран и Америки имеют много различных модификаций. Зарубежные специалистами разработаны методы, способы, оборудование для лабораторных испытаний и оценки характеристик упругих рельсовых прокладок [116], а также методики испытаний для определения их динамического поведения в условиях эксплуатации [117].

На основе приведенного анализа можно сделать вывод о том, что в нашей стране разработка новых конструкций рельсовых скреплений и их

элементов велась в направлении стабилизации параметров рельсовой колеи, обеспечивающих надежную работу пути в различных регионах в условиях смешанного движения (грузопассажирского). Поэтому в настоящее время на российских железных дорогах нет эффективных креплений для железобетонных шпал, т.к. удовлетворить всем требованиям эксплуатационных условий в одной модификации невозможно.

Межгосударственные стандарты ГОСТ 32698-2014 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля» [118], ГОСТ 34078-2017 «Прокладки рельсовых креплений железнодорожного пути. Технические условия» [119] не предусматривают какой-либо дифференциации по жесткости. В то же время в зарубежных нормативах (DIN EN 13481 Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 1 [120], DIN EN 13481-2 Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 2: Fastening systems for concrete sleepers [121]) статическая и динамическая жесткости, причем как для низких, так и для средних, а также высоких частот воздействия, являются главными показателями.

В настоящее время отечественными специалистами ведутся работы по внесению изменений в существующие нормативные документы на рельсовые крепления и прокладки рельсовых креплений, связанные с дифференциацией требований по условиям эксплуатации. Однако, для принятия правильных и обоснованных решений необходимо проведение соответствующих научно-исследовательских работ.

Анализ конструктивных решений амортизирующих элементов рельсовых креплений показал, что тип рифлений оказывает незначительное влияние на изменение жесткости прокладки, т.к. она изначально находится в сжатом состоянии под действием прижимающего к рельсу усилия клемм и поездной нагрузки. В аналогично сжатом состоянии под весом надрессорной части вагона находятся упругие элементы неподрессоренной части вагона и подпятниковой зоны. Следовательно, основными параметрами, управляющими жесткостью

упругих полимерных элементов рельсовых скреплений и подвижного состава, являются толщина демпфирующего слоя и тип материала.

Однако на сегодняшний день малоизученными остаются вопросы выбора упруго-гистерезисных характеристик демпфирующего материала, способного надежно работать в широком температурном диапазоне, а также моделирования его упруго-гистерезисных характеристик в статических и динамических расчетах.

1.4 Применение полимерных композиционных материалов для снижения динамических разночастотных колебаний и вибраций

Как следует из предыдущих глав, упругие амортизирующие элементы оказывают существенное влияние на улучшение динамических процессов в общей системе «Подвижной состав - железнодорожный путь», плавности хода, повышения устойчивости против схода с рельсов. Причем, эффективность их работы в различных эксплуатационных условиях во многом зависит от правильного выбора соответствующего демпфирующего материала.

Наиболее исследованными в этом направлении являются материалы для прокладок рельсовых скреплений железнодорожного пути.

В соответствии со своим назначением прокладки рельсовых скреплений должны обладать:

- упругостью для обеспечения демпфирования динамических вибраций;
- механической прочностью, т.е. способностью не разрушаться под воздействием механических нагрузок;
- температуроустойчивостью, т.е. способностью сохранять свои механические свойства при воздействии высоких и низких температур;
- фрикционными свойствами, чтобы оказывать достаточное сопротивление перемещению рельса в продольном направлении.

Еще одним немаловажным фактором является дешевизна и доступность для снижения эксплуатационных расходов.

Изначально прокладки-амортизаторы изготавливали из резины.

Известно, что резина - эластичный материал, образующийся в результате вулканизации натурального (НК) или синтетических каучуков (СК), которые и определяют основные свойства резинового материала [122]. Для улучшения физико-механических свойств каучуков вводятся различные добавки (ингредиенты).

Структура макромолекул каучука линейная или слаборазветвленная и состоит из отдельных звеньев, которые имеют тенденцию свернуться в клубок, занять минимальный объем, но этому препятствуют силы межмолекулярного взаимодействия, поэтому молекулы каучука извилистые (зигзагообразные). Этим объясняется исключительно высокая эластичность каучука, т.к. под небольшой нагрузкой происходит распрямление молекул, изменяется их конфигурация.

Процесс изготовления резиновых изделий состоит из приготовления сырой резиновой смеси, получения из нее полуфабрикатов или деталей и их вулканизации.

Основными особенностями механических свойств резин являются:

- высокоэластический характер деформации каучуков;
- зависимость деформаций от их скорости и продолжительности действия деформирующего усилия, что проявляется в релаксационных процессах и гистерезисных явлениях;
- зависимость механических свойств от их предварительной обработки, температуры и воздействия различных немеханических факторов (света, озона, температуры и др.).

К изделиям из резины в зависимости от их функционального назначения предъявляют различные деформационно-прочностные, фрикционные и специфические свойства.

К специфическим свойствам относятся, например, морозостойкость, теплостойкость, сопротивление старению (сохранение механических свойств после воздействия света, озона, тепла и других факторов).

Расширение полигона укладки рельсовых скреплений в северных и восточных регионах, характеризующихся продолжительным воздействием

экстремально низких температур (вплоть до -60°C) и температурных перепадов с большой амплитудой (до 30°C), оказывает существенное влияние на эффективность эксплуатации и надежность прокладок. Поэтому особое внимание стали уделять поиску морозостойких материалов. Морозостойкость – это способность резины сохранять высокоэластические свойства при пониженных температурах, характеризующиеся коэффициентом морозостойкости при растяжении, температурой хрупкости и температурой механического стеклования.

Существует несколько подходов к решению этой проблемы. Первый, заключается в синтезе новых пластификаторов, предназначенных для использования в уже существующих резиновых смесях. Они должны обеспечивать высокий уровень низкотемпературных характеристик и мало вымываться из резино-технических изделий [123].

Второй подход связан с широким внедрением новых морозостойких каучуков и с созданием на их основе материалов с улучшенным комплексом свойств путем совмещения с другими полимерами или введением активных наполнителей органической и неорганической природы [124, 125].

Для подрельсовых и наспальных прокладок в работе [126] разработана резиновая смесь с улучшенными физико-механическими характеристиками: увеличенными жесткостью, коэффициентом трения и ресурсом работоспособности вулканизатов, которые повысят эксплуатационные свойства прокладки, ее износостойкость и срок службы.

Технический результат обеспечивается тем, что резиновая смесь включает каучук бутадиен-стирольный, каучук синтетический полиизопреновый, дивиниловый каучук, вулканизирующую группу, состоящую из серы, тетраметилтиурамдисульфида, дитиодиморфолина, стеариновой кислоты и оксида цинка, фенилендиамин, полимеризованный триметилдигидрохиолин, нефтяной битум, каолин и технический углерод, смесь дополнительно содержит каучук бутадиен-стирольный, каучук с содержанием связанного стирола и альфа-

метилстирола и тонкодисперсный осажденный диоксид кремния, технический углерод с удельной геометрической поверхностью 20-26 м²/г.

Вулканизаты имеют высокую твердость, повышенную работоспособность, хороший коэффициент трения и морозостойкость. При этом сохраняется уровень значений других показателей вулканизатов.

Удачным решением для прокладок рельсовых креплений является разработанный специалистами Тамбовского завода резино-технических изделий полимерный композит марки ТПК-5 на основе резиновой смеси [127], включающей каучук (качуки СКИ-3 и СКИ-18М или БНКС-18АМН), серный вулканизирующий агент, ускорительную группу (альтакс, 2-меркаптобензтиазол, тиурам Д), активатор вулканизации (оксид цинка и стеариновая кислота), наполнитель (технический углерод), пластификатор (дибутилсебагинат), противостаритель (ацетонанил и диафен ФП) и высокомолекулярная добавка (сополимер этилена с винилацетатом - сэвилен). Композит обладает высокими демпфирующими свойствами при отрицательных температурах, стойкостью к процессам старения материала, низкой склонностью к остаточной деформации в процессе эксплуатации, повышенными упруго-пластическими свойствами.

С повышением осевых нагрузок для обеспечения стабильности геометрических параметров рельсовой колеи возникла необходимость увеличения жесткости прокладок материалов, поэтому стали применять армирование резиновых материалов. Сначала армирование осуществляли длинными синтетическими кордовыми волокнами.

Для улучшения характеристик виброгашения предложен вариант комбинированной резиновой прокладки [128], содержащей несколько горизонтально расположенных слоев, образованных из разных материалов: основа - из мягкой резины, а верхняя часть и ее основание - из резины, армированной тканевыми слоями. Два крайних, противоположно расположенных тканевых слоя по обе стороны прокладки обрезаются резиновой смесью с добавкой 30% весовых порошкообразного сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

Однако степень адгезии между резиновой матрицей и поверхностью волокон была велика, а сам процесс изготовления прокладок - трудоемким. Поэтому, в дальнейшем научные исследования в области материаловедения прокладок были направлены на получение резинокордных материалов с различной массовой долей коротких волокон [129].

По существу короткие волокна выполняют те же армирующие функции, что и длинные нити корда: они способны увеличивать жесткость, прочность и сопротивление ползучести композитных материалов.

Основным преимуществом резиноволокнистых композитов с короткими волокнами по сравнению с резинокордными системами является возможность существенного снижения трудоемкости изготовления изделий, то есть создания на их основе малооперационного технологического процесса. В качестве резиноволокнистого наполнителя использовали измельченные отходы обрезиненного полиамидного корда шинного производства. Высокопрочный полиамидный корд обрезинивается смесью на основе каучука с полуактивным техническим углеродом и содержит систему модификаторов адгезии. Это обеспечивает высокую прочность, как самой резины, так и высокий уровень адгезии резины с кордом.

Резиноволокнистые композиты с короткими волокнами в настоящее время являются перспективными материалами для изготовления прокладок рельсовых креплений, т.к. наряду с дешевизной изготовления вследствие добавления отходов шинного производства позволяют с помощью изменения процентного содержания кордового наполнителя управлять жесткостью материала.

Однако следует отметить, что резины в виду своего пространственно сетчатого и наличием различных по конфигурации пор обладают склонностью к водопоглощению, низкой сопротивляемостью к некоторым агрессивным средам, недостаточной долговечностью. В связи, с чем стали искать альтернативу резиновым композитам [130].

В последние 10 лет на рынок прокладочных материалов стали активно внедряться различные полимерные термопластичные композиции (ТЭП) на основе поливинилхлоридов, полиуретанов и других сополимеров.

Термоэластопласты (ТЭП) представляют собой новый перспективный класс полимерных материалов, свойства которых близки к свойствам обычных резин, но в отличие от них перерабатываются высокопроизводительными методами, применяемыми при переработке пластмасс. В отличие от каучуков, они перерабатываются в резиновые изделия, минуя стадию вулканизации. Для этого используют методы формования, экструзии, литья под давлением с малыми технологическими потерями. При этом, благодаря отсутствию необходимости в вулканизации, создается возможность многократной повторной переработки отходов при изготовлении изделий. Следовательно, производство изделий из ТЭП является более экономичным и мало затратным вследствие отсутствия отходов, малой энергоемкости процесса их переработки, чем изделий из резины.

Термоэластопласты (ТЭП) или термопластичные эластомеры (ТПЭ, TPE, thermoplastic elastomer) - это синтетические полимеры, которые при обычных температурах обладают свойствами резины, а при повышенных (120-200 °С) - размягчаются, подобно термопластам.

Сочетание таких свойств обусловлено тем, что ТЭП является блоксополимером, в макромолекулах которого эластичные блоки чередуются в определённой последовательности с термопластичными [131-137].

Стоит также отметить, что термоэластопласты подразделяют на несколько видов в зависимости от того, какой компонент лежит в основе термоэластопласта. Для изготовления прокладок рельсовых креплений применяют в основном ТЭПы, у которых основным компонентом является полиуретан, термоэластопласты на основе поливинилхлорида, а также их смеси [111-113].

Для регулирования свойств ТЭП вводят различные минеральные наполнители или стабилизаторы с пластификаторами. В результате чего они могут обладать:

- высокой механической прочностью, особенно при растяжении;

- способностями к противодействию УФ-излучению, озону или влаге;
- хорошей стойкостью к воздействию агрессивных сред;
- высокой износостойкостью;
- долговечностью;
- эластичностью;
- хорошими электроизолирующими свойствами.

В работе [138] предложена термопластичная эластомерная композиция для прокладок под рельсы, которая содержит полиэфирный термоэластопласт, сополимеры олефинов и смолу, содержащую ароматические фрагменты и гидроксильные группы. Композиция обеспечивает более высокий уровень физических и механических свойств и повышение химической устойчивости к технологическим жидкостям прокладок, изготовленных из нее.

Однако опыт эксплуатации прокладок из ТЭП на основе ПВХ, наиболее распространенных в настоящее время, показал склонность материала к пластическому течению, особенно в начальный период, появлению остаточных деформаций, длительное время восстановления после снятия нагрузки, низкую морозостойкость.

В работе [114] предложен морозостойкий композит на основе полиэфирного термоэластопласта, представляющий собой блок-сополимеры полибутилентерефталата (жесткий блок) и политетраметиленоксид (мягкий блок). Важным преимуществом данных термоэластопластов является возможность управления их структурой, механическими и упруго-эластическими свойствами за счет изменения соотношения в их структуре макромолекул гибких и жестких блоков, а также их молекулярной массы.

На железных дорогах зарубежных стран широко применяют полиуретановые ТЭПы амортизирующие элементы в конструкциях верхнего строения железнодорожного пути.

К полиуретанам относят высокомолекулярные соединения, содержащие значительное количество уретановых групп, независимо от строения остальной части молекулы. Обычно эти полимеры получают при взаимодействии

полиизоцианатов с веществами, имеющими несколько гидроксильных групп (гликоли, касторовое масло, простые полиэфиры, амины и карбоксилы). Поэтому в полиуретанах кроме уретановых групп можно обнаружить амидные, мочевиные, эфирные (простые и сложные) группы, а также ароматические и алифатические радикалы.

Ведущими фирмами в области производства полиуретанов являются BASF Wyandotte и The Dow Chemical Company.

Для снижения нагрузок, действующих на балластный слой, в работе [139] предложено инновационное техническое решение: использование упругих подкладок из полиуретановых материалов под железобетонными шпалами, которые позволяют реализовать у железобетонных шпал некоторые положительные характеристики деревянных.

В последнее время предприняты попытки создания комбинированных прокладок, состоящих из отдельных, различных по своим свойствам, элементов.

В работе [140] предложена дешевая, технологичная и надежно работающая упругая прокладка, комбинированная из нескольких материалов, по крайней мере, из двух видов пластмасс с различными показателями твердости и упругости, имеющая две противоположные внешние контактные стороны. Причем из твердой пластмассы выполнена жесткая основа прокладки, а одна из внешних контактных сторон прокладки сформирована из упругой пластмассы. Толщина основы составляет не менее 0,20% от общей толщины прокладки. Противоположные внешние стороны прокладки имеют одинаковую толщину. Основа выполнена со сквозными отверстиями, часть одной из поверхностей которой имеет выпуклости для формирования рельефа соответствующей внешней стороны прокладки.

Аналогичным техническим решением является упругая многослойная комбинированная прокладка-амортизатор [141], выполненная в виде набора расположенных горизонтально один над другим и соединенных между собой двух и более упругих элементов, жесткость которых выбирают из условия обеспечения суммарной жесткости прокладки в диапазоне 50-150 т/см. Опорная поверхность

нижнего элемента выполнена гладкой или профилированной с возможностью обеспечения постоянной площади контакта и жесткости, упругие элементы соединены между собой с возможностью обеспечения отсутствия взаимного продольного и поперечного смещения (например, клеевым способом или посредством выступов и ответных соосных отверстий (простым наложением).

Зарубежными авторами [142] предложена похожая модель рельсовой подкладки, которая состоит из пластины основания с устройством для размещения на ней рельса слоя электроизолирующего материала, расположенного на пластине основания. Таким образом, обеспечивают электроизоляцию отдельных частей рельсового пути друг от друга.

В работе [143] запатентована дополнительная упругая рельсовая подкладка, закладываемая под подошву рельса на металлическую U-образную и резиновую прокладки, которая состоит из несоединенных между собой внешней прямоугольной синтетической оболочки, двух внутренних синтетических оболочек, одна из которых такого же, а вторая уменьшенного размера. Оболочки подкладки изготовлены из полиэтилена, нейлона и полибутана.

Однако использование в одном изделии материалов с различными физико-механическими свойствами (полиамида и резины, металла и синтетического полимера) при длительном воздействии динамических эксплуатационных нагрузок приводит к интенсивному разрушению поверхности контакта пластин вследствие значительной величины поверхностного трения. Поверхностное разрушение сказывается в ухудшении их масло- и влагостойкости, а также характеристик виброгашения.

Таким образом, основными материалами прокладок рельсовых креплений, эксплуатируемые в настоящее время на сети железных дорог РФ, являются:

- резина на основе натурального и синтетического каучука;
- резинокордные композиты;
- термоэластопласты на основе смеси поливинилхлорида и полиуретана.

Разработка новых демпфирующих материалов была направлена на улучшение определенных физико-механических свойств (прочностных,

морозостойкости, стойкости к воздействию агрессивных сред и др.). Однако, основными параметрами амортизирующих материалов являются упруго-гистерезисные свойства – способность эффективно перерабатывать разночастотные динамические вибрации.

В связи, с чем целесообразно направить исследовательские работы на изучение упруго-гистерезисных свойств современных демпфирующих материалов: модифицированных, гибридных, комбинированных.

1.5 Современные способы оптимизации свойств полимерных композиционных материалов

В связи с тем, что получение комплекса необходимых свойств на одном типе полимера не всегда представляется возможным, а производство новых полимеров связано с большими экономическими затратами, актуальным способом решения данной задачи является модификация существующих полимерных материалов. С помощью модификации стремятся сохранить полезные свойства материала, устранить нежелательные и одновременно добавить новые [144].

Большой вклад в изучении различных направлений модификации внесли С.Д. Разумовский, А.М. Кочнев, Г.Е. Заиков, О.И. Тужиков, А.Н. Озерин, С.Г. Калганова, Д.О. Завражин, Н.С. Ениколопов, А.А. Попов, Ц. Сяопин, Х.К. Кву, Р. Дагостино.

Для целенаправленного регулирования строения, структуры и свойств полимеров и материалов на их основе используют различные способы модификации: физическую, химическую или их комбинацию: физико-химическую.

Физическая модификация основана на изменении физических свойств полимеров путем преобразования их надмолекулярной структуры при различных физических воздействиях без изменения химического строения макромолекул, например, путем воздействия на полимер внешних факторов (механических, ультразвуковых, высокочастотных, облучения и т.п.); изменения температурно-

временных режимов структурообразования полимера из расплава; введением в полимерную матрицу различных добавок и др. При этом химическое строение молекул не меняется.

С помощью физической модификации осуществляют также ориентацию полимерных материалов. Максимальную степень ориентации линейных полимеров достигают при переработке их в синтетические волокна, при этом значительно увеличиваются показатели прочности и модуля упругости.

Химическая модификация полимеров основана на возможности осуществления многих химических превращений. Наиболее широкое применение нашли: полимераналогичные превращения, внутри - и межмолекулярная циклизация линейных полимеров, блоксополимеризация, привитая сополимеризация, поперечное соединение линейных макромолекул (сшивание), варьирование молекулярной массы в процессе синтеза линейных макромолекул.

Полимераналогичные превращения при синтезе линейных полимеров основаны на полной или частичной замене функциональных групп, что дает возможность создавать новые полимеры.

Внутри - и межмолекулярная циклизация линейных полимеров находит широкое применение при изготовлении углеродных волокон, получаемых пиролизом полиакрилонитрильных волокон.

Блоксополимеризацию линейных полимеров проводят последовательным соединением нескольких линейных макромолекул (блоков) разного химического состава в одну линейную макромолекулу.

Привитая сополимеризация линейных полимеров заключается в присоединении к промежуточным звеньям макромолекул основного полимера макромолекул другого. Модификация линейных полимеров привитой сополимеризацией является особенно перспективным направлением в производстве волокон.

Поперечное соединение макромолекул линейных полимеров (сшивание) в технологии производства и переработки полимеров связано с преимуществами полимеров с сетчатой и пространственной структурой.

Варьирование молекулярной массой при синтезе линейных полимеров используют на разных этапах создания композиционных материалов – от изменения свойств компонентов до разработки новых методов их совмещения и переработки в изделия.

Физико-химическую модификацию полимеров проводят путем введения в их состав различных целевых добавок в виде наполнителей, пластификаторов, стабилизаторов, антипиренов, красителей и т.п. Оптимальное соотношение модифицирующих добавок обеспечивает необходимые технологические, эксплуатационные и специальные свойства полимерных материалов как на основе термопластичных, так и термореактивных полимеров.

Применение физической модификации (например, вибрационной обработки армирующих нитей на стадии их пропитки) значительно повышает прочностные характеристики. Как сказано в предыдущей главе, таким методом усиливали резиновые прокладки рельсовых скреплений.

Модификация путем механоактивации синтетических изопреновых каучуков марки СКИ-3 и бутадиенового каучука СКД-Л позволило улучшить упруго-прочностные свойства (снизить жесткость и повысить пластичность) [145].

Направленное изменение свойств слоистого металлополимерного композиционного материала путем совместной термообработки и обработки токами высокой частоты показано в работах Х.Ш. Яхьева [146]. Данный метод может применяться для производства различных металлополимерных прокладок в конструкциях ходовых частей вагонов.

С помощью плазменной модификации полимерных мембран [147] улучшили структуру поверхностного слоя, что способствовало повышению эксплуатационных характеристик.

В работе [148] представлена эффективная методика ультразвуковой девулканизации резины для реализации возможностей регенерации и возвращения вторичного сырья в производство. Выполнены расчеты по количественной оценке параметров процесса усталостного разрушения

межмолекулярных связей, которые обеспечивают достижение требуемых результатов.

Однако следует отметить, что процессы структурной модификации являются энергоемкими.

Наибольшее распространение в настоящее время получила композитная модификация: образование двух или многокомпонентных смесей полимеров с неорганическими или органическими модифицирующими добавками определенной геометрии (волокна, чешуйки, шарики и гранулы) [149]. Различают модификацию длинными волокнами и лентами и короткими, которые диспергируются в непрерывной матрице. Все эти элементы выполняют в основном усиливающую функцию.

Особенностями резиноволокнистых композитов являются анизотропия механических свойств, возможность регулирования модулей, сочетание жесткости и гибкости материала в перпендикулярных направлениях, повышенное сопротивление разрушению при ограниченных деформациях, что обуславливает стабильность размеров изделий при длительном действии напряжений.

В работах [150-160] исследован механизм деформации и разрушения резиноволокнистых композитов и выявлены локальные участки перенапряжений, являющиеся очагами разрушения. Нарушение контакта между матрицей, обладающей высокой деформативной способностью, и практически недеформируемыми волокнами начинается с образования вакуолей у концов и перегибов волокон. Кинетические и топологические особенности разрушения определяются структурной морфологией и условиями деформирования систем. С увеличением содержания волокна распределение напряжений становится более однородным, чувствительность сетки к действию напряжения возрастает. Увеличение интенсивности влияния напряжения на константу скорости деструкции эластомерных цепей подтвердил экспериментальные данные о том, что процесс разрушения композита начинается в наиболее напряженной области вблизи поверхности волокна.

Изменение напряженно-деформированного состояния и целенаправленное воздействие на процессы разрушения и свойства резиноволокнистых композитов можно осуществлять за счет соответствующих модифицирующих добавок.

При объемной модификации матрицы промоторами адгезии модификатор преимущественно взаимодействует с эластомером и лишь частично мигрирует на границу раздела фаз, что приводит к росту жесткости и прочности матрицы. Вакуоли образуются при более высоких значениях напряжения; повышается чувствительность сетки к влиянию напряжения и скорость разрастания вакуолей. Результатом является рост прочности композитов в статических условиях и снижение выносливости в динамических режимах испытаний.

При поверхностной модификации волокна олигодиенами в условиях интенсивного механохимического воздействия происходит частичная прививка модификатора к волокну. Количество привитого олигодиена определяется активностью его функциональных групп, значительно возрастающая с увеличением степени сдвиговой деформации. Матрица практически не изменяет свойств; меняются прочность связи на границе раздела фаз и упругие свойства граничного слоя. Уменьшаются чувствительность сетки к влиянию напряжения и скорость разрастания вакуолей. Результатом является повышение прочности резиноволокнистых композитов как в статических, так и в динамических условиях испытаний.

Присутствие упругих частиц измельченных вулканизатов обеспечивает более высокий уровень сохранения напряжения в резиноволокнистых композитах после циклического деформирования. Большая глубина деструктивных изменений измельченного вулканизата уменьшает количество локальных перенапряженных зон и приводит к росту усталостной выносливости композитов.

Как сказано в предыдущей главе, данный метод используют для усиления материала резиновых прокладок рельсовых. Наиболее эффективным армирующим элементом в прокладках рельсовых креплений железнодорожного пути является измельченный полиамидный корд (отход шинного производства) [129, 161].

Для применения в авиационной промышленности исследован композиционный материал с матрицей из силиконовой резины и различной объемной долей армирующих волокон из никелида титана [162]. Увеличение адгезионной прочности между элементами композиционного материала достигается при снижении шероховатости поверхности никелида титана. При нагреве предварительно деформированного до 10% композиционного материала с объемной долей армирующего волокна от 10 до 31% образцы полностью восстанавливают форму, что свидетельствует о наличии у полученного композиционного материала эффекта памяти формы.

В работе [163] рассмотрены новые древесно-полимерные композиты конструкционного назначения, армированные РЕТ-волокном, или метарамидным и графитированным волокном. Вариация физико-механических свойств данного композита возможна путем изменения соотношения эластичности армирующих волокон и полимера матрицы.

Ряд работ посвящен полимерным композитам, содержащим в своем составе в качестве модифицирующей добавки переработанную резиновую крошку [164], с помощью которой удалось повысить предел прочности при растяжении, однако, плотность и твердость по Шору А снизились.

Химическую модификацию каучуков осуществляют на стадии их синтеза или на стадии переработки в готовые изделия [165].

Наиболее распространена модификация каучуков на стадии их переработки, при которой реакционноспособные соединения (модификаторы), введенные в состав резиновой смеси реагируют с макромолекулами эластомеров с образованием в их структуре небольшого количества функциональных групп, способных в последующем образовывать специфические валентные, межмолекулярные и адсорбционные связи с различными компонентами резины. Наиболее эффективными являются модификаторы, склонные к полимеризации или поликонденсации [166].

Повышению деформационно-прочностных свойств и долговечности наполненных композитов способствует введение в композиционный материал

резорциновой смолы, которая улучшает смачиваемость наполнителя и применяется как адгезионная добавка [167].

Введение в состав полимеров кремнийорганических соединений позволяет улучшить их формуемость, прочностные показатели, а также стабилизировать их пластоэластические свойства [168, 169].

В работе [170] установлено, что при частичной замене кремнекислотного наполнителя на сшитый каучуковый микрогель Капоргепе® приводит к улучшению упруго-гистерезисных характеристик при 0°C и плюс 60°C, что приводит к повышению сцепления на мокрой дороге и снижению потерь на качение легковых шин соответственно.

Расширенные лабораторные испытания модификаторов на основе фумаровой и малеиновой кислот и гексаметилентетрамина показали их более высокую эффективность, чем традиционного модификатора РУ, а также стеарата кобальта - промотора адгезии резин к металлокорду. Использование МКУ и ФКУ позволяет улучшить по сравнению с модификатором РУ такие свойства резин, как работа разрушения, прочность связи, динамическая выносливость при многократном растяжении, стойкость к тепловому старению, сопротивление разрастанию трещин с проколом, а также такие свойства, как прочность связи, когезионная прочность, динамическая выносливость при многократном растяжении, сопротивление раздиру, работа разрушения, стойкость к тепловому старению по сравнению со стеаратом кобальта [171].

Применение диизоционатов в комплексе с незамещенными лактамами при производстве крупнотоннажных полиолефинов позволяет улучшить такие эксплуатационные характеристики, как морозостойкость, адгезия, термостабильность и прочность [172].

В работах [173-176] установлено, что модификация полимеров фуллеренами и другими углеродными наноматериалами позволяет получать композиции с улучшенным комплексом эксплуатационных свойств. Смесь фуллеренов оказывает комплексное модифицирующее действие на физико-механические свойства НК, СКД и композиций на их основе в дозировке 0,005 -

0,015 масс. ч. на 100 масс. ч. полимерной матрицы, позволяющее использовать в технологии изготовления резин. Введение смеси фуллеренов в дозировке 0,005 - 0,015 масс. ч. в композиции на основе НК и СКД позволяет сохранить параметры переработки резин (время вулканизации, вязкость по Муни и др.). Выявлено ингибирующее действие смеси фуллеренов при тепловом старении и усталостном нагружении резин на основе НК и СКД.

В работе Kwo Han Kio [177] показано, что термоэластопласты на основе эпоксицированного натурального каучука обладают высокими показателями маслостойкости, газонепроницаемости, а также стойкости к старению на воздухе. В сочетании с сополимером стирола и акрилонитрила повышают прочностные характеристики: сопротивлению к раздиру и растяжению.

Исследования релаксационных свойств нанокмпозиций на основе бутадиен-стирольного термоэластопласта ДСТ-30 и детонационных наноалмазов и наноалмазной шихты [178] выявили особенности модифицирующего влияния наноалмазной шихты на комплекс физико-механических и релаксационных свойств полимерной матрицы.

Природный минеральный наполнитель шунгит является полифункциональным модификатором полиуретановой композиции на основе политетраметилэтиленгликоля, выполняющим одновременно функцию пластификатора и усиливающего наполнителя, что приводит к улучшению эксплуатационных и технологических свойств изделий из данного композита [179].

С помощью гидрирования предварительно эпоксицированного каучука повышают термостойкость и стойкость к старению по сравнению с эпоксицированным натуральным каучуком [180].

Улучшение термостойкости и стойкости к старению полимеров особенно актуально для амортизирующих элементов железнодорожного транспорта, работающих в условиях циклического сжатия в широком диапазоне температур.

Одним из перспективных методов модификации свойств полимеров является получение смесей, так как смешение разнородных по свойствам

полимеров дает возможность получать материалы, сочетающие в себе свойства всех компонентов системы. Однако, большинство полимер-полимерных пар, при смешении проявляют термодинамическую несовместимость. В связи с чем, в настоящее время большое внимание уделяется получению так называемых гибридных связующих или связующих второго поколения, которые после отверждения сами представляют собой полимерные композитные матрицы [181-188].

Среди демпфирующих материалов особый интерес представляют новые композиционные материалы - резинопласты. В резинопластах в качестве матрицы используется термопластичный полимер; наполнитель - частицы резины (величиной до сотен микрон), полученные при измельчении отходов резино-технических изделий. Отличие дисперсной порошковой резины от традиционно используемых жестких наполнителей заключается, в первую очередь, в том, что модуль упругости эластичного наполнителя значительно меньше модуля упругости термопластичной матрицы. По составу (полимерная матрица - частицы наполнителя) и способу получения резинопласты относятся к классу дисперсно-наполненных композитов.

В работе [189] проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния дисперсного наполнителя на деформационное поведение наполненных пластичных полимеров, которое зависит от свойств матричного полимера, содержания и размера частиц эластичного наполнителя. Содержание наполнителя при пластично-хрупком переходе определяется отношением прочности к нижнему пределу текучести (напряжению вытяжки шейки) матричного полимера, при хрупко-пластичном и при пластично-пластичном переходах - отношением верхнего предела текучести матричного полимера к нижнему. При макрооднородном пластичном растяжении композитов с эластичными частицами возможен рост относительного удлинения при разрыве. Вблизи мелких частиц появляются овальные поры, а вблизи крупных - ромбовидные. Ромбовидные поры способны инициировать пластично-хрупкий переход при крайне низком содержании наполнителя.

В последние годы за рубежом интенсивно развивается производство и применение динамических термоэластопластов (ДТЭП), сочетающих свойства вулканизированных каучуков при эксплуатации и термоэластопластов в процессе переработки. Изменением соотношения каучуков и термопластов, используемых для изготовления ДТЭП, можно добиться в изделиях из них нужных показателей в диапазоне от резины до пластмассы. В нашей стране разработаны наполненные ДТЭП композиты [190, 191], которые в сравнении с ненаполненным ДТЭП, обладают улучшенным комплексом свойств: повышенными деформационно-прочностными характеристиками (модуль упругости; прочность при разрыве; относительное удлинение при разрыве); а также термостабильностью, маслобензостойкостью [192, 193].

Для повышения морозостойкости уплотнительных деталей из резины на основе бутадиен-нитрильного каучука с содержанием акрилонитрила 18 % (БНКС-18) при вальцевании вводят сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) и механоактивированный природный цеолит [194]. При этом, использование механоактивированного цеолита позволило улучшить взаимодействие на межфазной границе "бутадиен-нитрильный каучук/сверхвысокомолекулярный полиэтилен".

На основании проведения натурных испытаний материалов на основе пропиленоксидного каучука (СКПО) и политетрафторэтилена (ПТФЭ) показана перспективность использования смесей полимеров для эксплуатации в условиях холодного климата [195]. Резина на основе СКПО и ПТФЭ, содержащая минеральную добавку — цеолитовую пасту на основе природных цеолитов Якутских месторождений и дибутилфталата, после экспозиции в нефти обладает более высоким уровнем морозо-, маслостойкости и остаточной деформации сжатия по сравнению с композицией, не содержащей минеральной добавки.

Повышение морозостойкости полимеров является актуальным направлением исследований и в настоящее время в связи со строительством северного широтного хода.

Альтернативной возможностью получать материалы, сочетающие в себе свойства всех компонентов системы, является создание «сэндвичей» из различных материалов.

Многослойные композиты типа сэндвич - структур, состоящие из нескольких слоев материала разной структуры и природы происхождения становятся все более востребованными. Замена традиционных материалов полимерными композитами, способными совмещать в себе разные функции, становится все более актуальным [196, 197]. Главной задачей в исследованиях слоистых композиций является поиск путей повышения прочностных и эксплуатационных характеристик, позволяющих расширить область их применения.

Для строительной области разработана конструкция многослойного композита с пенополиуретановым наполнителем, армированным базальтовыми нитями, что позволяет повысить физико-механические характеристики сэндвич структуры на 30% [198]. При этом использование в качестве армирующих элементов базальтовых нитей, пропитанных эпоксидной смолой, улучшает механические характеристики сэндвич-панелей.

Концепция конструирования многофункциональных слоистых композиционных материалов — сэндвич-панелей с высокой виброзащитой и теплоизоляцией, предназначенных для использования в устройствах и сооружениях, эксплуатируемых в арктических условиях, предложена в работе [199].

Компанией Pandrol International совместно с Dupon Engineering Polimers для высоконагруженной угольной линии предложена комбинированная «ошипованная» амортизирующая прокладка рельсовых креплений, состоящая из вкладыша (термопласт Hytrel 6358) и подложки (термопласт Hytrel EP2) [200].

Таким образом, современные полимерные композиции должны удовлетворять комплексу технических и технологических требований, которые совместить в одном типе материала практически невозможно. Актуальным

решением данной проблемы являются модификация существующих полимерных материалов, разработка гибридных материалов и конструирование сэндвичей.

Выводы по первому разделу. Постановка целей и задач исследований

1. Тенденция роста осевых нагрузок и интенсивности грузопотоков, сопровождающаяся увеличением динамического воздействия на элементы верхнего строения железнодорожного пути и подвижного состава, требовала постоянного совершенствования их конструкций. Модернизацию осуществляли за счет увеличения массы и жесткости, однако при этом ухудшались динамические параметры общей системы. Наиболее эффективным решением данной проблемы являлось применение дополнительных полимерных амортизаторов в рессорном подвешивании, опорных поверхностях букс, буксовых проемов боковой рамы, зоне подпятника и боковых скользунов тележек грузовых вагонов, а также в подрельсовых элементах верхнего строения железнодорожного пути.

2. Разрабатываемые конструкции ходовых частей грузовых вагонов направлены на создание инновационных решений, кардинально отличающихся от массово применяемой тележки 18-100. При этом в последние годы за основу брали серийно выпускаемые конструкции зарубежных стран. Однако, несмотря на положительный опыт, прямое его копирование осложнено существующими различиями и конструктивными особенностями отечественных и зарубежных грузовых вагонов, а также условиями их эксплуатации.

3. Аналогично происходила модернизация конструкций подрельсовых элементов верхнего строения железнодорожного пути. Переход от жестких к упругим рельсовым скреплениям стал наиболее эффективным способом улучшения и достижения стабильности динамических процессов во всех направлениях, позволил снизить износ элементов и увеличить межремонтные сроки.

4. Совершенствование элементов подвижного состава и железнодорожного пути должно происходить взаимосвязано, т.к. они представляют единую термодинамическую систему и находятся в непосредственной зависимости друг от друга. При этом, возникающие силы взаимодействия и ускорения элементов пути и подвижного состава являются функцией не только геометрических параметров неровностей, скорости и направления движения подвижного состава, но и расчетных параметров элементов пути и колес (жесткости шейки рельса, контактной жесткости, массы пути, жесткости основания рельсовой нити, коэффициента вязкого трения, жесткости диска колеса, жесткости рессорного подвешивания), т.е. упруго-динамических характеристик рельсовых нитей и динамико-кинематических характеристик подвижного состава.

5. Таким образом, анализ результатов проведенных научных исследований взаимодействия пути и подвижного состава показал наличие множества факторов неблагоприятно влияющих на динамику процесса, которые необходимо решать, опираясь на достигнутые результаты, с помощью различных теоретических и экспериментальных методов, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

6. Наибольший опыт создания эффективных амортизирующих элементов в настоящее время получен при модернизации рельсовых скреплений, направленной на обеспечение надежной эксплуатации в различных условиях, определяемых категоричностью линий, планом пути и др. Анализ конструктивных решений амортизирующих прокладок показал, что тип рифлений оказывает незначительное влияние на изменение жесткости прокладки, т.к. она изначально находится в сжатом состоянии под действием прижимающего к рельсу усилия клемм и поездной нагрузки. В аналогично сжатом состоянии под весом надрессорной части вагона находятся упругие элементы неподрессоренной части вагона и подпятниковой зоны. Следовательно, основными параметрами, управляющими жесткостью упругих полимерных элементов рельсовых

скреплений и подвижного состава, являются толщина демпфирующего слоя и тип материала.

7. На сегодняшний день малоизученными остаются вопросы выбора упруго-гистерезисных характеристик демпфирующего материала, способного надежно работать в широком температурном диапазоне, а также моделирования их в статических и динамических расчетах.

8. Разработка новых демпфирующих материалов путем физической, химической или комбинированной модификаций была направлена на улучшение определенных физико-механических свойств (прочностных, морозостойкости, стойкости к воздействию агрессивных сред и др.). Однако основными параметрами амортизирующих материалов являются упруго-гистерезисные свойства – способность эффективно перерабатывать разночастотные динамические вибрации, изучению которых уделялось недостаточно внимания. В связи с расширением полигона эксплуатации, направленного на северные и восточные регионы, возникла необходимость создания новых материалов, способных работать в широком интервале климатических температур. Совмещение в одном типе материала целого комплекса технических и технологических требований практически невозможно.

9. В связи, с чем целесообразно направить исследовательские работы на изучение упруго-гистерезисных свойств различных демпфирующих материалов: однокомпонентно-модифицированных, гибридных и комбинированных.

Проведенный анализ позволяет сформулировать цель работы:

В соответствии с поставленной целью в работе необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель многомассовой колебательной системы (вагон – путь) с учетом возможности аппроксимации упруго-гистерезисных характеристик реальных амортизирующих материалов и варьирования ими;

- разработать методы экспериментальных исследований упруго-гистерезисных характеристик амортизирующих материалов в различных температурных условиях;
- провести экспериментальные исследования различных полимерных материалов для определения влияния конструктивных, физико-химических, температурных параметров на упруго-гистерезисные свойства амортизаторов;
- разработать методику проектирования амортизирующих элементов;
- выполнить верификацию методики на основе многовариантных расчетов математической модели многомассовой колебательной системы и экспериментальных исследований для определения рациональных параметров амортизирующих элементов.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОМАССОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (ВАГОН – ПУТЬ)

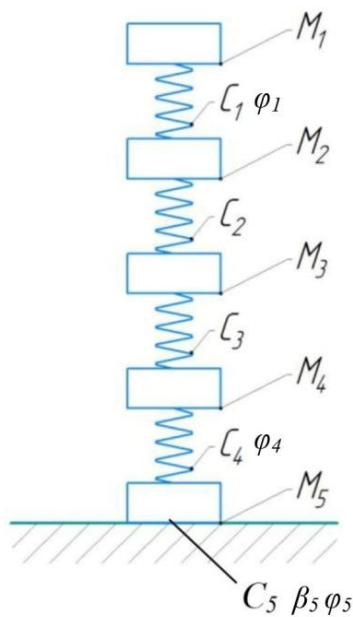
Аналитический обзор, представленный в главе 1, показал, что железнодорожный путь и подвижной состав представляют сложную термодинамическую систему, в которой они взаимодействуют, находясь в зависимости друг от друга. Основная задача исследования динамических процессов в системе «вагон-путь» заключается в том, чтобы определить оптимальные значения параметров этой системы (габаритные размеры, массу, жесткость и др.), при которых снижаются колебания, вибрации и динамические силы, отрицательно влияющие на конструкции подвижного состава и пути.

Движение вагона по железнодорожному пути можно представить в виде колебаний многомассовой системы, показанной на рисунке 2.1.

Для описания движения тела в пространстве применим принцип Даламбера, согласно которому отбрасывают связи между телами и заменяют их действие реакциями, прикладывают силы инерции и моменты сил инерции [22, 201]. Расчетная схема взаимодействия ходовых частей с верхним строением железнодорожного пути представлена на рисунке 2.2.

В соответствии с принципом Даламбера, приложенные к каждой точке активные силы, реакции связей и силы инерции в любой момент времени образуют уравновешенную систему сходящихся сил.

Следовательно, в каждый момент движения механической системы работа активных сил, сил реакций связей и сил инерции на любом возможном перемещении из занимаемого положения равна нулю.



M_1 – масса подрессоренной массы вагона, приходящейся на 1 колесо

C_1 – жесткость рессорного подвешивания

ϕ_1 – коэффициент трения фрикционного гасителя колебаний

M_2 – масса неподдресоренной части вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колесной пары)

C_2 – жесткость обода колеса

M_3 – масса обода колеса

C_3 – жесткость рельса

M_4 – приведенная масса рельса

C_4 – жесткость подрельсовой прокладки

ϕ_4 – коэффициент внутреннего трения подрельсовой прокладки

M_5 – приведенная масса подрельсового основания (1/2 часть шпалы)

C_5 – Жесткость пути

β_5 – коэффициент сухого трения балласта

ϕ_5 – коэффициент вязкости балласта

Рисунок 2.1 – Обобщенная модель взаимодействия ходовых частей с верхним строением железнодорожного пути

В соответствии с принципом Даламбера система дифференциальных уравнений примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 \ddot{z}_1 + R_1 = 0 \\ M_2 \ddot{z}_2 + R_2 - R_1 = 0 \\ M_3 \ddot{z}_3 + R_3 - R_2 = 0 \\ M_4 \ddot{z}_4 + R_4 - R_3 = 0 \\ M_5 \ddot{z}_5 + R_5 - R_4 = 0 \end{array} \right. \quad 2.1$$

где M_i – значение; R_i – постоянная величина.

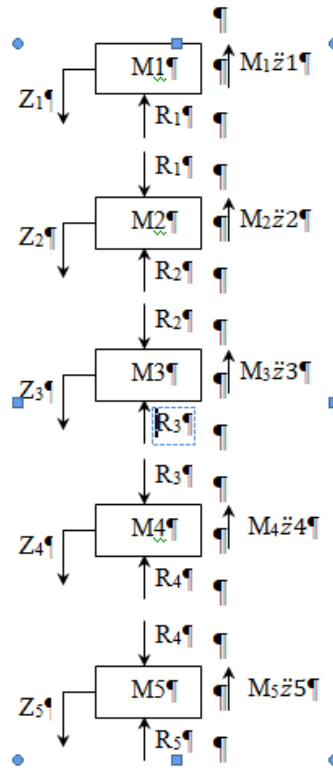


Рисунок 2.2 – Расчетная схема взаимодействия ходовых частей с верхним строением железнодорожного пути

Реакции связей на расчетной схеме направляются так, как бы они действовали при положительной деформации упругих и упруго-вязких элементов. За положительную деформацию принимаем деформацию сжатия. Уравнения реакций связей являются функциями жесткостей, координат, их производных:

$$\begin{cases} R_1 = C_1[1 + \varphi_1 \text{sign}(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)] (z_1 - z_2) \\ R_2 = C_2(z_2 - z_3) \\ R_3 = C_3(z_3 - z_4) \\ R_4 = C_4(z_4 - z_5) + \beta_4(\dot{z}_4 - \dot{z}_5) \\ R_5 = C_5[1 + \varphi_5 \text{sign}(\dot{z}_5)] z_5 \end{cases} \quad 2.2$$

Уравнения составлены для любого малого промежутка времени, в течение которого можно предположить, что силы инерции, внешние силы и реакции, являются постоянными величинами.

Имитируем удар колеса по рельсу.

При этом начальные условия примут следующий вид:

$$t=0:$$

$$z_1=z_2=z_3=z_4=z_5=0$$

$$\dot{z}_1=\dot{z}_2=\dot{z}_3=V_0$$

$$\dot{z}_4=\dot{z}_5=0$$

Для расчета реакций в элементах колебательной системы (вагон – путь) и их отклонений разработана специальная программа, которая предусматривает варьирование параметрами жесткости и внутреннего трения одного из элементов [202]. Интегрирование дифференциальных уравнений второго порядка осуществляют численными методами. При этом в программу закладывают динамические гистерезисы, построенные экспериментальными или расчетными методами.

На основе анализа многовариантных расчетов можно оценить эффективность работы амортизирующего элемента из различных демпфирующих материалов: модифицированных, гибридных и комбинированных. При чем условия работы амортизатора приближены к реальным, т.к. входными данными к программе являются аппроксимации динамических упруго-гистерезисных характеристик материалов с учетом влияния температурных факторов.

Выводы по второму разделу

1. Разработанная программа расчета многомассовой колебательной системы «вагон-путь» позволяет с высокой степенью точности и минимальными затратами определить реактивные силы и отклонения в элементах многомассовой термодинамической системы в зависимости от упруго-гистерезисных свойств различных материалов и конструкций амортизаторов.

2. На основе проведения многовариантных расчетов можно оценить эффективность работы амортизирующего элемента из различных демпфирующих материалов: модифицированных, гибридных и комбинированных.

3. Входными данными к программе являются аппроксимации динамических упруго-гистерезисных характеристик материалов с учетом влияния температурных факторов, поэтому условия работы амортизатора приближены к реальным условиям эксплуатации.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УПРУГО-ГИСТЕРЕЗИСНЫХ СВОЙСТВ ДЕМПФИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ (ЭЛАСТОМЕРОВ)

3.1 Определение показателей (оценочных характеристик) упруго-гистерезисных свойств демпфирующих материалов

Движущиеся по железнодорожному пути экипажи представляют собой сложную термодинамическую систему со многими степенями свободы, линейными (упругими) и нелинейными (вязко-пластичными) связями, совершающую вынужденные колебания под действием возмущающей динамической нагрузки. Следовательно, условия эксплуатации демпфирующих материалов для амортизаторов верхнего строения железнодорожного пути и подвижного состава предполагают работу под действием сжимающих статических и динамических (циклических и ударных) нагрузок в широком диапазоне температур окружающего воздуха. Причем, вновь разрабатываемые конструкции демпферов должны эффективно гасить динамические воздействия в вертикальной и горизонтальной, поперечной оси пути плоскости и высокочастотные вибрации. Вместе с тем, они должны обладать достаточной прочностью и жесткостью, чтобы обеспечивать стабильность геометрических параметров многомассовой системы и работоспособность в различных условиях эксплуатации. В связи, с чем актуальным является выбор соответствующих оценивающих показателей и методик экспериментальных исследований.

Известно, что одной из характеристик упруго-гистерезисных свойств материалов является жёсткость вязкоупругой связи [203, 204], определяемая как касательная или секущая к нагрузочной ветви диаграммы сжатия амортизатора. При этом показателем упругих и вязко-упругих связей принимают коэффициент жёсткости, представляющий собой отношение статической жёсткости к динамической при разных температурных воздействиях. Диапазон определения жесткости выбирают из условий работы амортизатора, которые в общем случае

соответствуют диапазону от предварительного нагружения до возможной максимальной нагрузки.

Затраченную работу амортизатора за цикл деформации отражают механические потери (площадь петли гистерезиса) [205, 206], характеризующие долю рассеивания энергии упругой деформации. Чем больше площадь петли гистерезиса, тем больше энергии рассеивается, тратится на нагрев и активацию химических процессов, а значит, и на затухание вынужденных колебаний. При этом целесообразно оценивать как статический, так и динамический гистерезис при различных температурных воздействиях. Мерой пластичности упругого материала является величина коэффициента механических потерь (относительный гистерезис). Альтернативным энергетическим показателем является полезная упругость, характеризующая долю возвращенной работы в следующий цикл деформации от затраченной на деформирование. Следовательно, чем больше полезная упругость, тем меньше энергии диссипируется, ниже эластичность материала.

На основании проведенного анализа существующих нормативных документов [205, 207] и исследований отечественных и зарубежных авторов [204, 206] предложено для оценки упруго-гистерезисных свойств демпфирующих материалов для амортизаторов железнодорожного транспорта использовать следующие жесткостные и энергетические характеристики:

- статическую жесткость в интервале 20-90 кН, как отношение приложенной вертикальной нагрузки с заданной скоростью к соответствующей деформации в направлении действия нагрузки.

$$C_{\text{stat}} = \frac{F_{90} - F_{20}}{z_{90} - z_{20}}, \quad 3.1$$

где F_{90} , F_{20} – максимальная и минимальная нагрузки в цикле нагружения, кН;

Z_{90} , Z_{20} – изменение толщины образца при нагрузках 90 и 20 кН, мм;

- коэффициент изменения статической жесткости, определяемый как отношение статической жесткости при температуре -40°C к статической жесткости при температуре $+23^{\circ}\text{C}$.

$$K_{\text{stat}} = \frac{C_{\text{stat}1}}{C_{\text{stat}0}}, \quad 3.2$$

где $C_{\text{stat}1}$, $C_{\text{stat}0}$ – статическая жесткость при температуре -40°C и $+23^{\circ}\text{C}$ соответственно, кН/мм;

- динамическую секущую жесткость, как отношение приложенной нагрузки в диапазоне 20-90 кН к изменению перемещения в данном диапазоне.

$$C_{\text{dinc}} = \frac{F_{\text{max}} - F_{\text{min}}}{Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}}}, \quad 3.3$$

где F_{90} , F_{20} – максимальная и минимальная нагрузки (90 кН и 20 кН) в цикле нагружения, кН;

Z_{max} , Z_{min} – изменение толщины образца при соответствующих нагрузках, мм.

- динамическую тангенциальную жесткость, являющаяся касательной к ветви нагружения соответствующей 60 кН.

$$C_{\text{dint}} = \frac{F_{90} - F_{60}}{Z_{90} - Z_{60}}; \quad 3.4$$

где F_{90} , F_{60} – нагрузки, соответствующие 90 кН и 60 кН в цикле нагружения, кН;

Z_{90} , Z_{60} – изменение толщины образца при соответствующих нагрузках, мм;

- коэффициент жесткости, определяемый как отношение динамической жесткости при амплитуде нагрузок 20-90 кН и частоте 10 Гц к статической жесткости при $+23^{\circ}\text{C}$.

$$K = \frac{C_{\text{din}}}{C_{\text{stat}}}, \quad 3.5$$

где C_{din} , C_{stat} – динамическая и статическая жесткость, кН/мм;

- коэффициент механических потерь (относительный гистерезис) при температурах $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$, представляющий собой отношение механических потерь за цикл (площадь гистерезиса) к полной энергии деформации цикла (площадь, ограниченная нагрузочной ветвью нагружения);

- полезную упругость (долю возвращенной работы от затраченной на деформирование образца) при температурах $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\text{ПУ} = \frac{S_b}{S} 100 (\%), \quad 3.6$$

где S_b , S – площади диаграммы, ограниченные прямой, параллельной оси OX и проходящей через точку $y = 20\text{ кН}$, и разгрузочной или нагрузочной ветвью гистерезиса;

- механические потери за цикл (долю рассеивания энергии упругой деформации) при температурах $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$, определяемые площадью петли гистерезиса.

Амплитуда нагрузок (интервал) при определении жесткостных параметров соответствует условиям работы надбуксовых амортизаторов в груженом режиме и подрельсовых амортизаторов при прохождении по ним грузового состава.

Количественно конструктивное совершенство амортизатора оценивается двумя коэффициентами [208, 209]:

- коэффициент полноты диаграммы, показывающий какую часть от максимально возможной работы воспринял амортизатор, и представляющий собой отношение площади прямоугольника (произведение максимального усилия на максимальную деформацию) к полной энергии деформации цикла (площадь, ограниченная нагрузочной ветвью нагружения).

- коэффициент гистерезиса, показывающий какая часть энергии, воспринятая амортизатором рассеивается (превращается в тепло), и представляющий собой отношение площади гистерезиса к площади прямоугольника (произведение максимального усилия на максимальную деформацию).

3.2 Метод экспериментальных исследований упруго-гистерезисных характеристик материалов

Методы экспериментальных исследований упруго-гистерезисных свойств полимерных материалов основаны на статических и динамических нагружениях образцов с определенной амплитудой, скоростью, частотой и анализе гистерезисов, получаемых за цикл деформации.

Большинство амортизаторов верхнего строения железнодорожного пути и подвижного состава работают в динамическом режиме при предварительном статическом нагружении сжатия под действием веса перевозимого груза и усилий, создаваемых другими конструктивными элементами (например, жесткими и упругими клеммами для обеспечения прижатия рельса шпале). В связи, с чем упругие характеристики материалов определяют в рабочем (не от нулевом) диапазоне. Для получения сходимости и сопоставимости результатов испытаний выбран диапазон определения показателей в интервале 20-90 кН. Частота приложения нагрузки составляла 10 ± 1 Гц, что соответствует скорости движения подвижного состава ~ 160 км/ч.

Порядок проведения экспериментальных исследований упруго-гистерезисных характеристик материалов предусматривал следующие этапы.

Для подготовки образцов из полимерных материалов к испытаниям проводили предварительную нормализацию и кондиционирование [210, 211] при температуре $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ не менее 1 часа. Для этого образцы выдерживали при заданных условиях окружающей среды в пределах допускаемых отклонений.

Определение статической жесткости при сжатии и коэффициента изменения статической жесткости при температуре минус $(40_{-2})^\circ\text{C}$ проводили на испытательных машинах с максимальным статическим усилием на штоке гидроцилиндра – не менее 200 кН и погрешностью измерения менее 1%. Образцы располагали между металлическими плитами толщиной не менее 15 мм, геометрические размеры которых соответствовали размерам испытуемых образцов. Между верхней и нижней плитой и образцом вкладывали абразивный

материал, размер которого соответствовал размеру испытуемого образца. Сборку помещали в центр нижней площадки испытательной машины так, чтобы продольная ось образца совпадала с направлением сжимающей силы (рисунок 3.1).

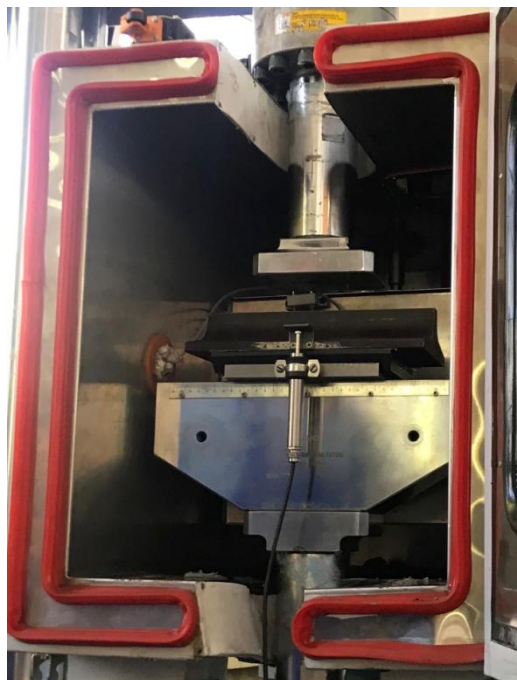


Рисунок 3.1- Стенд для экспериментальных исследований упруго-гистерезисных свойств полимерных материалов-демпферов

Скорость сближения нижней и верхней траверс испытательной машины соответствовала (120 ± 10) кН/мин. Максимальная нагрузка, прикладываемая к образцу при сжатии, составляла 100 кН.

Проводили трехкратное сжатие образца до 100 кН. Показатель жесткости образца определяли во время третьего нагрузочного цикла. Минимальные значения перемещений фиксировали при 20 кН, максимальные - при 90 кН.

Возбуждающее воздействие измеряли с помощью силоизмерителя испытательной машины.

Для регистрации перемещений с необходимой точностью ($\pm 0,001$ мм) с трех сторон опорной плиты устанавливали индуктивные датчики перемещений, а при температуре $(40_{-2})^{\circ}\text{C}$ тензорезисторные датчики перемещений, по показаниям

которых вычисляли среднее значение перемещений. В расчет жесткости образцов брали средние значения перемещений.

Для определения коэффициента изменения статической жесткости при температуре минус $(40_{-2})^{\circ}\text{C}$ на испытательную машину устанавливали температурную камеру с пределом изменения температуры от минус 60°C до плюс 100°C и погрешностью измерений $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Образцы выдерживали в камере при заданной температуре не менее 4 часов. После окончания времени выдержки проводили аналогичные испытания, не извлекая образца из камеры.

По результатам испытаний для каждого типа материала строили графики нагружения и снятия нагрузки, ограничивающие область гистерезиса.

Для определения динамической жесткости образцы устанавливали в сборку аналогично тому, как при статических испытаниях.

Образец подвергали воздействию циклической нагрузки с частотой (10 ± 1) Гц между минимальной нагрузкой нагрузочного цикла $F_{\min} = 20$ кН и максимальной нагрузкой нагрузочного цикла $F_{\max} = 90$ кН.

Через (10 ± 1) с после начала нагружения регистрировали значения перемещений образца (изменение толщины опорной поверхности) при $F_{\min} = 20$ кН, $F_{\max} = 90$ кН, $F_{60} = 60$ кН.

Для регистрации перемещений с необходимой точностью ($\pm 0,001$ мм) с трех сторон опорной плиты также устанавливали индуктивные датчики перемещений, а при температуре $(40_{-2})^{\circ}\text{C}$ тензорезисторные датчики перемещений, по показаниям которых вычисляли среднее значение перемещений. В расчет жесткости брали средние значения перемещений.

При определении динамической жесткости при температуре минус $(40_{-2})^{\circ}\text{C}$ на испытательную машину устанавливали температурную камеру с пределом изменения температуры от минус 60°C до плюс 100°C и погрешностью измерений $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Образцы выдерживали в камере при заданной температуре не менее 4 часов. После окончания времени выдержки проводили испытания, не извлекая образца из камеры.

По результатам испытаний для каждого типа материала строили графики нагружения и снятия нагрузки, ограничивающие область гистерезиса.

На основании полученных данных и графических построений вычисляли соответствующие жесткостные и энергетические характеристики.

Использованная в данной работе методика экспериментальных исследований позволила с высокой степенью точности, как при положительных, так и при отрицательных температурах, определить статические и динамические показатели жесткости полимерных материалов, используемых в качестве демпферов, рассчитать относительные коэффициенты жесткости при разных температурах, энергетические параметры: механические потери, полезную упругость, относительный гистерезис, а также количественно оценить конструктивное совершенство амортизатора.

3.3 Выбор материалов для исследования упругогистерезисных свойств амортизаторов железнодорожного транспорта

Элементы инфраструктуры и подвижной состав Российский железных дорог эксплуатируются в разных климатических зонах, поэтому применяемые в них амортизаторы должны сохранять свою работоспособность при различных температурах окружающей среды, влажности, воздействии агрессивных сред и солнечного излучения.

Жесткость амортизаторов определяется конструктивными особенностями и типом используемого материала. Уменьшение жесткости, достигаемое, например, применением мягких или повышенной толщины амортизаторов, снижает силы динамического взаимодействия в месте контакта колеса и рельса, давление рельса на одну шпалу, амплитуды вибрации частиц балластного слоя и грунтов земляного полотна, а также улучшает динамику подвижного состава особенно при прохождении различных неровностей пути. С другой стороны, заниженная жесткость приводит к росту сопротивления движению поезда и склонности к

изменению геометрических параметров рельсовой колеи, особенно в кривых малого радиуса и на участках с большими осевыми нагрузками.

В связи, с чем актуальной задачей проектирования демпферов для железнодорожного транспорта России является обоснованный выбор соответствующего материала.

В соответствии с задачами, решаемыми амортизаторами, к их материалам предъявлялся ряд требований, наиболее важными из которых являлись:

- Упругость для обеспечения демпфирования динамических вибраций.
- Механическая прочность, способность не разрушаться под воздействием механических нагрузок.
- Температуроустойчивость, способность сохранять свои механические свойства при воздействии высоких и низких температур.
- Дешевизна и доступность для снижения эксплуатационных расходов.

Как следует из главы 1, основным полимерным демпфирующим материалом в конструкциях ходовых частей подвижного состава и рельсовых креплений была резина. В дальнейшем для увеличения прочностных и жесткостных свойств резины стали применять различные виды ее армирования.

В последние 15 лет на рынок материалов-демпферов стали активно внедряться различные полимерные термопластичные композиции (ТЭП) на основе поливинилхлоридов и полиуретанов.

Термоэластопласты (ТЭП) представляют собой новый перспективный класс полимерных материалов, свойства которых близки к свойствам обычных резин, но в отличие от них перерабатываются высокопроизводительными методами, применяемыми при переработке пластмасс.

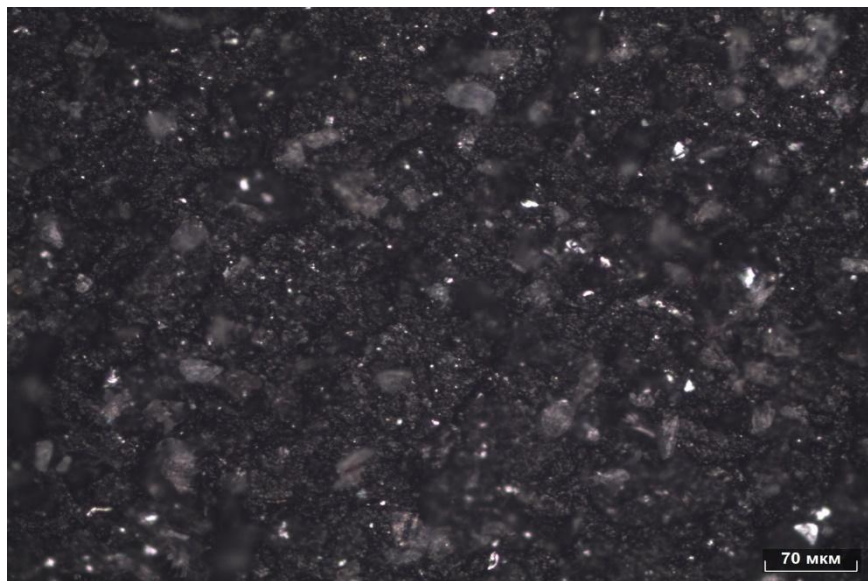
В связи с чем, среди всего многообразия современных амортизирующих материалов были выбраны четыре полимерные композиции (две на основе резиновой смеси и две разновидности композиционного термоэластопласта), считающиеся в настоящее время наиболее перспективными:

- полимерный композит на основе резиновой смеси (ТПРК), включающей каучук, серный вулканизирующий агент, ускорительную группу,

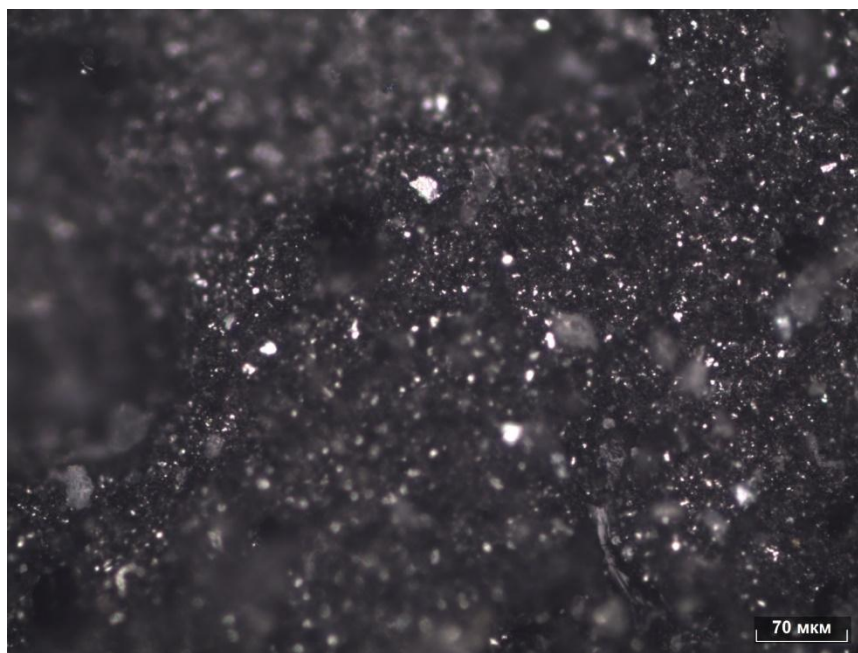
активатор вулканизации (оксид цинка и стеариновая кислота), наполнитель (технический углерод), пластификатор, противостаритель и высокомолекулярная добавка (сополимер этилена с винилацетатом - сэвилен);

- резиноволокнистый композит (РВК), содержащий каучук, полуактивный технический углерод, систему модификаторов адгезии и резиноволокнистый наполнитель в разном процентном соотношении (измельченные отходы обрезиненного полиамидного корда шинного производства);
- две разновидности композиционного термоэластопласта ТЭП1нж и ТЭП2вж (смесь упругого термоэластопласта (полиуретана или полиэфирных блоксополимеров) и поливинилхлорида пластиката), отличающиеся процентным содержанием компонентов (жесткой и мягкой фаз).

Микроструктура композитов представлена на рисунках 3.2, 3.3.



а)

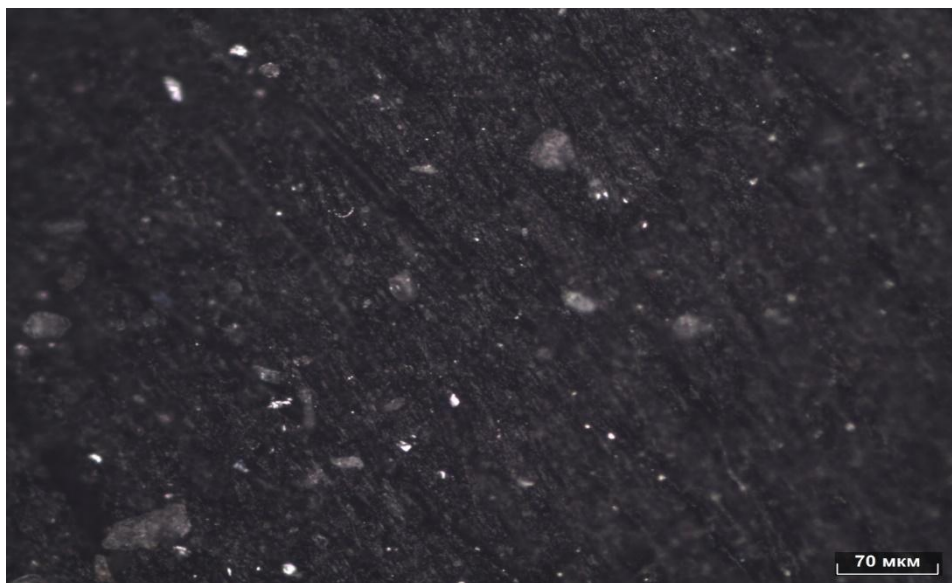


б)

Рисунок 3.2- Микроструктура резиновых композитов:

а) Композит на основе резиновой смеси (ТПРК);

б) Резиноволокнистый композит (РВК)



а)



б)

Рисунок 3.3- Микроструктура композиционных термоэластопластов:

а) Композиционный термоэластопласт (ТЭП2вж);

б) Композиционный термоэластопласт (ТЭП1нж)

Микроструктура резиновых композитов (темное поле – каучук, светлое поле – наполнитель) более пористая, т.к. имеет сетчатое строение, а композиционных термоэластопластов – более жесткая, состоящая из твердой фазы с твердо-закрепленными полимерными цепями (темное поле) и мягкой фазы (эластомера).

Причем, концентрация мягкой фазы композиционного термоэластопласта ТЭП2вж значительно меньше, чем у ТЭП1нж.

Выводы по четвертому разделу

На основе изложенного выше, следуют выводы, приведенные ниже:

1. Для качественной оценки упруго-гистерезисных свойств демпфирующих полимерных материалов для амортизаторов железнодорожного транспорта целесообразно использовать жесткостные и энергетические характеристики, определенные в диапазоне температур эксплуатации: статическую и динамическую (секущую и тангенциальную) жесткость, коэффициенты изменения жесткости, коэффициент механических потерь (относительный гистерезис), полезную упругость, механические потери за цикл, а также коэффициент полноты диаграммы и коэффициент гистерезиса.

2. Разработанная методика экспериментальных исследований позволяет с высокой степенью точности, как при положительных, так и при отрицательных температурах, определить необходимые оценочные характеристики упруго-гистерезисных свойств различных полимерных материалов и использовать их для сравнения между собой и в качестве исходных данных для проектирования амортизаторов.

3. На основе анализа литературных данных и опыта применения выбраны перспективные материалы для исследования упруго-гистерезисных свойств амортизаторов: резиновый композит ТПРК, резинокордный композит с 20% коротких кордных волокон РВК, представляющий класс гибридных материалов) и два варианта термоэластопластов, отличающиеся процентным содержанием компонентов (жесткой и мягкой фаз).

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АМОРТИЗАТОРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

4.1 Влияние геометрических параметров на упруго-гистерезисные свойства амортизаторов

Эффективным средством снижения вертикальных и продольных динамических нагрузок, действующих в процессе эксплуатации на элементы верхнего строения железнодорожного пути, а также ходовых частей подвижного состава, является дополнительное применение различных полимерных прокладок и блоков.

Задача их проектирования условно делится на следующие этапы:

1. Определение места установки и требуемых жесткостных, демпфирующих характеристик, энергоемкости, статического прогиба.
2. Проектирование амортизаторов: выбор схемы расположения, геометрических размеров, проведение предварительных расчетов.
3. Прототипирование: изготовление опытного образца и проведение различных испытаний.
4. Корректировка и доработка опытного образца.

Выбор основных характеристик с целью рационального сочетания упругих и диссипативных свойств проводят на основе анализа колебательного процесса и накопленного опыта.

Для минимизирования затрат на проектирование полимерных амортизаторов проведен анализ влияния их геометрических параметров на упруго-гистерезисные свойства.

С целью изменения жесткостных параметров амортизатора применяют различные габаритные размеры, рифления, выемки, окантовочные выступы и т.д. Однако преобладающее влияние на показатели жесткости и их относительные коэффициенты оказывает толщина выбранного амортизатора.

Изучение взаимосвязи толщины, жесткости и других упруго-гистерезисных характеристик проведено на двух типах материалов разного класса: резиновом композите ТПРК с толщиной образцов 14 мм и 10 мм и композиционном термоэластопласте ТЭПнж с толщиной образцов 14,5 мм и 9,7 мм [212, 213]. Для этого, в соответствии с изложенной в разделе 3 методикой, экспериментально определены основные характеристики упруго-гистерезисных свойств резинового композита при температурах +23 °С и –40 °С, представленные на рисунках 4.1, 4.2, диаграммах 4.5-4.9 и в таблице 4.1, а также композиционного термоэластопласта при температурах +23 °С, представленные на рисунках 4.3, 4.4, диаграммах 4.12-4.16 и в таблице 4.2. Схемы, режимы, условия испытаний (скорости нагружения, параметры силового воздействия, частота нагружений, температура) соответствовали методике, представленной в разделе 2, поддерживались постоянными для каждого типа и размера образца.

Таблица 4.1 - Уруго-гистерезисные свойства образцов толщиной 10 мм и 14 мм из композиционного материала ТПК

Характеристика	Толщина 10 мм	Толщина 14 мм	k (1/ k)
Статическая жесткость, кН/мм, при температуре: +23 °С	122,1	86	1,42
–40 °С	122,1	90	1,36
Динамическая секущая жесткость, кН/мм, при температуре: +23 °С,	204,4	150,1	1,36
–40 °С	426,4	296,1	1,44
Динамическая тангенциальная жесткость, кН/мм, при температуре: +23 °С	311,4	220,9	1,41
–40 °С	392,4	288,9	1,36
Коэффициент изменения статической жесткости	1,1	1,1	1,0
Коэффициент жесткости при температуре: +23 °С	1,7	1,7	1,0
–40 °С	3,5	3,5	1,0
Коэффициент механических потерь (относительный гистерезис) при температуре: +23 °С	2,9	2,9	1,0
–40 °С	2,2	2,2	1,0
Полезная упругость, %, при температуре: +23 °С	34,7	33,3	1,04
–40 °С	44,9	44,9	1,0
Механические потери за цикл, Дж/см ³ , при температуре: +23 °С,	11,7	16,7	(1,43)
–40 °С	9,1	12,7	(1,45)

Примечание. k – соотношение значений исследуемых свойств, определенных при испытании образцов толщиной 10 и 14 мм соответственно.

Таблица 4.2 - Упруго-гистерезисные свойства образцов толщиной 9,7 мм и 14,5 мм из композиционного материала ТЭП1нж

Характеристика	Толщина 9,7 мм	Толщина 14,5 мм	k (1/ k)
Статическая жесткость, кН/мм, при температуре: +23 °С	102,1	66,2	1,54
Динамическая секущая жесткость, кН/мм, при температуре: +23 °С,	219,9	134,2	1,64
Динамическая тангенциальная жесткость, кН/мм, при температуре: +23 °С	220,0	135,2	1,63
Коэффициент жесткости при температуре: +23 °С	2,15	2,03	1,06
Коэффициент механических потерь (относительный гистерезис) при температуре: +23 °С	2,4	2,3	1,04
Полезная упругость, %, при температуре: +23 °С	40,8	40,0	1,02
Механические потери за цикл, Дж/см ³ , при температуре: +23 °С,	17,0	25,7	(1,51)

Примечание. k – соотношение значений исследуемых свойств, определенных при испытании образцов толщиной 10 и 14 мм соответственно.

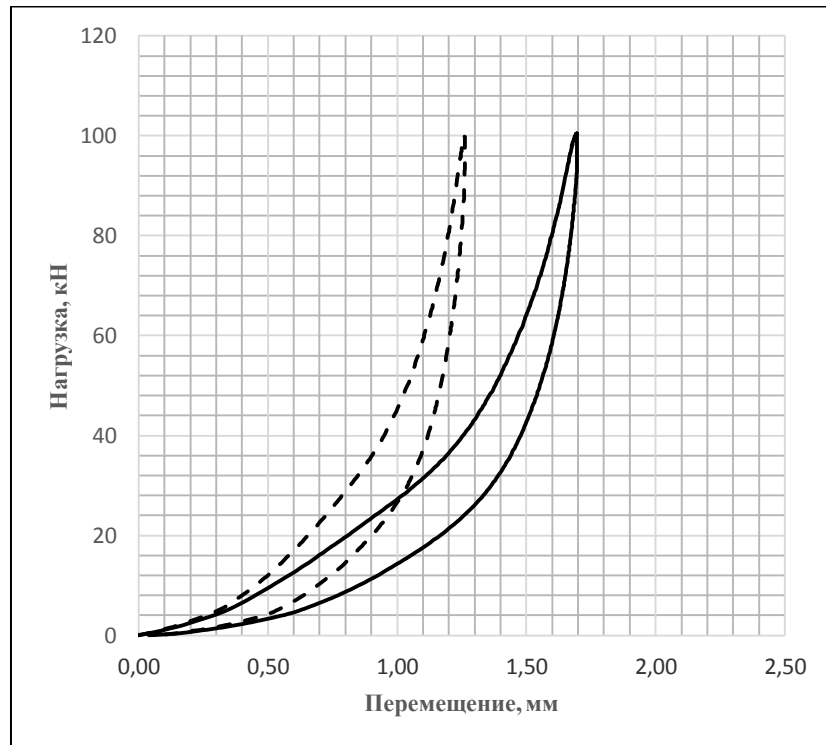


Рисунок 4.1- Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом нагружении для образцов из ТПРК толщиной 10 мм (пунктирная линия) и 14 мм (сплошная линия) при температуре +23 °С

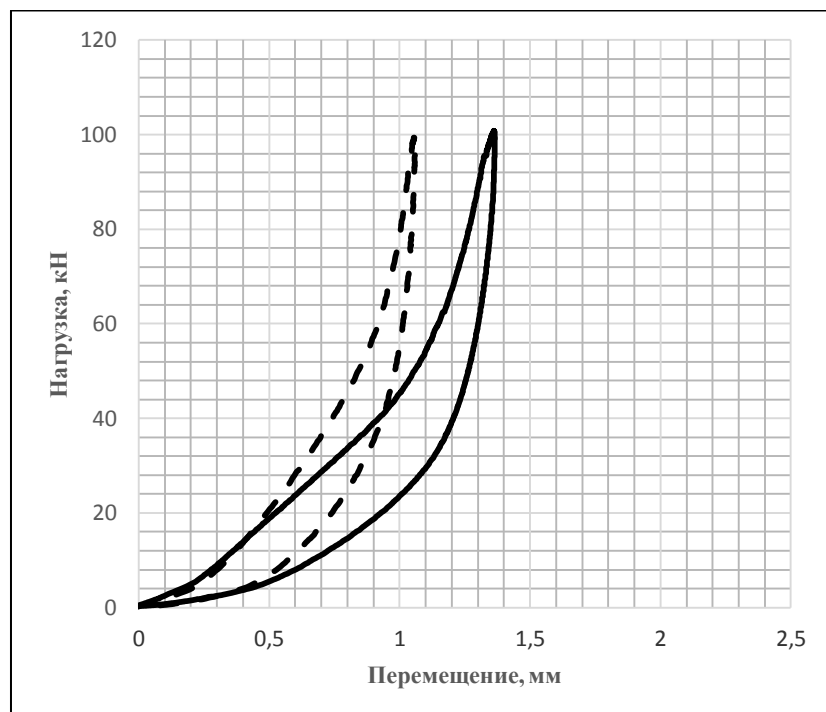


Рисунок 4.2 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом нагружении для образцов из ТПРК толщиной 10 мм (пунктирная линия) и 14 мм (сплошная линия) при температуре -40 °С

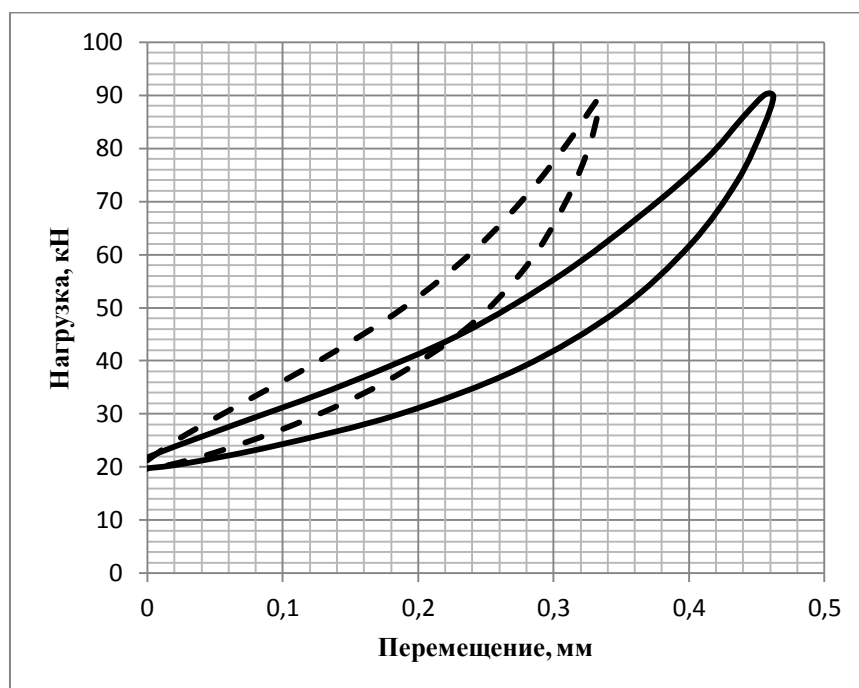


Рисунок 4.3 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения в случае динамического нагружения с частотой 10 Гц для образцов из ТПРК толщиной 10 мм (пунктирная линия) и 14 мм (сплошная линия) при температуре +23 °С

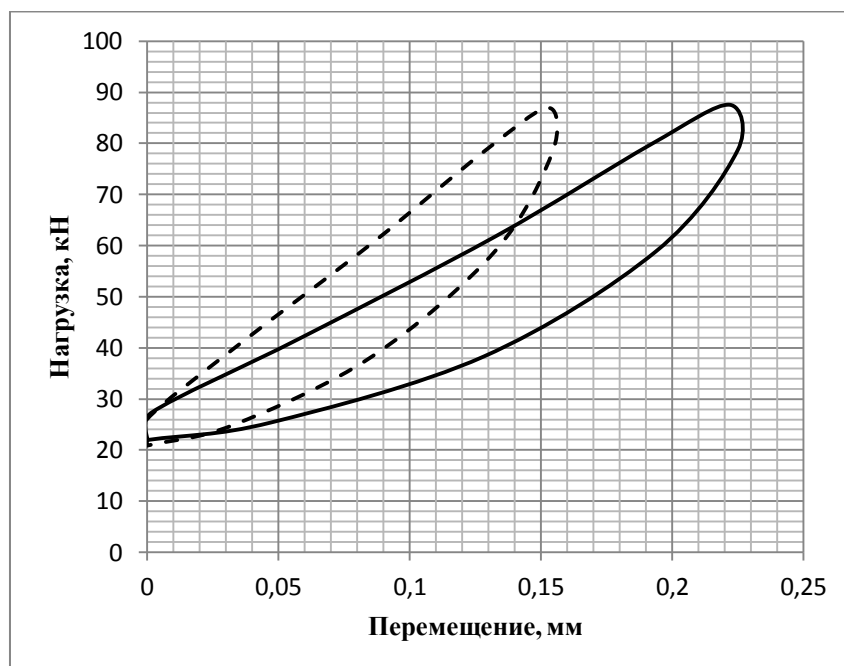
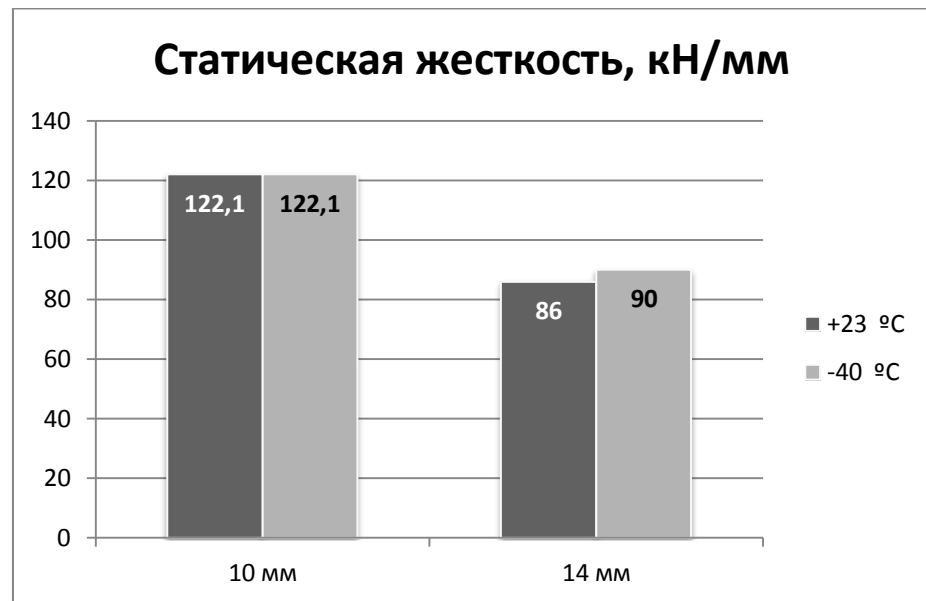
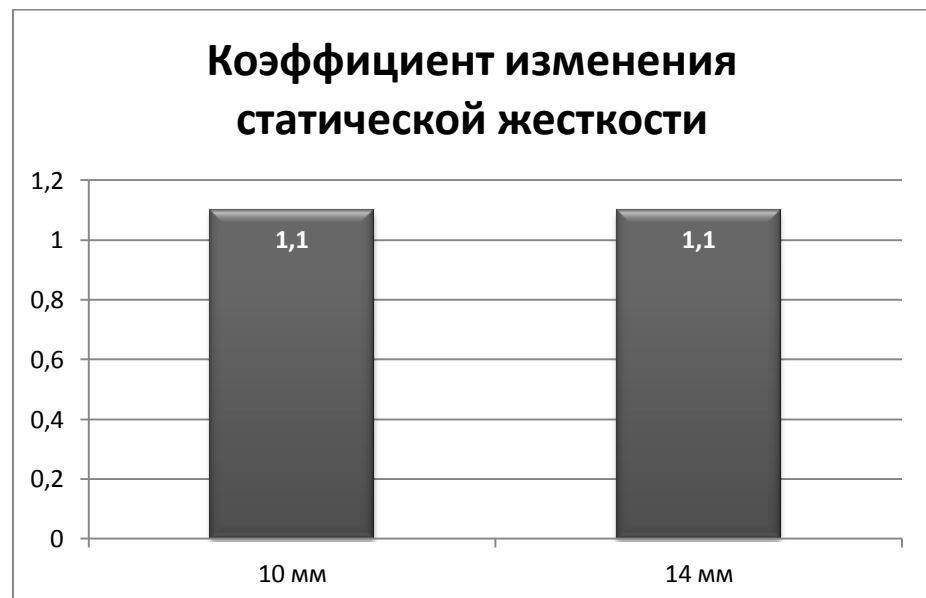


Рисунок 4.4 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения в случае динамического нагружения с частотой 10 Гц для образцов из ТПРК толщиной 10 мм (пунктирная линия) и 14 мм (сплошная линия) при температуре -40 °С.

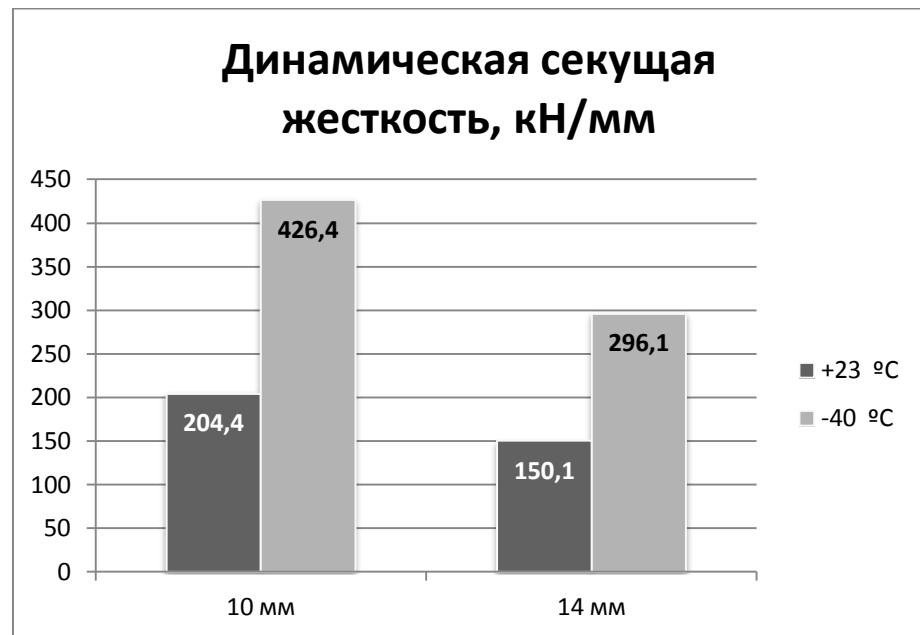


а)

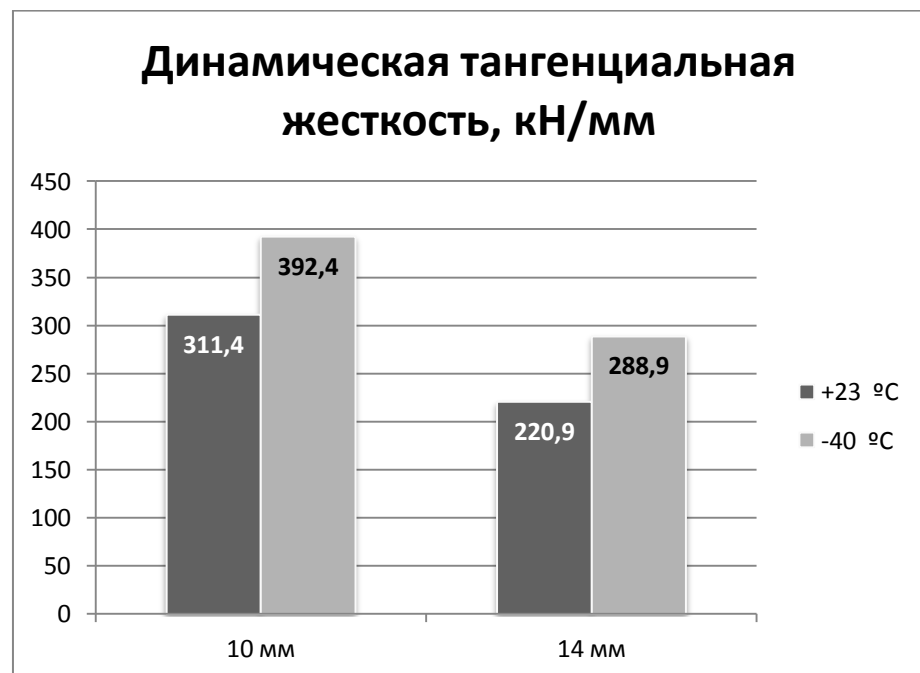


б)

Рисунок 4.5 – Диаграммы статической жесткости образцов из материала ТПРК толщиной 10 мм и 14 мм при температурах +23 °C и –40 °C (а); коэффициента изменения жесткости (б)



а)



б)

Рисунок 4.6 – Диаграммы динамической секущей (а) и тангенциальной (б) жесткости образцов из материала ТПРК толщиной 10 мм и 14 мм при температурах +23 °C и -40 °C

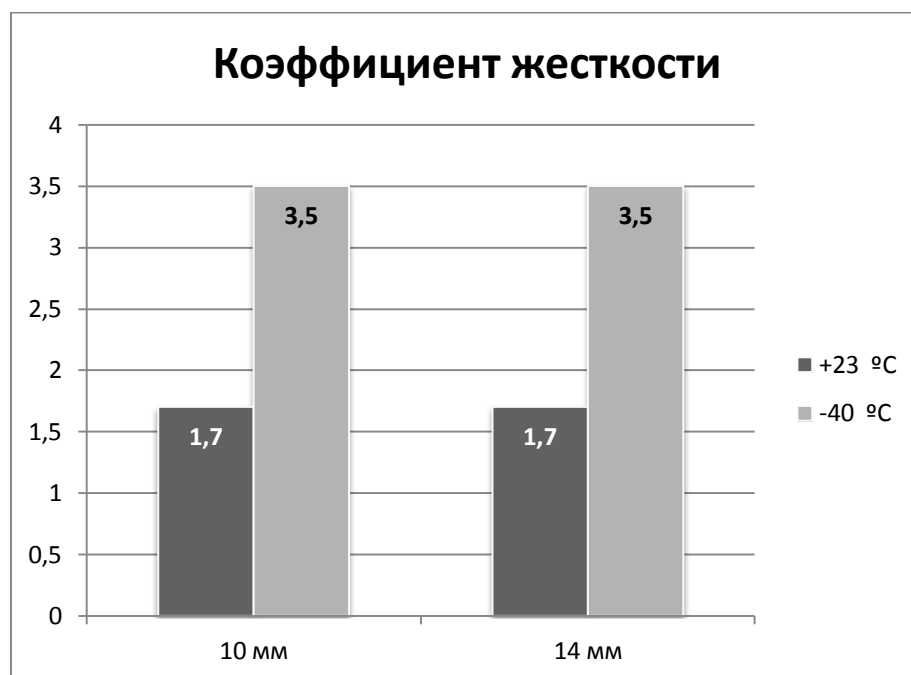


Рисунок 4.7 – Диаграмма коэффициента жесткости образцов из материала ТПРК толщиной 10 мм и 14 мм при температурах +23 °C и –40 °C

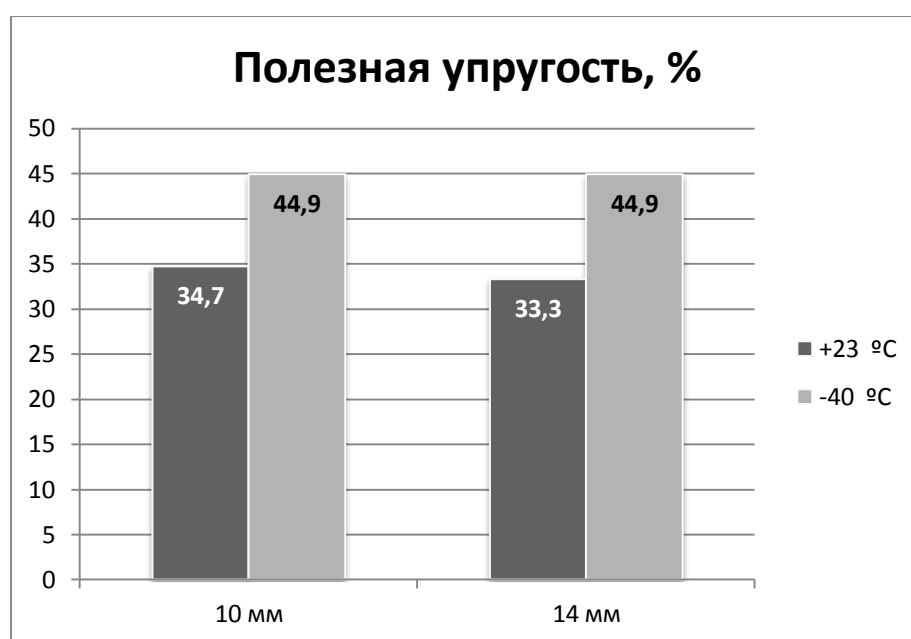
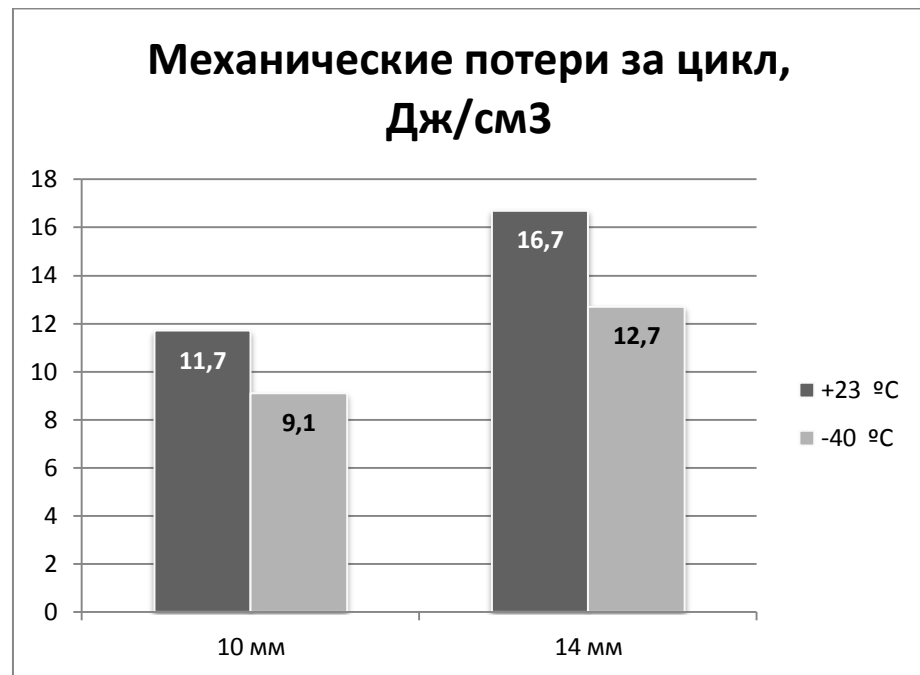
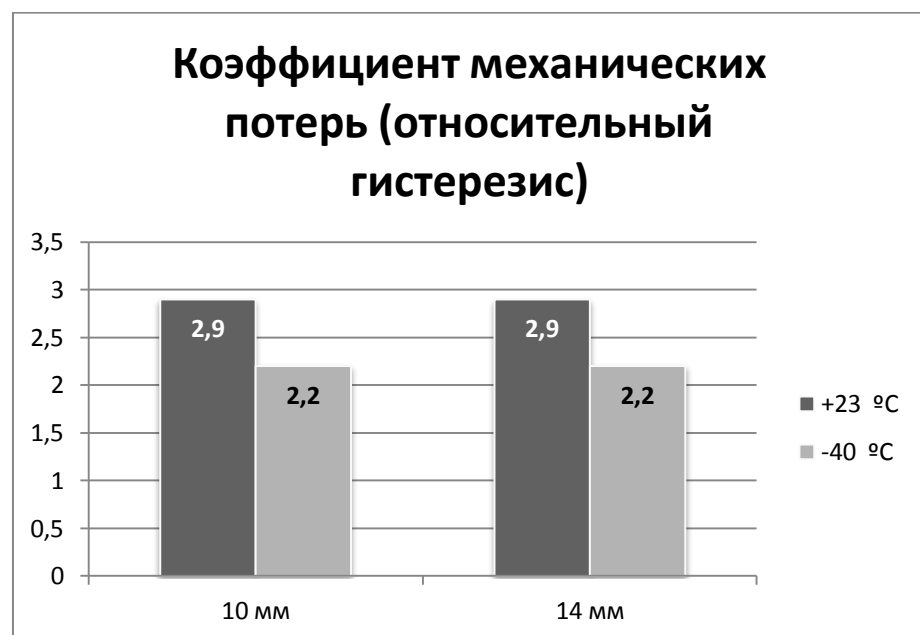


Рисунок 4.8 – Диаграмма полезной упругости образцов из материала ТПРК толщиной 10 мм и 14 мм при температурах +23 °C и –40 °C



а)



б)

Рисунок 4.9 – Диаграммы механических потерь (а) и коэффициента механических потерь (относительный гистерезис) (б) образцов из материала ТПРК толщиной 10 мм и 14 мм при температурах +23 °C и –40 °C

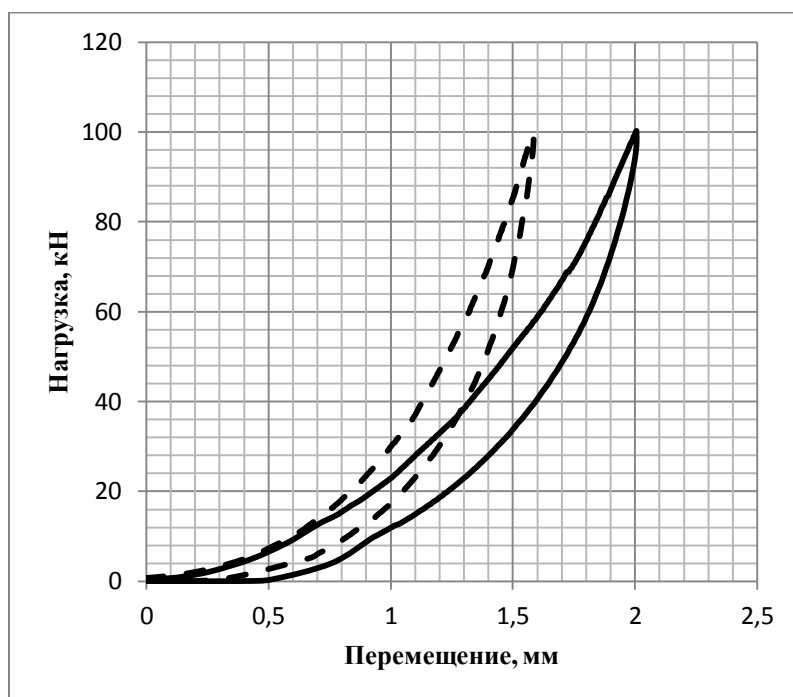


Рисунок 4.10- Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом нагружении для образцов из ТЭП1нж толщиной 9,7 мм (пунктирная линия) и 14,5 мм (сплошная линия) при температуре +23 °С

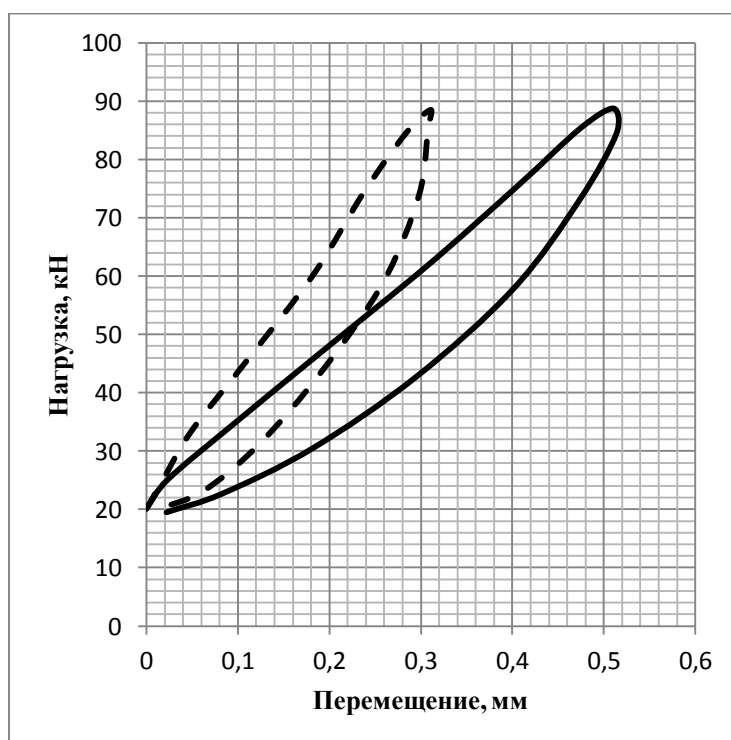


Рисунок 4.11 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения в случае динамического нагружения с частотой 10 Гц для образцов из ТЭП1нж толщиной 9,7 мм (пунктирная линия) и 14,5 мм (сплошная линия) при температуре +23 °С

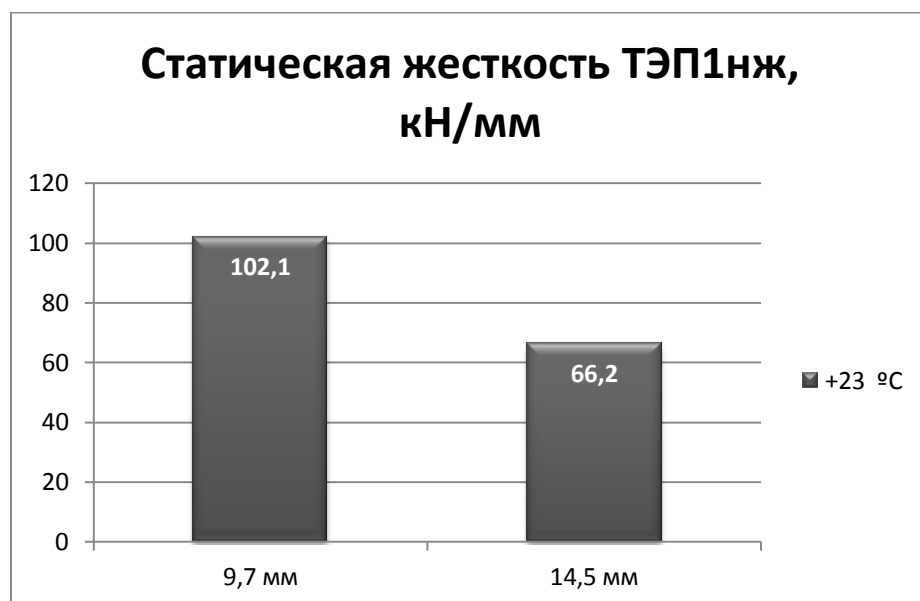
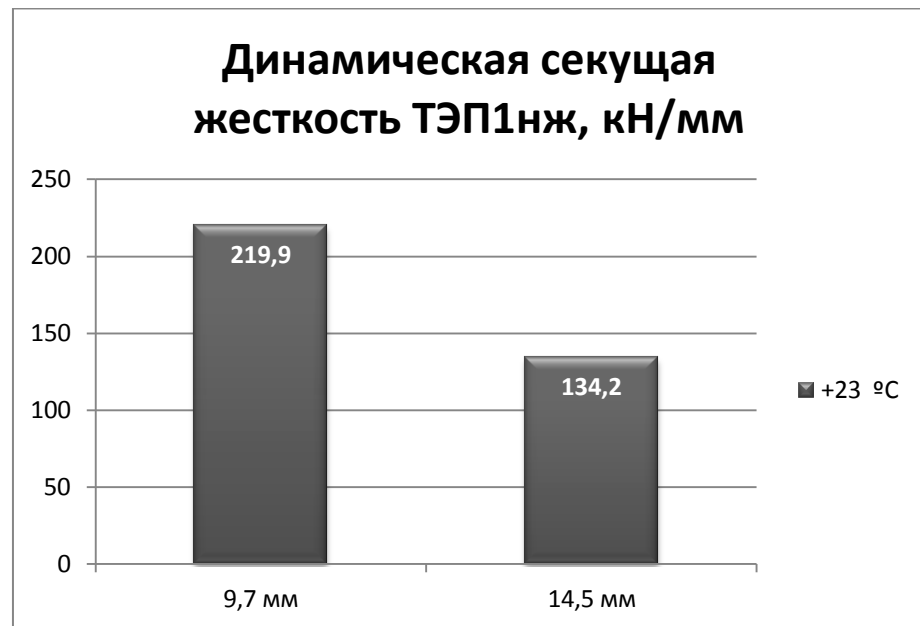
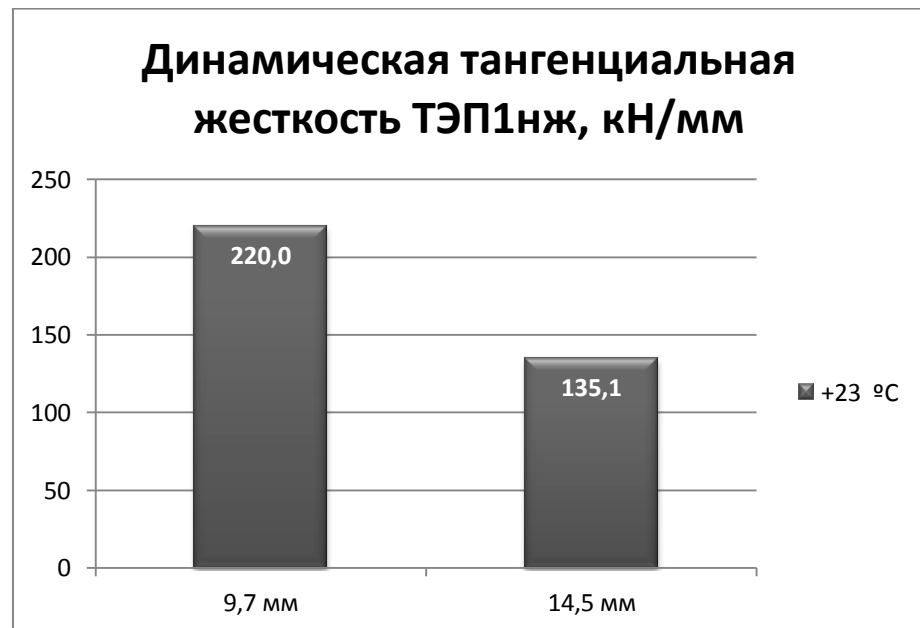


Рисунок 4.12 – Диаграмма статической жесткости образцов из материала ТЭП1нж толщиной 9,7 мм и 14,5 мм при температуре +23 °C



а)



б)

Рисунок 4.13 – Диаграммы динамической секущей (а) и тангенциальной (б) жесткости образцов из материала ТЭП1нж толщиной 9,7 мм и 14,5 мм при температуре +23 °C

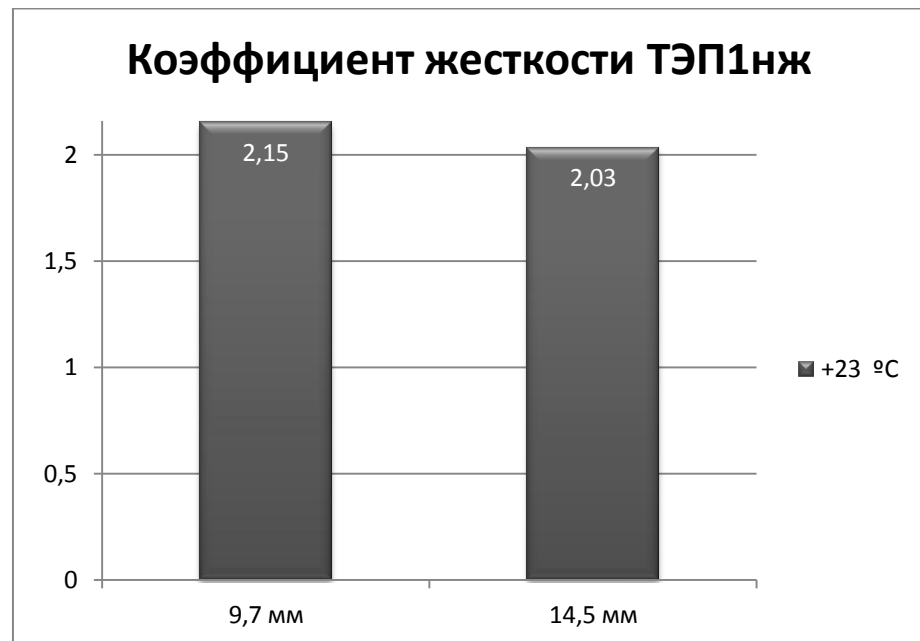


Рисунок 4.14 – Диаграмма коэффициента жесткости образцов из материала ТЭП1нж толщиной 9,7 мм и 14,5 мм при температуре +23 °С

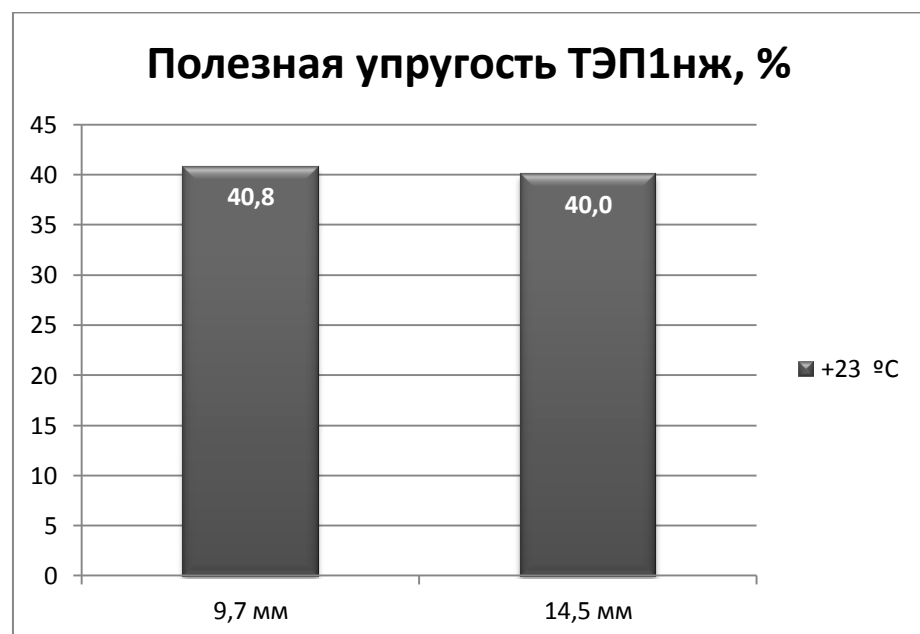
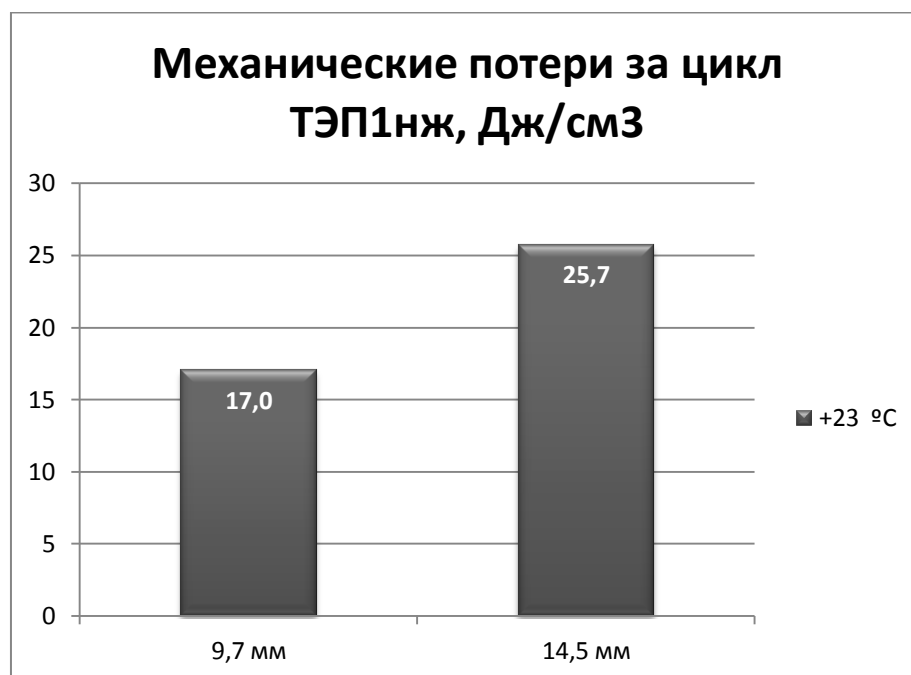
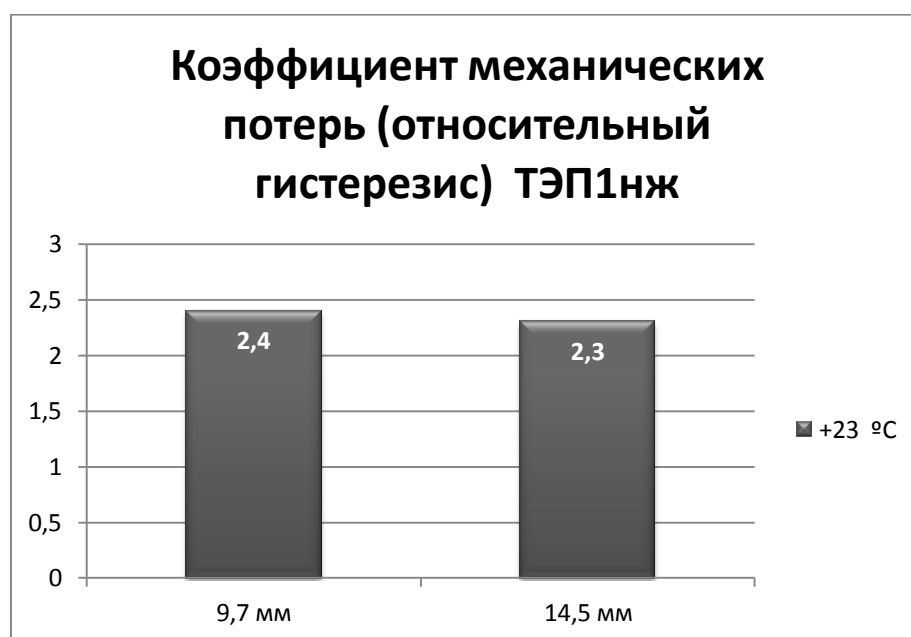


Рисунок 4.15 – Диаграмма полезной упругости образцов из материала ТЭП1нж толщиной 9,7 мм и 14,5 мм при температуре +23 °С



а)



б)

Рисунок 4.16 – Диаграммы механических потерь (а) и коэффициента механических потерь (относительный гистерезис) (б) образцов из материала ТЭП1нж толщиной 9,7 мм и 14,5 мм при температуре +23 °C

Анализ результатов, представленных в таблице 4.1, показывает, что с понижением температуры до –40 °C статическая жесткость резинового композита ТПРК (рисунки 4.1, 4.2, 4.5а) и коэффициент изменения статической жесткости

(рисунок 4.5б), практически не изменяются. Динамические жесткости увеличиваются, причем секущая в ~ 2 раза (рисунки 4.3, 4.6а), тангенциальная в $\sim 1,3$ раза (рисунки 4.4, 4.6б), а коэффициент жесткости в ~ 2 раза (рисунок 4.7). Следовательно, данный материал при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ работает в области термомеханической кривой, в которой высокоэластическая деформация начинает постепенно снижаться к температуре стеклования, поэтому при циклическом воздействии с частотой 10Гц протекающие релаксационные процессы замедляются, что согласуется с принципом температурно-временной суперпозиции, устанавливающим эквивалентность влияния температуры и продолжительности воздействия на релаксационные свойства полимеров. При этом механические потери (рисунок 4.9) уменьшаются, т.к. меньшая часть энергии рассеивается в тепло, а полезная упругость (рисунок 4.8) возрастает и передает большую энергию в следующий цикл колебаний.

Гистерезисные явления достаточно часто наблюдаются при эксплуатации изделий при пониженных температурах (но выше температуры стеклования), когда время релаксации велико и процесс восстановления размеров изделия после снятия напряжения происходит более медленно.

Следует отметить, что при выбранных температурах испытания жесткость ТПРК зависит от толщины образца и изменяется пропорционально соотношению толщин образцов, т.е. различаются в 1,4 раза (таблица 4.1). Относительные величины: коэффициенты жесткости, коэффициенты механических потерь, полезная упругость, являются константами для данного материала и не зависят от толщины. Механические потери за цикл обратно пропорциональны изменению толщины материала.

Статические (рисунки 4.10, 4.12) и динамические (рисунки 4.11, 4.13) жесткости образцов из материала ТЭП1нж также изменяются пропорционально соотношению толщин образцов с учетом допускаемой погрешности эксперимента и различаются в 1,54 раза при статическом нагружении, в 1,635 раза при динамическом нагружении (таблица 4.2).

Относительные величины: коэффициенты жесткости (таблица 4.2), коэффициенты механических потерь (рисунок 4.16б), полезная упругость (рисунок 4.15), как и в случае резинового композита, являются константами для данного материала и не зависят от толщины. Механические потери за цикл (рисунок 4.16а) обратно пропорциональны изменению толщины материала.

Следует отметить, что коэффициент жесткости резинового композита ТПРК (1,7) ниже, чем у термоэластопласта ТЭПнж (2,0), что говорит о меньшем времени релаксации материала при циклическом воздействии, поэтому процесс восстановления размеров образца после снятия напряжения происходит более быстро. Следовательно, можно предположить, что материал ТЭПнж обладает большей склонностью к процессу нарастания остаточной деформации во времени (ползучести). Вследствие чего, механические потери термоэластопласта ТЭПнж выше, чем у резинового композита ТПРК (таблицы 4.1, 4.2).

Из полученных результатов можно сделать вывод, что жесткость (как статическая, так и динамическая) полимерных материалов при разных температурах испытания зависит от толщины с коэффициентом пропорциональности равным отношению толщин.

$$C_2 = (\delta_1 / \delta_2) \cdot C_1, \quad 4.1$$

где C_1 – характеристики жесткости материала толщиной δ_1 ,

C_2 – характеристики жесткости материала толщиной δ_2 .

Таким образом, можно утверждать, что при проектировании амортизирующих элементов верхнего строения железнодорожного пути и подвижного состава, предназначенных для эксплуатации в различных климатических зонах, достаточно определить упруго-гистерезисные свойства тестового образца при выбранной температуре и, используя коэффициент пропорциональности, рассчитать необходимые характеристики реального объекта. При этом, существенно снижаются затраты на 3 и 4 этапы проектирования амортизаторов: изготовление опытного образца и проведение различных испытаний, а также корректировку и доработку опытного образца.

4.2 Влияние типа демпфирующего материала на упруго-гистерезисные свойства амортизаторов

Упруго-гистерезисные свойства полимерных амортизаторов определяются не только конструктивными особенностями, но и типом используемого материала. Особое влияние на работоспособность амортизатора оказывает температурный диапазон эксплуатации, который должен находиться в области высокоэластической деформации термомеханической кривой полимерного материала. Поэтому актуальным является выбор сфер применения демпфирующих материалов, используемых для проектирования амортизаторов железнодорожного транспорта.

В связи, с чем рассмотрено влияние типа демпфирующего материала на упруго-гистерезисные свойства амортизаторов при положительных и отрицательных температурах [214-218].

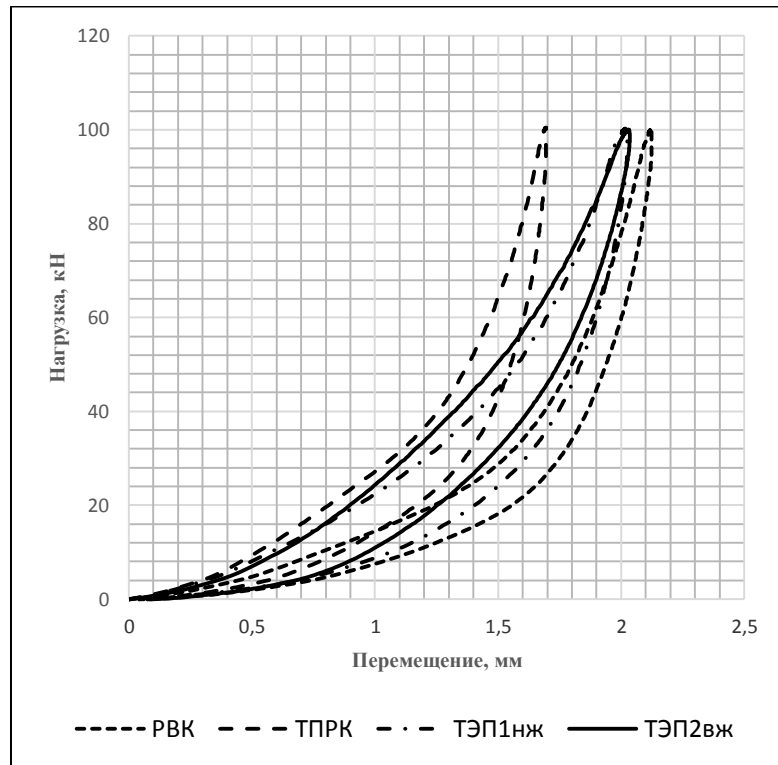
Для этого, в соответствии с изложенной в главе 2 методикой, экспериментально определены основные характеристики упруго-гистерезисных свойств четырех типов материалов при температурах $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сравнение упруго-гистерезисных свойств проведено на образцах с одинаковыми геометрическими параметрами и толщиной 14 мм, а также при одних и тех же условиях и режимах испытаний.

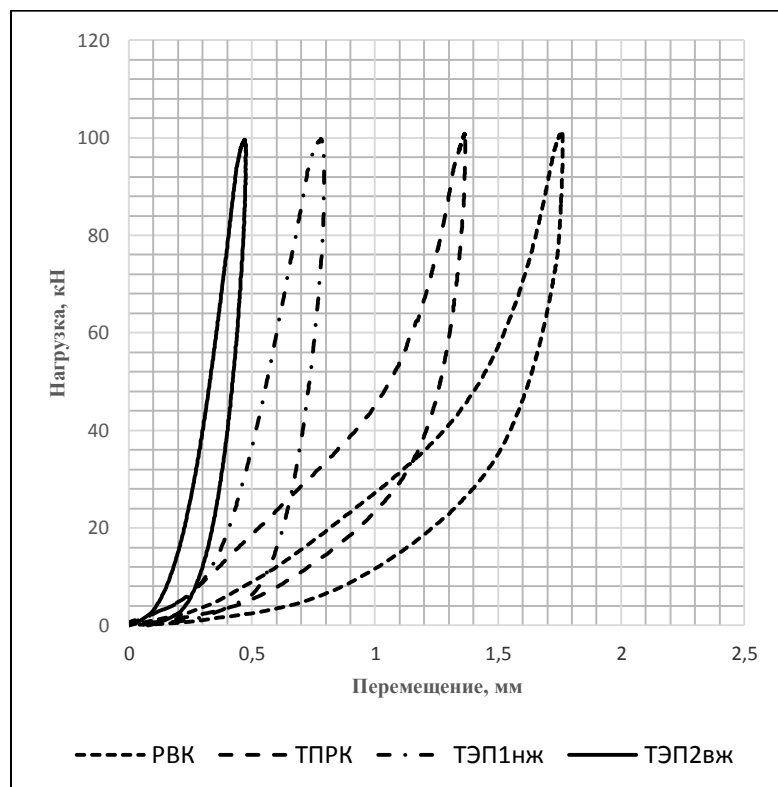
Графические зависимости прикладываемых сжимающих усилий от перемещений представлены на рисунках 4.17, 4.18, а числовые значения определяемых характеристик в таблице 4.3 и на диаграммах (рисунки 4.19-4.23).

Таблица 4.3 - Упруго-гистерезисные свойства образцов толщиной 14 мм из исследуемых композиционных материалов при температурах +23 °С и –40 °С

Характеристика	ТПРК	РВК	ТЭП2вж	ТЭП1нж
Статическая жесткость, кН/мм, при температуре: +23 °С	86	84,7	69,9	67
–40 °С	90	85	228,7	346,3
Динамическая секущая жесткость, кН/мм, при температуре: +23 °С	150,1	179,2	169	126,5
–40 °С	296,1	297,9	1186,9	903,6
Динамическая тангенциальная жесткость, кН/мм, при температуре: +23 °С	220,9	265	190,9	135,7
–40 °С	288,9	253,5	1162,5	868,3
Коэффициент изменения статической жесткости	1,1	1	3,3	5,16
Коэффициент жесткости при температуре: +23 °С	1,7	2,1	2,4	1,89
–40 °С	3,5	3,5	17	13,5
Коэффициент механических потерь (относительный гистерезис) при температуре: +23 °С	2,9	3,2	2,3	2,8
–40 °С	2,2	2,3	3,1	2,3
Полезная упругость, %, при температуре: +23 °С	33,3	30,9	43,2	35,7
–40 °С	44,9	40,5	32,5	42,6
Механические потери за цикл, Дж/см ³ , при температуре: +23 °С	16,7	12,6	21,4	23
–40 °С	12,7	12,7	2,1	3,9

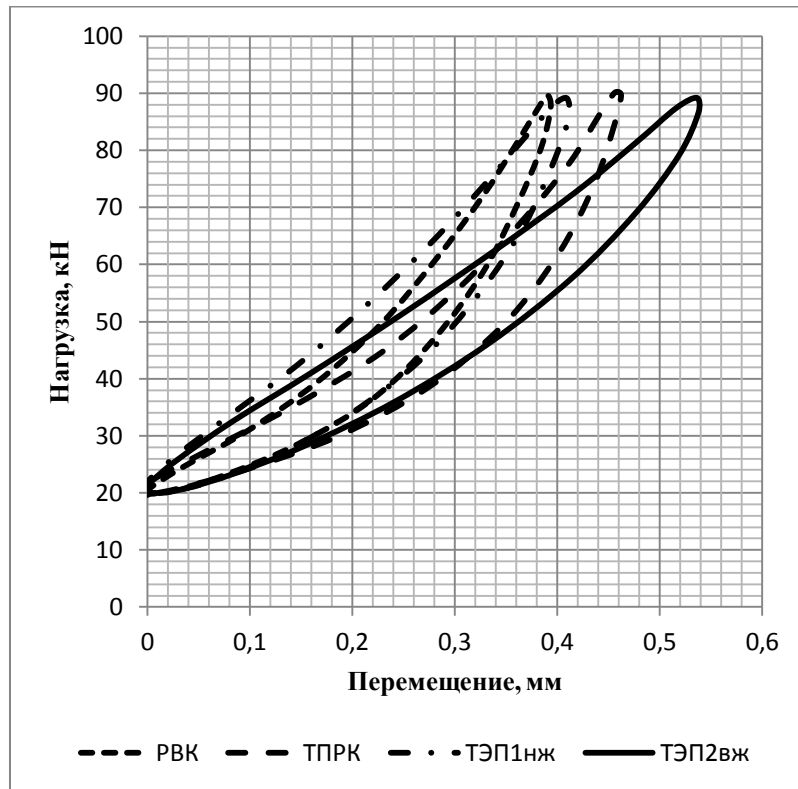


а)

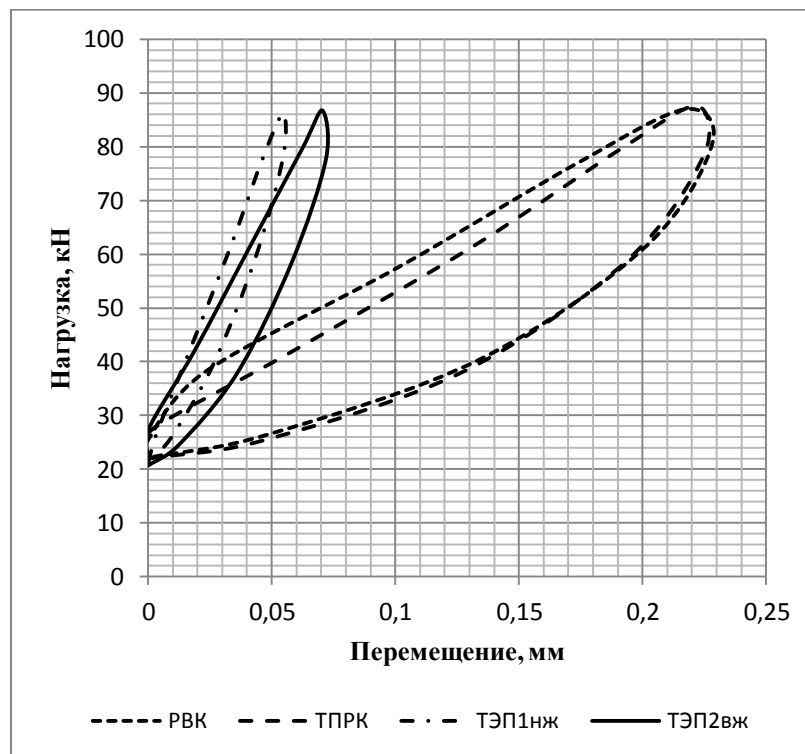


б)

Рисунок 4.17- Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом нагружении образцов из материалов ТПРК, РВК, ТЭП1нж, ТЭП2вж при температуре +23 °C (а) и температуре -40 °C (б)



а)

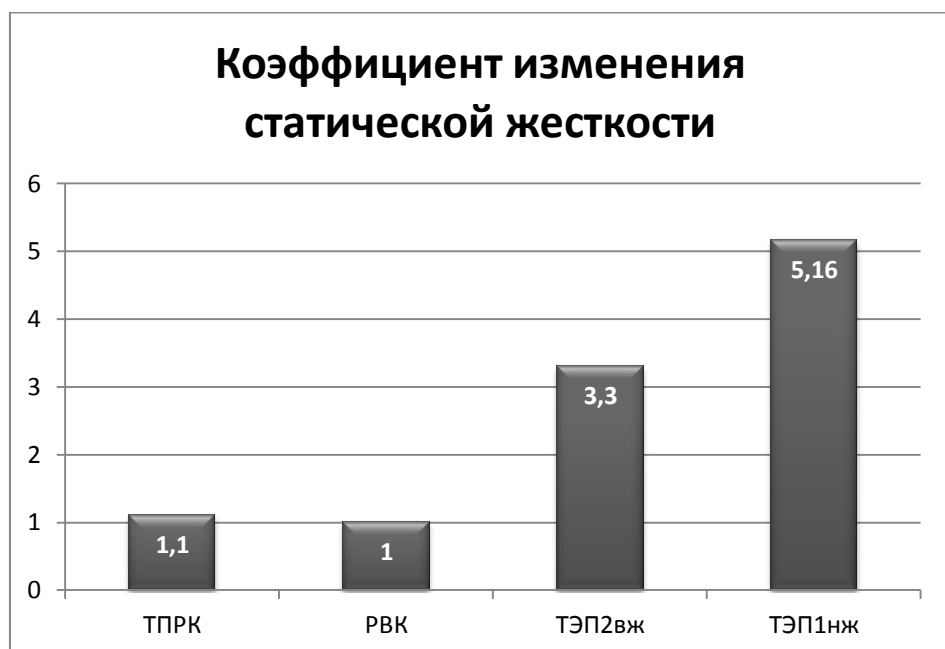


б)

Рисунок 4.18- Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при динамическом нагружении образцов из материалов ТПРК, РВК, ТЭП1нж, ТЭП2вж при температуре +23 °C (а) и температуре -40 °C (б)



а)



б)

Рисунок 4.19 – Диаграммы статической жесткости образцов из материалов ТПРК, РВК, ТЭП1нж, ТЭП2вж при температурах +23 °C и –40 °C (а); коэффициента изменения жесткости (б)



а)



б)

Рисунок 4.20 – Диаграммы динамической секущей (а) и тангенциальной (б) жесткости образцов из материалов ТПРК, РВК, ТЭП1нж, ТЭП2вж при температурах +23 °C и –40 °C

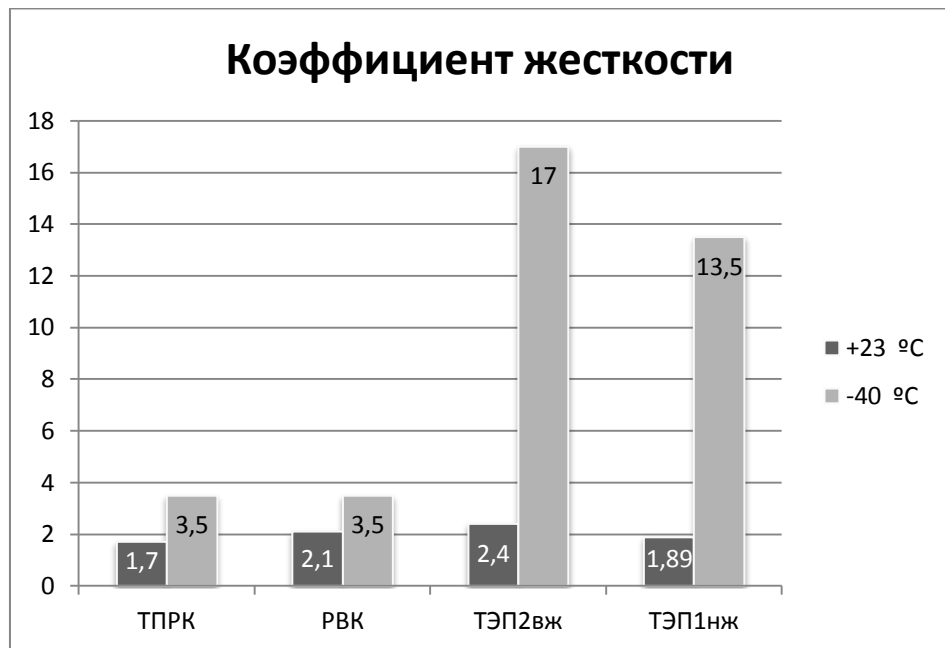


Рисунок 4.21 – Диаграмма коэффициента жесткости из материалов ТПРК, РВК, ТЭП1нж, ТЭП2вж при температурах +23 °C и –40 °C

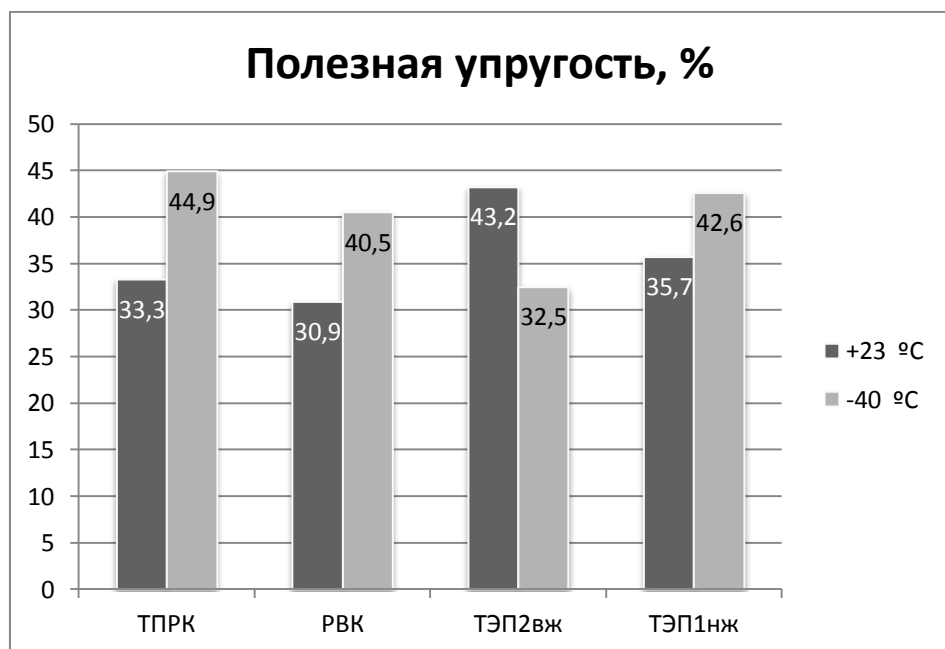
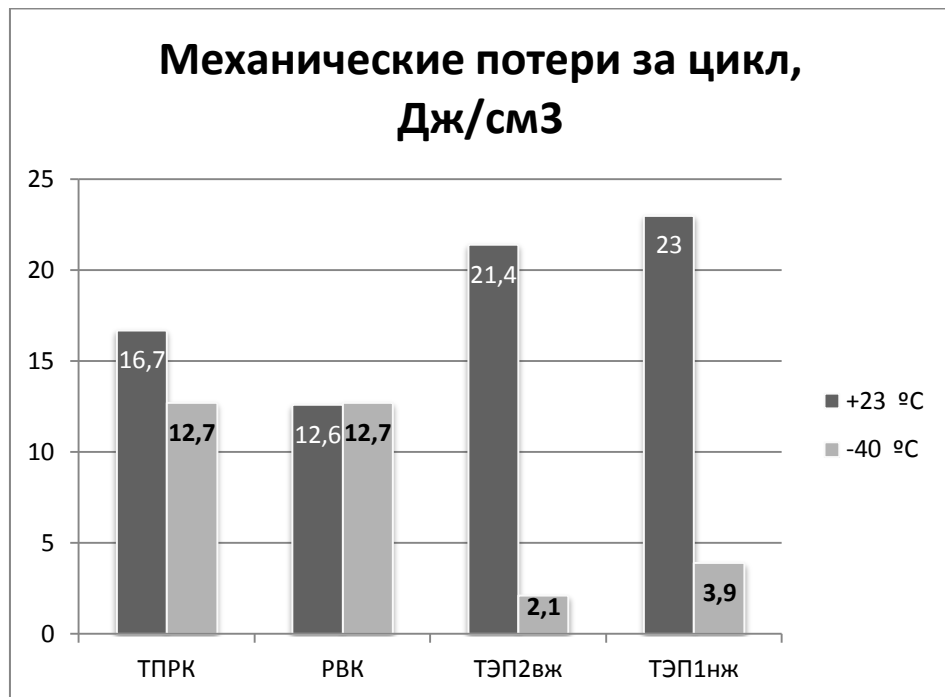
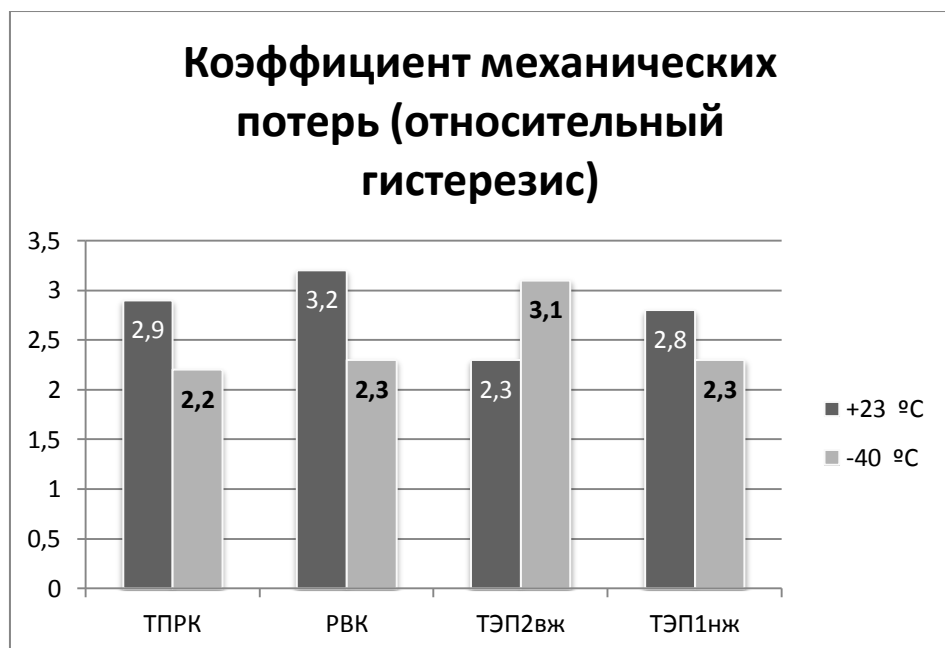


Рисунок 4.22 – Диаграмма полезной упругости образцов из материалов ТПРК, РВК, ТЭП1нж, ТЭП2вж при температурах +23 °C и –40 °C



а)



б)

Рисунок 4.23 – Диаграммы механических потерь (а) и коэффициента механических потерь (относительный гистерезис) (б) образцов из материалов ТПРК, РВК, ТЭП1нж, ТЭП2вж при температурах +23 °C и –40 °C

Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований материалов показал, что жесткость термоэластопластов ТЭП1нж и ТЭП2вж значительно возрастает при температуре -40°C (по сравнению с показателями, определенными при $+23^{\circ}\text{C}$), причем как статическая (в ≈ 4 раза), так и динамическая (в ≈ 15 раз), т.е. композиционные термоэластопласты ТЭП1нж и ТЭП2вж работают практически в стеклообразном состоянии. Температура стеклования материала ТЭП1нж близка к -40°C , а материала ТЭП2вж выше температуры -40°C . В свою очередь статическая жесткость резины (основа материала ТПРК и РВК) увеличивается всего на 10%, а динамическая – в $\approx 3,5$ раза. Следовательно, материалы из «резиновых» композитов при температуре -40°C не теряют своих эластических свойств, а композиты из термоэластопластов работают как упругое твердое тело. Сравнительный анализ жесткостных характеристик разных материалов в статическом и динамическом режимах нагружения показал, что критериями предельных состояний демпфирующих материалов может являться увеличение коэффициента жесткости более чем в четыре раза, а коэффициента изменения статической жесткости – более чем в три раза.

Относительная величина теряемой на внутреннее трение работы характеризуется коэффициентом полезной упругости – отношением работы, отданной при разгрузке, к работе, затраченной на деформирование. Максимальным значением коэффициента полезной упругости при температуре $+23^{\circ}\text{C}$ обладают материалы ТПРК и ТЭП1нж (рисунок 4.22), что предполагает меньшую возможность к восстановлению после действия нагрузки, особенно при увеличении частоты вибраций, а значит большую склонность к нагреванию, размягчению и, как следствие, развитию остаточных деформаций.

Оба «резиновых» композита (ТПРК и РВК) имеют близкие по значению характеристики статической жесткости (рисунок 4.19а), при этом динамические жесткости (рисунок 4.20) при температуре $+23^{\circ}\text{C}$ различаются на $\approx 20\%$, что связано с меньшим объемом эластичной матрицы материала РВК и быстрым

уплотнением границ между основной матрицей и кордовым наполнителем при циклическом воздействии с частотой 10 Гц.

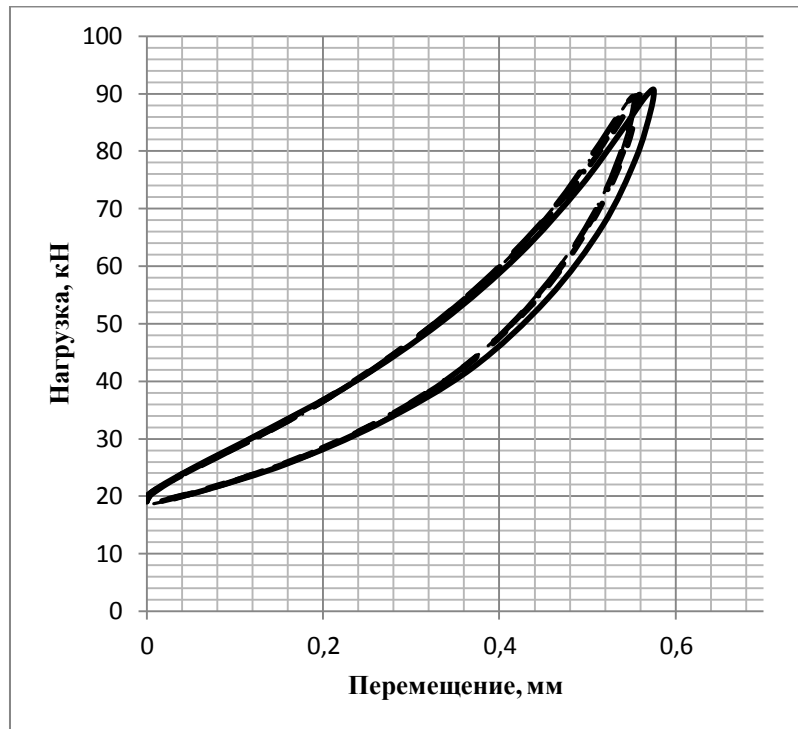
С целью подтверждения данной гипотезы для материалов ТПРК и РВК рассмотрен процесс изменения петли гистерезиса во времени (рисунок 4.24) при динамическом нагружении. Отмечено, что петля гистерезиса материала ТПРК практически не изменяется, а петля гистерезиса материала РВК смещается влево, увеличивая его жесткость.

Отмечено, что процент увеличения жесткости (20%) кордового материала при циклическом воздействии прямопропорционален процентному содержанию кордового наполнителя (20%) [216].

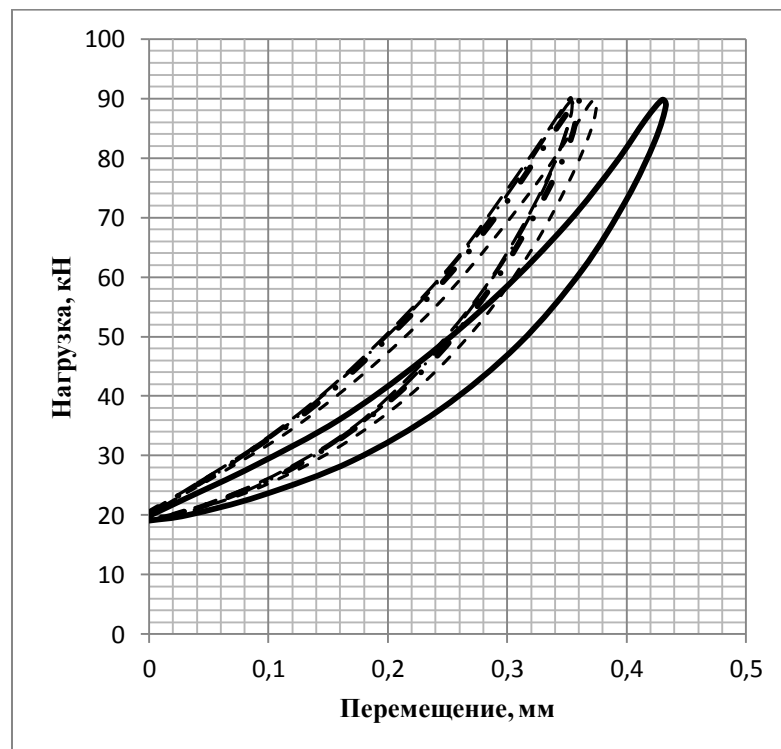
При температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ различие между параметрами жесткости (рисунки 4.19б и 4.21) резиновых композитов ТПРК и РВК практически исчезает, что связано с нарушением аддитивного действия компонентов РВК, а также началом процесса кристаллизации резиновой матрицы, при котором жесткость основной матрицы и кордового наполнителя становятся практически сопоставимы.

Таким образом, увеличение жесткости резиновых материалов за счет армирования измельченным полиамидным кордом для стабилизации геометрических параметров общей колебательной системы эффективно до температур начала кристаллизации каучука, а при дальнейшем понижении температур при проектировании следует ориентироваться на жесткость основной резиновой матрицы.

Поэтому резиноволокнистые композиты целесообразно использовать в конструкциях амортизаторов для стабилизации геометрических параметров общей динамической системы в широком диапазоне температур окружающего воздуха. Следует также отметить, что себестоимость такого амортизатора будет ниже конструкций из полностью резиновых композитов за счет частичной замены дорогостоящих каучуков измельченными отходами обрезиненного полиамидного корда шинного производства.



а)



б)

Рисунок 4.24 – Зависимость динамического гистерезиса от времени нагружения для образцов из материала: а) ТПРК, б) РВК

— 0с, - - 15с, - · - 30с, — — 45с, — · - 60с

Номограмма изменения статической жесткости от температуры исследуемых материалов приведена на рисунке 4.25. Аналогичным образом происходит изменение динамической жесткости.

Из представленной номограммы следует, что материалы ТПРК и РВК вплоть до температуры -40°C работают ниже критической температуры хрупкости, что говорит о высокой морозостойкости резиновых композитов. Термоэластопласты ТЭП1нж и ТЭП2вж сохраняют эластичность до температуры -20°C , после которой начинается кристаллизация полимерной матрицы, а температура -40°C является для них температурой стеклования.

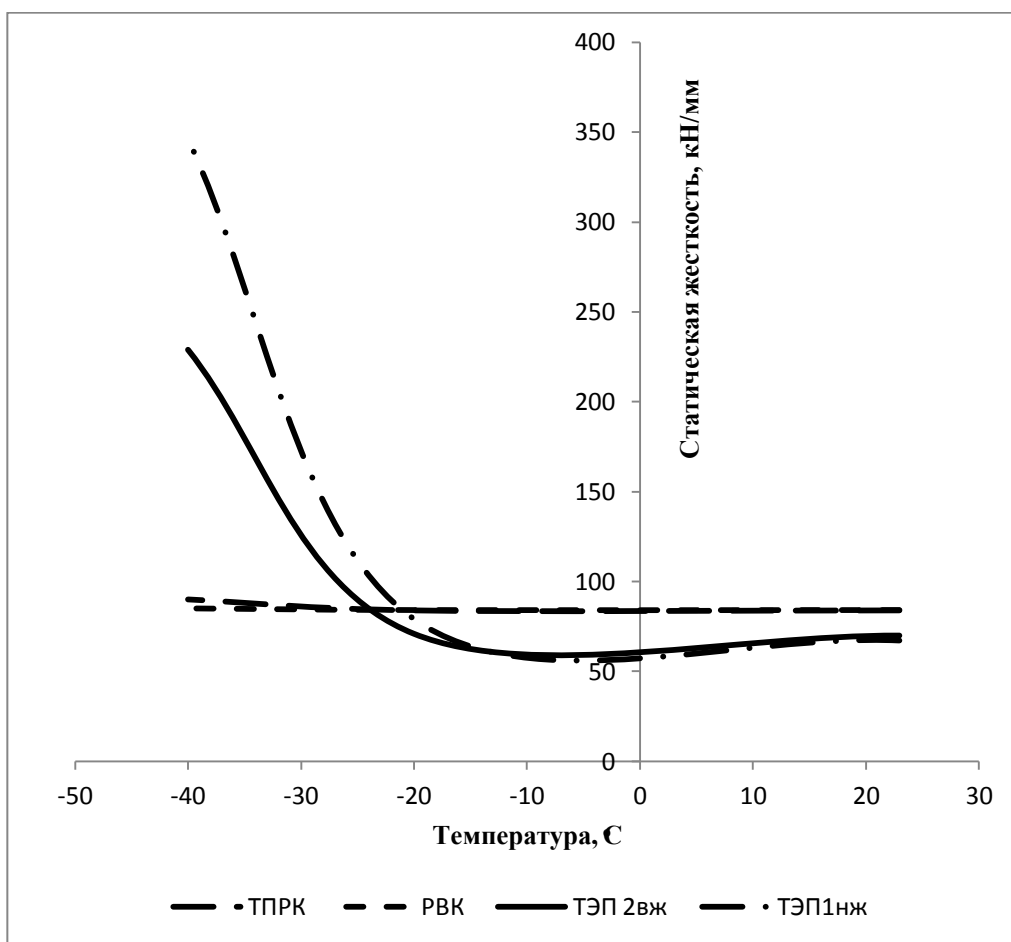


Рисунок 4.25 – Зависимость статической жесткости от температуры

Энергетический анализ упругогистерезисных свойств показал, что образцы из термоэластопластов ТЭП1нж и ТЭП2вж при температуре $+23^{\circ}\text{C}$ за один цикл

рассеивают в 1,5 раза большую энергию, чем резиновые композиты. Величина потерь работы, выражающаяся площадью петли гистерезиса, зависит от упругих свойств материала и амплитуды изменения деформаций. Часть энергии внешнего механического поля, затрачиваемой на колебательный процесс, полимерные материалы рассеивают в виде тепла вследствие релаксационных явлений, происходящих в них при циклическом нагружении. Таким образом, причиной возникновения гистерезиса является внутреннее трение материала (приводящее к его разогреванию), что может повлиять на ускоренное развитие остаточных деформаций. При этом на процесс воздействует не только нагревание элемента во время эксплуатации, но и температура окружающей среды. Остаточная деформация уменьшает толщину демпфирующего элемента, увеличивает его жесткость, что ведет к рассогласованию параметров первоначально спроектированной колебательной системы. Следовательно, при проектировании амортизаторов из термоэластопластов целесообразно определять жесткостные характеристики после термического старения под нагрузкой, определенной из условий эксплуатации.

Коэффициенты механических потерь (рисунок 4.23), характеризующие отношение рассеянной энергии деформации к полной энергии деформации, для композитов ТПРК и РВК при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижаются на 25-30%, а полезная упругость, наоборот, возрастает. Следовательно, данные материалы с понижением температуры до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинают работать более упруго (эластическая составляющая уменьшается), возвращают большую часть энергии в следующий цикл колебательной системы, что связано с замедлением релаксационных процессов и началом кристаллизации. Следует отметить, что механические потери материала РВК за цикл деформации при положительных и отрицательных температурах практически одинаковы. Причем, при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ они становятся равными потерям композита ТПРК. Следовательно, наличие кордового наполнителя снижает механические потери при положительных температурах, т.к. с увеличением жесткости материал работает более упруго. Рассеивание энергии при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит только за

счет эластичной работы связующей резиновой матрицы, в которой начинают происходить процессы кристаллизации, поэтому жесткость основной матрицы и кордового наполнителя становятся практически сопоставимы.

Механические потери композитов из термоэластопластов при температуре -40 °С (рисунок 4.22) снижаются в ≈ 10 раз вследствие того, что они работают в стеклообразном состоянии, абсолютно упруго, практически как твердое тело. Ширина петли динамического гистерезиса материала ТЭП2вж, характеризующая циклическую вязкость (отставание деформации разгрузки от деформации нагрузки), минимальна и составляет $\sim 0,01$ мм (рисунок 4.18), т.е. практически вырождается в прямую линию, что свидетельствует о его большей склонности к кристаллизации по сравнению с ТЭП1нж.

Для материала ТЭП2вж отмечено нетипичное изменение относительных энергетических параметров (коэффициента механических потерь и полезной упругости, рисунки 4.22, 4.23) при разных температурах, что связано с полным изменением механизма деформации от эластичного к абсолютно упругому.

Если представить испытанные образцы как готовый к установке амортизатор, то необходимо дополнительно провести сравнительную количественную оценку его конструктивного совершенства по двум показателям:

- коэффициенту полноты диаграммы, показывающий какую часть от максимально возможной работы воспринял амортизатор;
- коэффициенту гистерезиса, показывающий какая часть энергии воспринятая амортизатором рассеивается (превращается в тепло).

Анализ работы амортизаторов показал (таблицы 4.4, 4.5), что коэффициент полноты диаграммы при +23°С выше у демпферов на основе резинового композита с меньшей толщиной и резинокордного композита. Следовательно, для них требуется меньший ход для восприятия энергии удара, но амортизация становится более жесткой. При -40°С коэффициенты полноты диаграммы для резиновых композитов становятся соизмеримыми.

Таблица 4.4 - Коэффициенты полноты диаграммы

Температура	ТПРК 10мм	ТПРК 14мм	РВК	ТЭП2вж	ТЭП1нж
+23°C	0,87	0,47	0,65	0,57	0,48
-40°C	0,14	0,16	0,12		

Таблица 4.5 - Коэффициенты гистерезиса

Температура	ТПРК 10мм	ТПРК 14мм	РВК	ТЭП2вж	ТЭП1нж
+23°C	0,14	0,16	0,12	0,14	0,19
-40°C	0,04	0,04	0,03		

Оценку работы амортизаторов из термоэластопластов при температуре -40°C не проводили вследствие отсутствия эластических свойств данных материалов.

Коэффициент гистерезиса при +23°C выше у амортизаторов на основе резинового композита с меньшей толщиной и термоэластопласта ТЭП2вж, что говорит о более быстром рассеивании энергии удара, но замедленном процессе рапрямления амортизатора и увеличении времени для повторного удара. Поэтому при увеличении интенсивности воздействий возможно развитие остаточных деформаций материала.

Выводы по четвертому разделу

На основе изложенного выше, следуют выводы, приведенные ниже:

1. Статические и динамические жесткости полимерных материалов при разных температурах испытания зависит от толщины с коэффициентом пропорциональности равным отношению толщин.

2. Относительные величины: коэффициенты жесткости, коэффициенты механических потерь, полезная упругость, являются константами для данного

материала и не зависят от толщины. Механические потери за цикл обратно пропорциональны изменению толщины материала.

3. При проектировании амортизирующих элементов на основе полимерных материалов (резиновых композитов, термоэластопластов), достаточно определить упруго-гистерезисные свойства тестового образца при выбранной температуре, по которым рассчитать необходимые характеристики реального объекта.

4. Жесткость термоэластопластов ТЭП1нж и ТЭП2вж значительно возрастает при температуре -40°C (по сравнению с показателями, определенными при $+23^{\circ}\text{C}$), причем как статическая (в ≈ 4 раза), так и динамическая (в ≈ 15 раз), т.е. композиционные термоэластопласты ТЭП1нж и ТЭП2вж работают в стеклообразном состоянии, что необходимо учитывать при определении сфер их применения.

5. Термоэластопласты ТЭП1нж и ТЭП2вж сохраняют эластичность до температуры -20°C , после которой начинается кристаллизация полимерной матрицы, а температура -40°C является для них температурой стеклования.

6. Статическая жесткость резиновых композитов при температуре -40°C увеличивается всего на 10%, а динамическая – в $\approx 3,5$ раза, что говорит о некотором замедлении релаксационных процессов при динамическом воздействии. Следовательно, данные материалы при температуре -40°C работают в области высокоэластической деформации, приближающейся к температуре стеклования.

7. При температуре -40°C различие между параметрами жесткости резиновых композитов практически исчезает, что связано с нарушением аддитивного действия компонентов резинокорда, а также началом процесса кристаллизации резиновой матрицы, при котором жесткость основной матрицы и кордового наполнителя становятся практически сопоставимы.

8. Увеличение жесткости резиновых материалов за счет армирования измельченным полиамидным кордом для стабилизации геометрических

параметров общей колебательной системы эффективно до температур начала кристаллизации каучука, а при дальнейшем понижении температур при проектировании следует ориентироваться на жесткость основной резиновой матрицы.

9. При понижении температуры механические потери полимеров уменьшаются, т.к. меньшая часть энергии рассеивается в тепло, а полезная упругость возрастает и передает большую энергию в следующий цикл колебаний.

10. Увеличение жесткости наполненного измельченным полиамидным кордом резинового композита при циклическом воздействии по сравнению с ненаполненным прямопропорционально процентному содержанию кордового наполнителя, что связано с меньшим объемом эластичной матрицы и быстрым уплотнением границ между основной матрицей и кордовым наполнителем при циклическом воздействии.

11. Резиноволокнистые композиты с измельченным кордом целесообразно и экономически выгодно использовать в конструкциях амортизаторов для стабилизации геометрических параметров общей динамической системы в широком диапазоне температур окружающего воздуха.

12. Энергетический анализ упругогистерезисных свойств термоэластопластов показал, что образцы из термоэластопластов при температуре $+23^{\circ}\text{C}$ за один цикл рассеивают в 1,5 раза большую энергию, чем резиновые композиты, что может повлиять на ускоренное развитие остаточных деформаций, а следовательно к рассогласованию параметров первоначально спроектированной колебательной системы.

13. Коэффициент полноты диаграммы и коэффициент гистерезиса при $+23^{\circ}\text{C}$ выше у демпферов на основе резинового композита с меньшей толщиной и резинокордного композита. Следовательно, для них требуется меньший ход для восприятия энергии удара, но амортизация становится более жесткой. При -40°C коэффициенты полноты диаграммы для резиновых композитов становятся соизмеримыми.

5 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ АМОРТИЗАТОРОВ ТИПА «СЭНДВИЧ» НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЯВЛЯЮЩИХСЯ ЕГО КОМПОНЕНТАМИ

5.1 Теоретические основы проектирования «сэндвичей»

Амортизаторы для железнодорожного транспорта работают при статических, циклических и ударных нагрузках, при низких и высоких температурах, в контакте с различными средами. Эти факторы определяют требования к конструкционным материалам амортизаторов, основные из которых эксплуатационные, технологические и экономические.

Под эффективностью конструкционного материала понимают его способность к работе в заданных условиях эксплуатации при обеспечении наименьшей стоимости изготовленного из него элемента конструкции и надежно функционирующего в течение установленного времени.

Как правило, качественный конструкционный материал должен удовлетворять комплексу требований.

Например, материал прокладок рельсовых скреплений, устанавливаемых между шпалой и рельсом, должен обладать:

- амортизирующими свойствами для эффективного гашения различных ударных нагрузок и вибропоглощения;
- фрикционными свойствами, от коэффициента трения которого зависит уровень сопротивления продольным силам, действующим на рельсы (силы угона от подвижного состава и температурные силы, возникающие при изменении температуры рельсов относительно температуры в момент их прикрепления к шпалам);
- изолирующими свойствами, от электрического сопротивления которого зависит степень электроизоляции рельса от подрельсового основания;

- устойчивостью к климатическим изменениям и воздействию агрессивных сред;
- долговечностью.

Таким образом, выбор материала амортизаторов для железнодорожного транспорта является сложной задачей, так как в большинстве случаев, используя один универсальный материал, удовлетворить в полной мере всем эксплуатационным и производственно-технологическим требованиям не всегда представляется возможным. Решением данной проблемы может служить создание конструкций из различных совокупностей материалов, так называемых «сэндвичей».

В переводе с английского языка слово «сэндвич» означает бутерброд из нескольких слоев, где сверху и снизу хлеб. В настоящее время понятие значительно расширилось и сэндвичи из нескольких слоев разнородных материалов стали широко использовать в строительстве (стенные сэндвич-панели, кровельные сип-панели, сэндвич-трубы для дымоходов и вентиляции), в медицине (зубные пломбы, протезы) и других областях. В целом, сэндвич представляет собой конструкцию из нескольких слоев разнородных материалов, каждый из которых выполняет свою функцию. Каркасное строительство с применением сэндвич-панелей пользуется большой популярностью в мире, независимо от климатических условий. Широкое распространение технология получила благодаря тому, что, имея сэндвич-панели, всего за лето можно построить теплое жилье. Особенно популярны каркасные дома в таких странах, как США и Япония. Однако в области железнодорожного транспорта данной технологии не уделено достойного внимания.

Так для прокладок рельсовых креплений целесообразно в качестве верхнего материала, соприкасающегося с рельсом, использовать резиновые композиты, обладающие высоким коэффициентом трения [219], а в качестве нижнего материала – термоэластопласты, устойчивые к воздействию агрессивных сред, более технологичные и долговечные.

В современных конструкциях поглощающих аппаратов автосцепки, а также центральном и надбуксовом рессорном подвешивании перспективным решением также является применение комплекта упругих полимерных блоков в форме цилиндров вместо малоэффективных пружин [220].

Актуальными задачами, решаемыми при проектировании сэндвич-амортизаторов, является выбор габаритных размеров, количества слоев, очередность их чередования, а также упруго-гистерезисных характеристик.

Общую статическую и динамическую жесткость сэндвичей определяют экспериментальными (непосредственное испытание конструкции) и расчетными методами.

Для двухкомпонентных сэндвичей в качестве расчетных предложено использовать следующие методы [221, 222]:

Метод 1. Исходя из того, что элементы сэндвичей располагаются параллельно, то их жесткость $C_{\text{общ}}$ вычисляют для двух компонентов по следующей формуле:

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2}, \quad 5.1$$

где C_1 – жесткость 1 компонента, взятая из таблицы 5.1;

C_2 - жесткость 2 компонента, взятая из таблицы 5.1.

Метод 2. Геометрическое сложение графических зависимостей (гистерезисов) отдельных компонентов.

Однако второй расчетный метод определения общей жесткости является более трудоемким, в связи, с чем его можно использовать при проверке, а также построения гистерезисов элементов с измененными габаритными размерами (толщиной).

Определение других показателей упруго-гистерезисных свойств возможно после построения расчетных или экспериментальных гистерезисов.

Для определения точности и сходимости получения результатов разными методами необходимо провести соответствующий статистический анализ.

Таким образом, задача конструктора заключается в выборе наиболее правильного компромиссного решения, при котором наиболее полно удовлетворяются главные требования к конструкции амортизаторов. В связи с тем, что основным показателем эффективной работы амортизаторов является способность гасить низко и высокочастотные вибрации, то в дальнейшем рассмотрено влияние упругогистерезисных свойств материала отдельного компонента на общие характеристики «сэндвича», а также сходимость результатов исследований предложенными методами.

5.2 Выбор исходных компонентов и вариантов сборки

Исходными компонентами для составления «сэндвичей» выбраны материалы, рассмотренные в предыдущей главе:

- полимерный композит на основе резиновой смеси (ТПРК);
- композиционный термоэластопласт ТЭП1нж, более эффективно гасящий вибрации в динамическом режиме из двух разновидностей термоэластопластов, рассмотренных выше.

Образцы для испытаний представляли собой пластины длиной 205 мм, шириной 140 мм. Толщина образцов составляла $10 \pm 0,5$ мм и $14 \pm 0,5$ мм.

Методика экспериментальных исследований изложена в главе 3.

Испытания проводили при температуре $+23^{\circ}\text{C}$, т.к. влияние низких температур на свойства материалов подробно представлено в предыдущей главе.

Сначала определяли упруго-гистерезисные характеристики каждого отдельного компонента (ТПРК, ТЭП1нж), а затем сборки из следующих элементов:

- ТПРК 10 мм – ТПРК 14 мм;
- ТЭП1нж 10 мм – ТЭП1нж 14 мм;
- ТПРК 10 мм – ТЭП1нж 10 мм;
- ТПРК 14 мм – ТЭП1нж 14 мм;

- ТПРК 10 мм – ТЭП1нж 14 мм;
- ТПРК 14 мм – ТЭП1нж 10 мм.

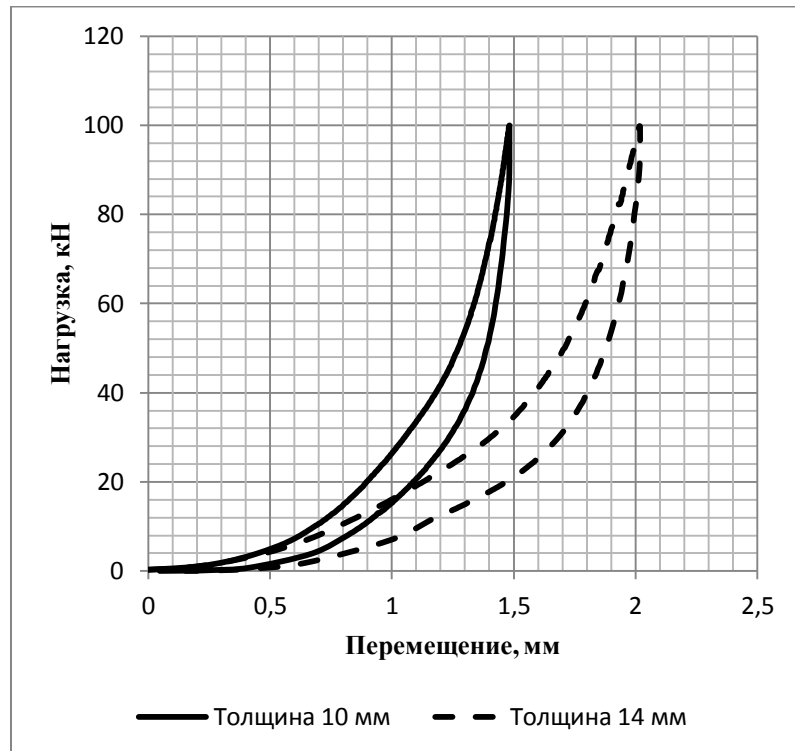
5.3 Результаты статических и динамических испытаний компонентов «сэндвича»

Исходными данными для проектирования сэндвич-амортизаторов являются экспериментально определенные характеристики его компонентов. В соответствии с методикой экспериментальных исследований, изложенной в главе 3, определены жесткостные характеристики выбранных исходных компонентов ТПРК и ТЭП1нж.

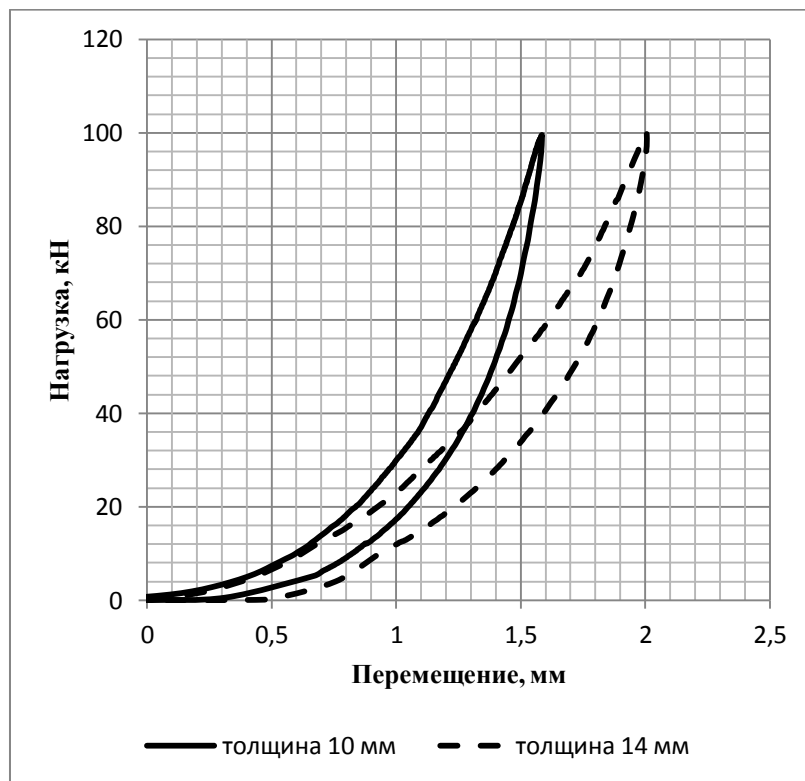
Результаты статических и динамических испытаний каждого компонента «сэндвича» представлены на рисунках 5.1, 5.2 и в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Результаты статических и динамических испытаний отдельных компонентов «сэндвича»

Характеристика	Компонент «Сэндвича»			
	ТПРК 10 мм	ТПРК 14 мм	ТЭП1нж 10 мм	ТЭП1нж 14 мм
Статическая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	125,4	83,2	107,3	66,2
Динамическая секущая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	202,9	141,9	219,9	134,2
Коэффициент жесткости при температуре +23°C	1,62	1,71	2,05	2,03

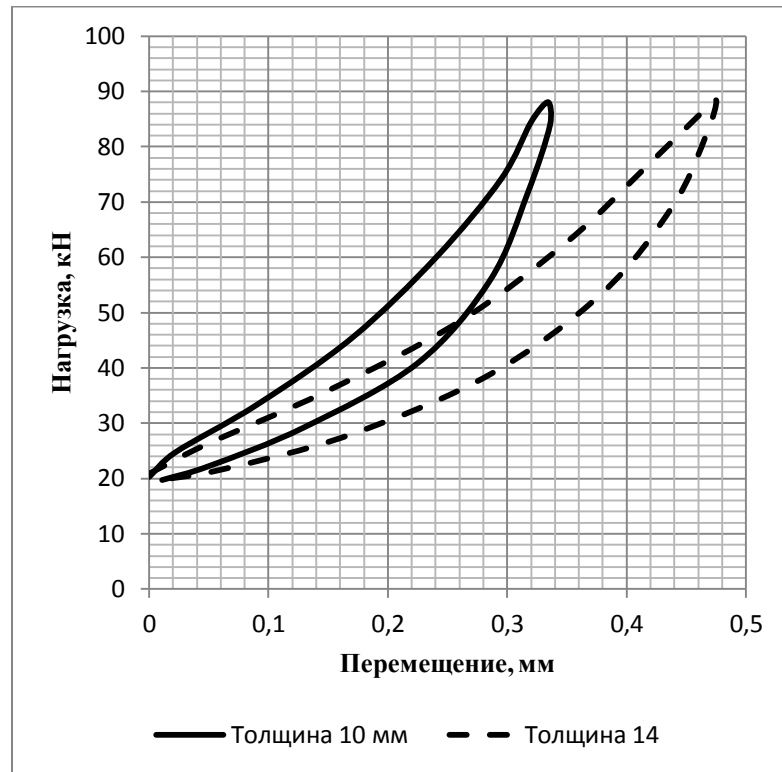


а)

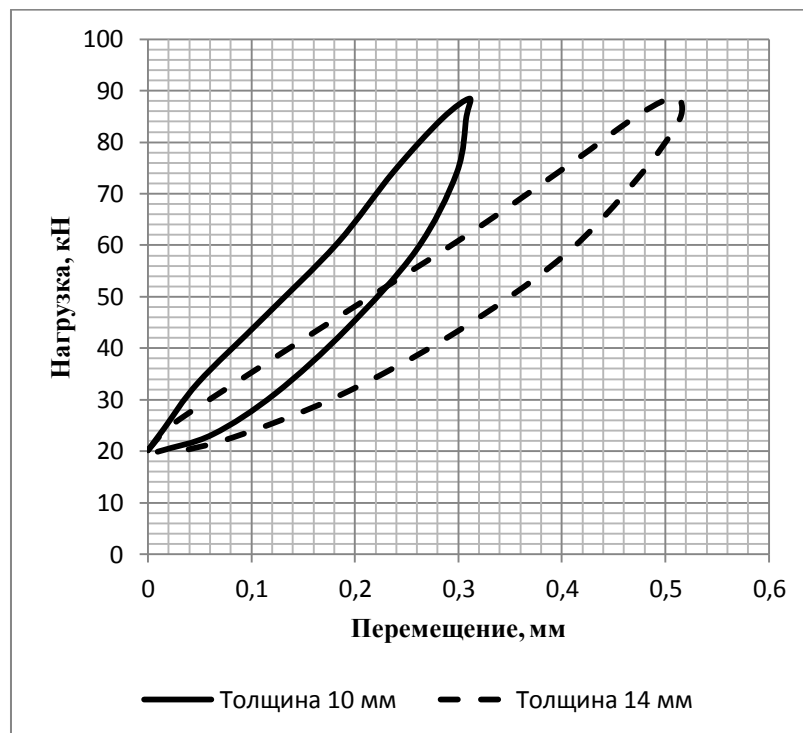


б)

Рисунок 5.1 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом нагружении образцов при температуре +23 °С из материалов ТПРК толщиной 10 мм и 14 мм (а) и ТЭП1нж толщиной 10 мм и 14 мм (б)



а)



б)

Рисунок 5.2 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при динамическом нагружении образцов с частотой 10 Гц при температуре +23 °С из материалов ТПРК толщиной 10 мм и 14 мм (а) и ТЭП1нж толщиной 10 мм и 14 мм (б)

5.4 Анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований сэндвичей. Определение сходимости применяемых методов

На основе полученных исходных данных (характеристики компонентов) теоретически рассчитаны жесткостные характеристики сэндвичей. Для подтверждения достоверности полученных данных проведено экспериментальное определение этих характеристик [221, 222].

Результаты статических и динамических испытаний сэндвичей представлены в таблицах 5.2, 5.3, 5.4 и на рисунках 5.3-5.16.

Сходимость результатов расчета статических и динамических жесткостей сэндвичей, определенных экспериментальным и расчетным методом, а также коэффициента жесткости, оценивали по следующим статистическим показателям: среднеквадратическое отклонение (СКО) и коэффициент вариации.

Среднеквадратическое отклонение, определяемое как квадратный корень из дисперсии случайной величины, является показателем рассеивания значений случайной величины относительно её математического ожидания. Большее значение среднеквадратического отклонения показывает больший разброс значений в представленном множестве со средней величиной множества; меньшее значение, соответственно, показывает, что значения в множестве сгруппированы вокруг среднего значения.

Величину разброса данных относительно самих значений (т.е. независимо от их масштаба) определяет коэффициент вариации, выражаемый в процентах. По этому показателю сравнивают однородность разных явлений независимо от их масштаба и единиц измерения.

Таблица 5.2 - Результаты статических испытаний «сэндвичей»

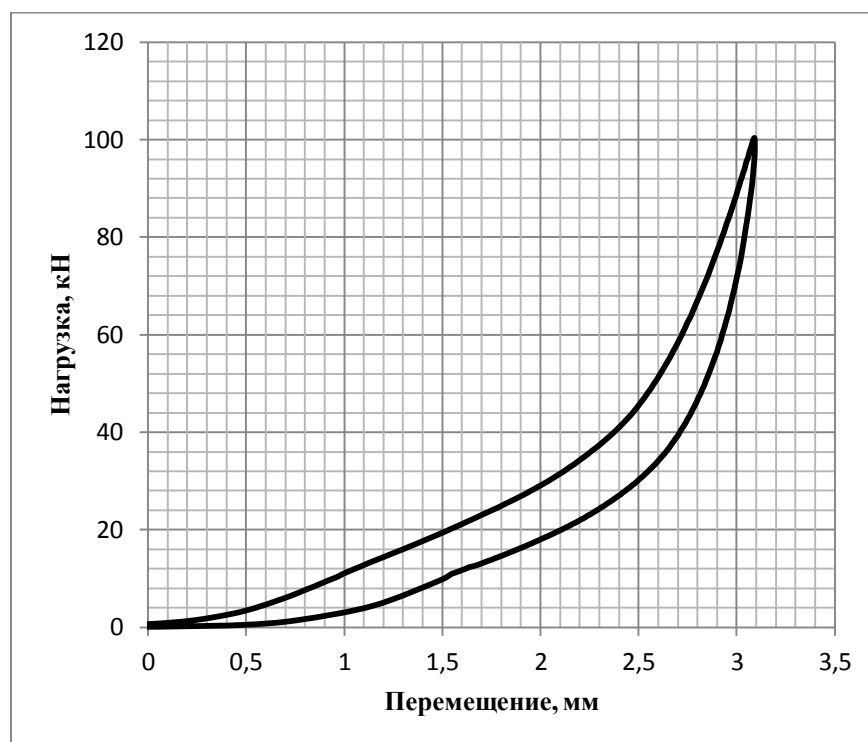
Характеристика	Наименование сборки «сэндвича»					
	ТПРК 10 мм – ТПРК 14 мм	ТЭП1нж 10 мм – ТЭП1нж 14 мм	ТПРК 10 мм – ТЭП1нж 10 мм	ТПРК 14 мм – ТЭП1нж 14 мм	ТПРК 10 мм – ТЭП1нж 14 мм	ТПРК 14 мм – ТЭП1нж 10 мм
Статическая жесткость, кН/мм, экспериментальная	50,09	43,71	59,61	39,09	46,35	49,98
Статическая жесткость, кН/мм, расчетная	50,00	40,16	56,26	36,87	43,33	45,83
Стандартное отклонение (СКО)	0,04	1,77	1,67	1,11	1,51	2,08
Коэффициент вариации, %	0,09	4,23	2,89	2,93	3,37	4,34

Таблица 5.3 - Результаты динамических испытаний «сэндвичей»

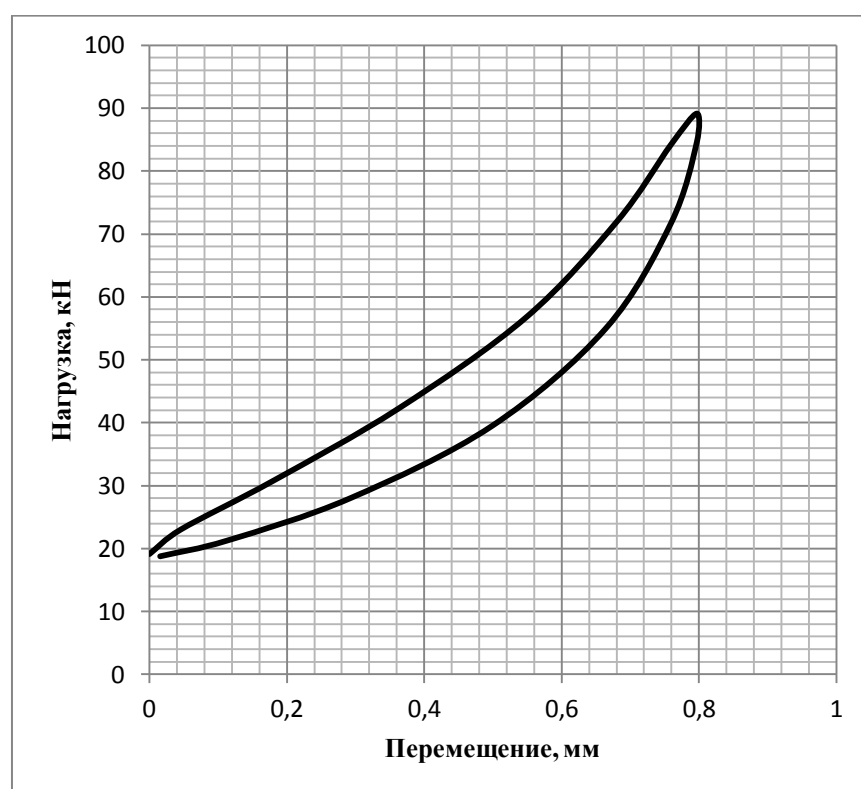
Характеристика	Наименование сборки «сэндвича»					
	ТПРК 10 мм – ТПРК 14 мм	ТЭП1нж 10 мм – ТЭП1нж 14 мм	ТПРК 10 мм – ТЭП1нж 10 мм	ТПРК 14 мм – ТЭП1нж 14 мм	ТПРК 10 мм – ТЭП1нж 14 мм	ТПРК 14 мм – ТЭП1нж 10 мм
Динамическая секущая жесткость, кН/мм экспериментальная	87,85	82,66	111,66	68,65	80,13	86,34
Динамическая секущая жесткость, кН/мм расчетная	83,50	83,34	105,63	68,97	80,17	86,25
Стандартное отклонение (СКО)	2,18	0,34	3,02	0,16	0,02	0,05
Коэффициент вариации, %	2,54	0,41	2,78	0,23	0,02	0,05

Таблица 5.4 – Результаты расчета коэффициентов жесткости

Характеристика	Наименование сборки «сэндвича»					
	ТПРК 10 мм – ТПРК 14 мм	ТЭП1нж 10 мм – ТЭП1нж 14 мм	ТПРК 10 мм – ТЭП1нж 10 мм	ТПРК 14 мм – ТЭП1нж 14 мм	ТПРК 10 мм – ТЭП1нж 14 мм	ТПРК 14 мм – ТЭП1нж 10 мм
Коэффициент жесткости экспериментальный	1,75	1,89	1,87	1,76	1,83	1,73
Коэффициент жесткости расчетный	1,67	2,04	1,83	1,87	1,85	1,84
Стандартное отклонение (СКО)	0,04	0,08	0,02	0,06	0,01	0,06
Коэффициент вариации, %	2,34	3,82	1,08	3,03	0,54	3,08



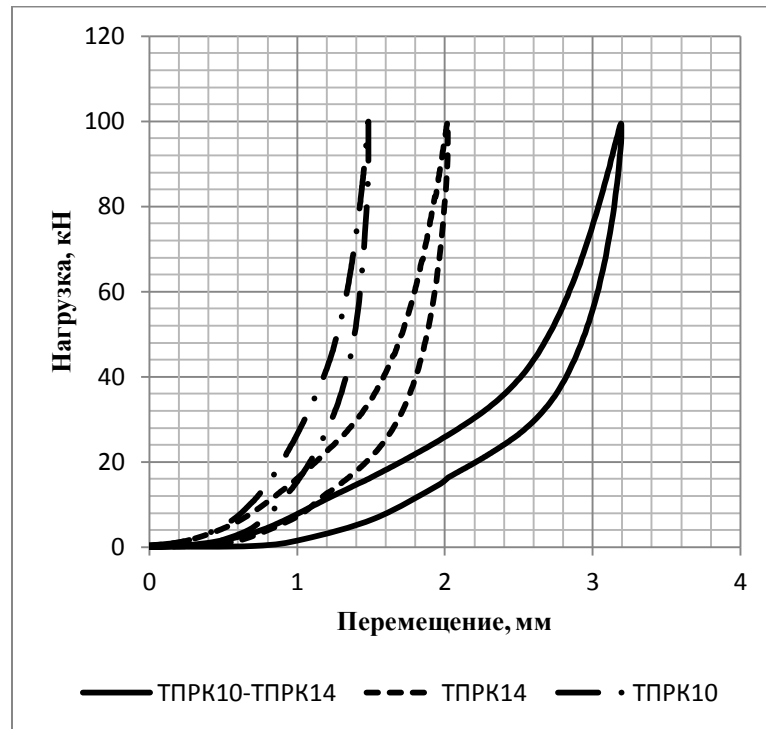
а)



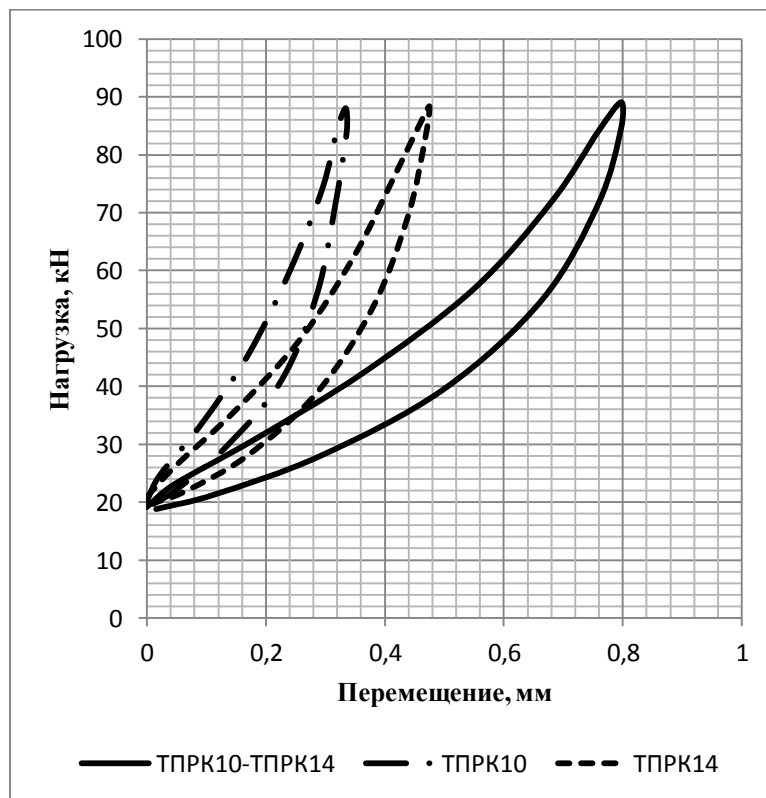
б)

Рисунок 5.3 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении сэндвича

ТПРК10-ТПРК14

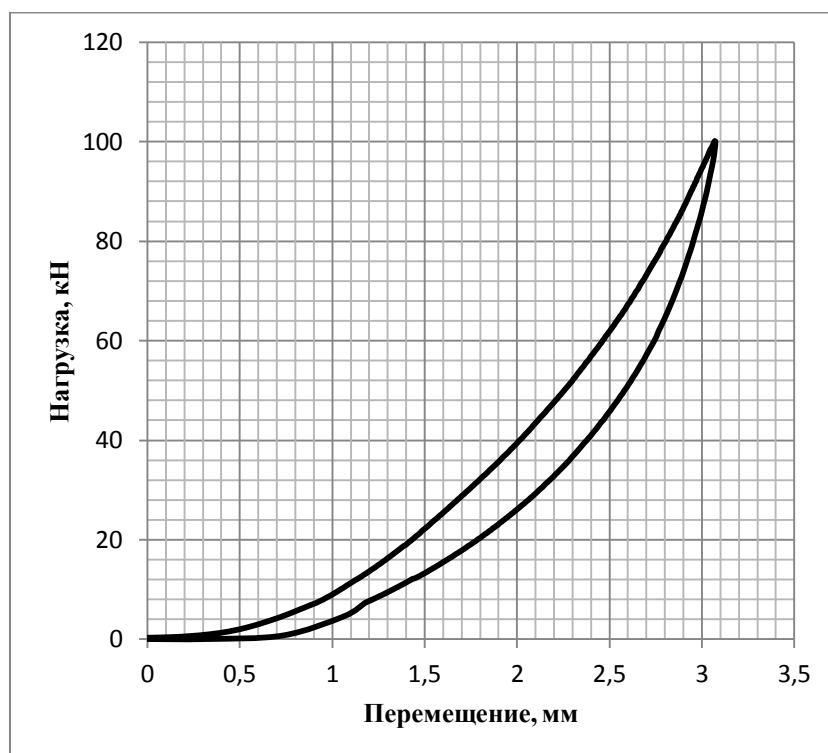


а)

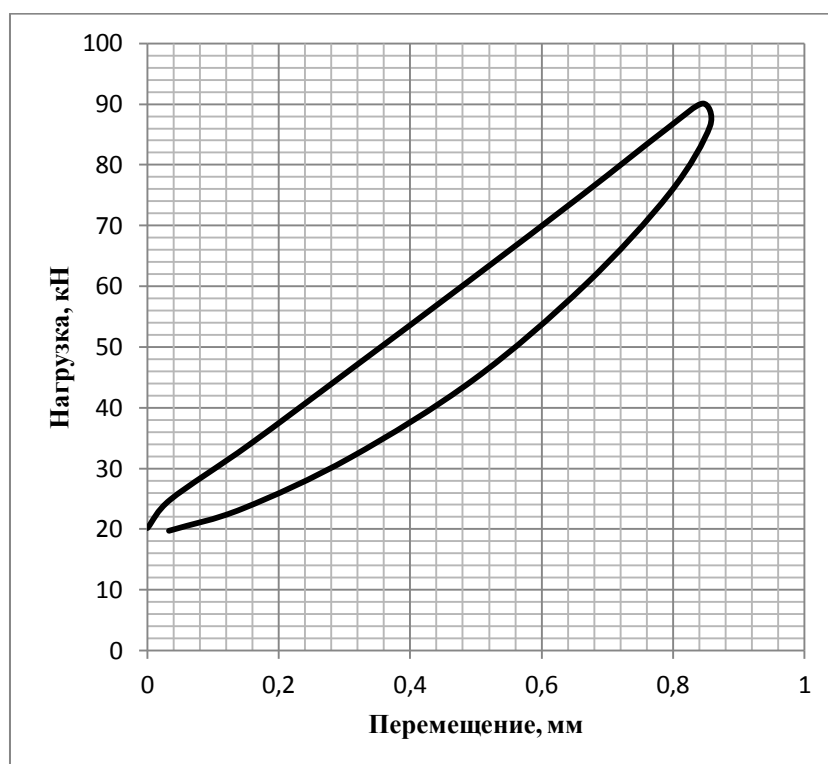


б)

Рисунок 5.4 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении составляющих компонентов ТПРК10, ТПРК14 и сэндвича ТПРК10-ТПРК14



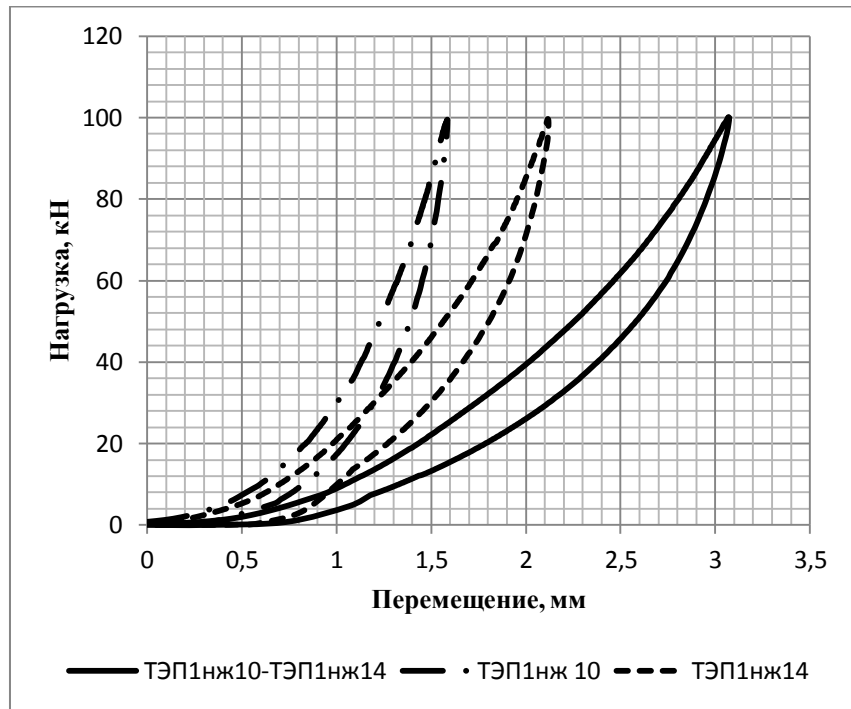
а)



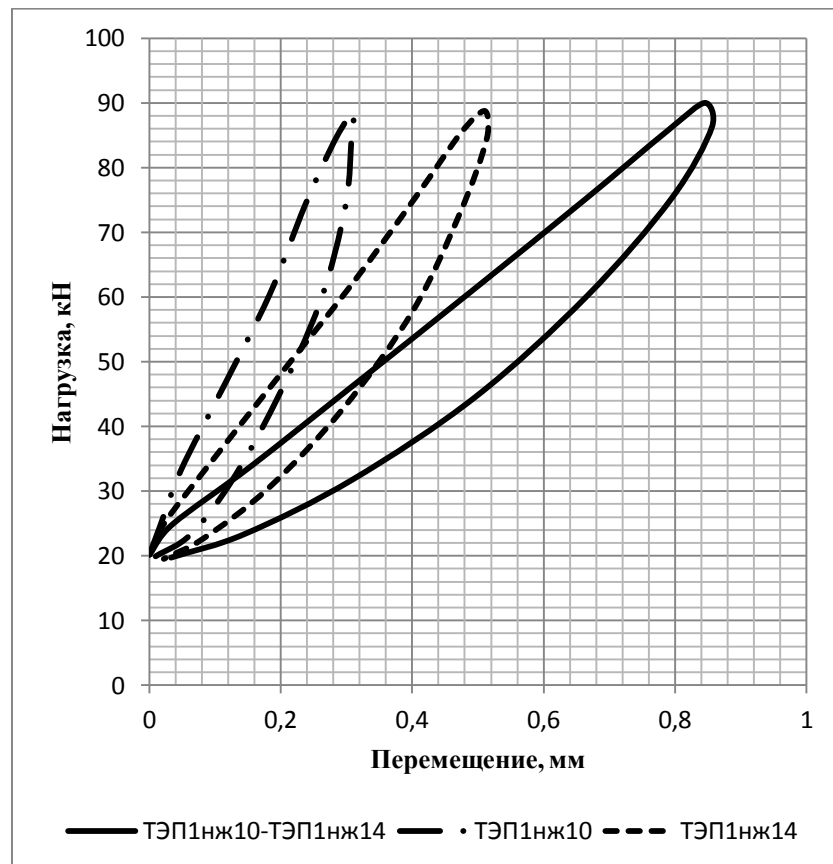
б)

Рисунок 5.5 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении сэндвича

ТЭП1нж10-ТЭП1нж14

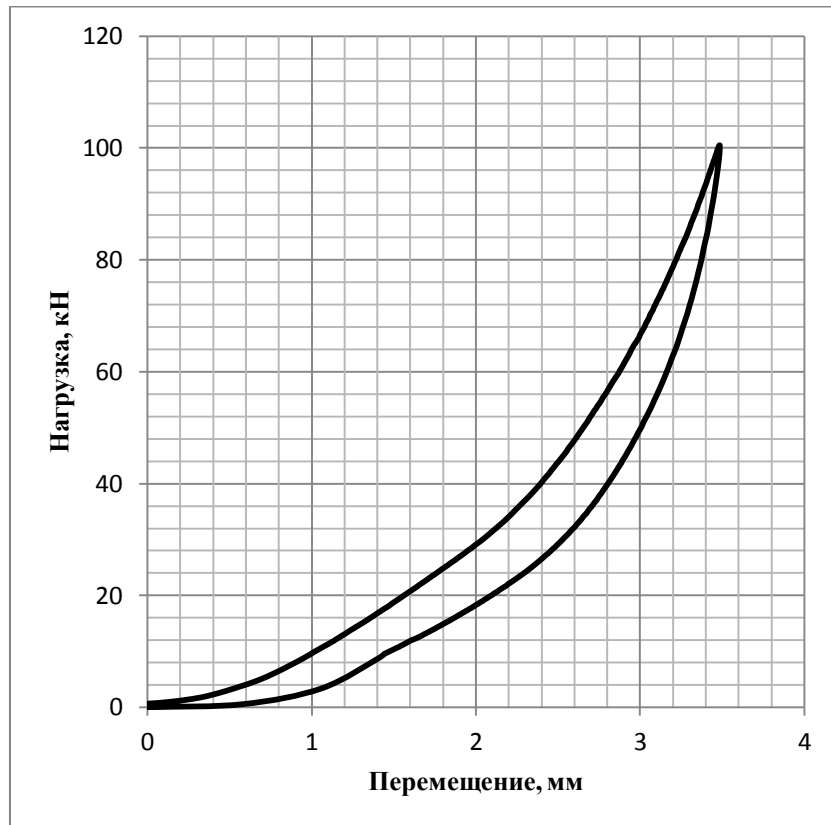


а)

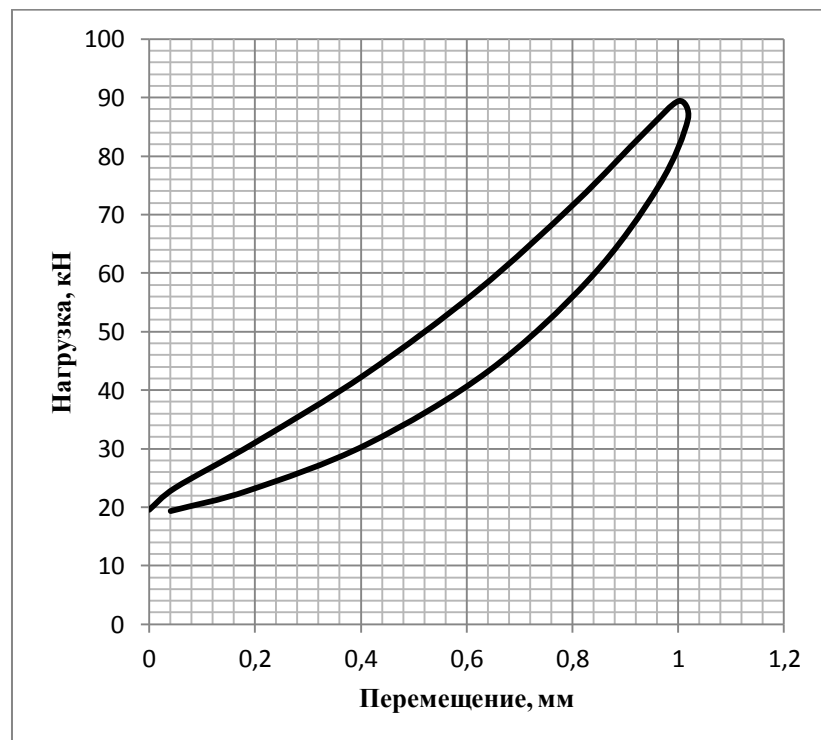


б)

Рисунок 5.6 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении составляющих компонентов ТЭП1нж10, ТЭП1нж14 и сэндвича ТЭП1нж10-ТЭП1нж14



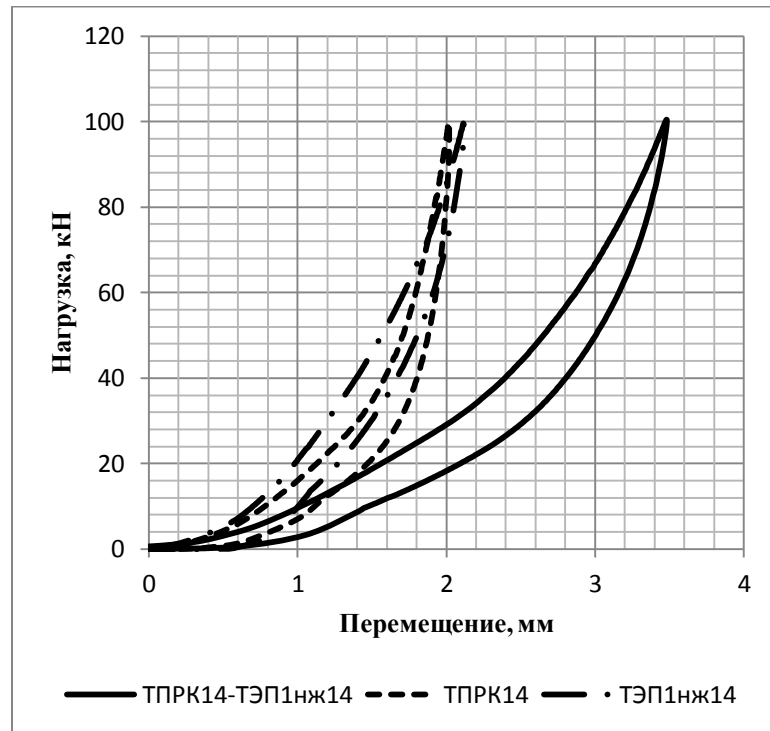
а)



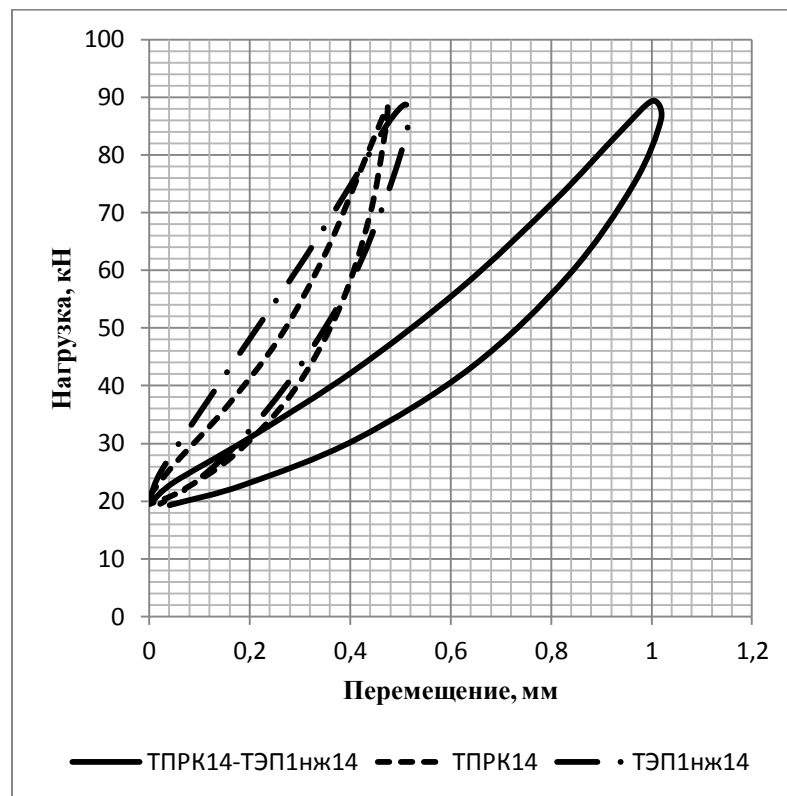
б)

Рисунок 5.7 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении сэндвича

ТПРК14-ТЭП1_{нж}14

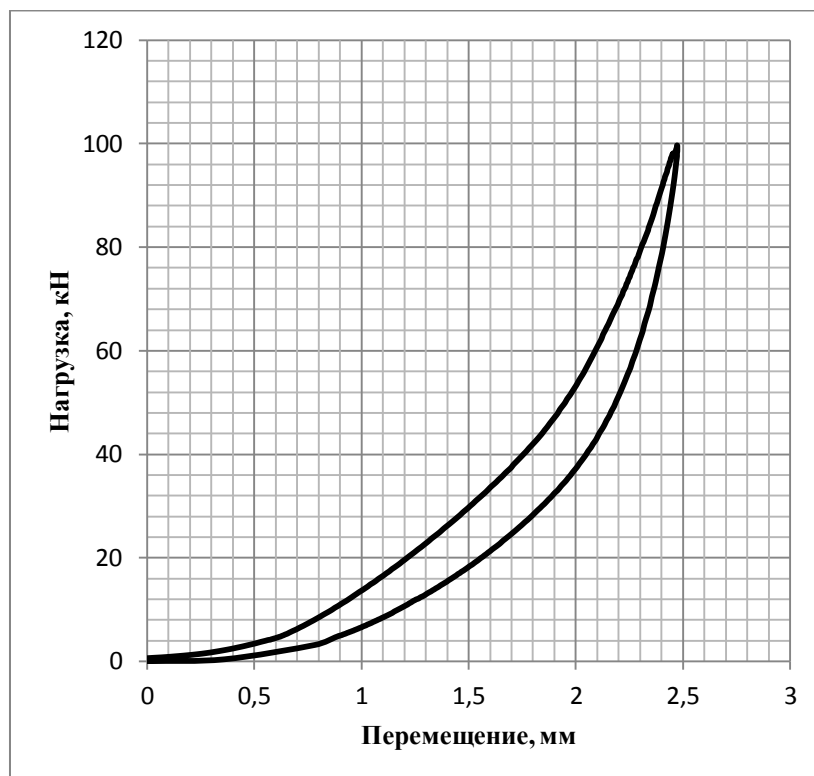


а)

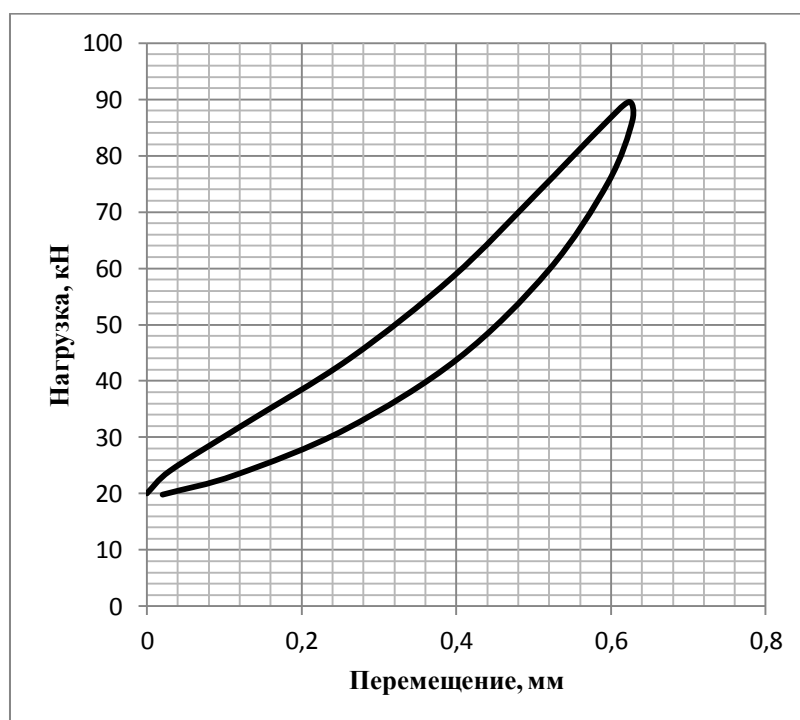


б)

Рисунок 5.8 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении составляющих компонентов ТПРК14, ТЭП1нж14 и сэндвича ТПРК14-ТЭП1нж14



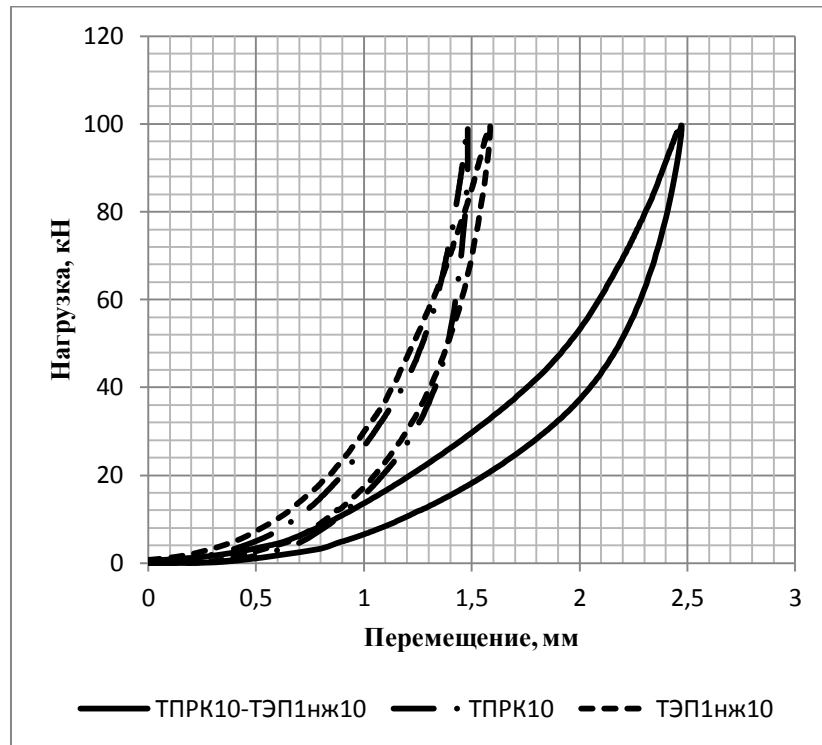
а)



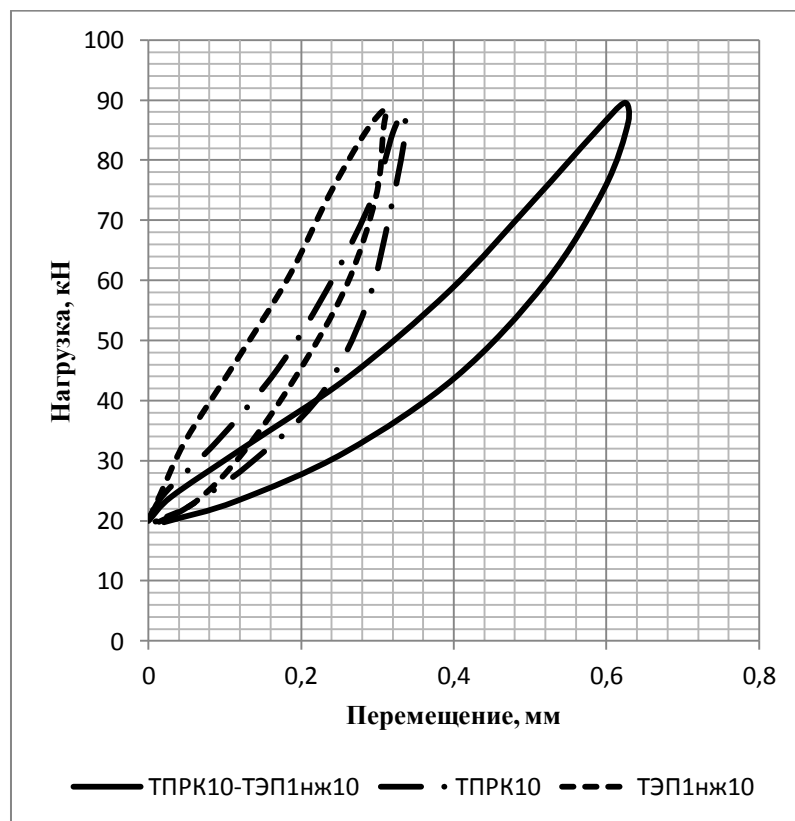
б)

Рисунок 5.9 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении сэндвича

ТПРК10-ТЭП1_{нж}10

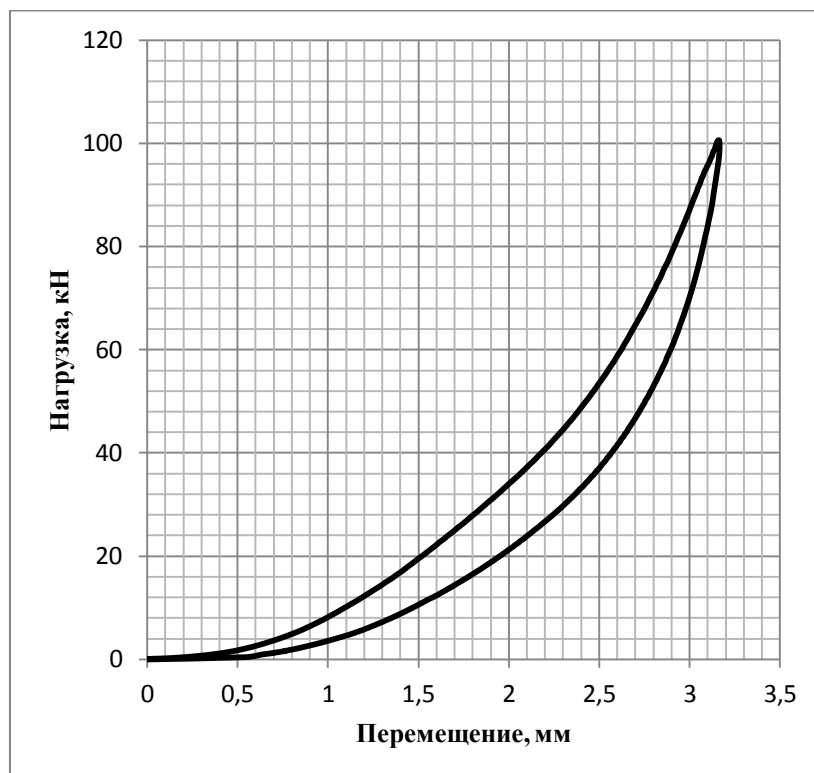


а)

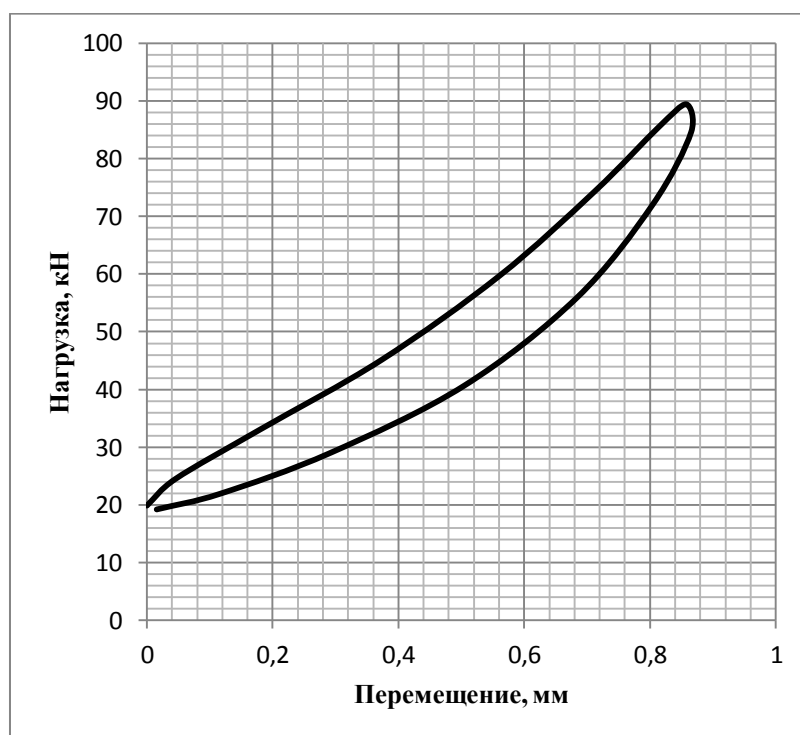


б)

Рисунок 5.10 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении составляющих компонентов ТПРК10, ТЭП1нж10 и сэндвича ТПРК10-ТЭП1нж10



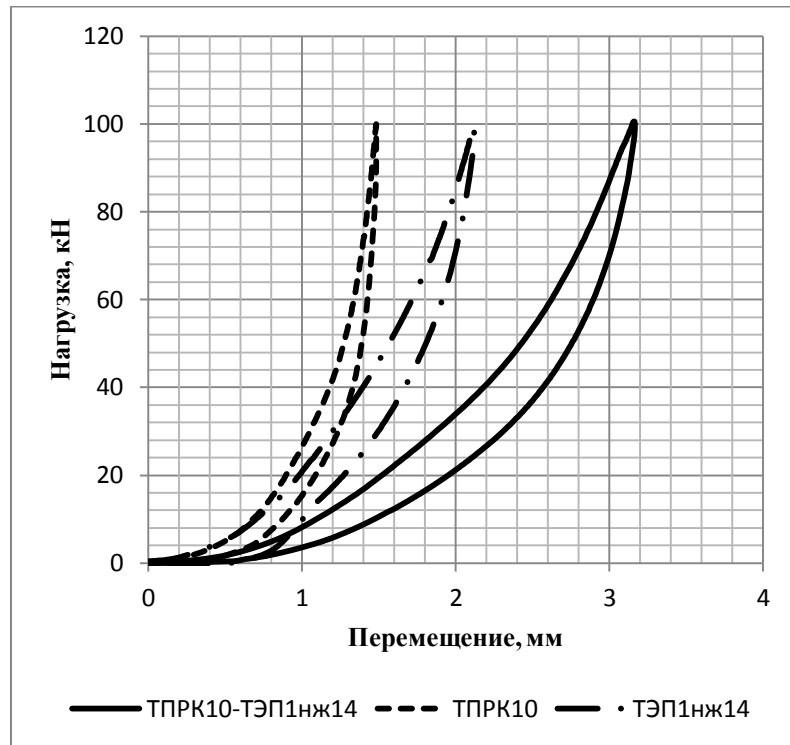
а)



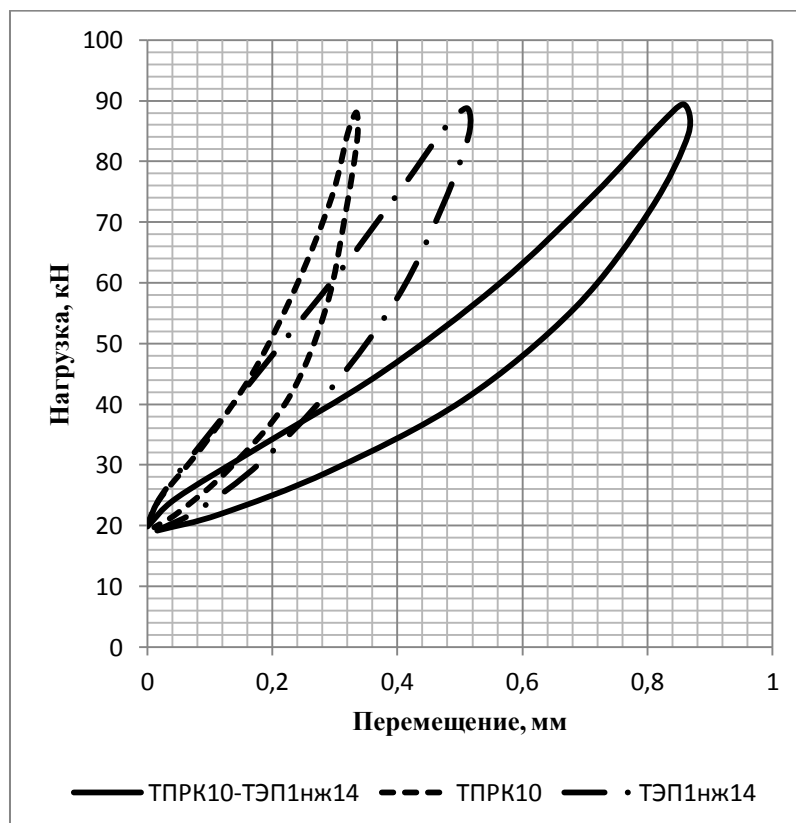
б)

Рисунок 5.11 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении сэндвича

ТПРК10-ТЭП1_{нж}14

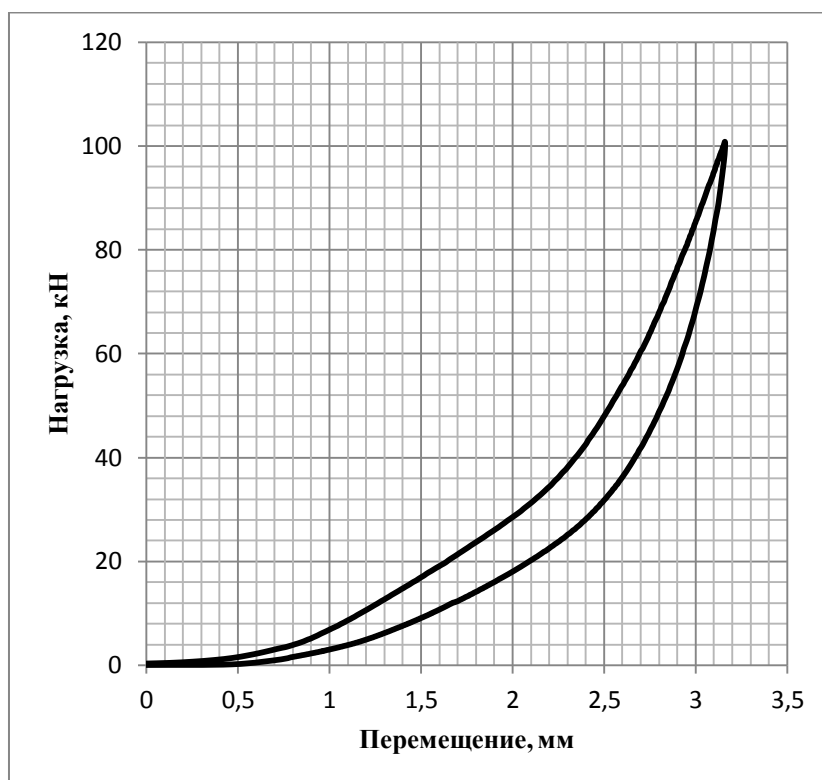


а)

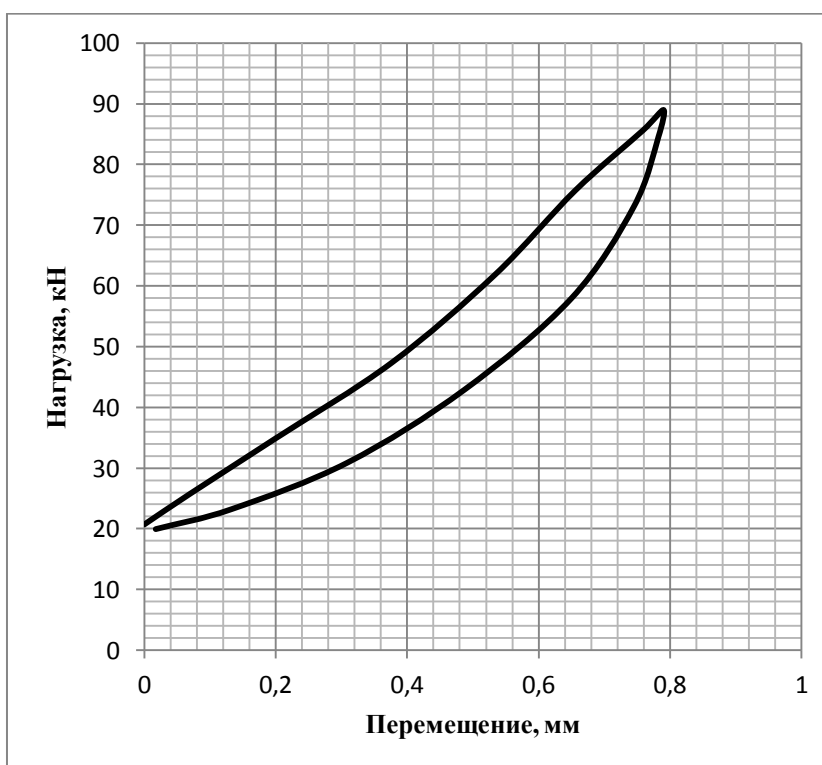


б)

Рисунок 5.12 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении составляющих компонентов ТПРК10, ТЭП1нж14 и сэндвича ТПРК10-ТЭП1нж14



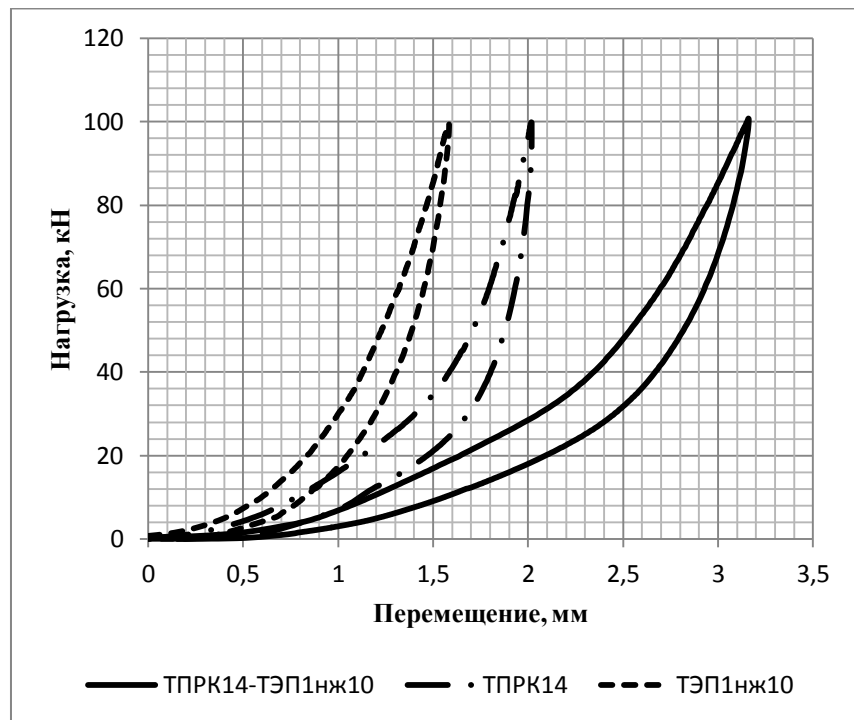
а)



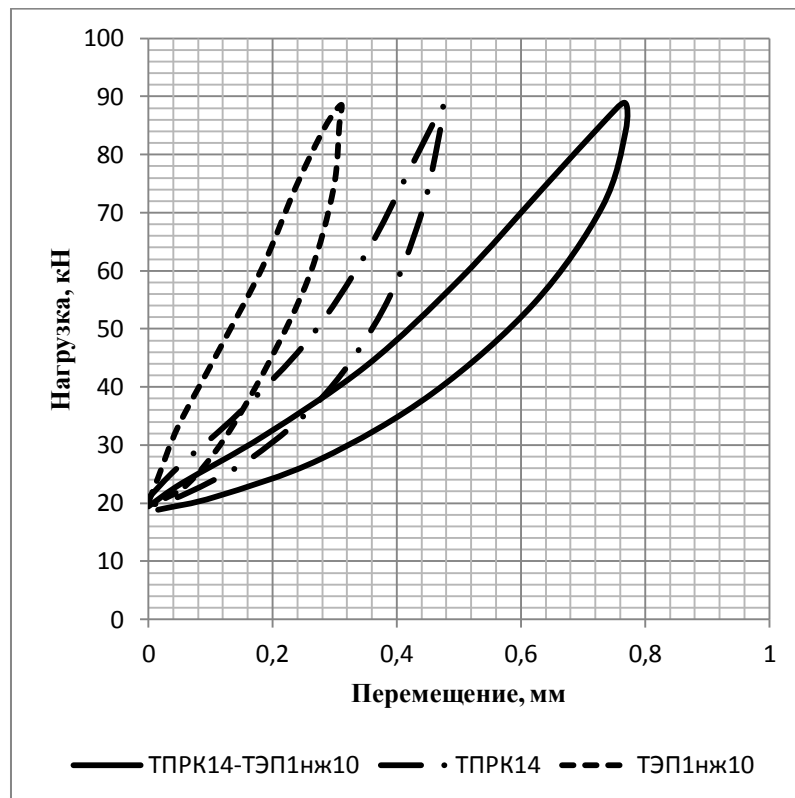
б)

Рисунок 5.13 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении сэндвича

ТПРК14-ТЭП1_{нж}10

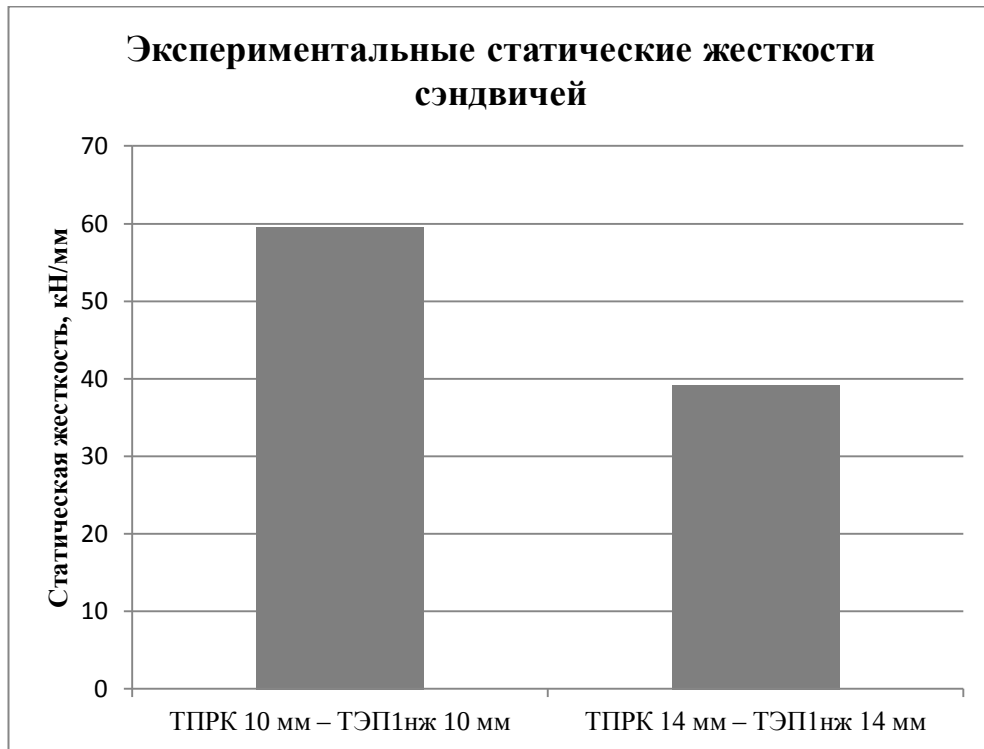


а)

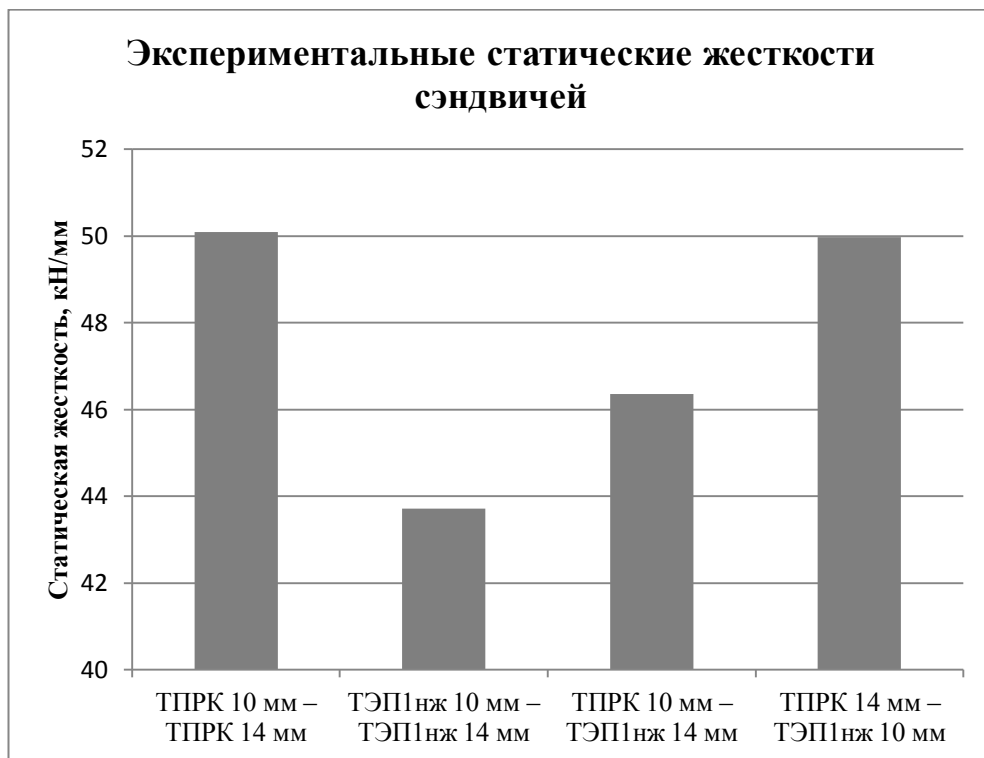


б)

Рисунок 5.14 - Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при статическом (а) и динамическом (б) нагружении составляющих компонентов ТПРК14, ТЭП1нж10 и сэндвича ТПРК14-ТЭП1нж10

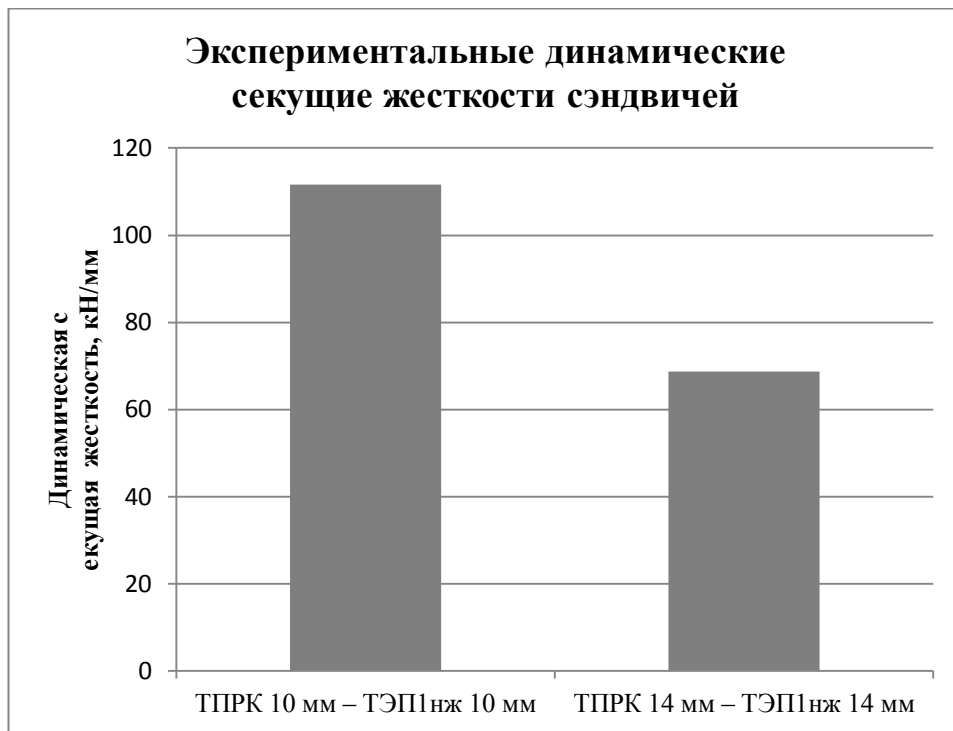


а)

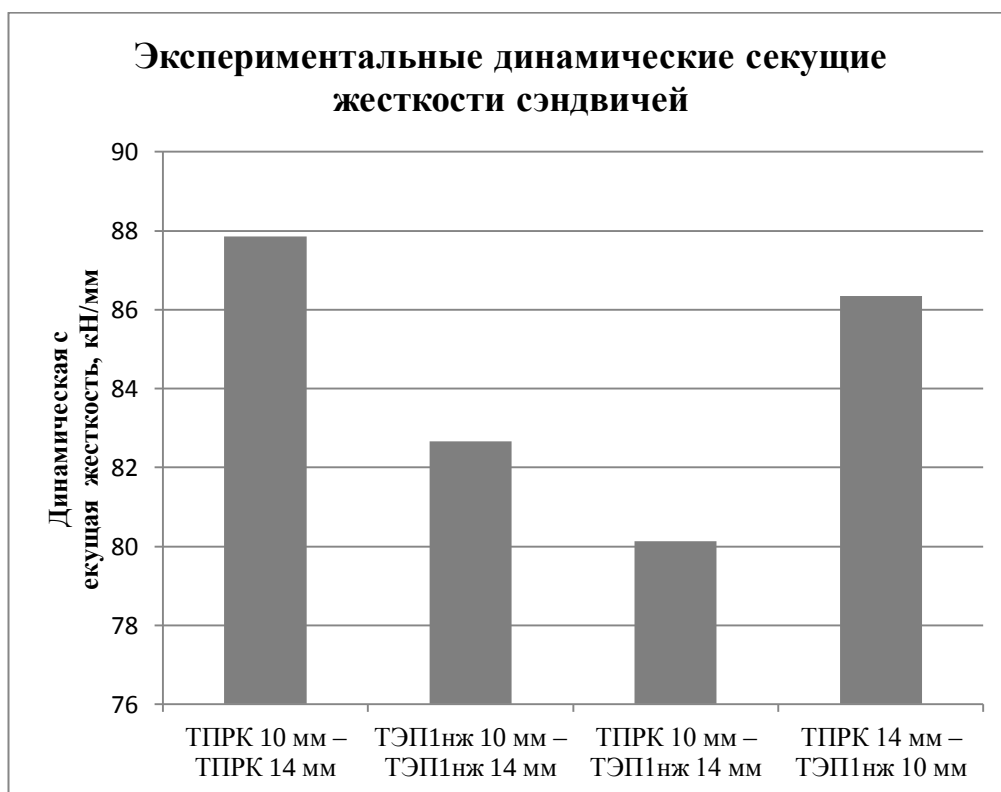


б)

Рисунок 5.15 – Диаграммы экспериментально определенных статических жесткостей сэндвичей: общей толщиной 20 мм, 28 мм (а) и 24 мм (б)



а)



б)

Рисунок 5.16 – Диаграммы экспериментально определенных динамических секущих жесткостей сэндвичей: общей толщиной 20 мм, 28 мм (а) и 24 мм (б)

Сравнительный статистический анализ жесткостей сэндвичей (таблицы 5.2, 5.3), определенных расчетным и экспериментальным методом показал, что среднеквадратичные отклонения статических жесткостей не превышает 2,08, а динамических – 3,02. Следовательно, мера разброса данных вокруг средней величины незначительная, что говорит о хорошей сходимости результатов расчета и эксперимента.

Значения коэффициента вариации не превысили 4,34% для статических жесткостей и 2,78% - для динамических. Следовательно, данные совокупности являются однородными.

Очевидно, что статические параметры коэффициентов жесткости сэндвичей (таблица 5.4) также имеют минимальные значения.

Графические зависимости сжимающей нагрузки от перемещения при статическом и динамическом нагружении составляющих компонентов и сэндвичей, полученные экспериментально и представленные на рисунках 5.4, 5.6, 5.8, 5.10, 5.12, 5.14, подтверждают возможность определения общей жесткости сэндвичей с допустимой погрешностью путем геометрического сложения графических зависимостей (гистерезисов) отдельных компонентов (метод 2).

Статические и динамические жесткости сэндвичей из однотипных компонентов равной толщины (рисунки 5.15а, 5.16а) находятся в прямопропорциональной зависимости от соотношения общих толщин. Жесткости сэндвичей единой толщины, составленные из разнотолщинных компонентов (рисунки 5.15б, 5.16б), распределяются в зависимости от жесткости преобладающего компонента.

Таким образом, проведенные исследования, а также их статистический анализ, основанный на установлении сходимости результатов экспериментальных и расчетных методов определения параметров сэндвича, подтвердили, что для проектирования амортизаторов в виде сэндвичей достаточно определить экспериментальным методом статические и динамические жесткости отдельных компонентов на тестовых образцах, а

затем, используя расчетные методы, подобрать необходимую общую жесткость.

Выводы по пятому разделу

На основе изложенного выше, следуют выводы, приведенные ниже:

1. Актуальными задачами, решаемыми при проектировании сэндвич-амортизаторов, является выбор габаритных размеров, количества слоев, очередность их чередования, а также упруго-гистерезисных характеристик.
2. Статическая и динамическая жесткость, а также относительные коэффициенты, сэндвичей, определенные экспериментальными (непосредственное испытание конструкции) и предложенными расчетными методами, показали высокую сходимость полученных результатов, т.к. мера разброса данных вокруг средней величины незначительная, а совокупности являются однородными.
3. Статические и динамические жесткости сэндвичей из однотипных компонентов равной толщины находятся в прямопропорциональной зависимости от соотношения общих толщин.
4. Жесткости сэндвичей одной суммарной толщины, составленные из разнотолщинных компонентов, распределяются в зависимости от жесткости преобладающего компонента.
5. Следовательно, для проектирования амортизаторов в виде сэндвичей достаточно определить экспериментальным методом статические и динамические жесткости отдельных компонентов на тестовых образцах, а затем, используя расчетные методы, подобрать необходимую общую жесткость.

6 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА УПРУГО-ГИСТРЕЗИСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ АМОРТИЗАТОРОВ И ЕЕ АПРОБАЦИЯ

6.1 Методика выбора упруго-гистрезисных характеристик материалов сэндвичей для проектирования амортизаторов

В предыдущих главах показана целесообразность использования сэндвичей из различных полимерных материалов в амортизаторах железнодорожных конструкций, а также доказана возможность с высокой степенью точности применения расчетных методов определения упруго-гистрезисных свойств при различных температурах на основании экспериментальных данных, полученных на тестовом образце.

При выборе материалов компонентов сэндвичей конструктор должен учитывать не только его физико-механические свойства, обеспечивающие выполнение заданной функции всей конструкцией, но и выбрать такой сортамент, который позволит изготовить амортизатор требуемой конфигурации с наименьшими затратами.

Для практического применения результатов проведенных исследований разработана методика выбора упруго-гистрезисных характеристик сэндвич-амортизаторов, которая состоит из следующих этапов:

1. Выбор исходных данных:
 - Геометрические параметры амортизатора (габаритные размеры) для сопряжения с другими элементами конструкции.
 - Упруго-гистрезисные характеристики тестового образца, полученные экспериментально или взятые из формируемой библиотеки элементов на основе накопленного опыта.

2. Определение критериев предельного состояния амортизаторов, взятых из нормативной документации или на основе результатов научно-исследовательских работ (жесткости при различных температурах эксплуатации, полезной упругости, коэффициента полноты диаграммы, относительного гистерезиса, фрикционной способности, и др.).

3. Выбор количества слоев, возможных толщин и предпочтительного их чередования.

4. Расчет характеристик каждого компонента по тестовым образцам.

Статическая и динамическая жесткость каждого выбранного компонента сэндвича при разных температурах испытания определяется по следующей формуле:

$$C_2 = (\delta_1 / \delta_2) \cdot C_1, \quad 6.1$$

где C_1 – статическая (динамическая) жесткость материала тестового образца (кН/мм), толщиной δ_1 (мм),

C_2 – статическая (динамическая) жесткость материала компонента (кН/мм), толщиной δ_2 (мм).

Относительные упруго-гистерезисные величины: коэффициенты жесткости, коэффициенты механических потерь, полезная упругость, являются константами для данного материала и не зависят от толщины, поэтому принимаются равными тестовому образцу. Механические потери за цикл, определяемые площадью петли гистерезиса, обратно пропорциональны изменению толщины материала:

$$q_2 = (\delta_2 / \delta_1) \cdot q_1, \quad 6.2$$

где q_1 – механические потери за цикл деформации материала тестового образца, толщиной δ_1 (мм),

q_2 - механические потери за цикл деформации материала компонента толщиной δ_2 (мм).

5. Расчет общих характеристик сэндвича.

Жесткость сэндвича C_c вычисляют для нескольких компонентов по следующей формуле:

$$C_c = \frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2}, \quad 6.3$$

или

$$\frac{1}{C_c} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_i}, \quad 6.4$$

где C_1 – статическая (динамическая) жесткость 1 компонента, кН/мм;

C_2 - статическая (динамическая) жесткость 2 компонента, кН/мм;

C_i - статическая (динамическая) жесткость i -го компонента, кН/мм.

Коэффициент изменения статической жесткости сэндвича, определяют по формуле:

$$K_{\text{stat}} = \frac{C_{\text{stat1}}}{C_{\text{stat0}}}, \quad 6.5$$

где C_{stat1} – статическая жесткость сэндвича при выбранной температуре, кН/мм;

C_{stat0} - статическая жесткость сэндвича при температуре при +23 °С, кН/мм.

Коэффициент жесткости сэндвича при разных температурах вычисляют по формуле:

$$K = \frac{C_{\text{din}}}{C_{\text{stat}}}, \quad 6.6$$

где C_{din} – динамическая жесткость сэндвича при выбранной температуре, кН/мм;

C_{stat} – статическая жесткость сэндвича при температуре +23 °С, кН/мм.

Механические потери сэндвича за цикл деформации (Дж/см³), определяемые площадью гистерезиса, равны сумме механических потерь компонентов:

$$q_c = q_1 + q_2 \dots + q_i, \quad 6.7$$

где q_1 - механические потери за цикл деформации 1 компонента, Дж/см³,

q_2 - механические потери за цикл деформации 2 компонента, Дж/см³,

q_i - механические потери за цикл деформации i -го компонента, Дж/см³.

Коэффициенты механических потерь, полезная упругость, коэффициент полноты диаграммы определяются как отношение сумм соответствующих площадей компонентов (для полезной упругости умноженные на 100%).

6. Анализ полученных вариантов по критериям предельных состояний, исключение (отбраковка) выявленных несоответствий (отрицательных результатов).

7. Расчет себестоимости каждого оставшегося варианта сэндвича, определение экономически эффективных модификаций.

8. Прототипирование выбранного варианта (вариантов) сэндвича.

9. Тестирование опытного образца.

10. Доработка опытного образца (при необходимости).

11. Изготовление конечного продукта (сэндвич-амортизатора).

Разработанная методика выбора упруго-гистерезисных свойств сэндвич-амортизаторов, основанная на расчете требуемых характеристик компонентов и сборки по экспериментальным данным тестовых образцов материалов, позволяет с высокой степенью точности спроектировать конструкцию и значительно сократить затраты на этапе прототипирования, связанные с изготовлением и проведением экспериментальных исследований большого количества опытных образцов. Известные упруго-гистерезисные

характеристики материалов целесообразно систематизировать и накапливать в соответствующих справочных пособиях.

6.2 Апробация методики выбора упруго-гистрезисных характеристик материалов сэндвичей на примере проектирования прокладок рельсовых скреплений железнодорожного пути

Прокладки рельсовых скреплений представляют наиболее «нормативно –обеспеченный» класс полимерных амортизирующих элементов железнодорожного транспорт. В отличие от других полимерных амортизаторов к ним разработаны требования, учитывающие жесткостные характеристики. Следовательно, теоретически разработанные сэндвичи прокладок можно будет оценить по критериям предельных состояний.

Прокладки рельсовых скреплений железнодорожного пути являются элементом общей многомассовой колебательной системы (ходовые части подвижного состава – железнодорожный путь) и выражаются параметрами жесткости между двумя массами: колесо-рельс и подрельсовое основание (шпала и балластный слой). Как указано в предыдущей главе, прокладки должны обладать амортизирующими свойствами для эффективного гашения различных ударных нагрузок и вибропоглощения, фрикционными свойствами для увеличения сопротивления продольным силам, действующим на рельсы, электроизолирующими свойствами, устойчивостью к климатическим изменениям и воздействию агрессивных сред, долговечностью. Причем, определяющим функциональным параметром является жесткость, которая варьируется, прежде всего, от условий эксплуатации: скоростное и высокоскоростное движение (предпочтительна более низкая жесткость для обеспечения комфорта пассажиров и недопущения резонансных явлений), а также грузонапряженное и особо грузонапряженное движение (предпочтительна высокая жесткость во избежание раскантовки рельса и схода подвижного состава).

Жесткость материалов главным образом определяется их толщиной и характеристиками материалов (модулем упругости). Причем, во время эксплуатации жесткость прокладок увеличивается в виду развития процессов старения материала и накопления остаточной деформации. В связи с тем, что в настоящее время планируется увеличение назначенного ресурса элементов верхнего строения пути и подвижного состава более чем в 1,5 раза (с 1,5 млрд т брутто, до 2,5 млрд т брутто, а во временном выражении - до ~25 лет), необходимо разработать мероприятия по снижению величины и интенсивности воздействия эксплуатационных нагрузок на ответственные элементы (шпалу, рельс, колесо и т.д.) после определенного периода их эксплуатации. Одним из таких решений может быть замена одного из компонентов сэндвича, жесткость которого легко подобрать с учетом жесткости второго компонента. Используя методику выбора жесткостей сэндвичей, изложенную в предыдущей главе, можно варьировать толщинами элементов, типами и стоимостью материалов, при этом уменьшив затраты на жизненный цикл как прокладки, так и всего узла скрепления в целом.

В связи с чем произведен расчет жесткостей сэндвич-амортизаторов из трех типов материалов (ТПРК (далее Т), РВК (далее Р), ТЭПнж (далее П)) для пяти толщин:

- 10 мм, 12 мм для грузонапряженного и особо грузонапряженного движения;
- 14 мм для смешанного движения;
- 20 мм, 24 мм для скоростного пассажирского движения, где необходимо виброгашение.

В основу проектирования положен следующий принцип: верхним слоем сэндвича является компонент из резиновой смеси, обладающей высокими фрикционными свойствами для сопротивления угону пути в продольном направлении; нижним – компонент из термоэластопласта, устойчивый к воздействию агрессивных сред, более технологичный и долговечный.

В качестве критериев выбора жесткостных свойств сэндвич-амортизаторов применяли требования таблицы 1 пункт 14 ГОСТ 34078-2017 «Прокладки рельсовых креплений железнодорожного пути. Технические условия» [207].

Расчет общей жесткости сэндвича при температурах эксплуатации $+23^{\circ}\text{C}$ и -40°C произведен на основе экспериментальных данных отдельных компонентов, изложенных в предыдущих главах, с использованием формул подбора соответствующей толщины и определения жесткости двух параллельно расположенных демпфирующих элементов.

Результаты расчета жесткостей сэндвич-амортизаторов для прокладок рельсовых креплений представлены в таблицах 6.1-6.5. Приняты следующие условные обозначения сэндвичей: Т - материал ТПРК, Р - материал РВК, П – материал ТЭП1нж; цифра после буквенного обозначения соответствует толщине компонента.

Таблица 6.1- Результаты расчета параметров упруго-гистерезисных свойств проектируемых сэндвич-амортизаторов толщиной 10 мм

Наименование	Статическая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	Динамическая секущая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	Статическая жесткость при температуре -40°C, кН/мм	Динамическая секущая жесткость при температуре -40°C, кН/мм	Коэффициент статической жесткости	Коэффициент жесткости при +23 °C
Исходные компоненты сэндвича						
T5	250,8	405,8	263,2	870,2	1,05	1,62
П5	214,6	439,8	1385,2	3473,2	9,84	3,12
P5	237,16	501,76	238	834,12	1	2,12
Проектируемый сэндвич-амортизатор						
T5-П5	115,65	211,06	221,17	695,86	1,91	1,83
T5-P5	121,89	224,35	124,98	425,89	1,03	1,84
P5-П5	112,66	234,37	203,1	672,59	1,8	2,08
T6-П4	117,47	209,37	185,72	585,47	1,58	1,78
max	121,89	234,37	221,17	695,86	1,91	2,08
min	115,65	209,37	124,98	425,89	1,03	1,78

Таблица 6.2- Результаты расчета параметров упруго-гистерезисных свойств проектируемых сэндвич-амортизаторов толщиной 12 мм

Наименование	Статическая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	Динамическая секущая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	Статическая жесткость при температуре -40°C, кН/мм	Динамическая секущая жесткость при температуре -40°C, кН/мм	Коэффициент статической жесткости	Коэффициент жесткости при +23 °C
Исходные компоненты сэндвича						
T5	250,8	405,8	263,2	870,2	1,05	1,62
T7	166,4	283,8	180	577,8	1,08	1,71
P5	237,16	501,76	238	834,12	1	2,12
P7	169,4	358,4	170	595,8	1	2,12
Π5	214,6	439,8	1385,2	3473,2	6,45	2,05
Π7	132,4	268,4	692,6	1736,6	5,23	2,03
Проектируемый сэндвич-амортизатор						
T5-T7	100,03	167	106,9	347,24	1,07	1,67
T5-P7	101,11	190,31	103,29	353,66	1,02	1,88
P5-T7	97,79	181,27	102,49	341,35	1,05	1,85
T5-Π7	86,65	161,55	190,72	579,71	2,2	1,86
T7-Π5	93,73	172,49	159,3	495,39	1,7	1,84
P7-Π5	94,67	197,47	151,42	508,56	1,6	2,09
P5-T7	97,79	181,27	102,49	341,35	1,05	1,85
max	101,11	197,47	190,72	579,71	2,2	2,09
min	86,65	161,55	102,49	341,35	1,02	1,84

Таблица 6.3- Результаты расчета параметров упруго-гистерезисных свойств проектируемых сэндвич-амортизаторов толщиной 14 мм

Наименование	Статическая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	Динамическая секущая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	Статическая жесткость при температуре -40°C, кН/мм	Динамическая секущая жесткость при температуре -40°C, кН/мм	Коэффициент статической жесткости	Коэффициент жесткости при +23 °C
Исходные компоненты сэндвича						
T5	250,8	405,8	263,2	870,2	1,05	1,62
T7	166,4	283,8	180	577,8	1,08	1,71
T9	139,33	225,44	146,22	483,44	1,05	1,62
П5	214,6	439,8	969,64	2431,24	4,52	2,05
П7	132,4	268,4	692,6	1736,6	5,23	2,03
П9	119,22	244,33	538,69	1350,69	4,52	2,05
P5	237,16	501,76	238	834,12	1	2,12
P7	169,4	358,4	170	595,8	1	2,12
P9	131,76	278,76	132,22	463,4	1	2,12
Проектируемый сэндвич-амортизатор						
T7-П7	73,73	137,94	142,87	433,55	1,94	1,87
T7-P7	83,94	158,38	87,43	293,33	1,04	1,89
P7-П7	74,32	153,47	136,5	443,61	1,84	2,07
T9-П5	84,48	149,04	127,06	403,26	1,5	1,76
T9-P5	87,77	155,55	90,57	306,06	1,03	1,77
T5-П9	78,16	144,84	358,56	881,35	4,59	1,85
T5-P9	86,38	165,24	88,01	302,38	1,02	1,91
P9-П5	81,64	170,62	116,36	389,21	1,43	2,09

Продолжение таблицы 3						
P5-II9	79,34	164,32	165,07	515,67	2,08	2,07
max	87,77	170,62	358,56	881,35	4,59	2,09
min	78,16	144,84	88,01	302,38	1,02	1,76

Таблица 6.4- Результаты расчета параметров упруго-гистерезисных свойств проектируемых сэндвич-амортизаторов толщиной 20 мм

Наименование	Статическая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	Динамическая секущая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	Статическая жесткость при температуре -40°C, кН/мм	Динамическая секущая жесткость при температуре -40°C, кН/мм	Коэффициент статической жесткости	Коэффициент жесткости при +23 °C
Исходные компоненты сэндвича						
T7	166,4	283,8	180	577,8	1,08	1,71
T13	89,6	152,82	96,92	311,12	1,08	1,71
P7	169,4	358,4	170	595,8	1	2,12
P13	91,22	192,98	91,54	320,82	1	2,12
П7	132,4	268,4	692,6	1736,6	5,23	2,03
П13	71,29	144,52	372,94	935,09	5,23	2,03
Проектируемый сэндвич-амортизатор						
T7-P13	58,92	114,87	60,68	206,28	1,03	1,95
P7-T13	58,6	107,13	61,73	204,39	1,05	1,83
T7-П13	49,91	95,76	121,4	357,13	2,43	1,92
P7-П13	50,18	102,99	116,77	363,92	2,33	2,05
T13-П7	53,44	97,37	85,02	263,85	1,59	1,82
P13-П7	54,01	112,26	80,85	270,79	1,5	2,08
max	58,92	114,87	121,4	363,92	2,43	2,08
min	49,91	95,76	60,68	204,39	1,03	1,82

Таблица 6.5- Результаты расчета параметров упруго-гистерезисных свойств проектируемых сэндвич-амортизаторов толщиной 24 мм

Наименование	Статическая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	Динамическая секущая жесткость при температуре +23°C, кН/мм	Статическая жесткость при температуре -40°C, кН/мм	Динамическая секущая жесткость при температуре -40°C, кН/мм	Коэффициент статической жесткости	Коэффициент жесткости при +23 °C
Исходные компоненты сэндвича						
T7	166,4	283,8	180	577,8	1,08	1,71
T17	68,52	116,86	74,12	237,92	1,08	1,71
P7	169,4	358,4	170	595,8	1	2,12
P17	69,75	147,58	70	245,33	1	2,12
П7	132,4	268,4	692,6	1736,6	5,23	2,03
П17	54,52	110,52	285,19	715,07	5,23	2,03
Проектируемый сэндвич-амортизатор						
T7-P17	49,15	97,09	50,4	172,21	1,03	1,98
P7-T17	48,79	88,13	51,61	170,02	1,06	1,81
T7-П17	41,06	79,54	110,35	319,57	2,69	1,94
P7-П17	41,24	84,47	106,51	325	2,58	2,05
T17-П7	45,15	81,41	66,95	209,25	1,48	1,8
P17-П7	45,68	95,22	63,57	214,96	1,39	2,08
max	49,15	97,09	110,35	325	2,69	2,08
min	41,06	79,54	50,4	170,02	1,03	1,8

Требования ГОСТ 34078-2017 «Прокладки рельсовых креплений железнодорожного пути. Технические условия» (п.5.2, таблица 1, пункт 14) предусматривают, что коэффициент жесткости при испытательной частоте (10 ± 1) Гц при температуре плюс $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ должен составлять от 1,0 до 2,2, а коэффициент изменения статической жесткости при температуре минус $(40_{-2})^\circ\text{C}$ - не более 4,0.

Исходя из указанных нормативных требований и результатов расчета не применимы для эксплуатации будут прокладки в виде следующих сэндвичей:

- Т5-П7 (таблица 2);
- Т5-П9 (таблица 3);
- Р5-П9 (таблица 3);
- Т7-П13 (таблица 4);
- Р7-П13 (таблица 4);
- Т7-П17 (таблица 5);
- Р7-П17 (таблица 5).

Анализ полученных расчетным методом параметров жесткости показал целесообразность применения следующих сэндвич-амортизаторов в зависимости от условий эксплуатации:

- для грузонапряженного и особо грузонапряженного движения: Т5-Р5, Т5-Р7, Р7-П5.
- для смешанного движения - Т5-Р9, Р9-П5.
- для скоростного пассажирского движения - Т13-П7, Т17-П7.

Следующим этапом проектирования должен быть расчет себестоимости каждого варианта с целью минимизации затрат, изготовление опытного образца, проведение его ресурсных испытаний с определением остаточной деформации, влияющей на параметры жесткости, и, в случае необходимости, доработки или замены на другой предлагаемый вариант исполнения.

Результаты экспериментальных исследований каждого компонента, приведенные в настоящей работе, а также эксплуатационные наблюдения показали, что термоэластопласты склонны к развитию максимальной остаточной деформации в начальный период, композиты на основе резиновой смеси накапливают ее постепенно, а резиноволокнистые композиты подвержены уплотнению границ между основной матрицей и кордовым наполнителем при циклическом воздействии. Указанные свойства конструкционных материалов амортизаторов следует учитывать при выборе толщин сэндвичей для определенных условий эксплуатации: при тяжеловесном движении увеличение жесткости возможно, а при пассажирском не допустимо.

Таким образом, при выборе материала для амортизаторов железнодорожного транспорта удовлетворить в полной мере всем эксплуатационным и производственно-технологическим требованиям не всегда представляется возможным. Эти требования часто вступают в противоречие и приводят к различным конструктивным решениям. Задача конструктора заключается в выборе наиболее правильного компромиссного решения, при котором наиболее полно удовлетворяются главные требования к конструкции. Поэтому в данной главе показана целесообразность применения методики выбора упруго-гистрезисных характеристик сэндвич-амортизаторов для проектирования прокладок рельсовых креплений железнодорожного пути, которая позволяет достаточно быстро и с минимальными затратами спроектировать конструкцию, основываясь на главных, предъявляемых к ней требованиях: амортизирующих, фрикционных свойствах, обеспечения стабильности геометрических параметров рельсовой колеи, предотвращения резонансных явлений, обеспечения комфорта пассажиров, долговечности.

Практическое применение методики выбора упруго-гистрезисных характеристик сэндвич-амортизаторов с различной толщиной реализовано в патенте на изобретение № 2695944 «Анкерное рельсовое крепление,

подклеммная подкладка и амортизирующая подрельсовая прокладка анкерного рельсового скрепления (варианты)» [223], который позволяет устанавливать в анкерное рельсовое скрепление прокладки для разных условий эксплуатации.

Выводы по шестому разделу

На основе изложенного выше, следуют выводы, приведенные ниже:

1. На основе анализа, полученных в предыдущих главах, данных об упруго-гистерезисных характеристиках перспективных материалов-демпферов, а также теоретических основ проектирования сэндвичей и подтверждения сходимости результатов расчетных и экспериментальных методов, разработана методика выбора упруго-гистерезисных характеристик материалов сэндвичей для проектирования амортизаторов, которая позволит с высокой степенью точности спроектировать конструкцию и значительно сократить затраты на этапе прототипирования, связанные с изготовлением и проведением экспериментальных исследований большого количества опытных образцов.

2. Предложено систематизировать и накапливать в соответствующих справочных пособиях упруго-гистерезисные характеристики материалов с целью формирования библиотеки исходных данных для проектирования сэндвичей.

3. Проведена апробация методики выбора упруго-гистерезисных характеристик сэндвич-амортизаторов при проектировании прокладок рельсовых скреплений железнодорожного пути для различных условий эксплуатации (грузовое, смешанное, пассажирское движение).

4. Разработанная методика позволила достаточно быстро и с минимальными затратами спроектировать конструкцию амортизатора, основываясь на главных, предъявляемых к ней требованиях: демпфирующих, фрикционных свойствах, обеспечения стабильности геометрических

параметров, предотвращения резонансных явлений, обеспечения комфорта пассажиров, долговечности.

5. Предложены варианты сэндвич-амортизаторов для установки между шпалой и рельсом для разных условий эксплуатации.

6. Практическое применение методики реализовано в патенте на изобретение № 2695944 «Анкерное рельсовое крепление, подклепная подкладка и амортизирующая подрельсовая прокладка анкерного рельсового крепления (варианты)».

7 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ВЫБОРА УПРУГО-ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АМОРТИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ МНОВОВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ МНОВОМАССОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (ВАГОН – ПУТЬ)

7.1 Анализ результатов многовариантных расчетов многомассовой колебательной системы (вагон – путь) с использованием вариации упруго-гистерезисных свойств одного их элементов

С целью верификации методики проектирования амортизаторов и определения рациональных параметров амортизирующих элементов проведены многовариантные расчеты математической модели многомассовой колебательной системы «вагон-путь», представленной в главе 2.

В каждом варианте расчета варьировали параметрами жесткости [224, 225] и внутреннего трения подрельсовой прокладки, которые выбирали из полученных в предыдущих главах динамических гистерезисов для материалов ТПРК 14 мм и 10 мм, РВК 14 мм, ТЭП1нж 14 мм, ТЭП2вж 14 мм, а также сэндвичей Т5-Р5, Р9-П5, Т13-П7.

Массы (M_i), жесткости (C_i) элементов системы определяли из справочных данных, а жесткость прокладки (C_4) и силу внутреннего трения (β_4) аппроксимировали из построенных гистерезисов. Расчет проведен для случая прохождения грузового вагона с осевой нагрузкой 25 тс.

Имитировали удар колеса по рельсу.

Результаты расчетов реактивных сил и отклонений элементов многомассовой колебательной системы представлены в таблицах 7.1-7.8 и на рисунках 7.1-7.12 [202].

Таблица 7.1 – Результаты расчета для случая установки прокладки из материала ТПРК толщиной 14 мм

№ элемента	Наименование элемента системы	Реакция R, кН	Отклонения z, мм
1	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	169,94	70,243
2	Неподрессоренная масса вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колесной пары)	188,72	44,207
3	Обод колеса вагона	167,16	44,095
4	Приведенная масса рельса	266,63	43,622
5	Подрельсовое основание (1/2 часть шпалы)	132,36	43,199

Таблица 7.2 – Результаты расчета для случая установки прокладки из материала ТПРК толщиной 10 мм

№ элемента	Наименование элемента системы	Реакция R, кН	Отклонения z, мм
1	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	169,81	70,175
2	Неподрессоренная масса вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колесной пары)	194,02	44,099
3	Обод колеса вагона	173,02	43,995
4	Приведенная масса рельса	254,43	43,567
5	Подрельсовое основание (1/2 часть шпалы)	132,74	43,268

Таблица 7.3 – Результаты расчета для случая установки прокладки из материала РВК толщиной 14 мм

№ элемента	Наименование элемента системы	Реакция R, кН	Отклонения z, мм
1	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	169,50	70,203
2	Неподрессоренная масса вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колесной пары)	188,06	44,106
3	Обод колеса вагона	172,87	44,004
4	Приведенная масса рельса	254,16	43,627
5	Подрельсовое основание (1/2 часть шпалы)	132,81	43,295

Таблица 7.4 – Результаты расчета для случая установки прокладки из материала ТЭП1нж толщиной 14 мм

№ элемента	Наименование элемента системы	Реакция R, кН	Отклонения z, мм
1	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	169,72	70,242
2	Неподрессоренная масса вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колесной пары)	197,91	44,342
3	Обод колеса вагона	158,02	44,242
4	Приведенная масса рельса	263,42	43,598
5	Подрельсовое основание (1/2 часть шпалы)	132,31	43,106

Таблица 7.5 – Результаты расчета для случая установки прокладки из материала ТЭП2вж толщиной 14 мм

№ элемента	Наименование элемента системы	Реакция R, кН	Отклонения z, мм
1	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	169,69	70,196
2	Неподрессоренная масса вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колесной пары)	170,96	44,217
3	Обод колеса вагона	162,72	44,101
4	Приведенная масса рельса	245,39	43,532
5	Подрельсовое основание (1/2 часть шпалы)	132,40	43,157

Таблица 7.6 – Результаты расчета для случая установки сэндвич-прокладки Т5-П5 из материалов ТПРК (толщина 5 мм) и ТЭП2вж (толщина 5 мм)

№ элемента	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	Реакция R, кН	Отклонения z, мм
1	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	169,75	70,206
2	Неподрессоренная масса вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колесной пары)	191,71	44,108
3	Обод колеса вагона	175,80	44,010
4	Приведенная масса рельса	236,79	43,600
5	Подрельсовое основание (1/2 часть шпалы)	132,90	43,315

Таблица 7.7 – Результаты расчета для случая установки сэндвич-прокладки Р9-П5 из материалов РВК (толщина 9 мм) и ТЭП2вж (толщина 5 мм)

№ элемента	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	Реакция R, кН	Отклонения z, мм
1	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	169,73	70,214
2	Неподрессоренная масса вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колесной пары)	171,97	44,189
3	Обод колеса вагона	168,58	44,075
4	Приведенная масса рельса	238,68	43,573
5	Подрельсовое основание (1/2 часть шпалы)	132,67	43,194

Таблица 7.8 – Результаты расчета для случая установки сэндвич-прокладки Т13-П7 из материалов ТПРК (толщина 13 мм) и ТЭП2вж (толщина 7 мм)

№ элемента	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	Реакция R, кН	Отклонения z, мм
1	Приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)	169,58	70,357
2	Неподрессоренная масса вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колесной пары)	152,82	44,655
3	Обод колеса вагона	145,38	44,541
4	Приведенная масса рельса	284,13	43,7095
5	Подрельсовое основание (1/2 часть шпалы)	131,89	42,968

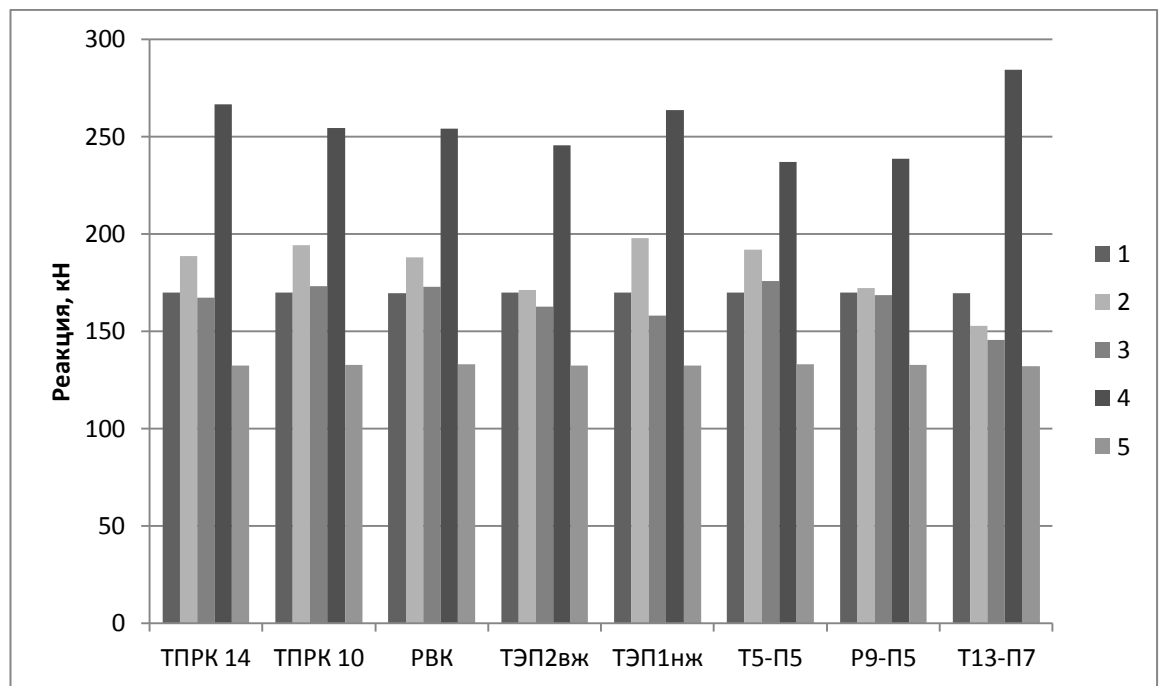


Рисунок 7.1 – Диаграмма распределения реакций связей во всех элементах многомассовой системы «вагон-путь» в зависимости от типа установленной подрельсовой прокладки

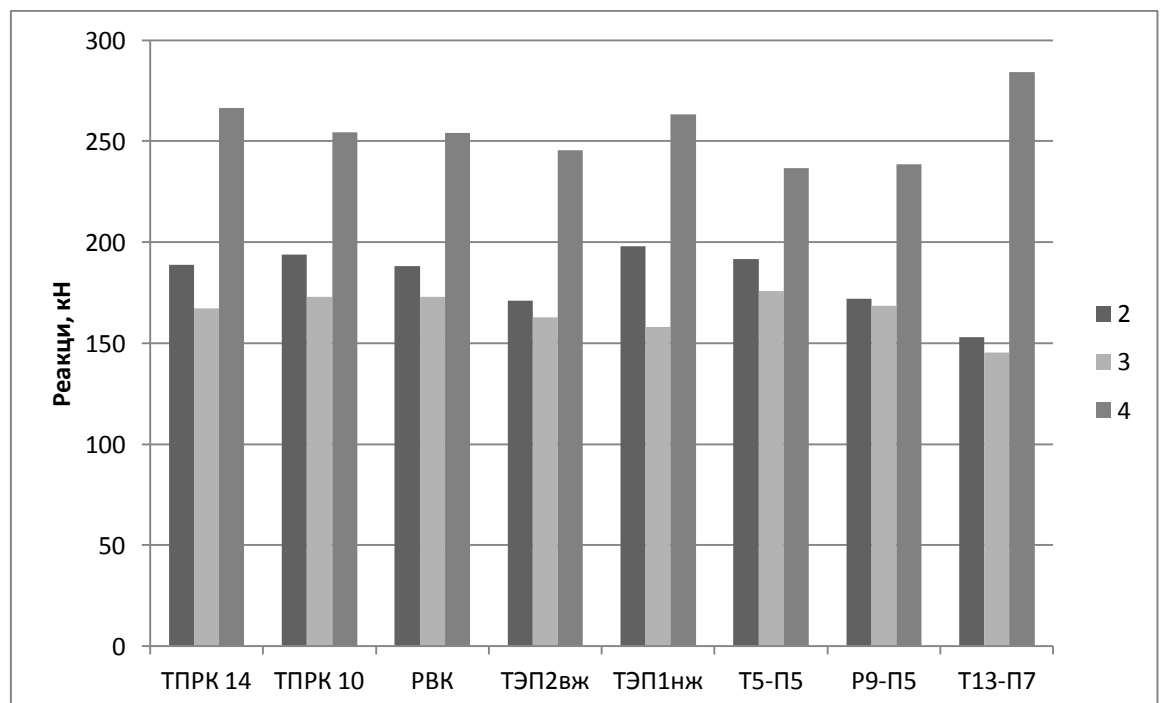


Рисунок 7.2 – Диаграмма распределения реакций связей в элементах 2, 3, 4 многомассовой системы «вагон-путь» в зависимости от типа установленной подрельсовой прокладки

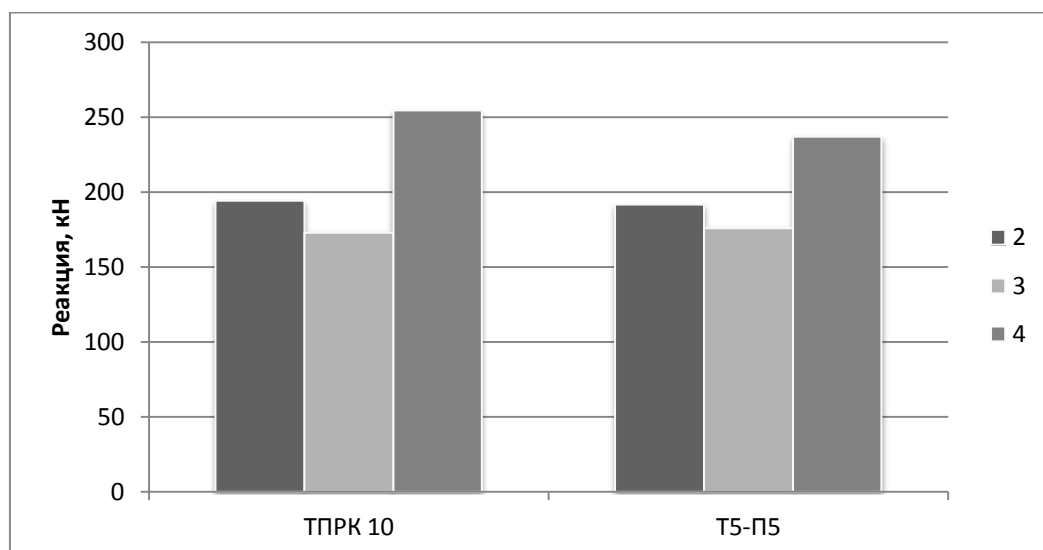


Рисунок 7.3 – Диаграмма распределения реакций связей в элементах 2, 3, 4 многомассовой системы «вагон-путь» для подрельсовых прокладок ТПРК толщиной 10 мм и сэндвича Т5-П5 толщиной 10 мм

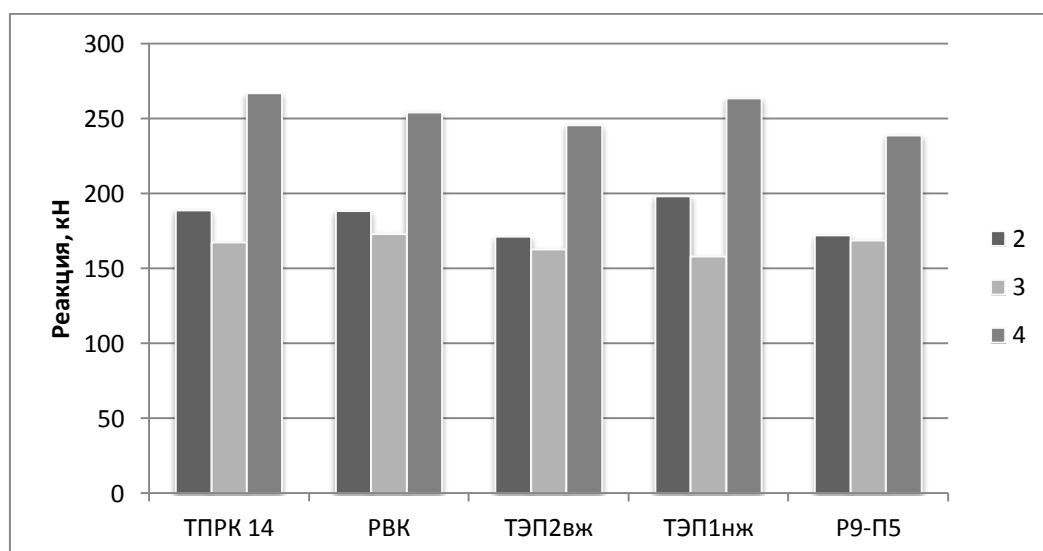


Рисунок 7.4 – Диаграмма распределения реакций связей в элементах многомассовой системы «вагон-путь» 2, 3, 4 многомассовой системы «вагон-путь» для подрельсовых прокладок ТПРК толщиной 14 мм, РВК толщиной 14 мм, ТЭП2вж толщиной 14 мм, ТЭП1нж толщиной 14 мм и сэндвича Р9-П5 толщиной 14 мм

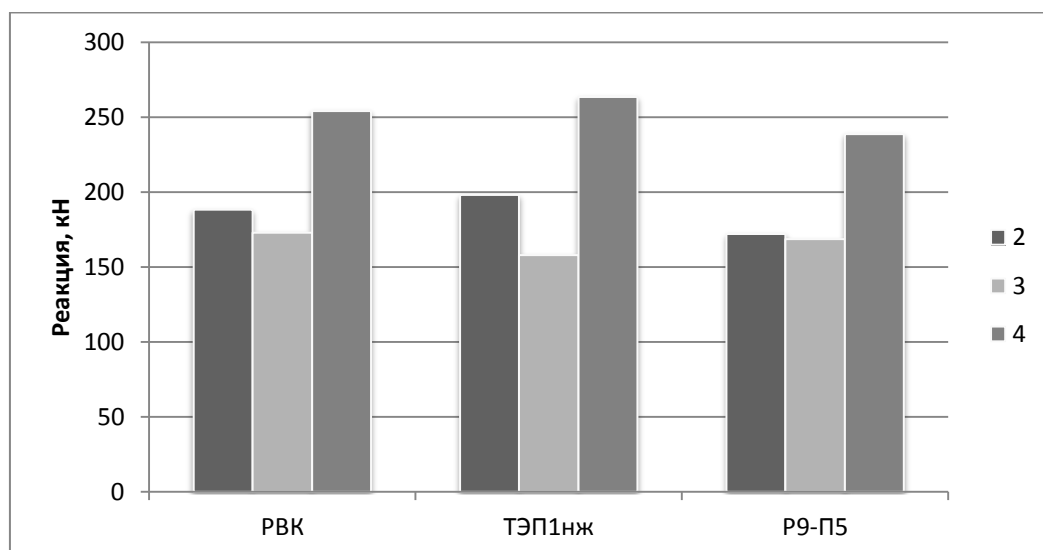


Рисунок 7.5 – Диаграмма распределения реакций связей в элементах многомассовой системы «вагон-путь» 2, 3, 4 многомассовой системы «вагон-путь» для подрельсовых прокладок РВК толщиной 14 мм, ТЭП1нж толщиной 14 мм и сэндвича Р9-П5 толщиной 14 мм

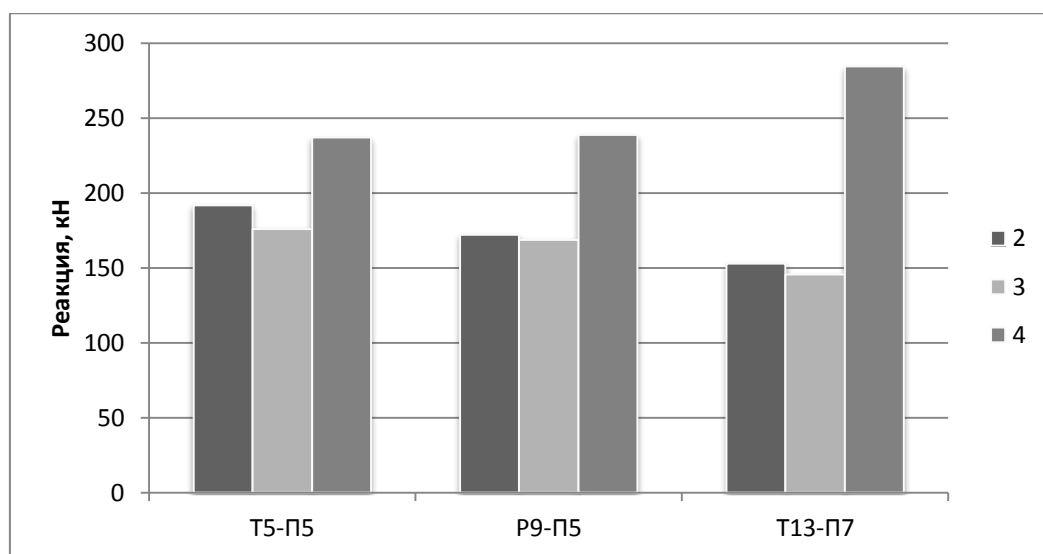


Рисунок 7.6 – Диаграмма распределения реакций связей в элементах многомассовой системы «вагон-путь» 2, 3, 4 многомассовой системы «вагон-путь» для подрельсовых прокладок-сэндвичей Т5-П5 толщиной 10 мм, Р9-П5 толщиной 14 мм, Т13-П7 толщиной 20 мм

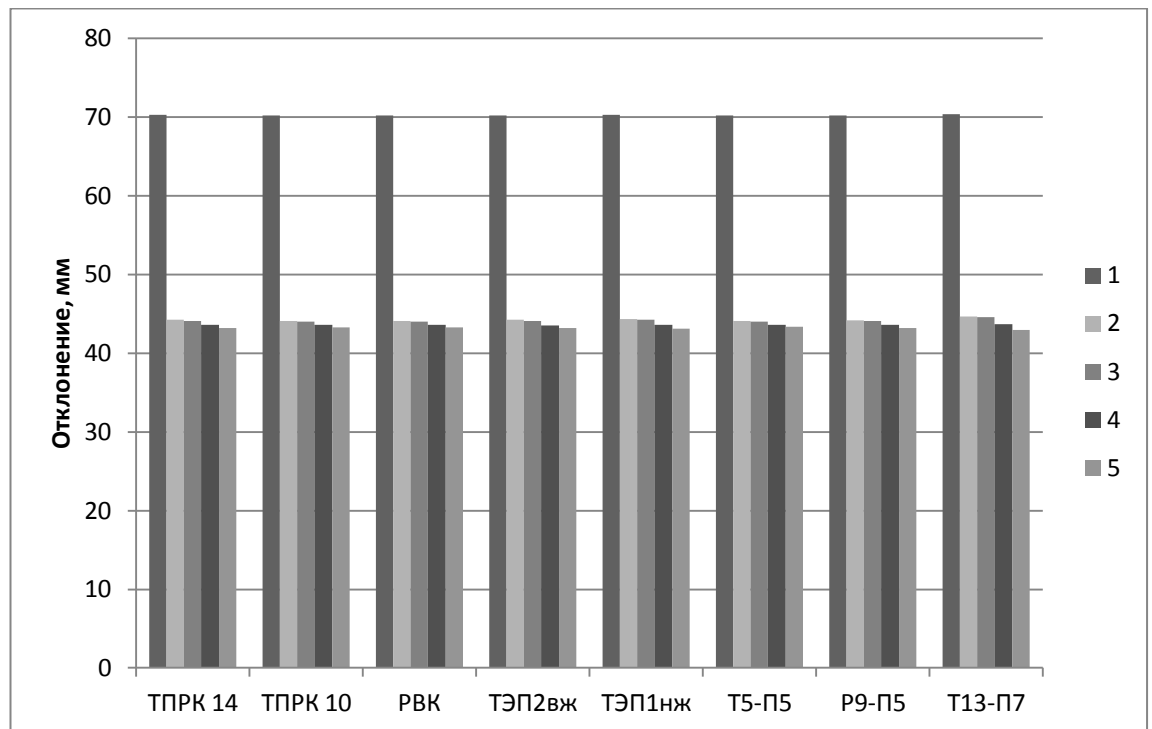


Рисунок 7.7 – Диаграмма распределения отклонений в элементах многомассовой системы «вагон-путь» в зависимости от типа установленной подрельсовой прокладки

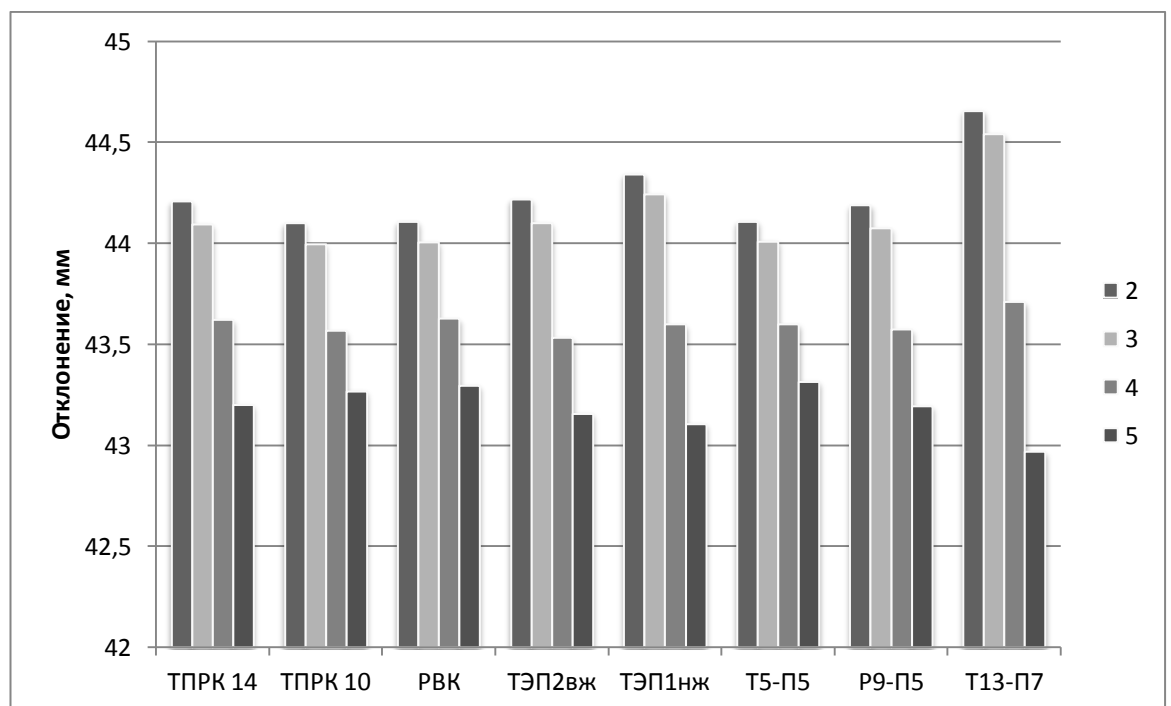


Рисунок 7.8 – Диаграмма распределения отклонений в элементах 2, 3, 4, 5 многомассовой системы «вагон-путь» в зависимости от типа установленной подрельсовой прокладки

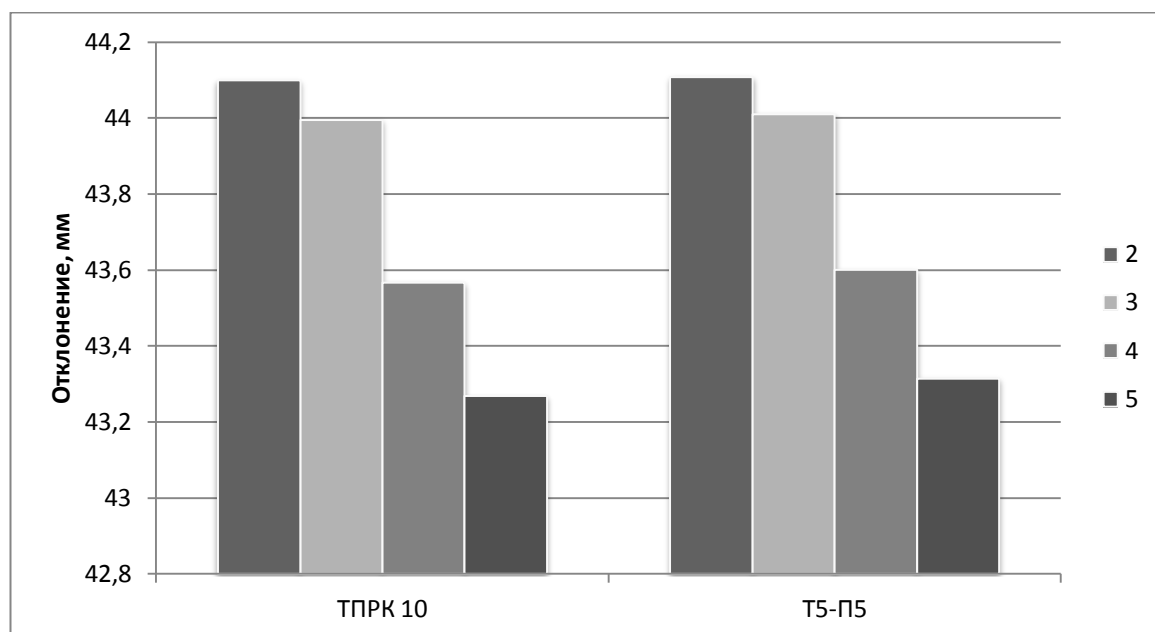


Рисунок 7.9 – Диаграмма распределения отклонений в элементах 2, 3, 4, 5 многомассовой системы «вагон-путь» для подрельсовых прокладок ТПРК толщиной 10 мм и сэндвича Т5-П5 толщиной 10 мм

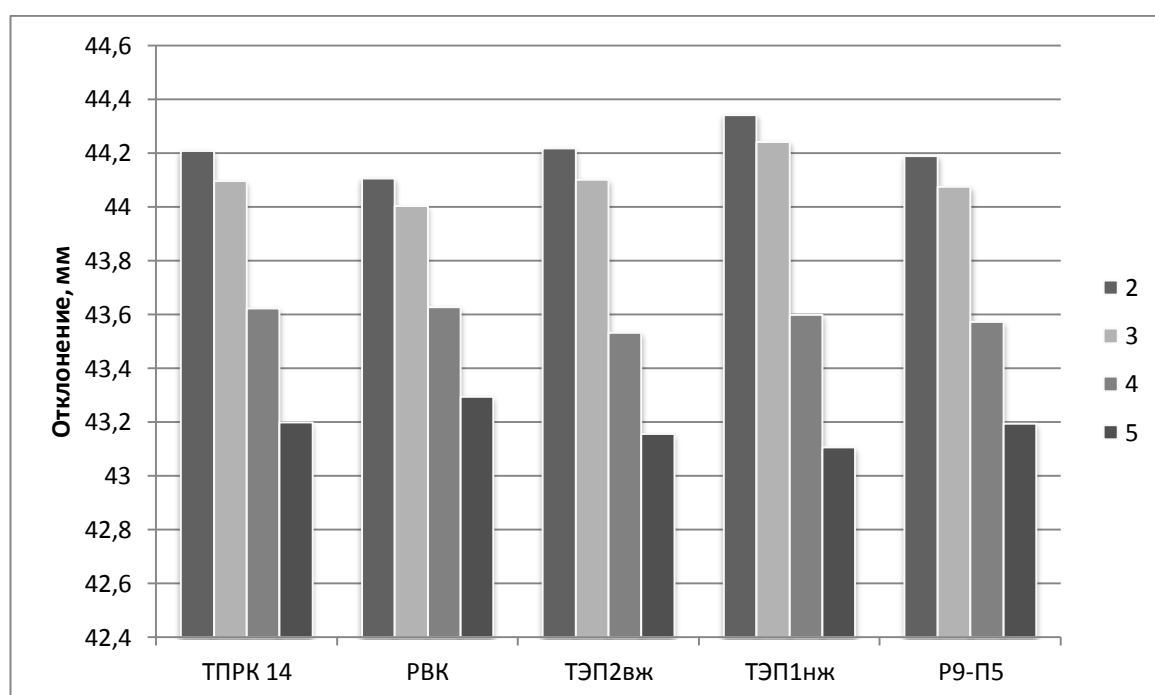


Рисунок 7.10 – Диаграмма распределения отклонений в элементах 2, 3, 4, 5 многомассовой системы «вагон-путь» для подрельсовых прокладок ТПРК толщиной 14 мм, РВК толщиной 14 мм, ТЭП2вж толщиной 14 мм, ТЭП1нж толщиной 14 мм и сэндвича Р9-П5 толщиной 14 мм

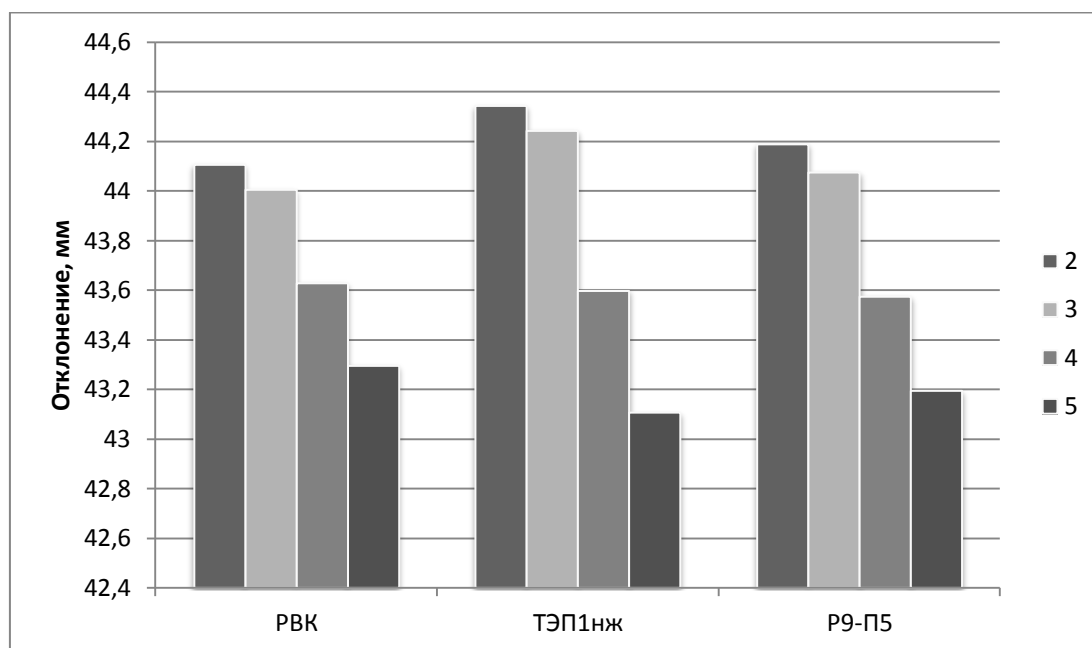


Рисунок 7.11 – Диаграмма распределения отклонений в элементах 2, 3, 4, 5 многомассовой системы «вагон-путь» для подрельсовых прокладок РВК толщиной 14 мм, ТЭП1нж толщиной 14 мм и сэндвича Р9-П5 толщиной 14

мм

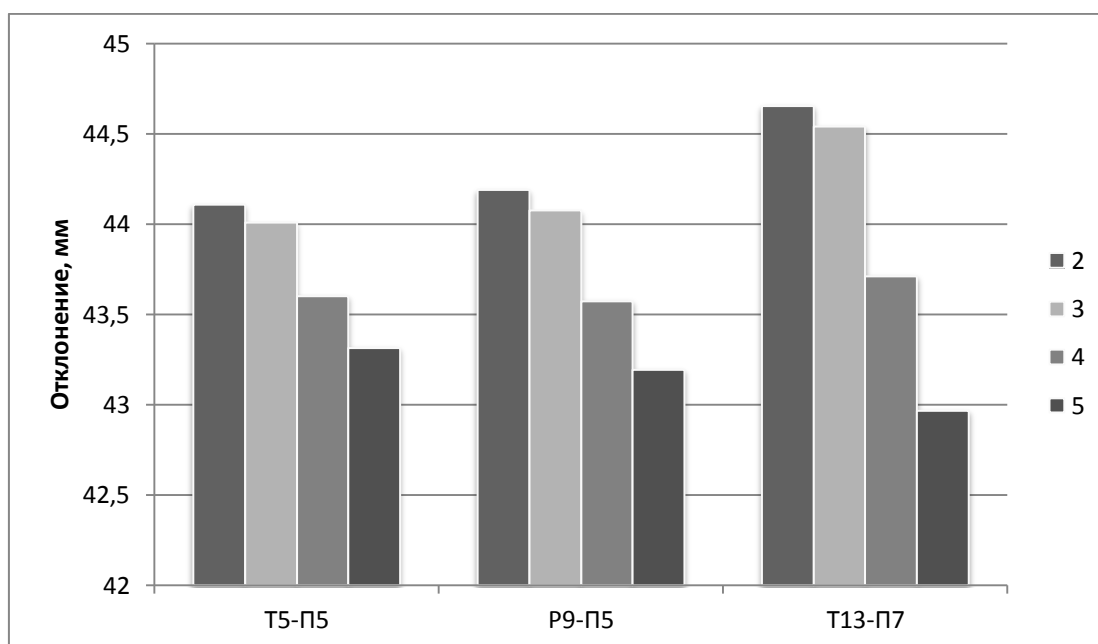


Рисунок 7.12 – Диаграмма распределения отклонений в элементах 2, 3, 4, 5 многомассовой системы «вагон-путь» для подрельсовых прокладок-сэндвичей Т5-П5 толщиной 10 мм, Р9-П5 толщиной 14 мм, Т13-П7 толщиной 20 мм

Анализ распределения реакций связей, эквивалентных по модулю реактивным силам, многомассовой системы «вагон –путь» при накатывании колеса на рельс показал, что изменение упруго-гистрезисных параметров прокладок рельсовых скреплений в зависимости от типа применяемого материала, оказывает незначительное влияние на обрессоренную часть вагона и подрельсовое основание (элементы 1, 5, рисунок 7.1). Поэтому дальнейший анализ проводили по трем элементам системы – 2, 3, 4 (рельс, обод колеса, боковая рама).

Наибольшая реактивная сила на рельсе (элемент 4 - рельс, рисунок 7.2) выявлена при установке сэндвича Т13-П7, имеющего максимальную толщину (20 мм), что связано с наименьшей жесткостью (97,37 кН/мм), увеличением прогиба, а, значит и работы сил внутреннего трения прокладки. Далее, по убыванию реактивных сил на рельсе, следуют системы с прокладками из материалов ТПРК толщиной 14 мм и ТЭП1нж толщиной 14 мм, жесткости которых находятся в пределах 125-150 кН/мм; ТПРК толщиной 10 мм, РВК толщиной 14 мм и ТЭП2вж толщиной 14 мм (169-203 кН/мм). В системах с сэндвичами Т5-П5 и Р9-П5 зафиксированы наименьшие значения реактивных сил в элементе 4 (рельс).

Следовательно, с увеличением жесткости реактивная сила на рельсе убывает.

Реактивные силы на ободе колеса и неподрессоренной массе вагона (элементы 2, 3 – боковая рама, обод колеса, рисунок 7.2) с увеличением жесткости наоборот возрастают, но со значительно меньшей интенсивностью.

Наилучший баланс реактивных сил во всех элементах отмечен в системе с прокладками-сэндвичами Р9-П5, что подтверждает целесообразность их применения.

Распределение реактивных сил при использовании прокладок одинаковой толщины 10 мм (рисунок 7.3) показал, что при практически идентичных силах в элементах 2, 3 (обод колеса и боковая рама), сила на

рельсе в случае сэндвича меньше. Следовательно, применение сэндвича в прокладках толщиной 10 мм наиболее предпочтительно.

Анализ действия возникающих реактивных сил при использовании прокладок толщиной 14 мм (ТПРК, РВК, ТЭП2вж, ТЭП1нж и сэндвича Р9-П5, рисунок 6.6) показал оптимальное распределение сил в сэндвиче Р9-П5: при практически равных и меньших, чем в других вариантах, реакциях в элементах 2, 3 (обод колеса и боковая рама), а реактивная сила на рельсе значительно меньше остальных.

Аналогичное распределение реактивных сил отмечено при использовании сэндвича Р9-П5 толщиной 14 мм в сравнении с применением прокладок толщиной 14 мм из его элементов: РВК и ТЭП1нж (рисунок 7.5).

Сравнительный анализ предложенных в предыдущей главе сэндвичей между собой показал сбалансированной распределение реактивных сил в элементах 2, 3 (обод колеса и боковая рама) и увеличение реакции на рельсе (элемент 4) с уменьшением жесткости сэндвича (рисунок 7.6).

Анализ распределения отклонений (перемещений от начального положения) элементов многомассовой системы «вагон-путь» показал, что изменение упруго-гистрезисных параметров прокладок рельсовых креплений в зависимости от типа применяемого материала, оказывает незначительное влияние на обрессоренную часть вагона (элемент 1, рисунок 6.9). Поэтому дальнейший анализ проводили по четырем элементам системы – 2, 3, 4, 5 (подрельсовое основание, рельс, обод колеса и боковая рама).

Отмечено, что с уменьшением жесткости прокладок увеличиваются отклонения в элементах 2, 3 (обод колеса и боковая рама), а в элементе 5 (подрельсовое основание) наоборот понижаются (рисунок 7.8). Отклонения в элементе 4 (рельс) изменяются незначительно.

Распределение отклонений в элементах системы при применении прокладок одинаковой толщины 10 мм: ТПРК10 и сэндвича Т5-П5 (рисунок 7.9) практически идентично. А при применении прокладок одинаковой толщины 14 мм (ТПРК, РВК, ТЭП2вж, ТЭП1нж и сэндвича Р9-П5, рисунок

7.10) наибольшие отклонения в элементах 2, 3 (обод колеса и боковая рама) отмечены при использовании прокладок из материала ТЭП1нж, а наименьшие – РВК. При этом отклонения в подрельсовом основании (элемент 5) распределяются в противоположной последовательности. Остальные варианты имеют практически идентичные средние отклонения.

Отклонения в системе с использованием сэндвича Р9-П5 толщиной 14 мм имеют усредненные значения между отклонениями систем с прокладками из его элементов той же толщиной 14 мм: РВК и ТЭП1нж (рисунок 7.11).

Сравнительный анализ предложенных в предыдущей главе сэндвичей между собой (рисунок 7.12) показал наибольшие отклонения в элементах 2, 3 (обод колеса и боковая рама) при применении наименее жесткого сэндвича Т13-П7 толщиной 20 мм, но при этом наименьшие отклонения в элементе 5 (подрельсовое основание). Следует заметить, что сэндвич Т13-П7 предложен для применения на линиях с пассажирским движением, а расчет производился для случая прохождения грузового состава. При пассажирском и высокоскоростном движениях осевые нагрузки значительно меньше, следовательно, пропорционально уменьшаются реактивные силы и отклонения. Отклонения в элементах при использовании остальных сэндвичей (Т5-П5 и Р9-П5) можно считать соизмеримыми.

7.2 Оптимизация динамических процессов общей многомассовой колебательной системы (вагон – путь) путем применения сэндвич-амортизаторов

Целью проведенных многовариантных расчетов многомассовой колебательной системы являлась оптимизация динамических процессов во всех элементах системы. Причем, в рамках данной работы исследовали влияние изменения упруго-гистерезисных характеристик полимерного амортизатора, установленного между рельсом и подрельсовым основанием, на поведение остальных элементов системы.

Анализ результатов расчета показал, что изменение жесткости между рельсом и подрельсовым основанием мало влияет на подрессоренную часть вагона (кузов).

С увеличением жесткости прокладок между колесом и рельсом реактивная сила на рельсе убывает, а на ободу колеса и неподрессоренной массе вагона - наоборот возрастает, что может быть важной причиной разрушения неподрессоренных частей вагона (колеса, оси, буксы, боковой рамы тележки).

С уменьшением жесткости прокладок увеличиваются отклонения в неподрессоренной массе вагона, а в подрельсовом основании наоборот снижаются, что ведет к уменьшению величин просадок балластного полотна пути.

С другой стороны, эксплуатационные наблюдения подтверждают тот факт, что уменьшение жесткости прокладок также влияет на стабильность геометрических параметров рельсовой колеи в поперечном направлении оси пути.

Следовательно, необходимо подобрать такую оптимальную жесткость подрельсовой прокладки, которая бы сбалансировала динамические процессы, происходящие в неподрессоренной массе вагона, рельсе и подрельсовом основании.

Анализ проведенных расчетов многомассовой колебательной системы показал, что оптимальное распределение реактивных сил и отклонений во всех элементах отмечен в системе с рекомендуемыми прокладками-сэндвичами по сравнению с прокладками из однотипных материалов той же толщины, что подтверждает целесообразность их применения.

Таким образом, для оптимизации динамических процессов многомассовой колебательной системы (вагон – путь) целесообразна установка полимерных амортизаторов между ее элементами, при проектировании которых необходимо применять методику выбора упруго-

гистерезисных свойств, изложенную в главе 6, и программу расчета распределения реактивных сил и отклонений.

Наилучшее распределение реактивных сил и отклонений в общей системе достигается путем установки сэндвич-амортизаторов.

Выводы по седьмому разделу

На основе изложенного выше, следуют выводы, приведенные ниже:

1. Разработанная программа расчета многомассовой колебательной системы (ходовые части подвижного состава – железнодорожный путь) позволяет с высокой степенью точности и минимальными затратами определить реактивные силы и отклонения в элементах системы в зависимости от упруго-гистерезисных свойств различных материалов и конструкций амортизаторов, устанавливаемых между рельсом и подрельсовым основанием.
2. Отмечено, что с увеличением жесткости устанавливаемых прокладок реактивная сила на рельсе убывает, а на ободу колеса и неподрессоренной массе вагона - наоборот возрастает, что может быть важной причиной преждевременного разрушения неподрессоренных частей вагона. Непогашенная кинетическая энергия будет передаваться в следующий цикл колебаний.
3. С уменьшением жесткости прокладок увеличиваются отклонения в неподрессоренной массе вагона, а в подрельсовом основании наоборот снижаются, что ведет к уменьшению величин просадок балластного полотна пути.
4. Оптимальное и сбалансированное распределение реактивных сил и отклонений в общей системе достигается применением прокладок-сэндвичей по сравнению с прокладками, состоящими из однотипного материала одного из компонентов. Следовательно, многомассовая колебательная система становится более уравновешенной, что приведет к

улучшению динамических процессов, плавности хода, снижению риска возникновения резонансных явлений, устойчивости подвижного состава против схода с рельсов.

5. Подтверждена практическая целесообразность применения полимерных сэндвич-амортизаторов между элементами многомассовой колебательной системы (вагон – путь).

Данные выводы могут быть достаточно универсальными применительно к различным типам и видам подвижного состава и инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научно-техническая проблема, связанная с разработкой эффективных амортизаторов ходовых частей грузового вагона путем направленного регулирования структуры и свойств демпфирующих полимерных материалов для удовлетворения комплексу эксплуатационных требований. Получены следующие результаты:

1. Разработана программа расчета многомассовой колебательной системы «вагон-путь», которая позволяет определить реактивные силы и отклонения в элементах системы в зависимости от упруго-гистерезисных свойств различных материалов и конструкций амортизаторов.

2. Разработана методика экспериментальных исследований, позволяющая с высокой степенью точности, как при положительных, так и при отрицательных температурах, определить упруго-гистерезисные свойства различных полимерных композиционных материалов и использовать их для сравнения между собой и в качестве исходных данных для проектирования амортизаторов.

3. Проанализированы упруго-гистерезисные свойства различных типов демпфирующих композиционных полимерных материалов: модифицированного резинового композита, резинокордного композита, представляющего класс гибридных материалов и двух вариантов модифицированных термоэластопластов, отличающиеся процентным содержанием компонентов (жесткой и мягкой фаз).

4. Доказано, что статические и динамические жесткости полимерных композиционных материалов при разных температурах испытания зависит от толщины с коэффициентом пропорциональности равным отношению толщин. Механические потери за цикл обратно пропорциональны изменению толщины материала.

5. Доказано, что относительные величины: коэффициенты жесткости, коэффициенты механических потерь, полезная упругость,

являются константами для конкретного полимерного композиционного материала и не зависят от его геометрии.

6. Доказано, что при проектировании амортизирующих элементов на основе полимерных композиционных материалов, достаточно определить упруго-гистерезисные свойства тестового образца при выбранной температуре, по которым можно рассчитать необходимые характеристики реального объекта.

7. Показано, что термоэластопласты ТЭП1нж и ТЭП2вж сохраняют эластичность до температуры -20°C , после которой начинается кристаллизация полимерной матрицы, а температура -40°C является для них температурой стеклования.

8. Показано, что морозостойкие резиновые композиты при температуре -40°C работают в области высокоэластической деформации, приближающейся к температуре стеклования вследствие замедления релаксационных процессов, особенно выраженных при динамическом нагружении.

9. Показано, что увеличение жесткости резиновых материалов за счет армирования измельченным полиамидным кордом для стабилизации геометрических параметров общей колебательной системы эффективно до температур начала кристаллизации каучука, а при дальнейшем понижении температур при проектировании следует ориентироваться на жесткость основной резиновой матрицы.

10. Доказано, что увеличение жесткости наполненного измельченным полиамидным кордом резинового композита при циклическом воздействии, по сравнению с ненаполненным, прямопропорционально процентному содержанию кордового наполнителя.

11. Показано, что образцы из термоэластопластов при температуре $+23^{\circ}\text{C}$ за один цикл рассеивают в 1,5 раза большую энергию, чем резиновые композиты, что может повлиять на ускоренное развитие остаточных

деформаций, а следовательно к рассогласованию параметров первоначально спроектированной колебательной системы.

12. Показано, что коэффициент полноты диаграммы и коэффициент гистерезиса при $+23^{\circ}\text{C}$ выше у демпферов на основе резинового композита с меньшей толщиной и резинокордного композита, а при -40°C относительные коэффициенты для резиновых и резинокордных композитов становятся соизмеримыми вследствие начала кристаллизации полимерной матрицы.

13. Разработана универсальная методика выбора упруго-гистерезисных характеристик материалов сэндвичей для проектирования амортизационных элементов подвижного состава, апробирование которой показало высокую сходимость полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований.

14. Отмечено, что с увеличением динамической жесткости подрельсовых прокладок реактивная сила на рельсе убывает, а на ободу колеса и неподрессоренной массе вагона - наоборот возрастает, что может быть важной причиной преждевременного износа неподрессоренных частей вагона.

15. Отмечено, что с уменьшением динамической жесткости подрельсовых прокладок увеличиваются отклонения в неподрессоренной массе вагона, а в подрельсовом основании наоборот снижаются, что ведет к уменьшению величин просядок балластного полотна пути.

16. Подтверждена целесообразность применения рекомендуемых продкладок-сэндвичей из оптимально-подобранных компонентов между элементами многомассовой колебательной системы (вагон – путь) для уравнивания многомассовой колебательной системы, улучшения динамических процессов, плавности хода, снижения риска возникновения резонансных явлений.

17. Представленные выводы достаточно универсальны и могут применяться к амортизирующим элементам различных типов подвижного состава и инфраструктуры.

18. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных с помощью разработанных программы и методик, могут быть использованы конструкторскими организациями при проектировании демпфирующих упругих полимерных элементов ходовых частей грузового вагона, выполнения количественной и качественной оценки эффективности работы амортизатора в реальных условиях эксплуатации, выборе их рациональных параметров.

Перспективы дальнейшей разработки могут быть связаны с изучением влияния низко- и высокочастотных воздействий, амплитуды нагрузок, термического старения на упруго-гистерезисные свойства демпфирующих полимерных материалов, проектированием дополнительных конструкций амортизаторов в особо нагруженных элементах подвижного состава с учетом особенностей их эксплуатации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей диссертации применяются следующие обозначения и сокращения:

АТМ Украины - Ассоциация технологов-машиностроителей Украины

ВНИКТИ - Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава»

ИМЕТ РАН – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

ПГУПС – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

РЖД - Открытое акционерное общество «Российские железные дороги»

СГУПС - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»

ФГУП «ЦКБ ТМ» - Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральное конструкторское бюро тяжелого машиностроения»

НК – натуральный каучук

СК – синтетический каучук

ТЭП – термоэластопласт

ТПЭ, ТРЕ - термопластичный эластомер

ДТЭП - динамический термоэластопласт

СКД - бутадиеновый каучук

ТПРК (Т) - полимерный композит на основе резиновой смеси

РВК (Р) - резиноволокнистый композит

ТЭП1нж (П) - композиционный термоэластопласт с меньшей жесткостью

ТЭП2вж - композиционный термоэластопласт с повышенной жесткостью

Элементы многомассовой колебательной системы «вагон-путь»:

1 - приведенная подрессоренная масса вагона (кузова)

2 – неподрессоренная масса вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колесной пары)

3 – обод колеса вагона

4 – приведенная масса рельса

5 - подрельсовое основание (1/2 часть шпалы)

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

В настоящей диссертации применены следующие термины с соответствующими определениями:

армирующий наполнитель: Материал, соединенный с термопластичным или термореактивным полимером или эластомером до начала процесса стеклования или кристаллизации или отверждения или вулканизации для улучшения физико-механических характеристик полимерного композита.

атмосфера кондиционирования: Атмосфера, в которой образец или контрольная проба хранятся перед испытанием.

блок-полимер: Полимер, молекулы которого состоят из блоков, связанных линейно.

вязкоупругость: Проявление материалом одновременно упругих (подчиняющихся закону Гука) и вязких (подчиняющихся уравнению Ньютона) свойств, характеризующееся зависимостью деформации от времени, температуры, нагрузки и скорости внешнего воздействия.

деформация: Изменение линейных размеров или формы объекта под действием механического напряжения.

жѐсткость: Способность конструктивных элементов сопротивляться деформации при внешнем воздействии.

каучук: Эластомер, который может быть или уже преобразован в состояние, при котором он, в основном, является нерастворимым (но может набухать) в кипящем растворителе, таком как метилэтилкетон и азеотропная смесь этанола и толуола.

колебательная система: Система, способная совершать свободные колебания.

композит (композитный материал, композиционный материал): Сплошной продукт, состоящий из двух или более материалов, отличных друг от друга по форме и/или фазовому состоянию и/или химическому составу

и/или свойствам, скрепленных, как правило, физической связью и имеющих границу раздела между обязательным материалом (матрицей) и ее наполнителями, включая армирующие наполнители.

корд: Жесткие и прочные волокна из стекла, ткани, металла и пр., применяющиеся для армирования материалов.

матрица полимерного композита (матрица): Твердая структура, состоящая из термореактивного или термопластичного полимера или эластомера, которая обеспечивает цельность полимерного композита, отвечает за передачу и распределение напряжений в армирующем наполнителе и определяет теплостойкость, влагостойкость, огнестойкость и химическую стойкость полимерного композита.

наполнитель: Относительно инертный материал, соединенный с термореактивным или термопластичным полимером до начала процесса отверждения или стеклования или кристаллизации, для изменения или придания требуемых свойств полимеру и/или матрице полимерного композита или для снижения стоимости конечной продукции.

образец для испытаний (образец): Часть пробы, непосредственно подвергаемая эксперименту при испытаниях.

остаточная деформация: Деформация, остающаяся после полного устранения нагрузки.

пластификация: Повышение пластичности и/или эластичности полимерного материала путем введения пластификатора или модификации химической структуры.

повторяемость (сходимость): Степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных одним и тем же методом на идентичных объектах в одинаковых условиях (один и тот же оператор, одно и то же оборудование, одна и та же лаборатория) в пределах небольшого промежутка времени.

полимер: Вещество, состоящее из молекул, характеризующихся многократным повторением одного или нескольких атомов или групп атомов

(составных звеньев), соединенных между собой в количестве, достаточном для проявления комплекса свойств, который остается практически неизменным при добавлении или удалении одного или нескольких составных звеньев.

релаксация напряжения: Постепенное снижение механического напряжения в деформированном образце во времени.

связывающее вещество в композиционных материалах (связующий агент в композиционных материалах): Вещество, добавляемое в связующее для улучшения адгезии между матрицей и наполнителем.

сополимер: Полимер, полученный из двух или более видов мономера.

температура кристаллизации полимера - температура, при которой происходит возникновение дальнего порядка во взаимном расположении сегментов макромолекул.

термопластичный эластомер: Полимерный материал, сочетающий свойства эластомеров при температуре эксплуатации со способностью при повышенных температурах обратимо переходить в пластическое или вязкотекучее состояние и перерабатываться в изделия из расплава по технологиям и на оборудовании для изготовления термопластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шадур, Л.А. Вагоны [Текст] / Под ред. Л.А. Шадура.- М:Транспорт, 1980. - 440 с.
2. Шадур, Л.А. Вагоны. Конструкция, теория и расчет [Текст] / Под. ред. Л.А. Шадура // Транспорт, 1980. - 222 с.
3. Лукин, В.В. Вагоны: Общий курс [Текст] / В.В. Лукин, С.А. Петр, П.Ф. Юрий; под ред. В.В. Лукина.- Маршрут, 2004. – 424 с.
4. Двухглазов, В.А. Исследование ходовых качеств полувагонов на двухосных тележках с различными типами рессорного подвешивания: дис. ... канд. тех. наук: 05.17.06 / Двухглазов Вячеслав Александрович. - Ленинград, 1975. - 205 с.
5. Двухглазов, В.А. Совершенствование демпфирующих устройств систем рессорного подвешивания скоростных грузовых вагонов [Текст]/ В.А. Двухглазов, Г.В. Левков, Е.А. Корнильев // Механика наземного транспорта. – Киев: Наукова думка, 1977.- С.68-70.
6. Быков, Б.В. Конструкция механической части вагонов [Текст] / Быков Б.В., Куликов В.Ф. - УМЦ ЖДТ, 2016. - 247 с.
7. Даффос Дж. Совершенствование тележек Y25// Железные дороги мира. – 1987.- № 8. – С.33-38.
8. Порядин, С.И. Новое поколение грузовых вагонов России [Текст]: научное издание / С. И. Порядин, Ю. П. Бороненко, В. Н. Цюренко ; Петербургский государственный университет путей сообщения, Петербург. гос. ун-т путей сообщ. // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. - СПб : Изд-во ПГУПС, 2003. - С. 3-14.
9. Бороненко, Ю.П. Каким быть тележкам для вагонов нового поколения? [Текст] : научное издание / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова // Вагоны и вагон. х-во. - 2005. - N 1. - С. 40-41.

10. Boronenko Yu., Orlova A., Rudakova E. Influence of construction schemes and parameters of three-piece freight bogies on wagon stability, ride and curving qualities // *Vehicle System Dynamics*, Vol.44, 2006. - P. 402-414.

11. Бороненко, Ю.П. Разработка тележек грузовых вагонов с осевой нагрузкой 30 т [Текст] : научное издание / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова // *Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: 4 Международная научно-техническая конференция*, СПб : ПГУПС, 2007. - С. 5-12.

12. Бороненко, Ю.П. Обобщение накопленного опыта проектирования тележек грузовых вагонов для создания их типоразмерного ряда [Текст] / Ю.П. Бороненко, А.М. Орлова // *Вюник ДНУЖТ імеш академіка В. Лазаряна*. - Вип. 5. - Д: ДНУЖТ, 2004. - с. 25-30

13. Бороненко Ю.П., Рудакова Е.А., Орлова А.М. Инновации в тележках грузовых вагонов: реальность и перспективы // *Наука и транспорт*. – Сб. – 2009. - С. 14-17.

14. Бороненко, Ю.П. Полиуретановые элементы буксового подвешивания тележек грузовых вагонов [Текст] : научное издание / Ю. П. Бороненко Орлова, А.М.; Васильев, С.Г.; Державец, Ю.А.; Аношин, Г.В.; Турков, А.И.; Петербург. гос. ун-т путей сообщ. // *Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты*. - СПб: Изд-во ПГУПС, - 2003. - С. 39-45.

15. Бороненко Ю.П., Орлова А.М., Рудакова Е.А., Васильев С.Г., Аношин Г.В. Экспериментально-теоретические исследования надежности полиуретановых упругих элементов в соединении «букса-рама» тележек грузовых вагонов [Текст] // *Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте. Труды VI межд. науч.-техн. конф.* - СПб: ПГУПС, 2004.- С. 71-77.

16. Филиппов В.Н. Петров А.Г., Зуйков П.И. Анализ конструктивных решений по созданию скоростных тележек для грузовых вагонов [Текст] // *Труды 13-й науч.-практ.конф. «Безопасность движения поездов»*. – М.:МИИТ, 2012.- С.VII -20 - VII -22.

17. Петров, А.Г.. Способ увеличения межремонтного пробега грузовых вагонов за счет модернизации тележек [Текст] // А.Г. Петров, М.В. Сапетов, С.И. Порядин / Мир транспорта. - 2015. - Том 13. - № 3. – С.46-57.

18. Петров Г.И. Пассивное и активное гашение вибраций для подвижного состава [Текст]/Г.И. Петров, С.И. Порядин, С.В. Калетин, О.И. Паначев, М.В. Сапетов, А.О. Иванов//МИИТ.-2013.-XIV научно-практическая конференция «Безопасности движения поездов». – С.-VII-35.

19. Паначев, О.И. Математическая модель трехслойного антифрикционного износостойкого поглотителя вибрации тележки грузового вагона [Текст] / О.И. Паначев // Экономика и менеджмент систем управления. -2017. - №2 (24) - С. 90-98.

20. Патент на полезную модель № 140958 Российская Федерация, МПК7 B61F 5/00, МПК7 B61F 5/26. Износостойкая сменная прокладка боковой рамы тележки вагона [Текст] / С.С. Барбарич, А.В. Воротилкин, Д.Г. Евсеев, А.О. Иванов, С.В. Калетин, В.В. Маловичко, О.И. Паначев, А.Г. Петров, Г.И. Петров, С.И. Порядин, М.В. Сапетов; заявитель / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет путей сообщения" МГУПС (МИИТ); патентообладатель - № 2013125263/11; заявл. 31.05.13.; опубл. 20.05.14. Бюл. № 14 - 2 с.: ил.

21. Вершинский, С.В. Динамика вагона [Текст] / Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. – М.: Транспорт, 1991. – 359 с.

22. Медель, В.Б. Исследование движения железнодорожных экипажей в кривых [Текст] / В.Б. Медель. – Томск, 1955.- Вып.20. – С. 207.

23. Appel P. Теоретическая механика, т. I. [Текст] / П.Аппель. - Физматгиз», 1960. - 515 с.

24. Appel P. Теоретическая механика, т. II. [Текст] / П.Аппель. - Физматгиз», 1960. - 487 с.

25. Хейман, Х. Направление железнодорожных экипажей рельсовой колеи [Текст] / Х. Хейман. – Трансжелдориздат, 1957. - 416 с.

26. Kalker J.J. Survey of Wheel — Rail Rolling contact theory // Vehicle System Dynamics. – 1979. - P. 317 -358.
27. Craig R.R., Bampton M.C. Coupling of substructures for dynamics analyses // AIAA Joutnal. – 1968. - №6. - P. 1313 – 1319.
28. Шахунянц, Г.М. Расчеты верхнего строения пути [Текст] / Г.М. Шахунянц. - М.: Трансжелдориздат, 1959. – 320 с.
29. Жуковский, Н.Е. Полное собрание сочинений [Текст] / Н.Е. Жуковский. – НКТП, 1937. - т. VIII. – С. 291.
30. Жуковский, Н.Е. Работа (усилие) русского сквозного и американского несквозного тягового привода при трогании поезда с места и в начале его движения [Текст] / Н.Е. Жуковский // Бюллетень Экспериментального института путей сообщения. - 1919. - №13. - С. 31-57.
31. Крылов, А.Н. Движение постоянной силы по массивной балке [Текст] / А.Н. Крылов //Математический сборник. – 1905. – №61. – С. 5-15.
32. Тимошенко, С.П. К вопросу о вибрациях рельсов. О динамических напряжениях в рельсах [Текст] / С.П. Тимошенко // Вестник инженеров.– 1915, – т. 1, N 4. – С. 143-152.
33. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле [Текст] / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер. Пер. с англ. под ред. Э.И. Григолюка. – Машиностроение, 1985. - 472 с.
34. Тимошенко, С.П. Прочность и колебания элементов конструкций [Текст] / С.П. Тимошенко. – Наука, 1975. - 704 с.
35. Schallenkamp. «Schurnaugen vor Frägern bai bewegten Lasten» //Ingenieur – Archiv. – 1937. – Bd. VIII, H. 3. – L. 182-198.
36. Dörr I. «Das Schurngungsverhalten eines federnd gebetteten unendlich langen Balkens» //Ingenieur – Archiv. – 1948. –XVI Band, fünftes und sechstes Heft.
37. Carter, F.W. ON THE ACTION OF LOCOMOTIVE DRIVING WHEEL [Текст] /F.W. Carter //Proc. Roy. Soc. -Ser. A. - 1926. - V. 112. - S. 151-157.

38. Марье, Г. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / Г. Марье, Перевод под редакцией Н.А. Бредихина, Н.Т. Минюшина, Ф.В. Пугачевского. – Госжелдориздат, 1933. – 338 с.

39. Коган, А.Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь [Текст] / А.Я. Коган. М.: Труды ЦНИИ МПС, 1969. – Вып.402. – С. 206.

40. Годыцкий-Цвирко, А.М. О динамических расчетах верхнего строения пути [Текст] / А.М. Годыцкий-Цвирко. -Журнал МПС, 1905. – Кн.1, 2. – С. 38.

41. Годыцкий-Цвирко, А.М. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / А.М. Годыцкий-Цвирко. - М.: Гострансиздат, 1931. – 215 с.

42. Яковлева, Т.Г. Железнодорожный путь [Текст] / Т.Г. Яковлева, Н.М. Карпущенко, С.И. Клинов, Н.Н. Пуртя, М.П. Смирнов. - М.: Транспорт, 1999. – 405 с.

43. Яковлев, В.Ф. Исследование сил взаимодействия колеса и рельса с учетом нелинейных односторонних связей и переменных масс [Текст] / В.Ф. Яковлев. - Л.: Труды ЛИИЖТа, 1964. – Вып.233. – С. 122.

44. Яковлев, В.Ф. Исследование упруго-динамических характеристик пути и определение динамических вертикальных сил в крестовине [Текст] / В.Ф. Яковлев, И.И. Семенов. - Л.: Труды ЛИИЖТа, 1964. – Вып.222. – С. 35.

45. Яковлев, В.Ф. О параметрах расчетной схемы сил взаимодействия в контакте колеса и рельса [Текст] / В.Ф. Яковлев. - Л.: Труды ЛИИЖТа, 1964. – Вып.222. – С. 123.

46. Яковлев, В.Ф. Исследование упругих динамических характеристик пути [Текст] / В.Ф. Яковлев, И.И. Семенов. - Л.: Труды ЛИИЖТа, 1964. – Вып.222. – С. 134.

47. Яковлев, В.Ф. Определение расчетных параметров пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях с помощью вибромашины [Текст] / В.Ф. Яковлев, И.И. Семенов, В.И. Абросимов, В.И. Полетаев. - - Л.: Труды ЛИИЖТа, 1971. – Вып.323. – С. 66-85.

48. Данилов, В.И. Динамические характеристики рельсового основания [Текст] / В.И. Данилов, В.Ф. Яковлев, И.И. Семенов // Вестник ВНИИЖТ. – 1964. – № 27. – С. 16-18.
49. Вершинский, С.В. Динамика вагона [Текст] / С.В. Вершинский, А.Н.Данилов, И.И. Челноков. – Транспорт, 1978. - 352 с.
50. Лукин, В.В. Конструирование и расчет вагонов: учебник для вузов ж. -д. транспорта [Текст] / В.В. Лукин, Л.А. Шадур, А.А. Хохлов, П.С. Анисимов; под ред. В.В. Лукина. - УМК МПС России, 2000. - 731 с.
51. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. – Транспорт, 1986. - 559 с.
52. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес [Текст] / М.Ф. Вериго. - ПКТЬ ЦП МПС, 1997. - 207 с.
53. Вериго, М.Ф. К вопросу о процессах взаимодействия необрессоренных масс и пути [Текст] / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган// Вестник ВНИИЖТ. - 1969. - № 6. - С. 22-25.
54. Богданов, В.М. Проблемы износа колес и рельсов. Возможные способы борьбы [Текст] / В.М. Богданов, Ю.А. Евдокимов, В.Н. Кашников, Я.А. Майба // Железнодорожный транспорт. - 1996. - №12. - С. 30-31.
55. Богданов, В.М. Снижение интенсивности износа гребней колес и бокового износа рельсов [Текст] / В.М. Богданов // Железнодорожный транспорт. - 1992.-№12.-С. 30-34.
56. Грачева, Л.О. Взаимодействие вагонов и железнодорожного пути [Текст] / Грачева Л.О. - Тр. ВНИИЖТ, 1968. - Вып. 356. - С. 1-207.
57. Петров, Г.И. Влияние отступлений геометрии пути на динамику грузового вагона [Текст] / Г.И. Петров, Е.Г. Адильханов, Ш.А. Секерова, Н.К. Игембаев // МИИТ. - 2009. - X научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». - С. VII-3-VII-4.
58. Петров, Г.И. Особенности моделирования силовых связей при компьютерном моделировании движения и схода колесной пары вагона с

учетом качения, подкальзывания и скольжения обода и гребня колеса по боковой грани головки рельса [Текст] / Г.И. Петров, Д.В. Шпади, А.Г. Петров, С.В. Калетин, С.И. Порядин, О.И. Паначев // МИИТ. - 2015. - XVI научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». - С. II-101 -II-106.

59. Петров, Г.И. Оценка безопасности движения вагонов при отклонениях от норм содержания ходовых частей и пути [Текст] / Г.И. Петров, А.Н. Шамаков, В.М. Богданов, В.М. Меланин, Н.В. Телегин.- Глобус, 2003. - 257 с.

60. Яковлев, В.Ф. Влияние расчетных характеристик элементов пути и подвижного состава на уровень динамических сил в контакте колеса и рельса [Текст] / В.Ф. Яковлев. Л.: Труды ЛИИЖТа, 1964. – Вып.233. – С. 125.

61. Орлова, А.М., Артамонов Е.И. Влияние параметров, характеризующих состояние тележек грузовых вагонов, на боковой износ гребней колес [Текст] / А.М. Орлова, Е.И. Артамонов// Транспорт Урала. – 2008. - №3 (18). - с. 36-40.

62. Богданов, В.М. Применение эластомерных амортизаторов в подвешивании тележек грузовых вагонов [Текст] / В.П. Богданов, Г.И. Петров, В.Н. Филиппов, С.В. Дмитриев // МИИТ. - 2003. - Труды. - С. VII4-VII5.

63. Кокорев, А.И. Упругие характеристики связи кузова с тележками посредством резинометаллических блоков [Текст] / А.И. Кокорев // ВНИТИ. - 1972.-Вып. 37.-С. 126-139.

64. Соколов, М.М. Выбор жесткости упругих прокладок в тележках грузовых вагонов с буксовым подвешиванием [Текст] / М.М. Соколов, Д.Д. Беньковский, Г.В. Левков, под ред. И.И. Челнокова // Транспорт. - 1969. - Вып. 298. - С. 96-100.

65. Петров, Г.И. Математическая модель для исследования пространственных колебаний грузового вагона с двумя кососимметрично

расположенными грузами с упруго-диссипативными опорными элементами [Текст] / Г.И. Петров, П.С. Анисимов // ЦНИИТЭИ МПС. - 1992. - № 5715.

66. Петров, Г.И. Математическая модель и методика исследования пространственных колебаний многоосных грузовых вагонов с различными схемами ходовых частей и опорных устройств [Текст] / Г.И. Петров, В.Д. Хусидов, В.Н. Филиппов. – ЦНИИТЭИтяжмаш, 1988. - № 2. - 43 с.

67. Петров, Г.И. Моделирование силовых взаимодействий надрессорной балки при построении компьютерной модели тележки вагона [Текст] / Г.И. Петров, С.В. Калетин, О.И. Паначев, С.И. Порядин, М.В. Сапетов, А.О. Иванов // МИИТ. - 2013. - XIV научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». - С. VII-37.

68. Петров, Г.И. Численный эксперимент по оценке влияния фрикционных свойств контакта колесо-рельс на показатели износа и динамики порожнего полувагона [Текст] / Г.И. Петров, Д.В. Иванов, В.М. Кузович, М.В. Козлов, С.С. Андриянов, Н.К. Игембаев // МИИТ. - 2008. - IX научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». - С. XIV9- XIV11.

69. Ромен, Ю.С. Математическое моделирование влияния перекоса колесных пар на интенсивность износных процессов [Текст] / Ю.С. Ромен // Днепропетровск. - 1996. - IX Международная конференция «Проблемы механики железнодорожного транспорта». - С. 127-128.

70. Ушкалов, В.Ф. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств [Текст] / В.Ф. Ушкалов [и др.]. - Наук. Думка, 1989. - 240 с.

71. Хусидов, В.Д. Методика компьютерной оценки безопасности движения подвижного состава [Текст] / В.Д. Хусидов, Ю.С. Ромен Ю.С, Г.И. Петров [и др.]. – М.:МПС. - 1999. – 23 с.

72. Хусидов, В.Д. Решение задач динамики подвижного состава с применением ЭЦВМ [Текст] / В.Д. Хусидов // НИИИНФОРТЯЖМАШ. - 1967. - Вып. 5-67-13. - С. 6-8.

73. Хохлов, А.А. Построение единой математической модели колебаний многоосных вагонов [Текст] / А.А. Хохлов // ВНИИЖТ. - 1982. - № 3. - С. 46-48.

74. Хохлов, А.А. Решение экстремальных задач динамики вагонов [Текст] / А.А. Хохлов. – М.: МИИТ. - 1982. - 105 с.

75. Бурчак, Г.П. К расчету экипажей на вынужденные колебания в вертикальной плоскости [Текст] / Г.П. Бурчак, В.С. Плоткин // МИИТ. - 1970. - Вып. 311.-С. 41-51.

76. Коссов, В.С. Выбор параметров трехэлементной тележки грузового вагона методами компьютерного моделирования его динамики [Текст] / В.С.Коссов,Э.М. Сорочкин, Г.С. Михальченко, Д.Ю. Погорелов, В.А. Симонов // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна. - 2004. - Вып. 5. - С. 109-113.

77. Мюллер, П.К. Математические методы в динамике транспортных средств [Текст] / П.К. Мюллер Пер. с англ. под ред. Т.А. Тибилова // Транспорт. - 1988. - С. 39-58.

78. Тибилов, Т.А. О вероятностном анализе колебаний подвижного состава [Текст] / Т.А. Тибилов // Ростов-на-Дону. - 1965. - Вып. 51. - С. 16-31.

79. Орлова, А.М. Иерархически-итерационный метод выбора параметров силовых характеристик и конструктивных решений подвешивания тележек грузовых вагонов [Текст] / А.М. Орлова// Транспорт Урала. - 2008. - №2(17) - с. 35-42.

80. Boronenko Yu., Orlova A., Rudakova E. Influence of construction schemes and parameters of three-piece freight bogies on wagon stability, ride and curving qualities (Влияние конструктивных схем и параметров трехэлементных грузовых тележек на устойчивость, качества хода и вписывания вагона в кривые) // Vehicle System Dynamics. - Vol.44. - 2006. - p. 402-414.

81. Погорелов, Д.Ю. Универсальный механизм. Руководство пользователя [Текст] / Под ред. Д.Ю. Погорелова. – Брянск: БГТУ. - 1993. - 2008.
82. Михальченко, Г.С. Исследование пространственных колебаний рельсовых экипажей с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» [Текст] / Г.С. Михальченко, Д.Ю. Погорелов, В.А. Симонов, А.В. Круговых, В.В. Симонов // ДГТУ. - 1996. - Тез. докл. IX Между нар. конф. - С. 107-108.
83. Ашпиз, Е.С. Железнодорожный путь [Текст]: учебник / Ашпиз Е.С. - Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. - 544 с.
84. Золотарский, А.Ф. Железобетонные шпалы [Текст] / А.Ф. Золотарский [и др.]. - М.: Трансжелдориздат, 1959. – 234 с.
85. Кулагин, М.И. Неровности на поверхности катания рельсов и их влияние на динамическое давление колеса на рельс [Текст] /М.И. Кулагин. – М.: Труды ЦНИИ МПС, 1959. – Вып.177. – С. 125.
86. EN 13146-3:2002 Railway applications – Track – Test methods for fastening systems – Part 3: Determination of attenuation of impact loads.
87. Лысюк, В.С. Боковая жесткость пути с железобетонными шпалами [Текст]/ В.С. Лысюк, Н.Д. Кравченко // Путь и путевое хозяйство. – 1970. – №11. – С. 36-37.
88. Уразбеков А.К. Продольные силы и деформации рельсовых плетей бесстыкового пути в условиях обращения поездов повышенной массы и длины [Текст]/ А.К. Уразбеков// Новосибирск. –1991. – С. 86-91.
89. EN 13848-1:2004 Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 1: Characterization of track geometry.
90. Желнин Г.Г., Каменский В.Б., Лысюк В.С. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условию обеспечения его надежности [Текст]/ Г.Г. Желнин, В.Б. Каменский, В.С. Лысюк. - М.: ПТКБ ЦП. – №ЦПТ-52/14. – 38 с.

91. Плясов А.А. Что показывают наблюдения за рельсами [Текст] // Путь и путевое хозяйство. – 1967. – №8. – С. 12-20.
92. Курзина, Е.Г. Совершенствование изоляторов демпферов анкерного рельсового скрепления типа АРС [Текст]: научное издание / Е. Г. Курзина, Ю. Н. Аксенов, А. Ю. Богачев // Труды 9 Научно-практической конференции "Безопасность движения поездов". – Москва. - 2008. - М.: МИИТ. - 2008. - С. IV/29-IV/32.
93. Круглов, В.М. Эксплуатация модернизированного анкерного рельсового скрепления АРС-4 в кривых малого радиуса [Текст] / В.М. Круглов, Ю.Н. Аксенов, А.Ю. Богачев, Н.Д. Кравченко, С.А. Гришов, Е.Г. Курзина // МИИТ. - 2010. - XI научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». - С. III/16 –III/17.
94. Круглов, В.М. Модернизация рельсового скрепления типа АРС [Текст] / В.М. Круглов, Ю.Н. Аксенов, В.В. Кузнецов, Е.Г. Курзина // Транспорт Российской Федерации. Наука и транспорт. - Москва. - 2010. - № 3 (28). - С. 72-73.
95. Круглов, В.М. Модернизированное рельсовое скрепление АРС [Текст]: научное издание / В.М. Круглов, Ю.Н. Аксенов, А.Ю. Богачев, Е.Г. Курзина // Путь и путев. х-во. - 2011. - № 3. - С. 10-12.
96. Кузнецов, В.В. Применение скрепления АРС в Московском метрополитене [Текст] / В.В. Кузнецов, Ю.Н. Аксенов, А.Ю. Богачев, Е.Г. Курзина, С.А. Гришов, Б.В. Наумов // МИИТ. - 2012. - XIII научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». - С. III/20 – III/21.
97. Круглов, В.М. Скрепление АРС: надежно, безопасно, эффективно [Текст] / В.М. Круглов, Ю.Н. Аксенов, В.В. Кузнецов, А.Ю. Богачев, Е.Г. Курзина, С.А. Гришов // Евразия вести. – 2013. - № XII. - С. 8.
98. Круглов, В.М. Испытания скрепления АРС на Красноярской дороге [Текст]: научное издание / В.В. Кузнецов, В.М. Круглов, Ю.Н. Аксенов, Е.Г. Курзина, С.А. Гришов // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – №5. – С. 15-18.

99. Круглов, В.М. Десять лет эксплуатации скрепления APC на Северной дороге [Текст]: научное издание / В.В. Кузнецов, В.М. Круглов, Ю.Н. Аксенов, Е.Г. Курзина, С.А. Гришов // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – №9. – С. 8-10.

100. Круглов, В.М. Эксплуатация скрепления APC в Сибири и других регионах РФ [Текст] : научное издание / В.М. Круглов, Ю.Н. Аксенов, А.Ю. Богачев, В.В. Кузнецов, Е.Г. Курзина // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. - М. - 2015. - С. 148-150.

101. Карпущенко, Н.И. Разработка, испытания и внедрение новых конструкций промежуточных рельсовых скреплений [Текст] / Н.И. Карпущенко, Н.И. Антонов // Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе: Тез. науч.-практ. конф. – Новосибирск. - 2001.- С. 275-276.

102. Карпущенко, Н.И. Совершенствование рельсовых скреплений [Текст] / Н.И. Карпущенко, Н.И. Антонов. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2003. – 300 с.

103. Лебедев, А.В. Пандрол-350 - конструкция рельсового скрепления для современных магистралей [Текст] / А.В. Лебедев // Евразия Вести. – 2015. - № VII.

104. Фоссло Групп: надежное и перспективное партнерство [Текст] // Евразия Вести. – 2015. - № VII.

105. Золотарский, А.Ф. Железобетонные шпалы [Текст] / А.Ф. Золотарский [и др.]. - М.: Трансжелдориздат, 1959. – 255 с.

106. Золотарский, А.Ф. Железнодорожный путь и подвижной состав для высоких скоростей движения [Текст] / А.Ф. Золотарский [и др.]. – М.: Транспорт, 1964. – 250 с.

107. Волошко, Ю.Д. Исследование свободных колебаний колеса и рельса при переменной жесткости пути [Текст] / Ю.Д. Волошко. Днепропетровск: Труды ДИИТа, 1965. – Вып.57. – С. 254.

108. Орловский, А.Н. Обоснование выбора расчетной схемы для исследования взаимодействия колеса и пути в зоне неровностей [Текст] / А.Н. Орловский, В.Н. Клименко. – Днепропетровск: Труды ДИИТа, 1965. – Вып.57. – С. 321.

109. Евдокимов Б.А. О влиянии упругих прокладок на работу пути [Текст] / Б.А. Евдокимов // Вестник ЦНИИ МПС; 1967. – № 1. – С. 21-28.

110. Sato I. On high frequency vibration of track // Permanent Way. – 1962. – Vol. 5. – № 3. – P. 15-21.

111. Патент № 2288314 C1 RU, № заявки 2005115001. Подрельсовая прокладка [Текст] / А.В. Потлов [и др.]; заявитель / Общество с ограниченной ответственностью «Механизированная колонна № 20» (RU); заявл. 2005.05.18; опубл. 2006.11.27.

112. Патент № 112206 C1 RU. Подрельсовая прокладка [Текст] / О.А. Мичурин [и др.]; заявитель / Закрытое акционерное общество «Магистральпром» (RU); заявл. 2011.07.08; опубл. 2012.01.10.

113. Патент № 2280726 C1 RU. МПК: E01B009/68. Прокладка [Текст] / И.В. Бучко, Л.А. Кацберг; заявитель / Закрытое акционерное общество «ТРАНСРОУД ГРУП» (UA); заявл. 29.10.2004; опубл. 27.07.2006.

114. Патент № 17262 C1 Республика Беларусь, МПК7 E01B 9/00 (2006.01). Прокладка подрельсовая для рельсовых креплений [Текст] / С.С. Песецкий [и др.]; заявитель / Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого» Национальной Академии наук Беларуси (BY), Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (RU), Общество с ограниченной ответственностью «ТрансЭлКон»; патентообладатель - № 201111/09; заявл. 2011.08.15; опубл. 2013.04.30.

115. Леткова, А. А. Прокладки для креплений [Текст]: научное издание / А. А. Леткова // Путь и путей. х-во. - 2007. - № 5. - С. 15-18.

116. Stahl, Walter. Prüfung von elastischen Komponenten zur Schwingungsminderung beim Eisenbahnoberbau [Text] : научное издание / Walter Stahl // ETR: Eisenbahntechn. Rdsch. - 2011. - Vol. 60. - N 12. – S.33-39 . - ISSN 0013-2845.

117. Carrascal, I. A. Dynamic behaviour of railway fastening setting pads [Text] : научное издание / I. A. Carrascal [et al.] // Eng. Failure Anal. - 2007. - Vol. 14. - N 2. – P.364-373 . - ISSN 1350-6307.

118. ГОСТ 32698-2014 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля». – М.: Стандартинформ, 2015. – 10 с.

119. ГОСТ 34078-2017 «Прокладки рельсовых креплений железнодорожного пути. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2017. – 27 с.

120. DIN EN 13481-1-2012 Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 1: Definitions; German.

121. DIN EN 13481-2 Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 2: Fastening systems for concrete sleepers; German.

122. Ван Кревелен, Д.В. Свойства и химическое строение полимеров [Текст]: Пер. с англ. / Д.В. Ван Кревелен; под. ред. А .Я. Малкина.- М.: Химия, 1976. - 414с.

123. Кучерский, А.М. Упругие и релаксационные свойства резин при малых деформациях [Текст]: автореф. дис. док. ... техн. наук: 05.02.01/ А.М. Кучерский. - М., 1995.- 43с.

124. Петрова, Н.Н. Физико-химические аспекты создания масло- и морозостойких резин на основе смесей эластомеров [Текст] / Н.Н. Петрова, С.К. Курлянд // Полимерные композиты 98: сб. науч. тр. / ИММС НАНБ. Гомель. - 1998. - С. 247-252.

125. Адрианова, О.А. Перспективы повышения качества уплотнительных резин, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера.

[Текст] / О.А. Адрианова, М.Д. Соколова, С.Н. Попов. // Каучук и резина. - 1998. - №1. - С. 20-23.

126. Патент 2326902 Российская Федерация. Резиновая смесь для изготовления подрельсовых и нашпальных прокладок-амортизаторов рельсовых креплений [Текст] / С. П. Бычков [и др.]; Открытое акционерное общество «Ярославский шиноремонтный завод» (ОАО «ЯШРЗ») (RU). - Заявл. 16.08.2006; Оpubл. 20.08.2006.

127. Патент 2306323. Полимерная композиция тпк-5 с высокими эксплуатационными характеристиками [Текст] / И.К. Савостин; Открытое акционерное общество «АРТИ» (RU). - Заявл. 07.06.2006 ; Оpubл. 20.09.2007.

128. Патент 2378439 Российская Федерация, МКИ Е 01 В 9/68 (2006.01). Подрельсовая нашпальная прокладка-амортизатор [Текст] / Л. А. Кисилева [и др.]; ОАО РЖД. - № 2008125605/11 ; Заявл. 26.06.2008 ; Оpubл. 10.01.2010.

129. Пантелеева, Н.Л. Влияние коротких обрезиненных кордных волокон на свойства резин. [Текст] / Н.Л. Пантелеева, О.П. Панченко. // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. – 2015. - С. 85-89.

130. Петрова, Г.Н. Термопластичные эластомеры для замены резин. [Текст] / Г.Н. Петрова, Д.Н. Перфилова, В.И. Грязнов, Э.Я. Бейдер //Авиационные материалы и технологии. - 2012. - № 8. - С. 302–308.

131. Саундерс, Д. Химия полиуретанов. [Текст] / Саундерс Д., Фриш К. // Пер. с англ. - М.: Химия, 1968. - 470 с.

132. Липатов, Ю.С. Структура и свойства полиуретанов. [Текст] / Ю.С. Липатов, Ю.Ю. Керча Л.М. Сергеева. – Киев: Наук. Думка, 1970. - 279 с.

133. Керча, Ю.Ю. Физическая химия полиуретанов. [Текст] / Ю.Ю. Керча, - Киев: Наук. Думка, 1979. - 224 с.

134. Lidy, W.A. «The Polyurethane Flexible Slabstock Foaming Process. Chemistry and Physics Standards and Testing»; UTECH '96-Processing Workshop 3; Crain Communications: London, 1996.

135. Turner, R.B. Structure Vs. Properties of Flexible Urethane Foams Used in the Home Furnishing Industry (Polymer-Morphology). [Text] / Turner, R.B.; Wilkes, G.L. // Proceedings of the SPI/FSK Polyurethanes World Congress. - Technomic: Lancaster. - Pa. - 1987. - P. 935-940.

136. Abouzahr, A. Segmented Copolymers with Emphasis on Segmented Polyurethanes. [Text] / Abouzahr, A.; Wilkes, G.L. // In Processing Structure and Properties Of Block Copolymers. - Folkes. - M.J. - Ed. - Elsevier Applied Science Publishers. - London. - 1985. - P. 165-207.

137. Nierzwichi W. A study of toluene diisocyanate based polyurethanes of various isomer ratios. . [Text] / Nierzwichi W., Walczynski B. // J. Appl. Polym. Sci. - 1990. - №41. - P.907-915.

138. Патент 2441042 (RU). Термопластичная эластомерная композиция для прокладок под рельсы [Текст] / В. И. Кимельблат, Л. Е. Сирот; Общество с ограниченной ответственностью «КМС-9» (RU). - Заявл. 30.06.2010; Оpubл. 27.01.2012.

139. Kelt, P. Подшпальные подкладки в пути на балласте [Текст]: научное издание / P. Kelt, S. Marschnig // Ж. д. мира. - 2011. - N 8. - С. 74-77: 1 ил. . - ISSN 0321-1495.

140. Патент 2287038 (RU). Упругая прокладка [Текст] / Андреев А.В. (RU). - Заявл. 17.01.2005; Оpubл. 10.11.2006.

141. Патент 2250280 (RU). Прокладка-амортизатор упругая многослойная комбинированная [Текст] / М. Б. Блудов [и др.]; Открытое акционерное общество "Асбестовые и резиновые технические изделия" (ОАО «АРТИ») (RU). - Заявл. 06.11.2003; Оpubл. 20.04.2005.

142. Патент 7261244 Соединенные Штаты Америки, МКИ Е 01 В 3/00 (2006.01). Tie plate [Text] / Portec Rail Products, Inc., Urmson William T., Mospan John W., Downey John M. - № 11/269160; Заявл. 07.11.2005; Оpubл. 28.08.2007.

143. Kawai, Shoji. Заявка 1925734 ЕПВ, МКИ Е 01 В 9/68 (2006.01). Railway rail supporting pad [Text] / Shoji Kawai; Daiwa Gravure Co., Ltd. - № 07290198.6; Заявл. 15.02.2007; Оpubл. 28.05.2008
144. Кочнев, А.М. Модификация полимеров. Монография [Текст] / А.М. Кочнев, С.С. Галибеев. – Казань, 2008. – 533 с.
145. Галимова, Е.М. Механоактивация бутадиенового каучука марки СКД-L [Текст] / Е.М. Галимова, В.П. Дорожкин // Вестник Казанского технологического университета: межвуз.сб.науч.ст. – 2011.- № 17. - С. 272-273.
146. Яхьева, Х.Ш. Особенности релаксационных и термических свойств слоистых металлполимерных композитов [Текст] / Х.Ш. Яхьева, Г.М. Магомедов, Е.Н. Задорина // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки: межвуз.сб.науч.ст. – 2008. - № 1.- С. 7-10.
147. Желтухин, В.С. Моделирование плазменной модификации наноструктуры полиэтиленовых волокон. I. Физическая модель [Текст] / В.С. Желтухин, Е.А. Сергеева / Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. - 2010. - Т. 152. - № 4. - С. 34-38.
148. Proceedings of 13th International Symposium on Plasma Chemistry. Beijing: Peking University Press, 1997. - Vol. 3. - P. 1304.
149. Ксантос М. Типы и компоненты полимерных композитов [Электронный ресурс]: статья. 2011. URL: <http://plastinfo.ru/information/articles/365> (дата обращения: 23.01.2014).
150. Соловьев, Е.М. Получение волокнистых наполнителей резин и пути улучшения их свойств [Текст] / Е.М. Соловьев, Т.Н. Несиоловская, И.А. Кузнецова. Темат. обзор. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1986. - 60 с.
151. Несиоловская, Т.Н. Коротковолокнистые наполнители. Способы получения, свойства и области применения [Текст] / Т.Н. Несиоловская, Е.М. Соловьев. Темат. обзор. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1992. - 72 с.

152. Соловьев, Е.М. Ускоренный метод определения анизотропии резин с волокнистыми наполнителями [Текст] / Е.М. Соловьев, И.А. Кузнецова, Т.Н. Несиоловская //Пром-сть СК, шин и РТИ. - М. – ЦНИИТЗнефтехим. - 1987.- № 4. - С. 30-32.

153. Поляков, О.Г. Влияние содержания коротких волокон на прочность и изменение удельного объема резиноволокнистых композитов при растяжении [Текст] / О.Г. Поляков, А.И. Каменщиков, А.М. Чайкун и др. //Каучук и резина. - 1985. - № 3. - С. 24-25.

154. Dzyura, E.A. Tensile strength and ultimate elongation of Rubber-Fibrous Compositions //International Journ. of polimeric. materials. - 1980. - Vol.9. - P. 165-176.

155. Senapati A.K., Nando G. B., Pradhan B. Characterization of short nylon fibre reinforced natural rubber composites //Int. J. Polym. Mater. - 1988. - Vol. 12. - № 2. - P. 73-92.

156. Дзюра, Е. А. Пути варьирования жесткостных свойств резиноволокнистых композитов [Текст] / Е. А. Дзюра, Л. М. Волченков, И. В. Маркова и др. // Пром-сть СК, шин и РТИ. - М. – ЦНИИТЗнефтехим. - 1986. - № 5.- С. 13-16.

157. Bhagawan S. S., Tripathy D.K., De S. K. Stress relaxation in short jute fiber-reinforced nitrile rubber composites //J. Appl. Sci. 1987. - Vol. 33. - №5. - P. 1623-1639.

158. Dinamic fatigue of short fiber-rubber composites under compressive stress /Mashimo S., Nakayima M., Naquchi T. e. a. //Proc. Int. Rubber Conf., IRC 86. Geteborg, 1986.- Vol. 2. P. 544-545.

159. Relaxation moduli under bending deformation for short fiber-rubber composites /Mashimo S., Nakayima M., Noquchi T. e. a. //Int. Rubber Conf. Sydney, Chatswood, 1988. - P. 1-14.

160. Науменко А.П., Дзюра Е.А. Влияние дисперсного наполнителя на сопротивление ползучести резиноволокнистых композитов [Текст] //Каучук и резина. 1987. - № 3. - С. 39-40.

161. Ким, Л.М. Технология производства, свойства и применение капрона [Текст]: учебное пособие / Л. М. Ким, Н. Л. Пантелеева. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2003. - 63 с.

162. Коллеров, М.Ю. Исследование функциональных свойств композиционного материала никелид титана - силиконовая резина [Текст] / М.Ю. Коллеров, Е.А. Лукина, Д.Е. Гусев, А.А. Борисов // Материаловедение. -2018. - №8. - С.28-33.

163. Екименко, А.Н. Перспективы использования полимерных композитов, гибридно-армированных синтетическим и растительным волокном [Текст] / А.Н. Екименко // Материаловедение. – 2018. - №7. С.18-24.

164. Modification of the mechanical properties of rubbers by introducing recycled rubber into the original mixture / Cs. Varga, N. Miskolczi, L. Bartha [et al.] // Global NEST Journal. - 2010. - Vol. 12. - № 4. - P. 352-358.

165. Руководство к практическим работам по химии полимеров: учебное пособие [Текст] / Под ред. В. С. Иванова. - Изд-во Ленинградского ун-та, 1982. — 176 с.

166. Титорский, И.А. Химическая модификация эластомеров: учебник / И.А.Титорский, Е.Э. Потапов, А.Г. Шварц. - М.: Химия, 1993. - 304 с.

167. Чагаев, С.В. Модификация наполненных композиций на основе полиолефинов и полярных полимеров резорциновыми смолами: дисс. канд. техн. наук. - Казань, 2010. - 115 с.

168. Русанова, С.Н. Влияние кремнийорганических модификаторов на структурные характеристики и эксплуатационные свойства полимеров [Текст] / С.Н. Русанова, С.Ю. Софьина, О.В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. - 2008. - № 5. - С. 85-89.

169. Темникова, Н.Е. Исследование модификации сополимеров этилена аminosиланами методом ИК-спектроскопии НПВО / Н.Е. Темникова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. - 2011. - № 19. - С. 112-124.

170. Gatti L. Compounding techniques to reduce silane in green tire formulations/ L. Gatti // Tyre Technology International Annual Review 2001. - Vol. 1. -P. 39-45.

171. Шилов, И.Б. Новый промотор адгезии резины к металлокорду [Текст] / И.Б. Шилов, Г.А. Хлебов, Р.А. Веснин, С.В. Фомин, Е.Э. Потапов // Ж. Каучук и резина. - 2010. - №4. с. 44.

172. Гафаров, А.М. Химическая модификация полиолефинов смесями диизоцианатов и незамещенных лактамов: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.06/ Гафаров Азат Магдеевич. -Казань, 2005.-124 с.

173. Игуменова, Т.И. Исследование влияния смеси фуллеренов на реологические свойства бутадиенового каучука [Текст] / Т.И. Игуменова, Е.С. Акатов, Г.В. Попов // Материалы 2-ой Всероссийской научно-технической конференции «Каучук и резина -2010». – Москва: НИИЭМИ. - 2010. - С.80-81.

174. Игуменова, Т.И. Особенности свойств и рецептуростроения резин с применением фуллеренсодержащих наноматериалов [Текст] / Т.И. Игуменова, М.А. Гудков, Г.В. Попов // Материалы 2-ой Всероссийской научно-технической конференции «Каучук и резина-2010». – Москва: НИИЭМИ. - 2010. - С.314-315.

175. Игуменова, Т.И. Анализ взаимодействия фуллерен-наполнитель при динамическом нагружении резин [Текст] / Т.И. Игуменова, Е.С. Акатов, М.С. Гудков // Сборник докладов XXI симпозиума «Проблемы шин и резинокордных композитов», ООО НТЦ «НИИШП». – Москва. - 2010. - Т. 1. - С. 156-159.

176. Попов, Г.В. Управление качеством и формирование комплекса свойств полимерных композитов путем модификации углеродными наноматериалами [Текст] / Г.В. Попов, Т.И. Игуменова, М.А. Гудков // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий.- 2012. - №3 – С. 111-114.

177. Kwo Han Kiu. Study of adhesion properties of natural rubber, epoxidied natural rubber, and ethylene-propylene diene terpolymer-based adhesives: author's abstract. Universiti Sains Malaysia, 2007. - 44 p.

178. Перов Н.С. Релаксационные свойства бутадиен-стирольного термоэластопласта с наноалмазным наполнителем [Текст] / Н.С. Перов // Материаловедение. -2017. - №12. – С. 26-30.

179. Волкова, Е.Р. Композиционные материалы на основе полиуретана, модифицированного тонкодисперсным шунгитовым наполнителем [Текст] / Е.Р. Волкова // Материаловедение. -2014. - №9. – С. 38-43

180. Патент 2126422 (RU). Линейные блоксополимеры:. № 93038868/04; заявл. 05.02.1992; опубл. 20.02.1999. 8 с.

181. Fuhrmann I., Karger-Kocsis J. Photoinitiated grafting of glycidyl methacrylate and methacrylic acid on ground tire rubber.// J. Appl. Polym. Sci. - 2003. -V.89. - №6. -P. 1622-1630.

182. Urayama H., Ma Ch., Kimura Y. Mechanical and thermal properties of poly (L-lactide) incorporating various inorganic fillers with particle and whisker shapes. // Macromol. Mater. Eng. -2003. -V.288. -№7. -P.562-568.

183. Liang Y. Tensile and impact properties of hollow glass bead Filled PVC composites. // Macromol. Mater.Eng. -2002. -V.287. - №9. - P.588-591.

184. Галашина, Н.М. Полимеризационное наполнение как метод получения новых композиционных материалов [Текст]/ Н.М. Галашина // Высокомолекулярные соединения. - 1994. - Т.36. - №4. - С.640-650.

185. Прут, Э.В. Химическая модификация и смешение полимеров в экструдере реакторе [Текст] / Э.В. Прут, А.Н. Зеленецкий // Успехи химии. - 2001. - Т.70. -№1. - С.72-87.

186. Muratoglu O.K., Argon A.S., Coheh R.E. Toughening mechanism of rubber modified polyamides.// Polymer. - 1995. - V.36. - №5. - P.921-930.

187. Liao Z.L., Chang F.C. Mechanical properties of the rubber-toughened polymer blends of polycarbonate (PC) and poly(ethylene terephthalate) (PET).// J. Polym. Sci. - 1994. - V.52. - №8. - P.1115-1127.

188. Loyens W., Groeninckx G. Rubber toughened semicrystalline PET: influence of the matrix properties and test temperature.// Polymer. - 2003. - V. 44. - №1. -P. 123-136.

189. Серенко, О.А. Структурно-механические особенности деформационного поведения композиционных материалов на основе пластичных полимеров и эластичного наполнителя (резинопластов): дис. ... докт. хим. наук: 02.00.06/ Серенко Ольга Анатольевна. –М., 2004.- 249 с.

190. Вольфсон С.И. Динамически вулканизированные термоэластопласты: получение, переработка, свойства [Текст] / С.И.Вольфсон// М.: Наука, 2004. - 170с.

191. Яруллин Р.С. Обзор мирового и отечественного рынка термоэластопластов [Текст] / Р.С. Яруллин// The Chemical Journal. – 2003. - № . - С. 46-47.

192. Сагдеева, Э.Г. Получение динамического термоэластопласта на основе бутадиен-нитрильных каучуков и полиолефинов с использованием модифицированного технического углерода: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 /Сагдеева Эльвира Гильфановна. - КГТУ им. С.М. Кирова, 2003. - 16с.

193. Нигматуллина. А.И. Динамический термоэластопласт на основе бутадиен-нитрильного каучука и полипропилена, модифицированный слоистым силикатом: дис. ... канд.техн.наук: 05.17.06 / Нигматуллина Алина Ильдусовна. – Казань, 2010.- 174с.

194. Соколова, М.Д. Морозостойкие композиты на основе бутадиен-нитрильного каучука, сверхвысокомолекулярного полиэтилена и природного цеолита [Текст] / М.Д. Соколова, М.Л. Давыдова, Н.В. Шадрин //Материаловедение. - 2010. - №5. - С.40-44.

195. Портнягина, В.В. Разработка уплотнительных резин на основе морозостойких каучуков и ультрадисперсных наполнителей для техники Севера: дис. ... канд.техн. наук: / Портнягина Виктория Витальевна. М., 2010.- 176 с.

196. Михайлин, Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы / Михайлин Ю.А. - Санкт-Петербург: Науч. основы и технологии (НОТ), 2009. - 658 с.
197. Абрамов С.А. Полиуретаны фирмы ООО «Эластокам» для применения в строительстве, производстве сэндвич-панелей в автомобильной и мебельной промышленности [Текст] /С. А. Абрамова // Пластические массы. -2007.-№9.-С. 3-7.
198. Пономарев М.В. Сэндвичевые конструкционные материалы / А. А. Артеменко, Г. П. Пономарева, О. М. Сладков, М.В. Пономарев // Энергосбережение в Саратовской области. - 2008. - №3. - С.16.
199. Рябов, Д.К. Концепция создания слоистых многофункциональных композиционных материалов для эксплуатации в арктических условиях [Текст] / Д.К. Рябов, В.В. Шестов, В.М. Бузник, В.В. Антипов// Материаловедение. – 2015. - №12. – С. 41-47
200. Саржанов Т.С. Прокладки для креплений [Электронный ресурс, режим доступа: http://www.rusnauka.com/15.PNR_2007/Tecnic/21788.doc.htm].
201. Данилов, В.Н. Постановка и метод решения задачи пространственных колебаний двухосной тележки [Текст] / В.Н.Данилов, В.Д. Хусидов, В.Н. Филиппов // Труды МИИТа. - вып. 368. – 1971. - С. 30-44.
202. Беспалько, С.В. Влияние жёсткости демпфирующего подрельсового элемента на параметры многомассовой колебательной системы «вагон–путь»/ С.В. Беспалько, Е.Г. Курзина, А.М. Курзина, И. Жайсан // Мир транспорта. – 2019. - № 5. – С. 78-82.
203. Дж. Ферри, Вязкоупругие свойства полимеров. Пер. с англ. М.: ИЛ, 1963. — 536с.
204. Knothe K. Динамические свойства резиновых рельсовых подкладок // Железные дороги мира. - 2005. - № 8. - С. 73-78. (перевод статьи K. Knothe. Glasers Annalen, 2002, № 11, S. 496 – 501).
205. ГОСТ 23326-78. Резина. Методы динамических испытаний. Общие требования.

206. Захаров, Н.Д. Лабораторный практикум по технологии резины [Текст] : Основные процессы резинового производства и методы их контроля : [Для хим.-технол. специальностей вузов / Н.Д. Захаров, С.В. Усачев, О.А. Захаркин [и др.]. - Москва: Химия, 1977. - 165 с.
207. ГОСТ 34078-2017 Прокладки рельсовых креплений железнодорожного пути. Технические условия.
208. Дербаремдикер А.Д. Амортизаторы транспортных машин. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1985. — 199 с.
209. Соколов, М.М. Гасители колебаний подвижного состава: Справочник / М.М. Соколов, В.И. Варава, Г.М. Левит - М.: Транспорт, 1985. - 216 с.
210. ГОСТ ISO 23529-2013 Резина. Общие методы приготовления и кондиционирования образцов для определения физических свойств. – М.: Стандартиформ, 2014. – 14 с.
211. ГОСТ 12423-2013 Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). – М.: Стандартиформ, 2014. – 14 с.
212. Курзина, Е.Г. Влияние температуры испытания и толщины демпфирующего слоя на показатели статической и динамической жесткости амортизаторов из полимерной композиции / Е.Г. Курзина, А.М. Курзина, Ю.Н. Аксенов, А.В. Семак, А.Ю. Богачев // VII Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов". Сборник материалов. - М: ИМЕТ РАН, 2017. – С. 11-12.
213. Курзина, Е.Г. Сравнительная оценка композиционных материалов для амортизирующих элементов инфраструктуры железнодорожного транспорта и подвижного состава / Е.Г. Курзина, А.Г. Колмаков, Ю.Н. Аксенов, А.М. Курзина, А.Ю. Богачев, А.В. Семак // Деформация и разрушение материалов. - 2018. - № 12. - С. 39–44.
214. Курзина, Е.Г. Оптимизация свойств материалов для полимерных элементов рельсовых креплений с целью увеличения их эксплуатационной надежности / Е.Г. Курзина, Ю.Н. Аксенов, А.М. Курзина, А.Ю. Богачев, А.В.

Семак // Международные Научные чтения им. Чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов». Сборник материалов. - М: ИМЕТ РАН, 2018. – С. 80-82.

215. Курзина, Е.Г. Исследование упруго-гистерезисных свойств композиционных полимерных демпфирующих материалов для железнодорожного транспорта при низких температурах в условиях статического и динамического нагружения / Е.Г. Курзина, А.Г. Колмаков, Ю.Н. Аксенов, А.М. Курзина, А.Ю. Богачев, А.В. Семак // Деформация и разрушение материалов. - 2019. - № 3. - С. 43–48.

216. Kurzina, E.G. Management of elastic and hysteresis properties of the damping polymeric composite materials / E.G. Kurzina, A.G. Kolmakov, Yu.N. Aksenov, A.Yu. Bogachev, A.M. Kurzina, A.V. Semak // International conference «Materials science of the future: research, development, scientific training». Nizhny Novgorod, Russia, 2019. - С.51-52.

217. Kurzina, E.G. Comparison of the Composite Materials Intended for Damping Elements for the Infrastructure of Rail Transport and Rolling Stock / E.G. Kurzina, A.G. Kolmakov, Yu.N. Aksenov, A.M. Kurzina, A.Yu. Bogachev and A.V. Semak // Russian Metallurgy (Metally). - Vol. 2019. - No. 4. - pp.. 448-452.

218. Kurzina, E. G. Elastic Hysteretic Properties of Damping Composite Materials / E.G. Kurzina, A.G. Kolmakov, Yu.N. Aksenov, A.M. Kurzina, A.V. Semak // Russian Metallurgy (Metally). - Vol. 2019. - No. 10. - pp. 1090–1094.

219. Курзина, Е.Г. Влияние коэффициента трения металлополимерной системы рельс-подрельсовая прокладка на эксплуатационные свойства рельсовых креплений / Н.М. Курзина, А.Г. Колмаков, М.Л. Хейфец, С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 19-го Международного научно-технического семинара. – Киев: АТМ Украины, 2019. – С.83-85.

220. Болдырев, А.П. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава [Текст] / А.П. Болдырев, Б.Г. Кеглин. -М.: Машиностроение-1, 2004. -199 с.

221. Курзина, Е.Г. Экспериментальные исследования упругогистерезисных свойств сэндвич-амортизаторов / Е.Г. Курзина, А.Г. Колмаков, С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, М.Л. Хейфец, А.М. Курзина, А.В. Семак // IX Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов". Сборник материалов. - М: ИМЕТ РАН, 2019. – С. 414-418.

222. Курзина, Е.Г. Экспериментальные исследования упругогистерезисных свойств сэндвич-амортизаторов при статическом сжатии / Е.Г. Курзина, А.М. Курзина, А.В. Семак, А.Г. Колмаков, М.Л. Хейфец // Материалы 19-й Международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий». – Киев: АТМ Украины, 2019. – С. 83-86.

223. Патент на изобретение RU № 2695944 C1. Анкерное рельсовое крепление, подклепная подкладка и амортизирующая подрельсовая прокладка анкерного рельсового крепления (варианты) / Аксенов Ю.Н., Богачев А.Ю., Курзина Е.Г., Левин Б.А., Гнездилов С.А., Лактюшин А.А. / патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "Холдинг АРС" (RU) / заявл. 15.10.18.; опубл. 29.07.19. – 2 с.

224. Филиппов, В.Н. Выбор параметров упругих элементов математической модели «вагон-путь» / В.Н. Филиппов, Курзина Е.Г., Курзина А.М., И.Ж. Жайсан // Мир транспорта, 2018. - том 16. - № 3. - С.62-71.

225. Аксенов, Ю.Н. Оптимизация параметров жесткости в системе «колесо-рельс» для пропуска поездов с большими осевыми нагрузками / Е.Г. Курзина, Ю.Н. Аксенов, А.Ю. Богачев, А.М. Курзина // М: МИИТ. - 2016. - XVII научно - практическая конференция “Безопасность движения поездов”. С. II4- II5.