

На правах рукописи



КУРЗИНА АНГЕЛИНА МИХАЙЛОВНА

**СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ГРЕБНЕЙ
КОЛЕСНЫХ ПАР ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2021

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Филиппов Виктор Николаевич

Официальные оппоненты: **Буйносов Александр Петрович,**
доктор технических наук, профессор, кафедра
«Электрическая тяга» федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Уральский
государственный университет путей
сообщения», профессор

Антипин Дмитрий Яковлевич,
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Брянский государственный
технический университет», доцент, директор
учебно-научного института транспорта

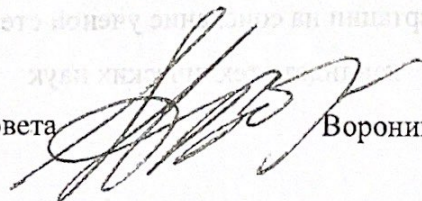
Ведущая организация: Акционерное общество Научная организация
«Тверской институт вагоностроения»

Защита состоится 16 сентября 2021 г., в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ) по адресу: 127994, г.Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

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

Автореферат разослан «__» июня 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Стратегия динамического развития железнодорожного транспорта, активно реализуемая в настоящее время, предусматривает увеличение интенсивности движения, повышение осевых и погонных нагрузок, а также скоростей движения грузовых поездов. Ужесточение условий эксплуатации приводит к увеличению интенсивности износа узлов и элементов вагонов, что значительно повышает расходы, связанные с заменой деталей или восстановлением изношенных поверхностей.

Особое влияние условия эксплуатации оказывают на фрикционно-механическую систему «колесо-рельс», работа которой всегда сопровождается трением рабочих поверхностей. В случае сверхнормативного износа, возникает угроза безопасности движения, увеличиваются сопротивление движению, энергозатраты на тягу, и, следовательно, растут эксплуатационные расходы. Для сохранения гарантированного уровня безопасности движения железнодорожники вынуждены преждевременно заменять рельсы, ремонтировать и менять колесные пары подвижного состава.

В настоящее время планы вагонного хозяйства по снижению количества случаев текущего отцепочного ремонта не реализованы, а основной причиной отцепок являются износ гребней и остроконечный накат. Согласно анализу ПКБ ЦВ за 10 месяцев 2020 года неисправности колесной пары составили 67,4%, при этом по причине тонкого гребня - 54,1%. Сумма обточек колесных пар по данным дефектам за год достигает 70 % от общего количества обточенных колесных пар, а в год перетачивается до 1 миллиона колесных пар.

Поэтому снижение эксплуатационных расходов, связанных с неисправностями колесных пар, при обязательном условии обеспечения высокой гарантии безопасности движения, является весьма актуальной задачей для вагонного хозяйства железных дорог России.

Степень разработанности темы исследования.

Теоретические методы расчета сил в кривых с учетом действия поперечных и продольных составляющих сил трения в опорных точках колес, сил сухого трения, возникающих при относительном перемещении кузова и опорных элементов тележки, моделирование различных расчетных схем динамического взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути, учитывающих упругость и случайные отступления пути в плане и по уровню, зависимость от сил тяги или торможения, процессы качения и проскальзывания колес в режимах выбега и торможения, геометрические параметры тележек, представлены в работах Г.М. Шахунянца, М.Ф. Вериго, С.В. Вершинского, А.Я.

Когана, В.Ф. Яковлева, В.Б. Медея, В.М. Богданова, Л.О. Грачевой, А.А. Камаева, В.Д. Хусидова, В.Н. Филиппова, Г.И. Петрова, С.В. Беспалько, Е.П. Королькова, А.Н. Савоськина, Ю.С. Ромена, В.С. Коссова, В.Ф. Ушкалова, Ю.М. Черкашина, А.В. Смольянинова, А.П. Буйносова, С.М. Захарова, В.Н. Данилова, Ю. П. Бороненко и др. Основным способом передачи нагрузки от кузова вагона на тележки в конструкциях грузовых вагонов является опирание кузова на плоскую поверхность подпятника, а при отклонениях кузова – на боковые скользуны, что не позволяет свободно вращаться колесным парам при прохождении кривых и неровностей пути, оказывает существенное влияние на величину горизонтальных поперечных сил и влияние колёсных пар, способствует интенсивному износу гребней.

Модернизации ходовых частей с целью снижения боковых рамных сил при прохождении вагоном кривых участков пути посвящены работы ведущих отечественных университетов: МИИТ, ПГУПС, УрГУПС, БГТУ, научно-исследовательских институтов: ВНИКТИ, ВНИИЖТ, НВЦ Вагоны, проектно-конструкторских бюро ОАО «РЖД», а также заводских лабораторий: ОАО «ВНИИТрасмаш», ОАО «Ижорские заводы», ООО «Вагонмаш», ОАО «Демиховский машиностроительный завод» и др. Однако в них не достаточно уделялось внимание обоснованному выбору соответствующих конструкционных материалов трибосопряжения опорных зон тележки на основе проведения всесторонних исследований ряда предполагаемых материалов. В связи, с чем необходимо провести более глубокие теоретические и экспериментальные исследования современных конструкционных материалов, и на основе сравнения их свойств, а также оценки антифрикционных характеристик трибосопряжений и динамических процессов, возникающих в многомассовой колебательной системе «вагон-путь», предложить наиболее рациональный вариант.

Цель и задачи работы. Разработка способов снижения интенсивности износа гребней колес грузовых вагонов путем уменьшения противокрутящего момента, препятствующего повороту тележки вокруг оси пятника, за счет применения в трибосопряжении современных композиционных материалов с высокими антифрикционными и износостойкими свойствами, способные сохранять свою работоспособность в течение межремонтного периода.

В соответствии с поставленной целью в диссертации решены следующие научные задачи:

– разработка методов экспериментальных исследований материалов и элементов трибосопряжения «пятник-подпятник»;

- выбор рациональных характеристик физико-механических свойств и геометрических параметров износостойкой композитной сэндвич-прокладки трибосопряжения «пятник-подпятник»;
- оценка влияния антифрикционных характеристик трибосопряжения «пятник-подпятник» с износостойкой композитной сэндвич-прокладкой на величину момента сил сопротивления повороту тележки грузового вагона при разных схемах опирания кузова, в груженом и порожнем режиме;
- оценка динамических процессов, возникающих в многомассовой колебательной системе «вагон-путь», выбор типа и конструкции амортизирующего полимерного элемента на основе комплексного анализа упруго-гистерезисных свойств и ресурсных характеристик современных демпфирующих композиционных материалов, проведение многовариантных расчетов математической модели многомассовой колебательной системы для определения рациональных параметров проектируемых амортизирующих элементов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработаны методы экспериментальных исследований материалов и элементов трибосопряжения «пятник-подпятник», получены характеристики, не указанных в литературных и справочных данных, выбраны рациональные физико-механические свойства и геометрические параметры износостойкой композитной сэндвич-прокладки трибосопряжения «пятник-подпятник»;
- разработаны способы снижения противокрутящего момента, препятствующий повороту тележки вокруг оси пятника, уменьшения динамических нагрузок на подпятник, демпфирования колебаний кузова вагона путем применения износостойкой антифрикционной композитной двухкомпонентной сэндвич-прокладки трибосопряжения «пятник-подпятник»;
- разработана математическая модель многомассовой системы «вагон-путь» с учетом установки в трибосопряжение «пятник-подпятник» износостойкой композитной сэндвич-прокладки и программа расчета, позволяющие оценить уровень снижения реактивных сил в элементах ходовых частей вагонов и демпфирования колебаний, выбрать рациональные упруго-гистерезисные и геометрические параметры демпфирующего элемента.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработаны новые методы экспериментальных исследований материалов и элементов трибосопряжения «пятник-подпятник», получены характеристики

физико-механических и упруго-гистерезисных свойств, не указанные в литературных и справочных данных;

- выбраны рациональные характеристики физико-механических и упруго-гистерезисных свойств, а также геометрических параметров износостойкой композитной сэндвич-прокладки трибосопряжения «пятник-подпятник»;

- разработаны программы расчета величины противокрутящего момента в зависимости от схем опирания кузова, загрузки вагона, антифрикционных характеристик трибосопряжения «пятник-подпятник», а также многомассовой системы «вагон-путь» с учетом установки в трибосопряжение «пятник-подпятник» износостойкой композитной сэндвич-прокладки для оценки величины снижения реактивных сил в элементах ходовых частей вагонов и демпфирования колебаний, выбора рациональных упруго-гистерезисных и геометрических параметров демпфирующего элемента сэндвич-прокладки;

- предложен способ трибосопряжения «пятник-подпятник» через износостойкую композитную сэндвич-прокладку, антифрикционные свойства которой позволяют значительно снизить противокрутящий момент, препятствующий повороту тележки вокруг оси пятника, а упруго-гистерезисные свойства демпфирующего элемента – снизить величину реактивных сил на элементах ходовых частей вагона, что позволит продлить срок службы антифрикционного элемента сэндвича, и, следовательно, уменьшить интенсивность износа гребней колесных пар грузового вагона в течение длительного времени;

- рекомендована установка износостойкой композитной сэндвич-прокладки в зону подпятника надрессорной балки проектируемой платформы для перевозки контейнеров.

Методология и методы исследований. Решение поставленных задач осуществлялось проведением экспериментальных исследований фрикционных, прочностных, упруго-гистерезисных свойств и ресурсных характеристик полимерных композиционных материалов для трибосопряжения «пятник-подпятник» на основе анализа существующих методов и разработки новых подходов, учитывающих условия эксплуатации изделия, а также теоретических исследований, базирующихся на классических уравнениях теоретической и аналитической механики (Даламбера-Лагранжа), аналитических и численных методов интегрирования дифференциальных уравнений (методе Эйлера - кусочно-линейной аппроксимации данных), математической статистики и теории вероятности, а также анализе результатов отечественных и зарубежных научно-исследовательских работ по данной тематике.

Положения, выносимые на защиту:

- методы экспериментальных исследований материалов и элементов трибосопряжения «пятник-подпятник», характеристики фрикционных, прочностных, упруго-гистерезисных, ресурсных свойств композиционных полимерных материалов;

- способ трибосопряжения «пятник-подпятник» через износостойкую композитную сэндвич-прокладку;

- методы расчета величины противокрутящего момента в зависимости от схем опирания кузова, загрузки вагона, антифрикционных характеристик трибосопряжения «пятник-подпятник», а также многомассовой системы «вагон-путь» с учетом установки в трибосопряжение «пятник-подпятник» износостойкой композитной сэндвич-прокладки;

- рациональные характеристики физико-механических и упруго-гистерезисных свойств, геометрических параметров износостойкой композитной сэндвич-прокладки трибосопряжения «пятник-подпятник» на основе экспериментальных данных и результатов расчета противокрутящего момента, реактивных сил и отклонений в элементах многомассовой колебательной системы «вагон-путь».

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

Личный вклад автора. Автор принимал участие в постановке задач, проведении экспериментов и анализе результатов. Экспериментальные данные получены, а модели и методики разработаны лично автором либо с его непосредственным участием. Автор принимал участие в написании статей и в докладах на конференциях.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждены и одобрены: на XVII, XVIII научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов» в 2016, 2017 годах, Москва, МГУПС (МИИТ); на заседаниях кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»

Института транспортной техники и систем управления, Москва, РУТ (МИИТ) в 2019 и 2020 годах; на VII, IX 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 2020 году; на International conference «Materials science of the future: research, development, scientific training», Nizhny Novgorod, Russia в 2019 году; на 20-й Международной научно-технической конференции «Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика», Киев, АТМ України в 2020 году, на 10-й Международной научной конференции «Topical issues of modern science and education», Lisbon, Portugal в 2021 году.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 170 страницах в том числе: 140 страниц основного текста, 95 рисунков, 12 таблиц. Список литературы содержит 211 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В **первом разделе** проведен анализ зарубежных и отечественных работ по исследованию взаимодействия пути и подвижного состава, конструктивных решений тележек грузовых вагонов, направленных на улучшение взаимодействия колеса и рельса, способов снижения износа гребней колесных пар путем применения лубрикации, конструктивных изменений колес и узлов опирания кузова на тележки, а также современных конструкционных материалов с повышенными фрикционными, износостойкими и демпфирующими свойствами.

Сужение колеи с 1524 на 1520 мм, увеличение нагрузки на ось, излишнее возвышение рельсов, внедрение рельсов тяжёлых типов и железобетонных шпал, изменение профиля рельсов и ряд других факторов усилило давление гребня на рельс и, соответственно, значительно повысило интенсивность изнашивания гребня и боковой поверхности рельса.

Решение данной проблемы отечественные и зарубежные ученые осуществляли за счет внесения дополнительных поперечных упругих связей в тележки (тяг, демпферов, шарниров), изменения традиционной схемы опирания кузова, совершенствования конструкции, профиля поверхности катания и

технологии изготовления колес, введения систем лубрикации, модернизации узлов сухого трения (подпятниковых зон, боковых скользунов).

Введение лубрикации первоначально позволило снизить износ и гребней колес и боковой поверхности головки рельсов. Однако эксплуатационный мониторинг грузонапряженных направлений выявил рост интенсивности износа вследствие одновременного применения лубрикации и «песочниц».

Улучшению вписывания восьмиосных грузовых вагонов в кривые участки пути способствовало создание МИИТом новых типов ходовых частей с опиранием на скользуны двухосных тележек, исключаящих момент трения на центральных пятниках соединительных балок. При этом регулировка величины момента трения возможна за счет установки между валиком и катком втулок из антифрикционных материалов, скользящей опоры с парой трения чугун по стали или опоры качения с плоским шариковым подшипником.

Уменьшению сопротивления повороту тележек способствовала модернизация боковых скользунов зазорного типа и постоянного контакта путем создания упругих, катковых и упруго-катковых конструкций, а также оснащенных износостойкими накладками.

Работа пятникового узла грузового вагона оказывает значительное влияние на ходовые характеристики вагона, особенно при движении в кривых. Сопряжение «пятник-подпятник» при вписывании вагона в кривую превращается во фрикцион, в нем возникает довольно значительный противокрутящий момент, препятствующий повороту тележки вокруг оси пятника, что ведет к увеличению боковых сил, действующих на колесо со стороны рельса.

Для снижения износа взаимодействующих поверхностей узла «пятник-подпятник» разработаны разделительные прокладки из марганцовистой стали со смазкой, а также со специальными антифрикционными покрытиями. Однако данные технические решения обеспечивают кратковременный эффект, так как максимальная толщина покрытия составляет не более 200 мкм, а закладываемая в трибосопряжение смазка быстро выдавливается и узел фактически работает в условиях сухого трения.

Техническое оснащение некоторых моделей американских тележек подпятниками с установленными по диаметру шариками или роликами, а также полиамидными прокладками оказалось не долговечным, в связи с тем, что в результате воздействия больших динамических нагрузок они быстро выходят из строя.

Таким образом, одним из перспективных способов снижения интенсивности износа гребней колесных пар грузовых вагонов является применение в местах опоры кузова износостойких элементов и покрытий из материалов с низким коэффициентом трения и высокой прочностью. Однако до настоящего времени не удалось получить технических решений, способных сохранить работоспособность в течение всего межремонтного периода вагона. С развитием современного материаловедения, появлением различных вариантов модифицированных композитных, гибридных конструкционных материалов, появились более широкие возможности подбора пар трения на основе комплексного изучения их физико-механических свойств.

Во **втором разделе** разработаны методики и проведены экспериментальные исследования фрикционных, износостойких, прочностных свойств современных полимерных композиционных материалов для установки в трибосопряжение «пятник-подпятник» в качестве разделительной прокладки, а также упруго-гистерезисных и усталостных свойств дополнительного демпфирующего элемента.

Разработанные, аттестованные и верифицированные в испытательном центре РУТ (МИИТ) методы экспериментальных исследований позволили:

- определить реальные коэффициенты трения скольжения при горизонтальном расположении соприкасаемых поверхностей (рисунок 1а) для пар трения: металл-металл; металл-полиамид; металл-эластомер и полиамид-эластомер, не указанные в справочных данных;

- воспроизвести реальные процессы, происходящие в трибосопряжении «пятник-подпятник» и определить истираемость материала при вращательном движении образца и контртела под действием вертикально приложенной нагрузки (рисунок 1б);



а)

б)

Рисунок 1 – Определение коэффициента трения (а) и истираемости полимерных образцов (б)

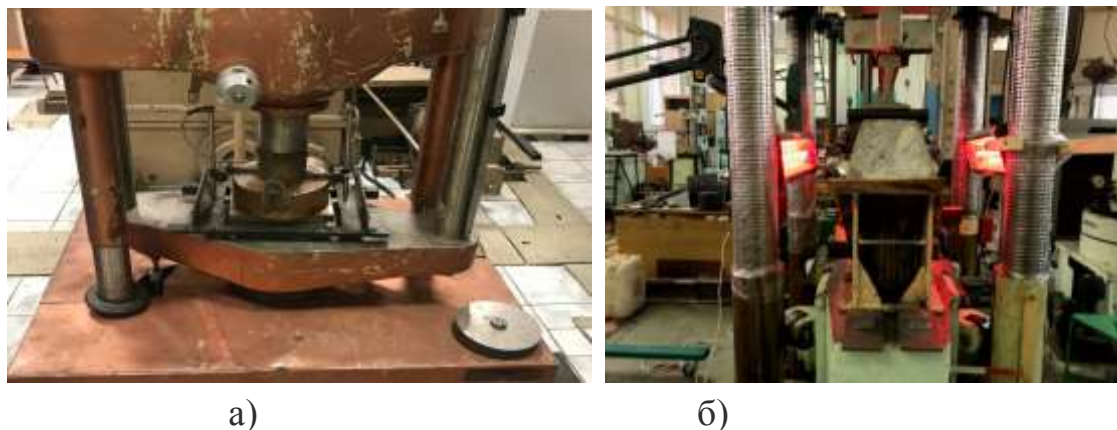


Рисунок 2 – Определение упруго-гистерезисных (а) и ресурсных показателей полимерных образцов (б)

- определить ударную вязкость и твердость износостойкой прокладки для трибосопряжения «пятник-подпятник» с учетом остаточной и упругой деформации, характеризующими склонность материала к развитию остаточной деформации и возможность восстановления;

- определить статические и динамические показатели жесткости полимерных демпфирующих материалов (рисунок 2а) с учетом действующих в подпятниковой зоне нагрузок, частоты воздействий и температуры, рассчитать относительные коэффициенты жесткости, а также энергетические параметры: механические потери, полезную упругость, относительный гистерезис;

- провести оценку работоспособности эластомерных композитов в течение межремонтного периода по результатам ресурсных испытаний (рисунок 2б) при их регулярном нагружении наклонной поперечной силой в условиях циклического температурного воздействия окружающей среды.

В **третьем разделе** проведены сравнительный и статистический анализ различных полимерных композиционных материалов по результатам проведенных экспериментов, оценка работоспособности эластомерных материалов, а также выбран рациональный вариант двухслойной антифрикционной износостойкой вставки в подпятник надрессорной балки грузового вагона.

Комплексный анализ физико-механических свойств полиамидных материалов показал следующее.

Рациональной парой трения в трибосопряжении «пятник-подпятник» является металл - полиамид 6 с добавлением (15-30) % стекловолокна (или аналогом литым полиамидом 6 (капролоном) с добавлением MoS_2), коэффициент трения которой 0,11, что в ~3 раза ниже реального коэффициента трения пары «металл-металл».

Наполненные полиамиды стекловолокном и дисульфидом молибдена обладают большей стойкостью к истиранию (в 1,5-2,0 раза выше) и твердостью (в 2,0 раза выше), чем ненаполненные полиамиды. Однако ударная вязкость при положительных и особенно при отрицательных температурах значительно снижается, причем интенсивнее с увеличением процентного содержания наполнителя в полиамидной матрице.

Снижение ударной вязкости является возможной причиной преждевременного разрушения полимерных прокладок, устанавливаемых в подпятник американских тележек, особенно при отрицательных температурах окружающей среды и при прохождении вагоном различных неровностей пути. Следовательно, для увеличения их долговечности необходимо снизить влияние жестких условий эксплуатации.

Для демпфирования ударных нагрузок, воздействующих на износостойкую вставку при эксплуатации, по результатам анализа упруго-гистерезисных свойств, предложены морозостойкие эластомеры: резиновый композит с добавлением противостарителя сэвилена в количестве (3-5) % от общей массы и термопластичный полиуретан повышенной плотности, наполненный молекулярным газом.

Статические, динамические (рисунок 3а) жесткости при температурах +23 °С и -40 °С, повышаются в ~1,4 раза при увеличении амплитуды нагрузок с (20-90) кН до (20-180) кН.

С понижением температуры до -40 °С эластомеры продолжают работать в области высокоэластической деформации и выполнять свои демпфирующие функции (рисунок 3б).

Жесткостные характеристики эластомеров находятся в обратно пропорциональной зависимости от толщины.

Механические потери за цикл деформации при температурах +23 °С и -40 °С при увеличении амплитуды нагрузок повышаются в 3,57 раза, а при уменьшении толщины материала, снижаются прямо пропорционально уменьшению толщины.

Изменение частоты в низкочастотном диапазоне (4-10) Гц не оказывает существенного влияния на параметры упруго-гистерезисных свойств эластомеров.

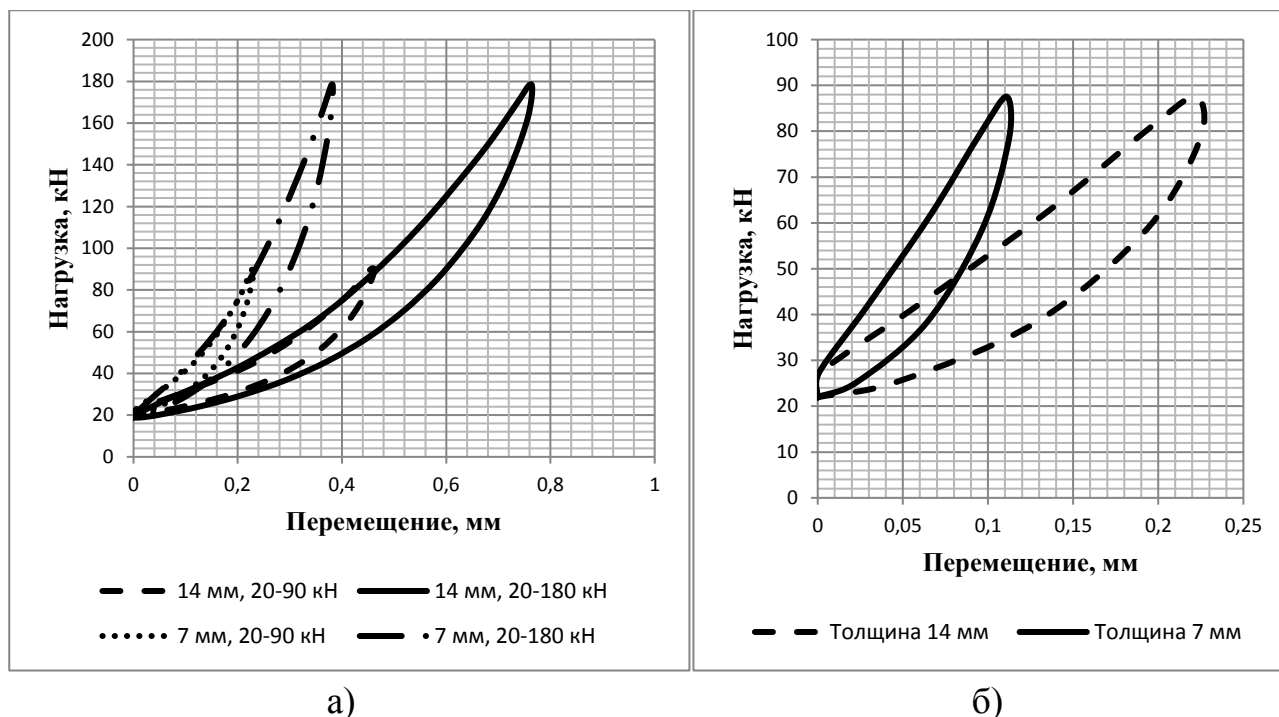


Рисунок 3 - Диаграмма динамического сжатия резинового эластомера толщиной 7 мм и 14 мм при температуре +23 °С с различной амплитудой нагрузок (а); при температуре -40 °С с частотой 10 Гц (б)

С использованием методики проектирования амортизирующих элементов из полимерных композиционных материалов подобраны толщина и жесткость, позволяющие работать амортизатору в условиях увеличенных динамических нагрузок в сопряжении «пятник-подпятник» без выдавливания.

Демпфирующие свойства эластомерных элементов после регулярного циклического нагружения в сочетании с термоциклированием на базе 10 млн циклов остаются в допустимых пределах (падение не более 8-10%), что подтверждает возможность их применения в элементах вагона в течение длительного времени в различных климатических зонах эксплуатации.

Перспективный резиновый композит обладает лучшей демпфирующей способностью, а термопластичный эластомер – менее подвержен влиянию агрессивных сред (масел, эмульсий) и процессам старения, что следует учитывать при установке на конкретный тип вагона.

По результатам исследований предложен вариант антифрикционной износостойкой вставки в подпятник надрессорной балки грузового вагона в виде сэндвича, имеющий верхний компонент в виде кольцевой полиамидной износостойкой вставки из полиамида 6 с добавлением (15-30)% стекловолокна или капролона с добавлением дисульфида молибдена, имеющие низкий коэффициент трения (0,11), и нижний компонент, предназначенный для демпфирования ударных нагрузок, в виде кольцевой полимерной эластичной

прокладки из резинового композита с высокомолекулярным противостарителем – сэвиленом или термопластичного полиуретана повышенной плотности, наполненного молекулярным газом.

В четвертом разделе рассмотрено влияние антифрикционных характеристик трибосопряжения «пятник-подпятник» с предложенной антифрикционной, износостойкой сэндвич-прокладкой на момент сил сопротивления повороту тележки грузового вагона с учетом полученных экспериментально значений коэффициентов трения сопрягаемых поверхностей.

Суммарный момент сопротивления повороту одной тележки грузового вагона зависит от доли (k) вертикальной нагрузки кузова (N), приходящейся на подпятник, перераспределения ее между подпятником и скользяном, коэффициентов трения ($\mu_n, \mu_{ск}$) на трибосопрягаемых поверхностях подпятника и скользяна, расстояния от центра пятника до центра скользяна (плеча действия

силы $b_{ск}$), приведенного радиуса трения $\frac{R^3-r^3}{R^2-r^2}$,

$$\Sigma M(F) = \frac{2}{3} N (1-k) \cdot \mu_n \cdot \frac{R^3-r^3}{R^2-r^2} + k \cdot N \cdot \mu_{ск} \cdot b_{ск} \quad (1)$$

Для расчета момента сопротивления разработана программа в системе *Borland C++ Builder*. С учетом экспериментально полученных значений коэффициентов трения скольжения различных пар материалов проведены расчеты моментов сил сопротивления повороту двухосной тележки грузового полувагона для разных схем опирания кузова в груженом и порожнем режиме работы.

Анализ результатов расчетов показал, что в случае применения предлагаемой износостойкой композитной сэндвич-прокладки с коэффициентом трения 0,11 между пятником и кольцевой износостойкой вставкой уменьшается момент сопротивления повороту при опирании кузова на подпятник в 2,91 раза.

Если коэффициент трения на скользяне принять 0,32, полученный экспериментально для трибосопряжения «металл-металл», то интенсивность снижения момента сопротивления повороту (рисунки 4 а,б,в) уменьшается в зависимости от увеличения доли нагрузки, приходящейся на боковой скользян. При уменьшении коэффициента трения на боковом скользяне до 0,11 по сравнению с типовым вариантом 0,32 в случае восприятия им 85 % вертикальной нагрузки, приходящейся на одну тележку, общий момент сопротивления снижается в 2,86 раза (рисунок 4 г).

Величина коэффициента трения 0,11 на сопрягаемых поверхностях подпятниковой зоны и бокового скользяна снижает в 2,91 раза момент

сопротивления повороту тележки при всех возможных схемах опирания кузова вагона. Следовательно, для уменьшения износа гребней целесообразно одновременно снижать коэффициент трения на скользяне.

Условием минимального износа гребней колес и головки рельса при прохождении вагоном кривых разного радиуса является не превышение общего момента сопротивления повороту кузова над моментом, возникающим от горизонтальной поперечной силы со стороны рельса, который составляет 29,4 кН/м в расчете от горизонтальной силы величиной 3 тонны. Данному условию удовлетворяют все схемы опирания с коэффициентом трения на подпятнике и скользяне равным 0,11, а также при других коэффициентах трения на боковом скользяне, в случае восприятия им не более 15 % вертикальной нагрузки.

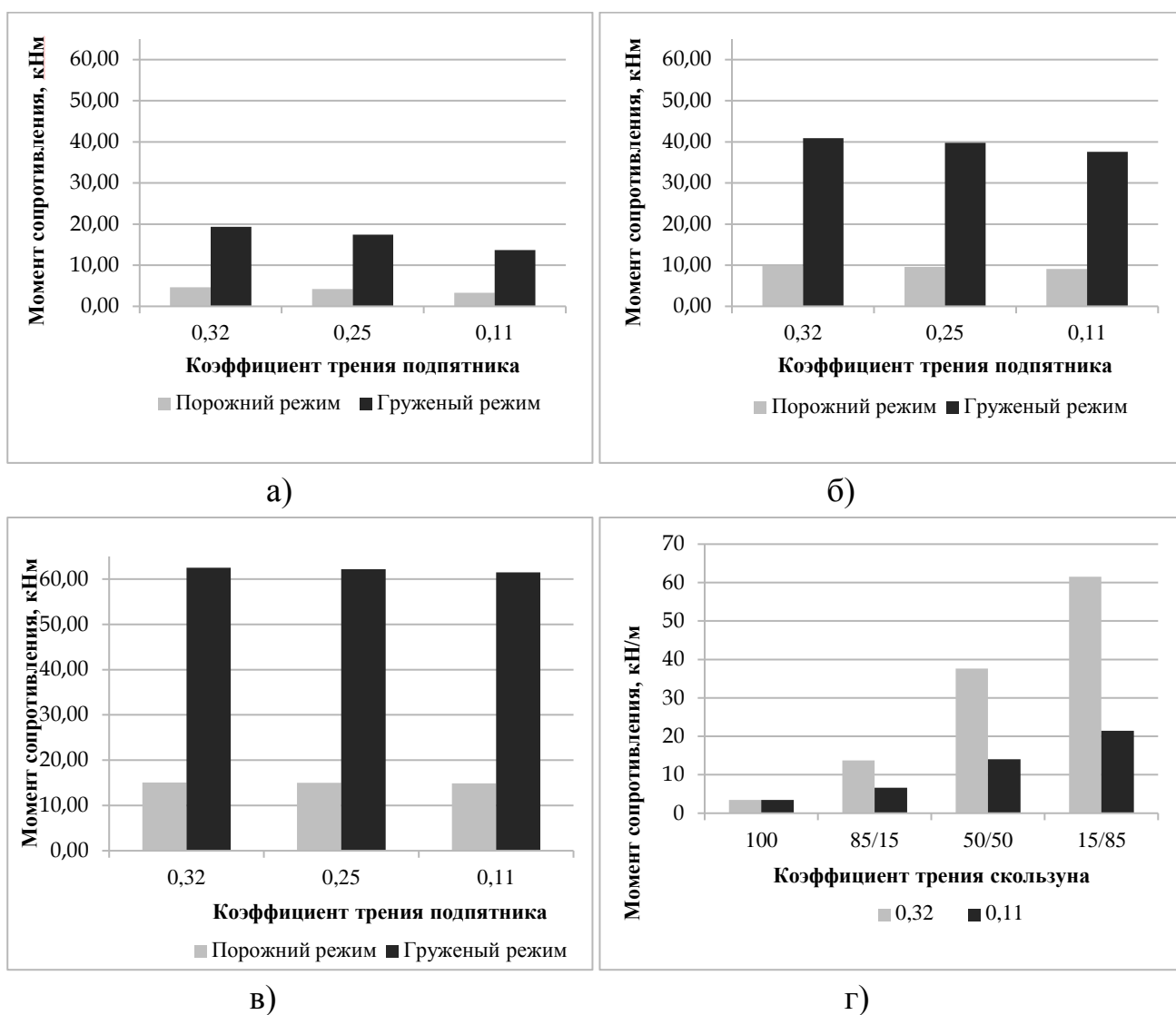


Рисунок 4 - Зависимость момента сил сопротивления повороту тележки:
- от величины коэффициента трения на подпятнике для схемы опирания:

а) на подпятник 85 % и скользяне 15 % ($\mu_{ск} = 0,32$);

б) на подпятник 50 % и скользяне 50 % ($\mu_{ск} = 0,32$);

- в) на подпятник 15 % и скользуны 85 % ($\mu_{ск} = 0,32$);
- г) от величины коэффициента трения на скользуне и подпятнике при разных схемах опирания в груженом режиме

Причем, интенсивность износа гребней будет уменьшаться пропорционально снижению противокрутящего момента.

В пятом разделе проведена оценка амортизационных свойств полимерного эластичного элемента двухкомпонентной сэндвич-прокладки, устанавливаемой в подпятниковую зону, на основе многовариантных расчетов многомассовой колебательной системы (вагон – путь).

С этой целью разработана математическая модель многомассовой колебательной системы «вагон-путь», в которой все элементы вагона разделены на группы (рисунок 5).

Отличительной особенностью разработанной модели от других известных моделей является возможность введения вязкоупругих связей между жесткими телами в виде аппроксимаций экспериментальных динамических упруго-гистерезисных характеристик материалов с учетом влияния температурных факторов, частоты и амплитуды колебаний. В разработанной модели уточнены параметры отдельных элементов и связей между ними в соответствии с современными характеристиками.

Принятые допущения в модели:

- все элементы вагона разделены на группы и отдельно не учитывались;
- элементы представлены в виде абсолютно твердых тел, соединенных между собой упругими или вязкоупругими связями;
- не учтена переменная масса необрессоренных частей вагона при движении;
- использованы приведенные массы подрессоренных и неподрессоренных частей вагона, шпалы и железнодорожного пути.



Рисунок 5 – Обобщенная модель (а) и расчетная схема (б) многомассовой колебательной системы «вагон-путь»

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

$$\begin{cases} M_1 \ddot{z}_1 + R_1 = 0; \\ M_2 \ddot{z}_2 + R_2 - R_1 = 0; \\ M_3 \ddot{z}_3 + R_3 - R_2 = 0; \\ M_4 \ddot{z}_4 + R_4 - R_3 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_1 = C_1 (z_1 - z_2) + \beta_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2); \\ R_2 = C_2 [1 + \varphi_2 \operatorname{sign}(\dot{z}_2 - \dot{z}_3)] (z_2 - z_3); \\ R_3 = C_3 (z_3 - z_4); \\ R_4 = C_4 [1 + \varphi_4 \operatorname{sign}(\dot{z}_4)] \cdot z_4 + \beta_4 \cdot \dot{z}_4. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 = -\frac{C_1}{m_1} (z_1 - z_2) - \frac{\beta_1}{m_1} (\dot{z}_1 - \dot{z}_2); \\ \ddot{z}_2 = \frac{C_1}{m_2} (z_1 - z_2) + \frac{\beta_1}{m_2} (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - \frac{C_2}{m_2} [1 + \varphi_2 \operatorname{sign}(\dot{z}_2 - \dot{z}_3)] \cdot (z_1 - z_2); \\ \ddot{z}_3 = \frac{C_2}{m_3} [1 + \varphi_2 \operatorname{sign}(\dot{z}_2 - \dot{z}_3)] \cdot (z_2 - z_3) - \frac{C_3}{m_3} (z_3 - z_4); \\ \ddot{z}_4 = \frac{C_3}{m_4} (z_3 - z_4) - \frac{C_4}{m_4} [1 + \varphi_4 \operatorname{sign}(\dot{z}_4)] \cdot z_4 - \frac{\beta_4}{m_4} \cdot \dot{z}_4. \end{cases} \quad (4)$$

Имитировали удар колеса по рельсу.

В расчетах, учитывающих установку демпфирующего полимерного элемента, характеристики которого (упругую силу и силу внутреннего трения) определяли из экспериментально полученных гистерезисов, взят достаточно маленький шаг – 1/100 секунды для хорошей сходимости результатов, т.к. порядок жесткости между элементами разный.

Анализ результатов расчётов показал, что затухание колебаний элементов системы при наличии в подпятниковой зоне эластомерного элемента происходит с большей интенсивностью (рисунок 6 а), чем при его отсутствии (рисунок 6 б), что характеризуется уменьшением в 2 раза амплитуды колебаний реактивных сил в течении 5с после удара.

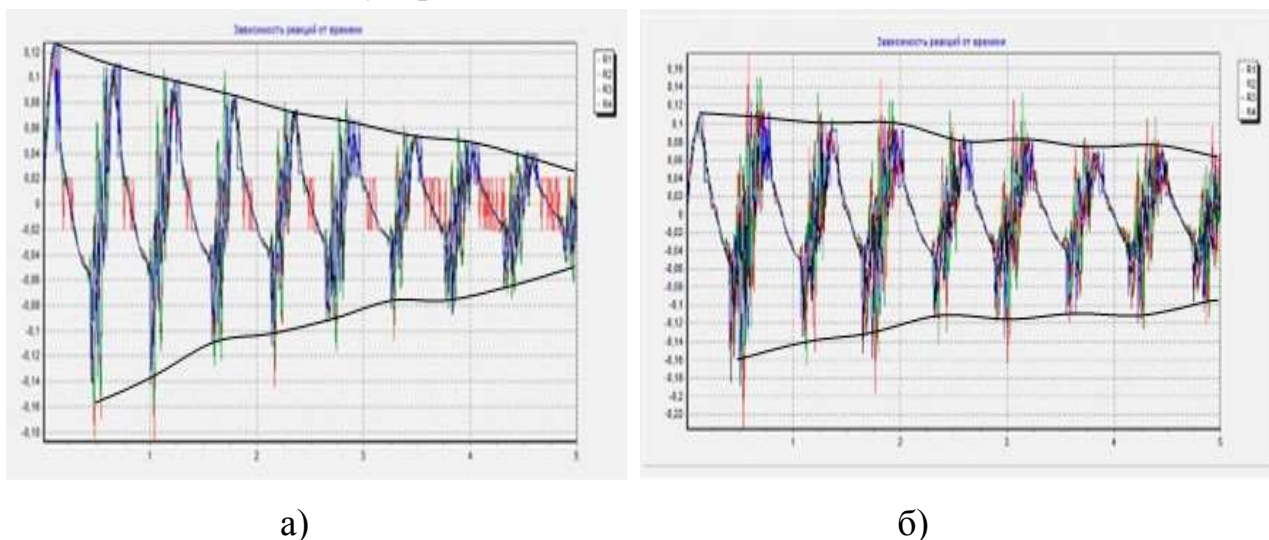


Рисунок 6 - Зависимость реакций от времени в подпятниковом узле при температуре +23 °С, в случае наличия (а) и отсутствия (б) эластомерного элемента

Количество диссипируемой эластомерным элементом кинетической энергии соответствует механическим потерям (площади образуемого гистерезиса), которые возрастают с увеличением амплитуды нагружения (рисунок 7).

Температурное воздействие не оказывает существенного влияния в распределение реактивных сил в элементах системы (рисунок 8), следовательно, выбранный материал демпфирующего элемента обеспечивает гашение колебаний вплоть до температуры -40 °С, которая находится выше его температуры стеклования.

Частота колебаний в низкочастотном диапазоне (3-10) Гц также не оказывает существенного влияния на величину гистерезиса.

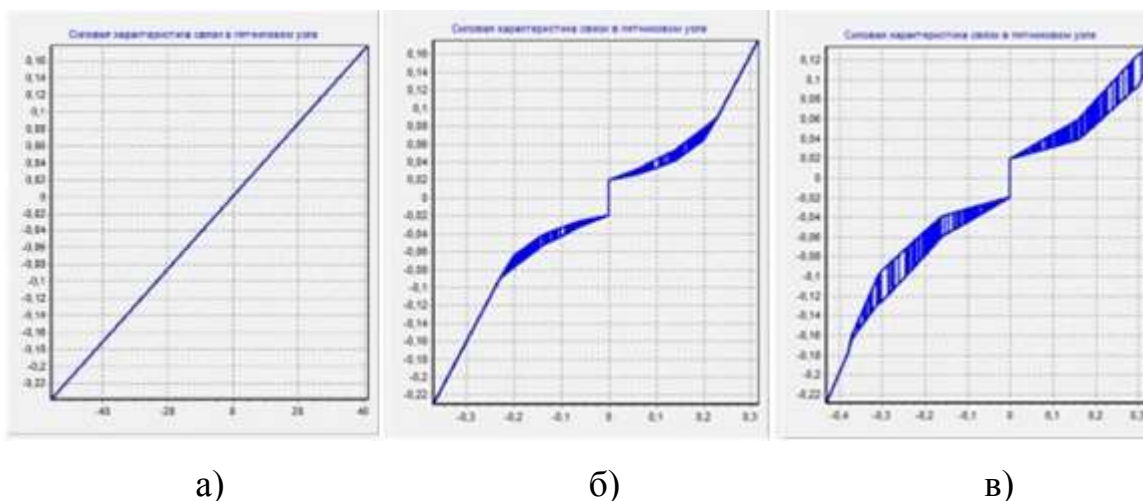


Рисунок 7 - Зависимость реакций от времени и силовая характеристика связи в подпятниковом узле при температуре +23 °С, в случае отсутствия (а) полимерного элемента (сопряжение «металл-металл»); при амплитуде нагрузки (20-90) кН (б); при амплитуде нагрузки (20-180) кН (в)

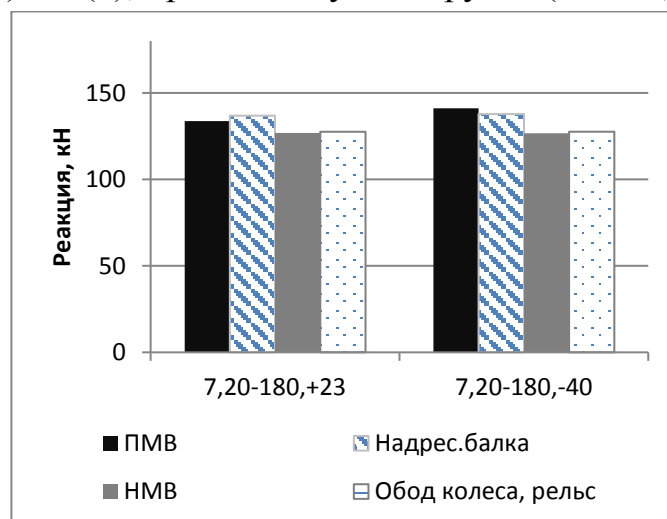


Рисунок 8 – Распределение реактивных сил в элементах системы при наличии демпфирующего элемента толщиной 7 мм в подпятниковой зоне в зависимости от температуры

Сравнительный анализ работы подпятникового узла при наличии демпфирующего элемента и без него показал, что при отсутствии амортизатора (рисунок 9а) значительно возрастают реактивные силы в надрессорной балке - на ~55 кН (40 %), чуть с меньшей интенсивностью – в неподрессоренной массе вагона - на ~18 кН (14 %). Реактивные силы на ободе колеса и рельсе можно считать сопоставимыми.

Наличие амортизатора снижает на 14 мм (в 1,2 раза) отклонения подрессоренной массы вагона (рисунок 9б), что приведет к уменьшению влияния кузова вагона при снижении коэффициента трения между сопрягаемыми поверхностями пятника и подпятника.

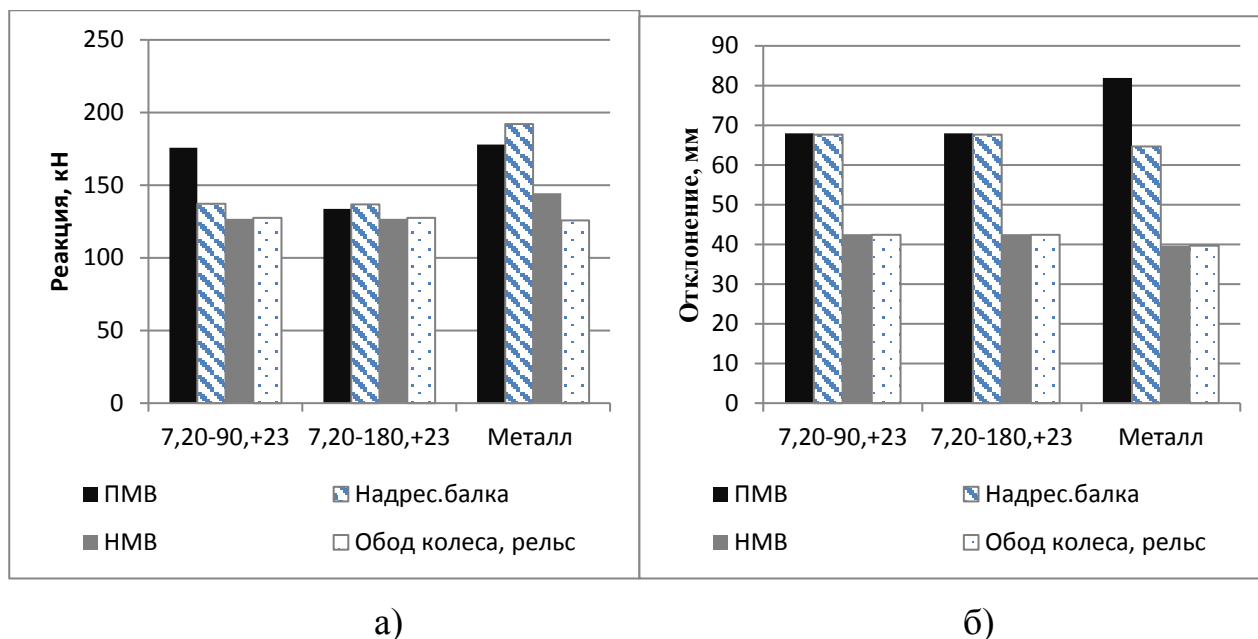


Рисунок 9 – Распределение реактивных сил (а) и отклонений (б) в элементах системы при наличии демпфирующего элемента толщиной 7 мм и без него (сопряжение «металл-металл») при температуре +23 °С

В связи с тем, что увеличение толщины амортизатора до 14 мм по результатам проведенных расчетов не существенно влияет на распределение реактивных сил в элементах вагона, а перемещения при перевалке кузова на край подпятника будут больше, то рациональной толщиной демпфирующего элемента, устанавливаемого в подпятниковую зону является 7 мм.

Таким образом, применение предложенных вариантов полимерного амортизатора с высокими демпфирующими свойствами и стойких к термическому старению под нагрузкой приведет к уменьшению динамических ударных воздействий на кольцевую полиамидную износостойкую вставку, увеличению ее ресурса, а также снижению влияния кузова вагона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научно-техническая проблема, связанная с разработкой новых технических решений для уменьшения интенсивности износа гребней колесных пар грузового вагона. Получены следующие результаты:

1. Предложен способ трибосопряжения «пятник-подпятник» через антифрикционную износостойкую композитную сэндвич-прокладку, состоящую из верхнего компонента – модифицированного полиамида 6 с низким коэффициентом трения и нижнего эластомерного компонента для демпфирования ударных нагрузок при прохождении вагоном различных

неровностей пути, которое позволит уменьшить противокрутящий момент, препятствующий повороту тележки вокруг оси пятника в 2,91 раза, как в груженом, так и в порожнем режиме, тем самым улучшить вписывание тележек в кривые и снизить интенсивность износа гребней колес, которая будет уменьшаться пропорционально снижению противокрутящего момента.

2. Обоснована целесообразность применения аналогичных технических решений, снижающих коэффициент трения на скользуне до 0,11. В связи с чем перспективой дальнейших исследований является разработка способа снижения противокрутящего момента на скользуне за счет применения износостойких антифрикционных накладок с амортизирующим слоем.

3. Предложено применение в составе сэндвича полимерной эластичной вставки из морозостойкого резинового композита или термопластичного полиуретана оптимальной жесткости, которая позволит уменьшить уровень динамических ударных воздействий на кольцевую износостойкую вставку, особенно при прохождении по неровностям пути, увеличить ее долговечность, а также снизить величину реактивных сил, действующих на надрессорную балку на ~55 кН (в 1,4 раза), неподдрессоренную массу вагона - на ~18 кН (в 1,14 раз), уменьшить влияние кузова вагона при уменьшении коэффициента трения между сопрягаемыми поверхностями пятника и подпятника.

4. Разработаны методики экспериментальных исследований физико-механических свойств полимерных композиционных материалов (истираемости, коэффициента трения, упруго-гистерезисных свойств), которые позволяют определить реальные характеристики материалов и выбрать рациональные параметры дополнительных элементов, снижающих интенсивность износа узлов сухого трения вагонов.

5. Рекомендована, на основании проведенных исследований, к установке в зону подпятника надрессорной балки проектируемой платформы для перевозки контейнеров износостойкая композитная сэндвич-прокладка.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) В рецензируемых научных изданиях:

1. 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. – № 3. – С.62-71.

2. 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. 68-76.

б) В индексируемых и реферируемых в SCOPUS, Web of Science научных изданиях:

3. 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.

4. Курзина, Е.Г. Демпфирующие композиты из материалов с различающимися упруго-гистерезисными свойствами для сэндвич-амортизаторов железнодорожного транспорта / Е.Г. Курзина, А.Г. Колмаков, В.Н. Филиппов, А.В. Семак, А.М. Курзина // Материаловедение. – 2020. – №1. – С. 25-32.

5. 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.

6. Kurzina, E. G. Damping Composites from Materials with Different Elastic Hysteresis Properties for Sandwich Shock Absorbers of Railroad Transport / Kurzina E.G., Kolmakov A.G., Filippov V.N., Semak A.V., Kurzina A.M // Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – V.11. №4. – P.947-954.

в) В других изданиях и материалах конференций:

7. 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.

8. Кондращенко, В.И. Этапы создания шестишпального испытательного стенда ИЦТС МИИТ / В.И. Кондращенко, Ю.Н. Аксенов, Е.Г. Курзина, А.В. Семак, А.М. Курзина // М: МИИТ. – 2017. – XVII научно - практическая конференция “Безопасность движения поездов”. С. IV47- IV50.

9. 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.

10. 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.

11. Курзина, Е.Г. Полимерные демпфирующие композиционные материалы для железнодорожного пути в виде двухслойных сэндвич-амортизаторов / Е.Г. Курзина, А.М. Курзина, В.Д. Кудрявцева, А.Г. Колмаков, Д.В. Просвирнин, С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, М.Л. Хейфец // Матеріали 20-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика» 07–11.09.2020 р., м. Одеса. – Київ: АТМ України. –2019. – С. 79-82.

12. Аксенов, Ю.Н. Оптимизация параметров жесткости в системе «колесо-рельс» для пропуска поездов с большими осевыми нагрузками / Ю.Н. Аксенов, Е.Г. Курзина, А.Ю. Богачев, А.М. Курзина // М: МИИТ. - 2016. - XVII научно - практическая конференция “Безопасность движения поездов”. –С. П4- П5.

13. Курзина, Е.Г. Совершенствование свойств полимерных демпфирующих материалов железнодорожного пути путем создания двухслойных сэндвич-амортизаторов на основе упруго-гистерезисных характеристик компонентов [Текст] / Е.Г. Курзина, А.Г. Колмаков, А.М. Курзина, С.А. Клименко, В.Д. Кудрявцева, М.Ю. Копейкина, Д.В. Просвирнин, М.Л. Хейфец // Сборник материалов Научных чтений им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов». – М: ИМЕТ РАН. – 2020. - С.161-164.

14. Kurzina, Angelina M. Development of polymer, antifriction and damping sandwich pads for loaded elements of the rolling stock of railways / Angelina M. Kurzina, Alexey G. Kolmakov, Elena G. Kurzina // The X International Science Conference «Topical issues of modern science and education».– March 09-12. – 2021. –Lisbon, Portugal. – P.302-304.

КУРЗИНА Ангелина Михайловна

**СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ГРЕБНЕЙ
КОЛЕСНЫХ ПАР ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**

**05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 27.05.2021. Заказ № 2563
Усл.печ.л.-1,5

Формат 60x90/16
Тираж 80 экз.

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,