

На правах рукописи



Шишкина Ирина Викторовна

Повышение ресурса стрелок стрелочных переводов за счет
усовершенствования прикрепления рельсовых элементов стрелки к
основанию

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель (консультант) доктор технических наук, профессор
Глюзберг Борис Эйникович

Официальные оппоненты:

Карпущенко Николай Иванович, доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», кафедра «Путь и путевое хозяйство», профессор.

Абдурашитов Анатолий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент
Проектно-конструкторское бюро инфраструктуры - филиал Открытого акционерного общества «Российские железные дороги», отдел рельсов, начальник.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения».

Защита состоится «16» мая 2019 г., в 13:30 на заседании диссертационного совета Д 218.005.15 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 7618.

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

Автореферат разослан «___» марта 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Королев Вадим Вадимович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Чтобы обеспечить возрастающие железнодорожные перевозки, создать условия для наиболее эффективного использования всех преимуществ железнодорожного транспорта, поднять скорости движения и вес поездов, необходимы опережающие темпы развития пути, его усиления и совершенствования.

В развитии конструкций стрелочных переводов железных дорог России нужно отметить тенденцию к внедрению более мощных элементов переводов – остряков и крестовин, которые, в свою очередь, требуют надежного прикрепления их к основанию.

В настоящее время на дорогах магистрального железнодорожного транспорта эксплуатируется около 166 тысяч стрелочных переводов. Годовая потребность замены конструкций, выработавших свой ресурс, составляет 5,5 – 8,5 тысяч переводов, 6 – 7 тысяч полустрелок (ремкомплектов), 5 – 6 тысяч отдельных крестовин.

Стрелочные переводы, работающие на российских железных дорогах в настоящее время, в основном удовлетворяют потребностям перевозочного процесса, однако с учетом времени, необходимого на подготовку стрелочного хозяйства к реализации перспективных задач, уже сегодня необходимо приступить к разработке и постановке на производство новых конструкций и модельных рядов стрелочной продукции.

Целью проектирования новых стрелочных переводов является разработка конструкций, обеспечивающих выполнение требований безопасности, комфортабельности и заданных показателей эксплуатационной надежности.

Совершенствование способов прикрепления позволит увеличить ресурс элементов стрелки, уменьшить расстройство рельсовой колеи на стрелках и тем самым снизить затраты на закупку и обслуживание стрелочных переводов, поэтому выбранная тема является важной и актуальной.

В настоящей работе представлены исследования, направленные на улучшение качества важной компоненты элементной базы - стрелочных подкладок с подушкой.

Степень разработанности темы исследования. Впервые теоретико-экспериментальный анализ нагруженности узлов, включающих в себя подкладки с подушкой, был дан в работе Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПСa). Полученные с помощью предложенного авторами метода расчетные напряжения коррелировали с результатами измерений в пути, однако расчетная модель подкладок с подушкой (пластина постоянной толщины, загруженная равномерно распределенной по поверхности нагрузкой) не позволяет оценивать влияние формы подкладок с подушкой на уровень напряжений в конкретных ее точках. Поэтому для совершенствования подкладок с подушкой необходимо создание моделей более точно моделирующих напряженно-деформированное состояние с учетом особенностей конструкции. Такие модели позволяют использовать методы оптимизационного проектирования подкладок с подушкой, основанные на анализе фактических причин их отказов.

Цель работы заключается в том, чтобы, опираясь на современные подходы, разработать метод получения эффективных и экономичных технических решений по конструкции подкладок с подушкой для стрелок стрелочных переводов массовых конструкций, позволяющий получить эффект при минимальных затратах на их реализацию. При этом, полученные решения должны сохранять генеральные технологические схемы изготовления элементов, применяемые на российских стрелочных заводах. Весь эффект должен достигаться за счет повышения инженерного уровня технических решений. Эти решения должны способствовать улучшению качества стрелочных переводов, снижению затрат материалов на их изготовление и расходов в эксплуатации.

Задачами исследования являются: анализ эксплуатационных качеств элементов прикрепления острияков и рамных рельсов к основанию на основе прямых динамико-прочностных испытаний, анализ причин отказов подкладок с

подушкой в эксплуатации, металлографические исследования подкладки с подушкой в сечениях изломов с целью определения причин появления и развития дефектов, разработка методов расчета напряженно-деформированного состояния подкладки с подушкой и получение на основании этих исследований оптимального технического решения, формирование предложений по использованию разработанного варианта.

Объект исследования. Подкладки с подушкой для стрелок стрелочных переводов различных конструкций.

Предмет исследования. Влияние конструкции и технологии изготовления подкладок с подушкой на их отказы.

Научная новизна работы состоит в том, что в ходе исследования впервые выполнены экспериментальные и теоретические разработки по исследованию влияния конструкции скреплений на стрелке стрелочного перевода на их ресурс.

Получены сравнительные результаты динамико-прочностных испытаний подкладок с подушкой различных конструкций для определения их напряженно-деформированного состояния под воздействием поездов с учетом особенности разных технологий изготовления.

Представлен анализ сроков службы элементов прикрепления острижков и рамных рельсов к основанию.

Построена вероятностная модель работы металлических подкладок с подушкой стрелок стрелочных переводов, хорошо согласующаяся с результатами опытной эксплуатации, которая позволяет рассчитывать распределение отказов подкладок с подушкой в зависимости от характеристик металла, из которого они изготовлены, начальной затяжки крепежителей и спектра напряжений, возникающих от поездной нагрузки.

Получены зависимости отказов подкладок с подушкой с помощью разработанной методики, которая дает возможность планировать замену подкладок на стрелочных переводах при смене основных металлических частей.

При исследовании выявлены новые виды дефектов причин отказов подкладок с подушкой.

Для выявления причин излома подкладок с подушкой был произведен химический анализ и металлографические исследования подкладки с подушкой в сечениях изломов.

Теоретическая и практическая ценность работы обусловлена разработанным в диссертационном исследовании методическим подходом, основанным на применении математического моделирования и экспериментальных исследований, позволяющих получать практически полезные технические решения по разработке подкладок для стрелочных переводов нового поколения.

Методология и методы исследования включают в себя:

- методы математической статистики, с помощью которых были получены сроки службы подкладок с подушкой;

- тензометрический метод исследования напряженного состояния подкладок;

- металлографический метод исследования, с помощью которого были выявлены причины излома подкладок с подушкой

- метод математического моделирования, с помощью которого была решена задача получения усовершенствованной конструкции подкладки с подушкой, позволяющей повысить ресурс стрелок стрелочных переводов за счет улучшенных прочностных характеристик.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту.

Основанный на применении математического моделирования и экспериментальных исследований метод, позволяющий получать практически полезные технические решения по разработке подкладок для стрелочных переводов нового поколения.

Улучшение конструкции подкладок с подушкой для стрелочных переводов с повышенным ресурсом.

Степень достоверности результатов обусловлена соответствием используемых методов поставленным задачам, а также сходимостью результатов, полученных методом моделирования с результатами экспериментальных исследований и практики эксплуатационной работы.

Апробация работы.

Материалы, составляющие диссертационную работу, одобрены специалистами на научно-технических совещаниях кафедр: «Транспортное строительство», «Путь и путевое хозяйство» института пути, строительства и сооружений Российского Университета транспорта (РУТ (МИИТ)), лаборатории «Стрелочное хозяйство» научного центра «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо-рельс» АО «ВНИИЖТ». Основные положения диссертационной работы докладывались на 134-ом заседании некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», на конференциях с международным участием: «Внедрение современных конструкций и технологий в путевое хозяйство» (РУТ МИИТ), «Конструкция и техническое обслуживание железнодорожного пути при организации тяжеловесного движения» (ПГУПС), научно-технической конференции «Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца».

В настоящее время подана заявка на патент на полезную модель «Цельнолитая подкладка с подушкой».

Внедрение результатов исследований. Результаты, изложенные в диссертационной работе, были приняты в качестве варианта для использования при разработке новых стрелочных переводов на АО «Новосибирский стрелочный завод».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано: 11 статей, две из которых входят в рекомендованный перечень ВАК и три - входящие в международную базу цитирования «Scopus».

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Работа изложена на 117 страницах печатного текста, имеет 4 таблицы, 92 рисунка, 7 страниц приложений. Список использованных источников содержит 85 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы и изложены цели и задачи исследований, научная новизна, достоверность научных положений и результатов, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе рассматривается состояние вопроса по увеличению ресурса и стабильности работы стрелочных переводов и их элементов.

Большие работы по созданию новых и совершенствованию серийных стрелочных переводов проводились научными коллективами во Всероссийском научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (ВНИИЖТе) под руководством докторов технических наук Н.Н. Путри, Г.Г. Желнина, кандидатов технических наук А.М. Тейтеля, Л.Г. Крысанова, инженером В.Г. Донцом; в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), бывшим Ленинградским институтом инженеров железнодорожного транспорта имени академика В. Н. Образцова, (ЛИИЖТе) под руководством профессоров, докторов технических наук С.В. Амелина, В.Ф. Яковлева, М.П. Смирнова, кандидатов технических наук В.И. Абросимова, Л.Н. Фролова; в Днепропетровском Государственном Техническом Университете Железнодорожного Транспорта (ДИИТе) - сотрудниками кафедры, возглавлявшейся профессором М.А. Фришманом, а затем профессором В.В. Рыбкиным. Проектные работы по созданию и совершенствованию стрелочных переводов проводились коллективом Проектно-технологического конструкторского бюро по пути и путевым машинам (ПТКБ ЦП) под руководством кандидата технических наук Н.Н. Елсакова и инженеров Ю.Н. Петрова, А.К. Гучкова, С.О. Сурина. В настоящее время работы по созданию новых стрелочных переводов ведутся специалистами лаборатории научного центра «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо-рельс» АО «ВНИИЖТ» под руководством профессора Б.Э. Глюзберга, кандидатом технических наук М.И. Титаренко; кафедрой «Транспортное строительство» РУТ МИИТ, возглавляемой профессором А.А. Локтевым, кандидатом технических наук В.В. Королевым.

Важными элементами, определяющими ресурс и стабильную работу стрелочных переводов, являются скрепления. В зоне стрелки такими элементами являются подкладки с подушками, на которые опираются острия стрелочного перевода. Подкладки с подушкой, изготавливаются с использованием различных технологий. Назначение подкладок с подушкой - передача нагрузки от подвижного состава на брус и создание условий перемещения подошвы остриёв при переводе их из одного положения в другое.

Подкладки с подушкой, прикрепленной к подкладке на заклёпках, являлись на протяжении длительного времени единственной конструкцией, применявшейся на стрелочных переводах всех типов и марок. Обладая проверенными эксплуатационными качествами, подкладки с подушкой на заклёпках имеют недостатки, связанные с расстройством заклёпочных соединений, что приводит к отказам в работе подкладок с подушкой и заклёпочных соединений.

Внедрение технологии штамповки позволяет изготовить подкладку с подушкой из одной монолитной заготовки. Такие подкладки с подушкой дешевы в изготовлении, однако использование технологии горячей штамповки для изготовления подкладок с подушкой связано с образованием надрывов металла и концентраторов напряжений в зоне среза металла подкладки с подушкой. Надрывы металла и концентраторы напряжений приводят к преждевременному отказу подкладок.

Альтернативой применения заклёпочных соединений и технологии горячей штамповки являются сварочные технологии.

При использовании технологии сварки подкладка с подушкой изготавливается из двух сваренных между собой элементов (подкладки и подушки). Реализованы два способа сварки: сварка через отверстия в подкладке, что связано с ослаблением подкладки, и продольная сварка без ослабления подкладки. Надрыв металла при просекании отверстий в подкладках, ослабление сечений подкладки за счёт отверстий и наличие сварных зон приводят к снижению прочностных и эксплуатационных качеств подкладок.

Достижение цели включает в себя разработку конкретных задач, которые иллюстрирует рисунок 1.



Рисунок 1 – Задачи, которые нужно решить для выбора рациональной конструкции подкладок с подушкой

Во второй главе дан анализ и статистика причин отказов подкладок с подушкой: методика анализа показателей эксплуатационной надежности подкладок с подушкой, методика получения аналитических зависимостей, статистика отказов подкладок с подушкой, распределение отказов подкладок с подушкой по видам дефектов (причины отказов).

В процессе эксплуатации отказы подкладок с подушкой на заклёпках происходят по причине ослабления заклепочных соединений, трещин и изломов подкладок, проходящих через отверстия под заклёпки в зоне внутренней кромки подошвы рамных рельсов, смятия и износа подушек.

Под воздействием динамических сил, передаваемых на подкладки от рельсов, отказ подкладок с подушкой, изготовленных с использованием технологии сварки, происходит из-за трещин и изломов в зоне внутренней кромки подошвы рамных рельсов от сварных швов ближайшего к кромке рамного рельса отверстия, или в зоне термического влияния сварных швов.

В процессе эксплуатации отказ подкладок с подушкой, изготовленных методом горячей штамповки, происходит по причине трещин и изломов подкладок по внутренней кромке рамных рельсов в зоне среза и выдавливания металла для формирования носовой части подушки подкладки, а также из-за

воздействия сил, передаваемых от остряка и рамного рельса на подкладку в месте резкого изменения сечения подкладки.

Вышеперечисленные повреждения подкладок с подушкой приведены в «Классификаторе дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов».

В последнее время на дорогах стали выявляться новые виды дефектов подкладок с подушкой, которые не были внесены в «Классификатор дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов». Наиболее вероятная причина отказов «нового» вида у подкладок с подушкой, изготовленных с использованием технологии сварки, - нарушение технологии режима сварки, наличие неметаллических включений, трещин в месте сварного шва. Еще один вид дефекта подкладки с приварной подушкой - истирание металла под рельсом. В данном случае причина отказов по этому виду дефектов - недостаточная износостойкость металла подкладки.

Для получения показателей надежности сбор данных по отказам подкладок с подушкой велся согласно методике эксплуатационных наблюдений за работой стрелочных переводов. Для получения статистического материала была рассмотрена информация по отказам подкладок с подушкой стрелочных переводов, изъятых из пути в 2013-2018 гг. с 12 железных дорог РФ.

В каждом интервале наработки определялись показатели надежности: $R(t)$ - вероятность безотказной работы и $L(t)$ – интенсивность отказов. По полученным значениям строились графические зависимости $R(t)$ и $L(t)$.

В качестве входной информации при определении аналитических функций, аппроксимирующих статистические зависимости основных показателей надежности подкладок с подушкой, использовались зависимости, полученные в результате статистической обработки исходных данных: $f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа, $R(t)$ – вероятность безотказной работы, $L(t)$ – интенсивность отказов.

Для анализа показателей надежности элементов стрелочного перевода была использована модель на основе специальных функций, предложенная в лаборатории «Стрелочное хозяйство» ВНИИЖТа.

Модель описывает изменение каждого показателя надежности за весь период работы подкладок с подушкой в виде единой непрерывной аналитической

функции с областью определения аргумента $0 < t < T_{max}$. Модель обеспечивает получение наилучшего приближения не для какого-нибудь одного из показателей надежности, но одновременно для всех рассматриваемых показателей надежности.

Для подкладок с подушкой в качестве модели, максимально удовлетворяющей всем предъявленным требованиям, может быть использована модель вида:

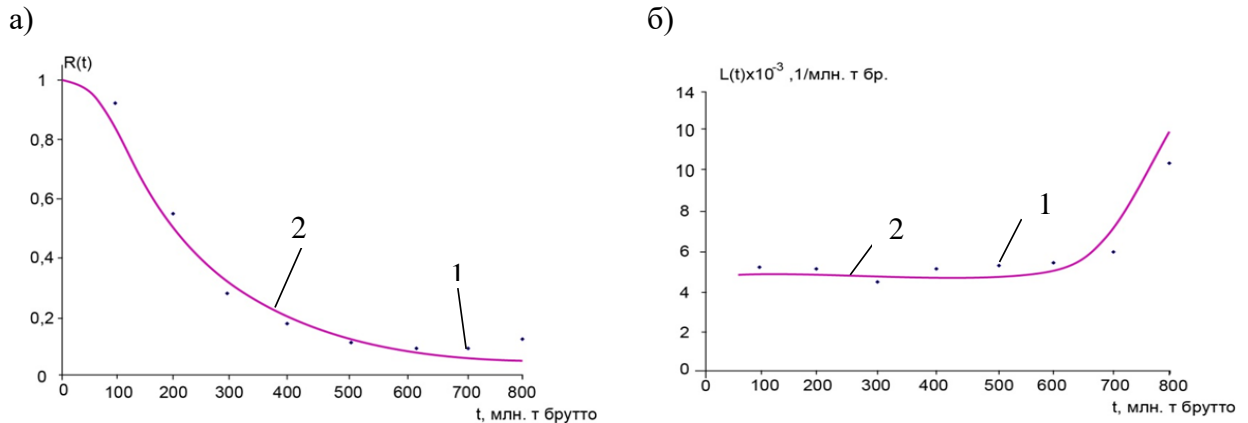
$$\left\{ \begin{array}{l} L(t) = at + b - k_{01}e^{-k_{02}t} + k_{11}e^{k_{12}(t-t_0)}; \\ R(t) = \exp\left[-\int_0^t L(t)dt\right]; \\ f(t) = L(t)R(t); \\ F(t) = \int_0^t f(t)dt, t \geq 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

Ее основой является зависимость для интенсивности отказов $L(t)$, которая дает возможность реализовать практически любую зависимость интенсивности отказов от наработки. Каждый из коэффициентов зависимости $L(t)$ имеет четкий физический смысл, значительно облегчающий анализ изменения интенсивности отказов в процессе наработки: a - скорость изменения интенсивности отказов на основном этапе эксплуатации; b - интенсивность отказов на начальном этапе эксплуатации; t_1 и t_0 - точки перехода между этапами работы элементов; k_{01} и k_{02} - показатели скорости изменения интенсивности отказов в начальный период эксплуатации; k_{11} и k_{12} - показатели скорости изменения интенсивности отказов в завершающий период эксплуатации; t - показатель, связанный с наработкой элемента до отказа.

По исходным статистическим данным определяется зависимость $L(t)$ и проводится аппроксимация по зависимости $L(t)$ (1). На этом этапе определяются коэффициенты $a, b, k_{01}, k_{02}, k_{11}, k_{12}, t_0$ в численном выражении. Далее вычисляются аналитические и статистические зависимости остальных уравнений, входящих в систему (1).

В качестве примера на рисунке 2 показаны графики изменений показателей надежности подкладок с подушкой, изготовленных с использованием технологии

сварки, отказавших в промежуток времени с 2013 по 2018 годы, полученные по данным с дорог. Там же приведены их аналитические аппроксимации. Такие же графики получены для подкладок с подушкой, изготовленных с использованием технологии на заклепках и изготовленных с использованием технологии горячей штамповки.



1 – результаты наблюдений; 2 – аналитическое распределение

Рисунок 2 – Графики показателей надежности подкладок с подушкой:

а) вероятность безотказной работы подкладок с подушкой, б) интенсивность отказов подкладок с подушкой

Интенсивность отказов подкладок с подушкой с начала эксплуатации стрелочных переводов до прохода по ним 500-600 млн. т брутто близка к постоянной (рисунок 2). Это хорошо видно по аналитической аппроксимации вероятности безотказной работы и интенсивности отказов подкладок с подушкой.

Среднесетевые сроки службы подкладок с подушкой превышают 300 млн. т брутто.

Повышение интенсивности отказов подкладок с подушкой начинается после пропуска по стрелочному переводу около 500 млн. т брутто. Практически значимое возрастание начинается после прохода по узлу 500-600 млн. т брутто. После достижения этой наработки наблюдается резкое возрастание интенсивности отказов подкладок с подушкой, имеющее характер, близкий к экспоненциальному. Несмотря на то, что фактическая интенсивность отказа подкладок с подушкой даже после наработки свыше 600 млн. т меньше, чем острияков, экспоненциальный характер нарастания интенсивности отказов

свидетельствует об исчерпании ресурса подкладок с подушкой. Использовать их после наработки 500 млн. т брутто не целесообразно.

Влияние осевых нагрузок на отказы подкладок с подушкой стрелочных переводов наиболее массовых конструкций исследовалось по отказам элементов стрелочных переводов на дорогах ОАО «РЖД». Для получения результатов исследованы данные по отказам 180 подкладок с подушкой разных конструкций.

Обработка полученных данных позволила получить корреляционные зависимости для основных показателей надежности подкладок с подушкой, что дало возможность экстраполировать результаты эксплуатации для условий работы при высоких осевых нагрузках.

Наработка до отказа подкладок с подушкой зависит от интенсивности движения поездов и пропущенного тоннажа. Так, средняя наработка до отказа подкладок с подушкой составляет 316,2 млн. т брутто. Средняя наработка до одиночного изъятия из пути подкладок с подушкой за период с 2013 года по 2018 год имела колебания от 300 до 350 млн. т брутто.

Исходя из того, что для сохранения ремонтных схем вероятность безотказной работы и интенсивность отказов на момент замены стрелочных переводов должны быть такие же, как и в настоящее время, получим необходимое увеличение ресурса элементов стрелочных переводов:

$$K_{он} = \frac{T_{он} - T_{суц.}}{T_{суц.}}, \quad (2)$$

где, $K_{он}$ – коэффициент необходимого увеличения ресурса; $T_{суц.}$ – показатель надежности элемента при осевых нагрузках вагонов до 23,5 т/ось;

$T_{он}$ – показатель надежности элемента при планируемой осевой нагрузке.

При повышенных нагрузках следует усилить конструкцию подкладок с подушкой, что целесообразнее всего сделать за счет изменения конструкции и технологии их изготовления.

В третьей главе приводятся результаты динамико-прочностных испытаний подкладок с подушкой различной конструкции.

Испытания подкладок с подушкой проводились в два этапа. На первом этапе испытаниям подвергались подкладки с подушкой, работавшие в составе эксплуатируемого стрелочного перевода.

По результатам этого этапа определялись места расположения наиболее нагруженных подкладок в каждой характерной зоне по условиям работы - передача нагрузки от колеса через рамный рельс, - передача нагрузки от колеса частично через рамный рельс и частично через остряк, - передача нагрузки от колеса через остряк.

На втором этапе в места, определенные по результатам выполнения первого этапа, устанавливались испытываемые подкладки с подушкой, и проводились измерения напряжений в наиболее нагруженных сечениях этих подкладок.

Испытаны подкладки с подушками следующих видов: подкладка с подушкой, изготовленная с использованием технологии горячей штамповки, изготовленная с использованием технологии на заклепках, изготовленная с использованием технологии сварки.

После определения на стрелке места наибольшей нагрузки, приходящейся на подкладку с подушкой (брус №9 от остряка остряка), вместо подкладки с подушкой, изготовленной с использованием технологии сварки, на то же место, для оценки напряжённого состояния, была уложена подкладка с подушкой, изготовленная с использованием технологии горячей штамповки, затем подкладка с подушкой, изготовленная с использованием технологии на заклепках. Образцы осциллограмм напряжений приведены на рисунках 3-5.

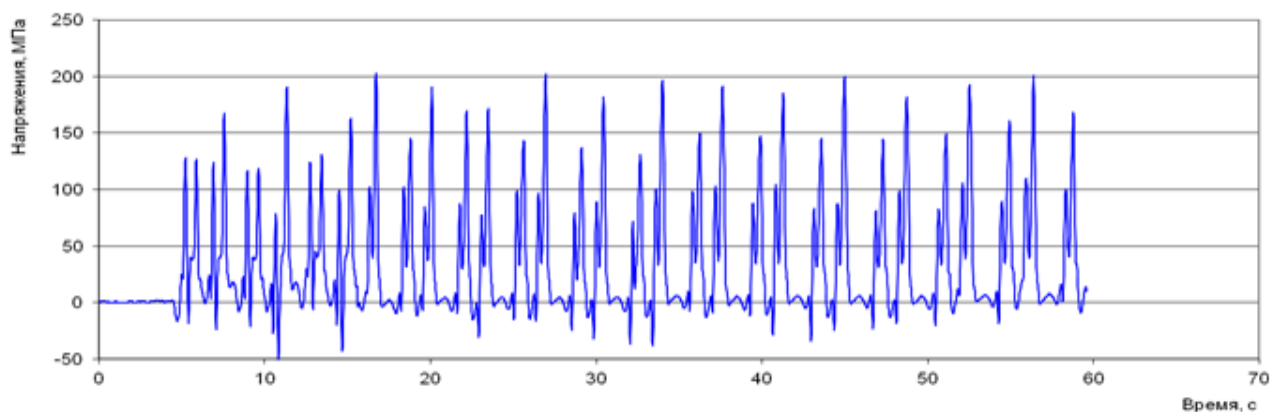


Рисунок 3 – Осциллограмма напряжений в подкладке с подушкой, изготовленной с использованием технологии сварки, на брус № 9

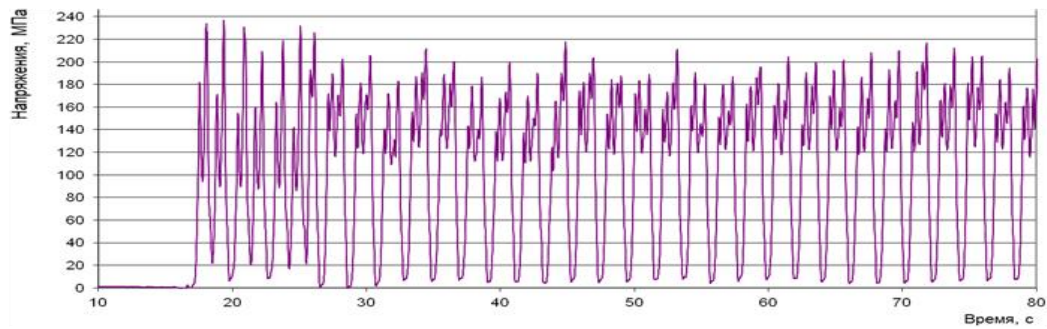


Рисунок 4 - Осциллограмма напряжений в подкладке с подушкой цельной конструкции, изготовленной по технологии горячей штамповки, на брусе №9

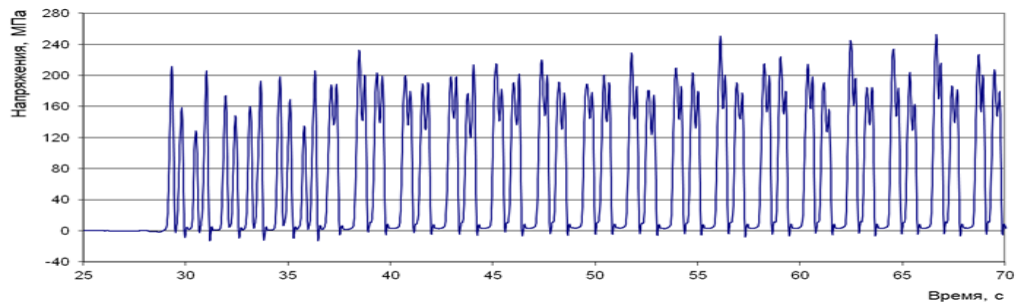


Рисунок 5 - Осциллограмма напряжений в подкладке с подушкой, изготовленной с использованием технологии на заклепках, на брусе №9

Общие результаты измерений напряжений в подкладках с подушкой сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Напряженное состояние стрелочных подкладок с подушкой в составе стрелочных переводов проекта 2750

Вид подкладки с подушкой	Наибольшее напряжение, МПа	Напряжение от затяжки крепежителей, МПа
Подкладка с подушкой, изготовленная с использованием технологии на заклепках	250,0	- 50,0
Подкладка с подушкой цельной конструкции, изготовленная по технологии горячей штамповки	240,0	- 80,0
Подкладка с подушкой, изготовленная с использованием технологии сварки	200,0	- 32,0

Из данных таблицы 1 видно, что из трех видов испытанных подкладок с подушкой наиболее предпочтительными являются подкладки с подушкой, изготовленные с использованием технологии сварки. Наибольшие напряжения в

них составляют 200 МПа, напряжения от затяжки - 32 МПа, средний коэффициент асимметрии циклов нагружения с учетом напряжений от затяжки минус 0,20.

Наихудшие результаты получены для подкладок с подушкой, изготовленных с использованием технологии на заклепках. Наибольшие напряжения составляют 250 МПа, напряжения от затяжки - 50 МПа, средний коэффициент асимметрии циклов нагружения с учетом напряжений от затяжки минус 0,20.

Неблагоприятными являются и условия работы подкладок с подушкой, изготовленные по технологии горячей штамповки. Наибольшие напряжения составляют для этих подкладок 240 МПа, напряжения от затяжки достигают - 80 МПа, средний коэффициент асимметрии циклов нагружения достигает с учетом напряжений от затяжки минус 0,36.

Из испытанных вариантов подкладок с подушкой наилучший результат получен у подкладок с подушкой, изготовленных с использованием технологии сварки.

Для выявления причин зарождения и развития трещин, приводящих к излому всех трех ранее рассмотренных конструкций подкладок с подушкой, целесообразно провести металлографические исследования подкладок с подушкой в сечениях изломов.

В четвертой главе приведены металлографические исследования подкладки с подушкой в сечениях изломов.

Исследование проводилось подкладки с подушкой, изъятой из пути, по излому в характерном сечении.

В микроструктуре сварного шва в исследованных сечениях вне зоны фокуса трещины наблюдаются дефекты в виде пор. В микроструктуре сварного шва в зоне фокуса трещины наблюдается расслоение сварного шва. Микроструктура основного металла подкладки и подушки – феррито-перлит.

Причиной излома является недостаточная циклическая прочность сварного шва.

На основании описанных выше исследований были сделаны следующие выводы: улучшение прочностных и эксплуатационных характеристик подкладок с подушкой может быть достигнуто за счет: применения металла с более высокими

прочностными характеристиками, изменения конструкции подкладок с подушкой за счет увеличения толщины пластины подкладки и (или) введения специальных конструктивных решений (например, разгружающих выкружек), уменьшающих концентрацию напряжений, изменения технологии изготовления подкладок с подушкой, путем ликвидации технологических отверстий и удаления термических узлов от мест расположения концентраторов напряжений.

В пятой главе описана разработка метода расчета подкладки с подушкой и улучшение конструкции подкладки с подушкой.

Для исследования напряженно-деформированного состояния подкладок с подушкой с целью совершенствования ее геометрических размеров был разработан метод, позволяющий подробно рассматривать все особенности геометрии сечений подкладки с подушкой.

Для непосредственных расчетов подкладки с подушкой был использован программный пакет ANSYS, поскольку этот программный комплекс позволяет реализовать модели подкладок с подушкой с необходимой для практических целей точностью.

Расчет напряжений с использованием программного пакета ANSYS для подкладок с подушкой, показал, что наибольшие напряжения для подкладок с подушкой сварной конструкции достигают максимальной величины в 239 МПа, что отличается от полученных в прямых испытаниях напряжений менее, чем на 6,3 %. Таким образом можно сделать вывод: полученные из расчета и прямых испытаний величины напряжений близки по значениям, следовательно, разработанная математическая модель адекватно отражает напряженное состояние подкладок с подушкой в зонах их наибольшей нагруженности.

Сходимость результатов исследования напряжений в подкладках с подушкой непосредственно в пути и на модели позволило поставить задачу проектирования рациональной конструкции подкладки с подушкой за счет изменения ее геометрии с применением разработанной модели.

Оптимизация конструкции подкладки с подушкой должна быть направлена на обеспечение долговечности конструкции подкладок при действующим в эксплуатации нагружении. Однако, при этом требуется соблюдение ряда условий:

- неизменность положения крепёжных элементов $l_{b1x} = l_{b1x0}$, $l_{b2x} = l_{b2x0}$,

$$l_{b1y} = l_{b1y0}, l_{b2y} = l_{b2y0};$$

- неизменность положения высоты подошвы рельса $h_r = h_{r0}$;
- неизменность положения высоты подошвы остряка $h_o = h_{o0}$;
- неизменность габаритов в плане $l_x = l_{x0}, l_y = l_{y0}$.

При этом должны удовлетворяться условия прочности и надёжности:

- обеспечение статической прочности $\sigma_M \leq [\sigma_s]$;
- обеспечение циклической прочности $\sigma_M^{ec} \leq [\sigma_{-1}]$;
- обобщённый коэффициент запаса $\geq 20\% [\sigma_s] = \sigma_{0,2}/1,2, [\sigma_{-1}] = \sigma_{-1}/1,2$.

Здесь l_{bij} – положение i -го крепёжного элемента в направлении j , l_{bij0} – проектные положения тех же элементов; h_r – положение высоты подошвы рельса, h_{r0} – его проектное положение; h_o – положение высоты подошвы остряка, h_{o0} – его проектное положение; l_j – габаритный размер подкладки в направлении j , l_{j0} – ее проектный размер.

Оптимизируемыми параметрами является набор геометрических размеров, не ограниченных вышеописанными условиями:

$$\vec{X} \in \mathbb{R}$$

Целевая функция имеет вид:

$$\vec{X}_o = \operatorname{argmax} n(\vec{X}),$$

где n – коэффициент запаса прочности.

Формально задача совершенствования записывается как:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{X}_o = \operatorname{argmax} n(\vec{X}), \quad \vec{X} \in \mathbb{R} \\ n = \min \left[\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_M}; \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_M^{ec}} \right] \\ n \geq 1,2 \\ l_{b1x} = l_{b1x0} \\ l_{b2x} = l_{b2x0} \\ l_{b1y} = l_{b1y0} \\ l_{b2y} = l_{b2y0} \\ h_r = h_{r0} \\ h_o = h_{o0} \\ l_x = l_{x0} \\ l_y = l_{y0} \end{array} \right.$$

В результате расчетов по разработанной методике был получен усовершенствованный вариант подкладки с подушкой.

Как показали вариантные исследования на основе моделирования, соотношение ширины подушки должно быть пропорционально ширине подкладки. Способ изготовления подкладки с подушкой может быть основан на технологии цельного литья, что позволит избежать концентрации напряжения в местах взаимодействия рамного рельса с подушкой.

Предлагаемая цельнолитая подкладка с подушкой, отличающаяся тем, что она выполнена методом цельного литья, а подушка имеет соотношение a/b , равное 250/200, где a – является длиной подушки, b – шириной подушки, и пропорциональна размеру самой подкладки.

В шестой главе представлено технико-экономическое обоснование эффективности применения подкладки с подушкой цельнолитой конструкции.

В данной работе проведено всестороннее исследование существующих технологий крепления элементов стрелочных переводов. Поэтому важно оценить влияние новой технологии с точки зрения стоимости жизненного цикла за весь срок службы системы (стрелочного перевода).

Стоимость жизненного цикла (СЖЦ) технического средства – ремкомплекта стрелочного перевода с применением подкладок с подушкой цельнолитой конструкции, - включает в себя затраты единовременного и текущего характера за срок службы стрелочного перевода, т.е. расходы на первоначальное приобретение и эксплуатацию в течение жизненного цикла.

С учетом дисконтирования СЖЦ рассчитывается по формуле:

$$\text{СЖЦ (LCC)} = C_{\text{пр}} + \sum_{t=1}^T (Z_{\text{год } t} - L_t) \cdot \alpha_t,$$

где $C_{\text{пр}}$ – цена приобретения ремкомплекта, $Z_{\text{год } t}$ – годовые эксплуатационные расходы по сравниваемым вариантам применения подкладок с подушкой базовой и новой, L_t – ликвидационная стоимость объекта, тыс. руб.

Рассчитанная экономия годовых текущих затрат на замену ремкомплектов стрелочного перевода, обусловленных выходом из строя сравниваемых подкладок с подушкой, составляет 16,61 тыс. руб. в расчете на один ремкомплект или 215,93

млн. руб. для условий сети ОАО «РЖД».

Расчет экономии затрат жизненного цикла также показал эффективность применения новой технологии. Экономия стоимости жизненного цикла стрелочного перевода составит 415,25 тыс. руб. за срок его службы 25 лет.

Заключение

1. Поставлена и решена задача повышения ресурса стрелок стрелочных переводов за счет усовершенствования прикрепления рельсовых элементов стрелки к основанию, а именно подкладки с подушкой.

2. Главным фактором, определяющим эксплуатационные качества подкладок с подушкой, является их конструкция.

3. Выявлены дефекты, которые не включены в «Классификатор дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов».

4. Нарботка до отказа подкладок с подушкой зависит от интенсивности движения поездов и пропущенного тоннажа. Так, средняя наработка до отказа подкладок с подушкой по данным составляет 316,2 млн. т брутто. Средняя наработка до изъятия из пути подкладок с подушкой за период с 2013 года по 2018 год имела колебания от 300 до 350 млн. т брутто.

5. В результате анализа данных по отказам и динамико-прочностных испытаний получен вывод, о том, что серийно выпускаемые подкладки с подушкой всех видов для стрелок имеют неудовлетворительную эксплуатационную стойкость и нуждаются в доработке.

6. По результатам металлографических исследований получено, что причиной излома является недостаточная циклическая прочность сварного шва, кроме того, в микроструктуре металла подкладки в зоне термического влияния сварки наблюдается распространение микротрещин.

7. Изломы подкладок с подушкой имеют общие характерные особенности. Линия излома во всех случаях пересекает место изменения формы подкладки с подушкой, которое представляет собой концентратор механических напряжений и располагается вдоль внутренней кромки рамного рельса.

8. Улучшение прочностных и эксплуатационных характеристик подкладок с подушкой может быть достигнуто за счет: применения металла с более высокими

прочностными характеристиками; изменения конструкции подкладок с подушкой за счет увеличения толщины пластины подкладки и (или) введения специальных конструктивных решений (например, разгружающих выкружек), уменьшающих концентрацию напряжений; изменения технологии изготовления подкладок с подушкой, путем ликвидации технологических отверстий и удаления термических узлов от мест расположения концентраторов напряжений; применения принципиально новых подкладок с подушкой за счет новых технических решений, в частности за счет применения литой конструкции.

9. Для исследования напряженно-деформированного состояния подкладок с подушкой с целью совершенствования ее геометрических размеров разработан метод, позволяющий рассматривать все особенности геометрии сечений и работы под нагрузкой подкладки с подушкой.

Целевая функция совершенствования подкладки с подушкой сформирована исходя из требований увеличения прочности при сохранении системы ограничений.

10. В результате моделирования получен усовершенствованный вариант цельнолитой подкладки с подушкой.

11. Внедрение в эксплуатацию подкладок с подушкой цельнолитой конструкции позволит увеличить их ресурс, а также ресурс ремкомплекта для стрелочного перевода как минимум на 10-15 %. Это и является эконом образующим фактором при оценке эффективности предлагаемой технологии крепления элементов стрелочных переводов.

12. Для регистрации полезной модели, полученной в результате в ходе исследований, получено решение о выдаче патента на полезную модель «Цельнолитая подкладка с подушкой» от Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) №2018140750/11 (067741).

13. Перспективой дальнейшей разработки темы диссертационного исследования является проведение аналогичных работ для других элементов стрелочных переводов. При этом могут быть использованы подходы и методы, разработанные в данной диссертации.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:**а) в рецензируемых научных изданиях ВАК**

1. Глюзберг, Б.Э. Вопросы проектирования технических средств инфраструктуры железных дорог / Б.Э. Глюзберг, Н.В. Зверкова, В.В. Королев, И.В. Шишкина // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – №2. – С. 20-22.
2. Шишкина, И.В. Цельнолитая подкладка с подушкой для стрелочных переводов / И.В. Шишкина // Наука и техника транспорта. – 2019. – №1. – С. 56-64.

б) в изданиях, входящих в международную базу цитирования «Scopus»

3. Loktev, A. Modeling the dynamic behavior of the upper structure of the railway track / A. Loktev, V. Vadim, I. Shishkina, D. Basovsky // Transportation Geotechnics and Geocology (TGG 2017, 17-19 May 2017). – Saint Petersburg: – 2017. – P. 133 – 137.
4. Glusberg, B. Calculation of track component failure caused by the most dangerous defects on change of their design and operational conditions / B. Glusberg, V. Korolev, I. Shishkina, A. Loktev, J. Shukurov, P. Geluh, D. Loktev // TransSiberia 2018 (MATEC Web of Conferences). – 2018. – № 239. – Режим доступа: doi.org/10.1051/matecconf/201823901054
5. Loktev, A. High frequency vibrations in the elements of the rolling stock on the railway bridges / A. Loktev, V. Korolev, I. Shishkina // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies (Materials Science and Engineering). – 2018 – № 463 – Режим доступа: [doi:10.1088/1757-899X/463/3/032019](https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032019)

в) в других изданиях

6. Шишкина, И.В. Дефекты элементов стрелочных переводов подкладок с подушками и подкладок с упорами / И.В. Шишкина // Конструкция и техническое обслуживание железнодорожного пути при организации тяжеловесного движения (ПГУПС, 18 ноября 2016). – СПб.: – 2017. – С. 188 – 192.

7. Королев, В.В. Новые конструкции пути рельсошпальной решетки для наземного электрического рельсового транспорта и метрополитена / В.В. Королев, С.С. Князев, И.В. Шишкина // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного пути: Межвузовский сборник научных трудов. – 2017. – С. 78 - 84
8. Шишкина, И.В. Этапы проектирования технических средств инфраструктуры для российских железных дорог / И.В. Шишкина, Н.В. Зверкова, Л.А. Елесина // Студент инновации России. – 2017. – №2. – С. 12 – 17.
9. Шишкина, И.В. Система учета дефектов подкладок с подушкой и подкладок с упорами / И.В. Шишкина // Студент инновации России. – 2017. – №3. – С. 50 – 56.
10. Шишкина, И.В. Применение стрелочных переводов с непрерывной поверхностью катания при повышении осевых нагрузок и скоростей движения поездов / И.В. Шишкина, Н.В. Зверкова, Л.А. Елесина // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство (РУТ (МИИТ) 5 - 6 апреля 2017). – М.: – 2018. – С. 127-128.
11. Глюзберг, Б.Э. Применение методов моделирования для определения скоростей движения по участкам пути, на которых расположены комбинации стрелочных переводов / Б.Э. Глюзберг, А.А. Локтев, Д.А. Локтев, П.А. Гелюх, В.В. Королев, И.В. Шишкина // История и перспективы развития транспорта на севере России – Ярославль – 2018. – №1. – С. 73-78.

Шишкина Ирина Викторовна

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА СТРЕЛОК СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ ЗА
СЧЕТ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРИКРЕПЛЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛКИ К ОСНОВАНИЮ**

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог
АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать

Заказ №

Формат 60x90/16

Усл. печ. л. – 1,5

Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9, РУТ (МИИТ)