

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

На правах рукописи

Трегубчак Павел Владимирович

**РАЗРАБОТКА КРЕСТОВИН СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ
ДЛЯ УСЛОВИЙ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО И ИНТЕНСИВНОГО ДВИЖЕНИЯ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Глюзберг Борис Эйнихович

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ КРЕСТОВИН СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ	12
1.1 Классификация крестовин стрелочных переводов	13
1.2 Зарубежные крестовины для тяжеловесного движения.....	14
1.3 Конструкции отечественных крестовин, применяемых для условий тяжеловесного и интенсивного движения	18
Выводы по первой главе	26
2 ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ КРЕСТОВИН С НЕПОДВИЖНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ. 27	
2.1 Дефекты крестовин	27
2.1.1 Классификация дефектов крестовин	27
2.1.2 Новые дефекты крестовин.....	29
2.2 Методика анализа показателей эксплуатационной надежности крестовин	33
2.3 Статистика отказов крестовин	35
2.4 Распределение отказов крестовин по видам дефектов (причинам отказов)	39
Выводы по второй главе	40
3. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА КРЕСТОВИН	42
3.1 Применение новых и модифицированных материалов	42
3.2 Упрочнение рабочих поверхностей крестовин	48
3.2.1 Рекристаллизованные и рекристаллизованные с последующим упрочнением энергией взрывной волны крестовины	49
3.2.2 Нанесение износостойких покрытий газотермическим методом	49
3.2.3 Механические методы упрочнения крестовин	50
3.2.4 Упрочнение энергией взрывной волны	51
3.3 Наплавка крестовин	52
3.4 Конструкционные методы повышения ресурса крестовин	53
Выводы по третьей главе.....	55

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА МОНОБЛОЧНЫХ КРЕСТОВИН, УЛУЧШЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОНОБЛОЧНЫХ КРЕСТОВИН	56
4.1 Предпосылки для построения моделей крестовины	56
4.2 Описание физико-механических характеристик материалов, исходные данные и граничные условия.....	64
4.3 Подготовка исходных данных для многоциклового усталостного анализа	65
4.4 Моделирование вариантов конструкции крестовины	68
4.5 Результаты численного моделирования	75
Выводы по четвертой главе.....	77
5 ДИНАМИКО-ПРОЧНОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОНОБЛОЧНЫХ КРЕСТОВИН	78
5.1 Методика проведения испытаний	78
5.2 Напряжённое состояние элементов крестовинного узла	82
5.2.1 Напряжённое состояние крестовины	82
5.2.2 Напряжённое состояние контррельса	84
5.2.3 Напряжённое состояние элементов креплений.....	85
5.3 Упругие изменения ширины колеи	86
Выводы по пятой главе.....	87
6 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КРЕСТОВИН	88
6.1 Эксплуатационные испытания моноблочных крестовин	88
6.1.1 Результаты эксплуатационных испытаний моноблочной крестовины второй конструкции в составе стрелочного перевода.....	90
6.1.2 Результаты эксплуатационных испытаний моноблочной крестовины третьей конструкции в составе стрелочного перевода.....	93
6.2 Эксплуатационные испытания крестовин, упрочненных новыми ленточными взрывными зарядами.....	96
Выводы по шестой главе	103
7 ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛА КРЕСТОВИН	105
7.1 Выявление причин зарождения и развития трещин, приводящих к выходу из строя крестовин	106

7.1.1 Характеристика объекта исследования.....	106
7.1.2 Определение химического состава.....	108
7.1.3 Определение механических свойств	108
7.1.4 Определение твердости	109
7.1.5 Макроструктурные исследования	109
7.1.6 Микроструктурные исследования	111
7.2 Исследование металла крестовин, упрочненных энергией взрывной волны .	116
7.2.1 Характеристика объекта и методы проведения исследований	116
7.2.2 Определение химического состава.....	117
7.2.3 Определение механических свойств	118
7.2.4 Определение твердости	118
7.2.5 Макроструктурные исследования	119
7.2.6 Микроструктурные исследования	119
Выводы по седьмой главе.....	121
8 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МОНОБЛОЧНОЙ КРЕСТОВИНЫ ПРЕДЛОЖЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ	122
8.1 Расчет экономии годовых текущих расходов при использовании моноблочных крестовин.....	124
8.2 Расчет стоимости жизненного цикла стрелочных переводов с моноблочными крестовинами	127
8.2.1 Условия достижения экономической эффективности стрелочного перевода как системы.....	127
8.2.2. Определение экономической эффективности.....	130
8.2.3 Результаты расчета стоимости жизненного цикла стрелочных переводов с моноблочными крестовинами.....	135
Выводы по восьмой главе.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования обусловлена потребностями ускоренного развития инфраструктуры железнодорожного транспорта, имеющей стратегическое значение для нашей страны и являющейся «кровеносной системой» экономики.

Важнейшей составляющей стратегии развития ОАО «РЖД» является увеличение провозной способности дорог и снижение затрат на содержание инфраструктуры [1; 2]. В первую очередь это относится к дорогам восточного региона страны – Западно-Сибирской, Восточно-Сибирской, БАМу и Транссибу.

В настоящее время на инфраструктуре ОАО «РЖД» эксплуатируется около 159 тысяч стрелочных переводов, из них на главных путях более 53 тысяч. Используется несколько десятков видов стрелочной продукции. Их конструкции и технология применения должны отвечать потребностям перевозочного процесса и иметь возможность реализации перспективных планов развития инфраструктуры [3].

На сегодняшний день стрелочное хозяйство российских железных дорог в целом обеспечивает потребности перевозочного процесса, однако в условиях тяжеловесного движения ресурс основных элементов серийно выпускаемых стрелочных переводов недостаточен. Это приводит к повышенным затратам в эксплуатации и создает препятствия для подготовки стрелочного хозяйства к решению перспективных задач по увеличению объемов перевозок [4].

Проблемам стрелочного хозяйства уделяется большое внимание как в отечественной практике, так и за рубежом [5] ввиду того, что стрелочная продукция оказывает существенное влияние на пропускную способность железных дорог, при этом являясь наиболее дорогим и технически сложным элементом инфраструктуры железных дорог.

Разработка новых, модернизация существующих стрелочных переводов и улучшение их эксплуатационных характеристик, а также проектирование элементной базы для создания стрелочных переводов нового поколения ведутся с

учетом отечественного и зарубежного опыта при участии профильных организаций, компетентных в области проектирования и проведения сложных расчетов элементов инфраструктуры, а также предприятий-производителей таких элементов, как правило имеющих собственные конструкторские подразделения [6].

В настоящее время стоит цель повышения эффективности инфраструктуры за счет создания конструкции пути с ресурсом 2,5 млрд т брутто пропущенного груза. Создание такого пути невозможно без соответствующей ему стрелочной продукции, отвечающей условиям эксплуатации и сферам рационального применения таких конструкций.

С целью повышения ресурса и надежности стрелочных переводов, а также их отдельных элементов ведутся поиски более прочных, более совершенных конструкций. В особенности это касается крестовин, срок службы которых в силу значительных динамических нагрузок, воспринимаемых от колес подвижного состава и конструктивных особенностей изделия, примерно в 2 – 3 раза меньше срока службы других элементов стрелочных переводов и значительно меньше сроков службы всей конструкции верхнего строения пути. Совершенствование конструкции крестовин позволит снизить затраты на эксплуатацию стрелочных переводов за счет увеличения ресурса его основного элемента.

Исследования, представленные в настоящей работе направлены в первую очередь на повышение ресурсных показателей железнодорожных крестовин с неподвижными элементами.

Степень разработанности темы исследования.

Многолетние исследования и опытно-производственные работы по разработке новой, совершенствованию и модернизации серийной стрелочной продукции проводились во Всероссийском научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) под руководством докторов технических наук Путри Н.Н., Желнина Г.Г., кандидатов технических наук Тейтеля А.М., Крысанова Л.Г., инженером Донцом В.Г.; в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, ранее ЛИИЖТ) под руководством докторов технических наук

Амелина С.В., Яковлева В.Ф., Смирнова М.П., кандидатов технических наук Абросимова В.И., Фролова Л.Н.; в Днепропетровском институте инженеров транспорта (ДИИТ) под руководством профессоров Фришмана М.А., Рыбкина В.В. и Дановича В.Д.

Опытно-конструкторские работы по разработке стрелочной продукции проводились в Проектно-технологическом конструкторском бюро по пути и путевым машинам (ПТКБ ЦП) под руководством Елсакова Н.Н., Петрова Ю.Н., Ткаченко В.Н., Гучкова А.К. и Сурина С.О. Работы по повышению технологичности изделий и изготовлению опытных образцов производились сотрудниками Новосибирского стрелочного завода (НСЗ), Муромского стрелочного завода (МСЗ) и Днепропетровского стрелочного завода (ДСЗ).

До настоящего времени проектирование железнодорожных крестовин и сердечников из высокомарганцевистой стали производилось на основе опыта конструкторов и эксплуатации соответствующих конструкций, а также упрощенных расчетных схем отдельных элементов. При этом вводимые в расчет упрощения не позволяют с достаточной точностью описать поведение изделия.

Последний раз такие работы с существенным изменением геометрии литой части крестовины проводились в 1984 г. в рамках разработки крестовин пониженной металлоемкости. В условиях Экспериментального кольца ВНИИЖТ испытывались крестовины типа Р65 марки 1/11 конструкции совместной разработки ДИИТ – ЛИИЖТ – ДСЗ. Основу методики исследований составляли прямые испытания натуральных образцов крестовин. Испытания проводились в три этапа. После каждого этапа проводились доработки конструкции, основывавшиеся на результатах полигонных испытаний.

По результатам данных работ так и не удалось разработать конструкцию облегченных крестовин, удовлетворяющую требованиям по надежности и отказоустойчивости изделия, соответствовавшую уровню серийно выпускаемых крестовин [7].

С целью разработки более совершенных конструкций крестовин, а также сокращения времени постановки продукции на производство [8] необходимо

создание метода расчета, позволяющего проводить моделирование напряженно-деформированного состояния и определять коэффициент запаса на усталостную прочность. Наличие такого метода позволит использовать подходы оптимизационного проектирования при разработке железнодорожных крестовин [9].

Цель диссертационной работы заключается в разработке метода, получения эффективных конструкторских решений по проектированию моноблочных крестовин как для серийно изготавливаемых в настоящее время стрелочных переводов, так и для перспективных разработок. Этот метод должен учитывать современные подходы в проектировании и обеспечивать минимизацию затрат при реализации разработок. Полученные решения должны максимально сохранять имеющиеся технологические приемы, применяемые при изготовлении стрелочной продукции, на российских стрелочных заводах, а также включать в себя стандартизированные и унифицированные элементы.

Эти конструкторские решения должны обеспечивать безопасность движения поездов, способствовать повышению технических характеристик стрелочных переводов, а также экономической эффективности от их применения в условиях тяжеловесного и интенсивного движения.

Задачами исследования являются: анализ причин отказов крестовин в эксплуатации; изучение методов повышения ресурса крестовин; разработка методов расчета моноблочных крестовин и получение на их основе нового рационального технического решения; динамико-прочностные и эксплуатационные испытания; металлографические исследования моноблочных крестовин различных конструкций в сечениях, в которых возникают трещины с целью определения причин появления и развития дефектов; формирование предложений по применению разработанного варианта; определение рационального метода упрочения поверхности катания крестовин из высокомарганцовистой стали, а также подтверждение эффективности разработанных методов расчета.

Научная новизна состоит в том, что в ходе работы впервые выполнены теоретические и эмпирические исследования по оценке влияния конструкции моноблочной крестовины стрелочного перевода на их прочностные и ресурсные показатели.

Получены результаты сравнительных эксплуатационных испытаний моноблочных крестовин различных конструкций в условиях реальной эксплуатации с учетом особенностей их конструкции и технологичности.

Построена вероятностная модель работы крестовин, хорошо согласующаяся с работой изделий на инфраструктуре российских железных дорог. Данная модель позволяет рассчитывать вероятность безотказной работы крестовин из высокомарганцовистой стали с неподвижным сердечником в зависимости от объема пропущенного груза под действием поездной нагрузки.

В ходе исследований были выявлены новые виды дефектов, вызывающие отказы крестовин.

Разработана и поставлена на производство первая российская моноблочная крестовина с четырьмя приварными рельсовыми окончаниями для работы в условиях тяжеловесного и интенсивного движения.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработанном методическом подходе, основанном на комплексном применении метаматематического моделирования и эмпирических исследований, позволяющим получить эффективные технические решения по разработке моноблочных крестовин стрелочных переводов нового поколения, работающих в условиях тяжеловесного и интенсивного движения.

Представленный метод определения прочности конструкции крестовин с цельнолитым блоком сердечника с усовиками и приварными рельсовыми окончаниями позволяет значительно сократить время разработки и постановки на производство моноблочных крестовин, а также исключить затраты на проведение работ по постановке на производство моноблочных крестовин, не отвечающих предъявляемым к ним требованиям по надежности конструкции.

Методология исследования включает в себя методы:

- метод математического моделирования, с помощью которого была получена усовершенствованная конструкция моноблочной крестовины, с повышенными ресурсными показателями изделия.
- тензометрический метод исследования напряженно-деформированного состояния крестовин;
- эксплуатационные испытания крестовин, позволившие определить их ресурсные показатели;
- металлографический метод исследования, с помощью которого были выявлены причины появления трещин в отливках моноблочных крестовин, а также подтверждено достижение нормативных показателей качества упрочнения крестовин энергией взрывной волны с применением новых взрывчатых материалов.

Положения, выносимые на защиту.

Метод, основанный на комплексном применении метаматематического моделирования и эмпирических исследований, позволяющий получить эффективные технические решения по разработке моноблочных крестовин стрелочных переводов нового поколения, работающих в условиях тяжеловесного и интенсивного движения.

Технические решения по моноблочным крестовинам стрелочных переводов для работы в условиях тяжеловесного и интенсивного движения, обладающим повышенным ресурсом.

Степень достоверности и апробации результатов.

Достоверность результатов исследования обусловлена сходимостью результатов математического моделирования с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований и эксплуатационных испытаний.

Разработанная в рамках выполненной работы конструкция крестовины апробирована в составе стрелочных переводов проектов Н01.001.0000.00 и Н01.004.0000.00 принятых к серийному производству.

В настоящее время моноблочные крестовины включены в состав стрелочных переводов для условий тяжеловесного и интенсивного движения, освоены в серийном производстве и сертифицированы на соответствие требованиям Технического регламента Таможенного союза «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» (ТР ТС 003/2011).

Результаты, изложенные в диссертационной работе, были приняты для использования при разработке новых конструкций крестовин в акционерном обществе «Новосибирский стрелочный завод».

Основные положения и результаты, изложенные в диссертационной работе, были доложены и одобрены специалистами на научно-технических совещаниях кафедры «Путь и путевое хозяйство» института пути, строительства и сооружений Российского Университета транспорта (РУТ (МИИТ), научного центра "Инфраструктура" АО "ВНИИЖТ", а также на четырех национальных и международных конференциях.

1 СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ КРЕСТОВИН СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

Стратегией научно-технологического развития ОАО «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга), разработанной на основании положений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642, Стратегии развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года, утвержденной советом директоров ОАО «РЖД» от 23 декабря 2013 г. № 19, а также с учетом других документов стратегического планирования, определяющих развитие железнодорожного транспорта предусмотрено повышение провозной способности железных дорог с обеспечением бесперебойности и безопасности движения поездов

Увеличение пропускной и провозной способности без строительства дополнительных линий возможно несколькими способами: повышение весовых норм поездов; повышение осевых нагрузок; повышение скоростей движения. Для их реализации необходимо развитие и совершенствование пути, а также его отдельных элементов.

Обновление железнодорожного пути с применением новых технологий, равноресурсных, малообслуживаемых элементов и конструкций, обеспечивающих увеличение срока службы, а также снижение стоимости его жизненного цикла, является одной из ключевых инициатив стратегического развития железных дорог России. Важную роль в этом играет стрелочное хозяйство инфраструктуры, которое должно обеспечивать выполнение требований безопасности, надежности, соответствовать системе обслуживания и учитывать применяемые виды подвижного состава.

В настоящее время научно-исследовательские и опытно конструкторские работы в области разработки новых стрелочных переводов и их элементов, а также по совершенствованию методов проектирования и технологии производства ведутся специалистами отдела «Устройства верхнего строения пути и стрелочных

переводов» научного центра «Инфраструктура» АО «ВНИИЖТ», кафедры «Транспортное строительство» РУТ МИИТ, акционерного общества «Новосибирский стрелочный завод» (АО «НСЗ») и акционерного общества «Муромский стрелочный завод» (АО «МСЗ»). Одними из наиболее актуальных направлений являются разработки, направленные на повышение ресурса и надежности стрелочных переводов и их элементов, в частности крестовин [10; 11].

1.1 Классификация крестовин стрелочных переводов

Крестовины с неподвижным сердечником обладают наименьшим ресурсом, и являются одним из самых нагруженных узлов стрелочного перевода, так как работают в условиях повышенных динамических воздействий. На Российских железных дорогах конструкции таких крестовин наиболее многочисленны. Они применяются в стрелочных переводах, косоугольных глухих пересечениях и перекрестных съездах.

Крестовины подразделяют:

- а) по типам (соответствует типу стыкуемых рельсов);
- б) по конструкции, определяемой геометрией основного пути (обыкновенные, криволинейные);
- в) по конструкции, определяемой местом крестовины в составе устройств соединений и пересечений железнодорожных путей;
- г) по конструктивному исполнению сердечника (с неподвижными элементами, с непрерывной поверхностью катания)
- д) по углу пересечения или по маркам, соответствующим тангенсу угла пересечения, выражаемым как отношение ширины сердечника к его длине (27° ; 45° ; $1/6$; $1/9$; $1/11$; $2/9$; $2/11$ и др.);
- е) по виду конструкции крестовины определяемому конструктивным исполнением усювиков, сердечников, контррельсов, наличием рельсовых окончаний (сборные, моноблочные, цельнолитые и т.д.);

ж) по конструктивному исполнению сочленения сердечника и усювиков (врезка, косой стык и др.);

и) по виду подрельсового основания (деревянное; железобетонное; металлическое и др.) для укладки крестовин;

к) по упрочнению (упрочненные, неупрочненные) [12].

1.2 Зарубежные крестовины для тяжеловесного движения

В мировой практике в проектах стрелочных переводов для тяжеловесного движения применяют конструкции крестовин с оптимизированной геометрией поверхности катания, которая позволяет распределять контактные напряжения и снизить их величину, тем самым существенно продлить срок службы крестовины. К таким крестовинам относятся:

– Крестовины типа «рыбка» без передней и задней врезки (сочленение по косому переднему и заднему стыку). При этом усювик прилегает к сердечнику по поверхностям, находящимся под углом друг к другу (Рисунок 1.1 а).

– Крестовины с цельнолитым блоком сердечника с усювиками и приварными рельсовыми окончаниями (моноблочная крестовина). Перекатывание колес с рельсовой на литую часть таких крестовин происходит за счет применения приварных рельсов, как в переднем, так и в заднем торце крестовины (Рисунок 1.1 б).

В большей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к конструкциям, работающим под воздействием высоких нагрузок моноблочные крестовины. К преимуществам данных крестовин можно отнести отсутствие болтовых соединений рельсовых усювиков и сердечника из высокомарганцовистой стали, что позволяет обеспечить более высокую жесткость по сравнению со сборными крестовинами и равномерность её распределения по сечениям, а также отсутствие необходимости подтяжки болтов в процессе эксплуатации.

Цельнолитой блок сердечника дает широкие возможности по оптимизации геометрии поверхностей катания крестовины [3].



а)



б)

Рисунок 1.1 – Конструкции крестовин для тяжеловесного движения: а) крестовина типа «рыбка»; б) моноблочная крестовина

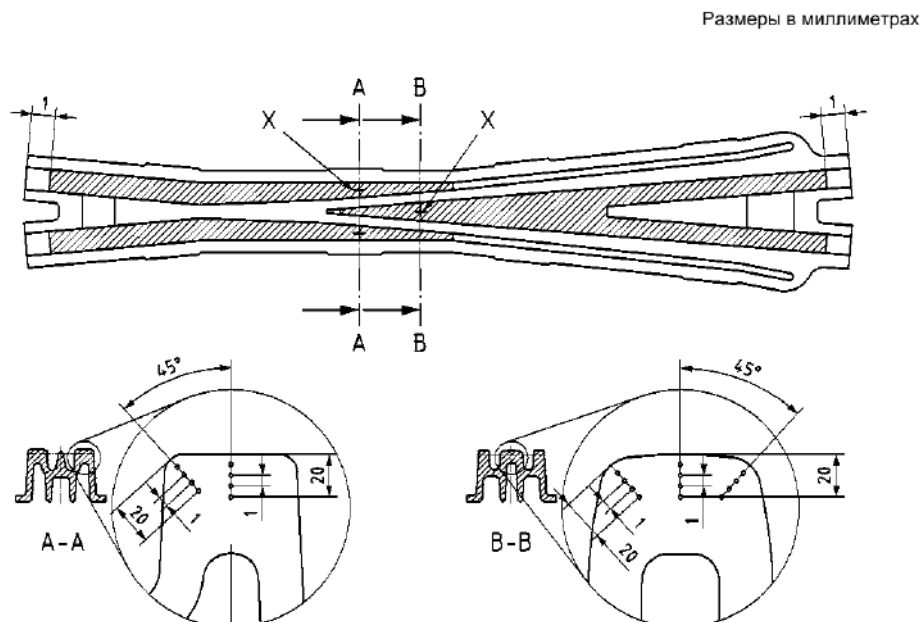
Благодаря конструктивным особенностям и способности к самоупрочнению в процессе работы, а также высокой износостойкости стали 110Г13Л крестовины имеют большой срок службы, высокую надежность и способны воспринимать

высокие осевые нагрузки. Упрочнение рабочих поверхностей крестовины энергией взрывной волны значительно повышает ее эксплуатационные характеристики.

По данным компании Vossloh Cogifer упрочнение крестовин энергией взрывной волны позволяет увеличить осевые нагрузки до 40 %, снизить затраты на техническое обслуживание до 50 % [13]. Российский опыт эксплуатации упрочненных энергией взрыва крестовин показывает увеличение ресурсных показателей до 30% для крестовин массовых конструкций.

По методу реализации и достигаемым характеристикам применяемая в РФ технология упрочнения взрывом не имеет мировых аналогов, и позволяет значительно увеличить износостойкость и ресурс крестовин стрелочных переводов. Данная технология упрочнения производится в условиях цеха с применением специально разработанных и изготовленных взрывных камер.

При этом крестовины производства Vossloh Cogifer упрочняются почти по всей поверхности катания, а глубина упрочненного слоя составляет 20 мм в соответствии с EN 15689:2009 (Рисунок 1.2) [14]. Глубина упрочненного слоя крестовин производства АО «НСЗ» составляет 30 мм.



1 – участок на поверхности катания без упрочнения (допускается до 75 мм от торца крестовины); X – место контроля твердости каждой упрочненной крестовины

Рисунок 1.2 – Схема упрочнения поверхности катания крестовин из высокомарганцовистой стали в соответствии с EN 15689:2009

На особо грузонапряженных участках пути за рубежом наряду с моноблочными крестовинами рекомендуются к применению крестовины с непрерывной поверхностью катания (Рисунок 1.3). Крестовины с непрерывной поверхностью катания для тяжеловесного движения по данным производителей, компаний Voestalpine и Vossloh Cogifer, способны работать при осевых нагрузках более 40 тонн [13; 15].



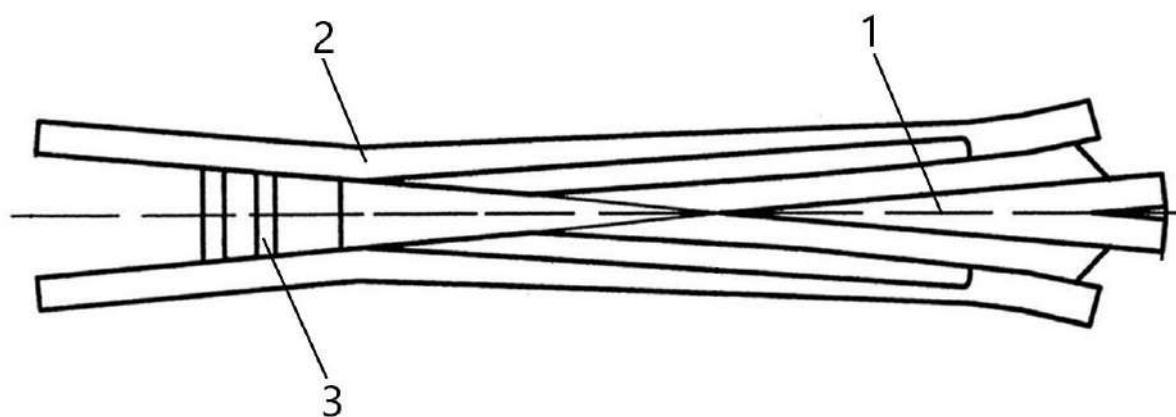
Рисунок 1.3 – Конструкции крестовин с непрерывной поверхностью катания для особо грузонапряженных участков пути

За счет отсутствия вредного пространства крестовины с непрерывной поверхностью катания подвержены меньшему динамическому воздействию, имеют больший ресурс, сопоставимый с ресурсом стрелки. При этом такие крестовины имеют высокую стоимость, сложнее в изготовлении и при эксплуатации в сравнении с крестовинами с неподвижным сердечником, требуют более высокой квалификации персонала. Кроме того, такие крестовины требуют большого внимания при эксплуатации в зимних условиях, особенно на снегозаносимых участках инфраструктуры. Помимо этого, применение стрелочных переводов, имеющих крестовины с непрерывной поверхностью катания, требует реконструкции систем СЦБ станций, что не всегда возможно и целесообразно [16; 17].

В силу этих и других особенностей крестовин с непрерывной поверхностью катания, их применение не решает проблем стрелочного хозяйства в области повышения ресурса крестовин для массовой продукции, применяемой на российских железных дорогах.

1.3 Конструкции отечественных крестовин, применяемых для условий тяжеловесного и интенсивного движения

Острые крестовины типа Р65 марки 1/11 сборные с рельсовыми усовиками и литым сердечником из высокомарганцовистой стали без передней врезки (сочленение по косому переднему стыку) (Рисунок 1.4) на железобетонном основании являются основными, применяемыми в конструкции стрелочных переводов, предназначенных для работы на путях 1 и 2 классов ОАО «РЖД».



1 – сердечник; 2 – рельсовый усовик; 3 – передний вкладыш

Рисунок 1.4 – Сборная крестовина с литым сердечником без передней врезки (сочленение по косому переднему стыку)

Вкладышно-накладочное окончание заднего вылета на протяжении длительного времени являлось наиболее распространенным конструктивным элементом, применявшимся в крестовинах всех типов и марок (Рисунок 1.5).

Несмотря на большой опыт производства и эксплуатации, крестовины с вкладышно-накладочным окончанием заднего вылета имеют недостатки, связанные с высокой трудоемкостью соединения хвостовой части сердечника и примыкающих рельсов. В зависимости от фактической геометрии рельсового проката, имеющего достаточно широкие допуски на размеры, в процессе сборки данного узла приходится подгонять размеры вкладыша по месту. Такая пригонка осуществляется за счет наплавки и съема лишнего металла обточкой абразивным кругом, что также предполагает наличие на месте проведения работ соответствующего оборудования.

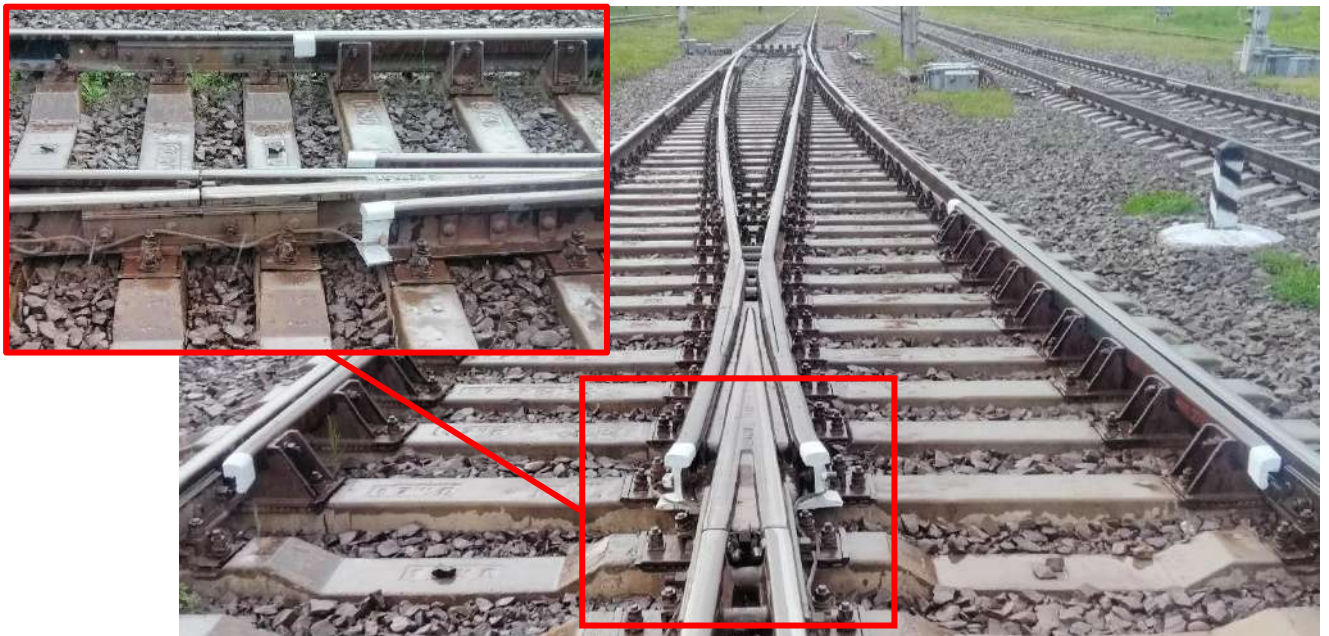


Рисунок 1.5 – Сборная крестовина проекта 2768 с вкладышно-накладочным окончанием заднего вылета

Кроме того, соединение хвостовой части сердечника с рельсом с помощью болтов через накладки создает резкий перепад вертикальной жесткости и вызывает местный износ поверхности катания концов сердечника крестовины и примыкающего рельса [18; 19].

Внедрение в производство на стрелочных задах стыковой электроконтактной сварки рельсовой и высокомарганцовистой стали через промежуточный слой хромоникелевой стали, позволяет изготавливать крестовины с приваренными к их

одному или двум торцам рельсовыми окончаниями и исключить вышеуказанные недостатки, характерные для крестовин с вкладышно-накладочным окончанием заднего вылета.

В настоящее время, на дорогах ОАО «РЖД» основным стрелочным переводом, предназначенным для работы в тяжелых эксплуатационных условиях, является стрелочный перевод типа Р65 марки 1/11 проекта 2750 в состав которого входит сборная крестовина с рельсовыми усовиками и укороченным литым сердечником (из высокомарганцовистой стали) с приваренными к его заднему торцу рельсовыми окончаниями (Рисунок 1.6). Конструкция перевода позволяет использовать его в составе бесстыкового пути, в том числе за счет применения сварной крестовины.



Рисунок 1.6 – Сборная крестовина с приварными рельсовыми окончаниями стрелочного перевода проекта 2750

Переводы этого проекта были разработаны в 1998 году, и успешно зарекомендовали себя на российских железных дорогах. С позиции развития конструкций стрелочной продукции они имеют устаревшую элементную базу и

нуждаются в замене на конструкции, построенные на современной элементной базе.

В июне 2015 года на месте эксплуатируемого стрелочного перевода № 111 на II-м главном пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» для проведения полигонных испытаний была уложена первая моноблочная крестовина с четырьмя приварными рельсовыми окончаниями, произведенная в РФ (Рисунок 1.7). Испытания проводились в составе модернизированного стрелочного перевода типа Р65 марки 1/11 проекта Н01.001 производства АО «НСЗ».



Рисунок 1.7 – Крестовина моноблочной конструкции с четырьмя приварными рельсовыми окончаниями в составе стрелочного перевода типа Р65 марки 1/11 проекта Н01.001

Наряду с подтверждением соответствия требованиям нормативной документации и требованиям норм безопасности при испытаниях предусматривалась также оценка эксплуатационных качеств и ресурса изделия. Крестовина вышла из строя пропустив 86,4 млн т брутто груза из-за трещины литой части сердечника в районе переднего вылета цельнолитого блока моноблочной крестовины (Рисунок 1.8) и улавливающего желоба (Рисунок 1.9).

При проведении полигонных испытаний моноблочной крестовины ширина колеи и желобов на стрелочном переводе находились в пределах регламентируемых норм и допусков, отклонений критического расстояния между элементами крестовины и контррельсового узла превышающих установленные нормы не отмечено. Отказов в работе креплений за время проведения испытаний не наблюдалось. Износ (горизонтальный и вертикальный) поверхности катания не превышал 1 мм.



Рисунок 1.8 – Трещина в районе переднего вылета цельнолитого блока моноблочной крестовины



а)



б)

Рисунок 1.9 – Трещины литой части сердечника в районе улавливающего желоба моноблочной конструкции: а) слева; б) справа

Исследования образцов металла, вырезанных из отливки крестовины, показали отсутствие литейного характера образования выявленных дефектов. Развитие трещины началось от внутренней поверхности крестовины. Очевидно, что причиной образования трещин, при эксплуатации моноблочной крестовины являлись недостатки конструкции.

Цель настоящей работы заключается в разработке метода, получения эффективных конструкторских решений по проектированию моноблочных крестовин как для серийно изготавливаемых в настоящее время стрелочных переводов, так и для перспективных разработок. Этот метод должен учитывать современные подходы в проектировании и обеспечивать минимизацию затрат при реализации разработок. Полученные решения должны максимально сохранять имеющиеся технологические приемы, применяемые при изготовлении стрелочной продукции, на российских стрелочных заводах, а также включать в себя стандартизированные и унифицированные элементы [20].

Эти конструкторские решения должны обеспечивать безопасность движения поездов, способствовать повышению технических характеристик стрелочных переводов, а также экономической эффективности от их применения в условиях тяжеловесного и интенсивного движения.

Достижение цели включает в себя решение ряда задач, укрупненно представленных на Рисунке 1.10, включающих в себя:

- рассмотрение конструкционных и технологических методов повышения срока службы крестовин;
- анализ сроков службы крестовин стрелочных переводов и причин их отказов;
- увеличение ресурса за счет применения упрочнения рабочих поверхностей крестовин;
- разработка методов расчета моноблочных крестовин и получение на их основе нового рационального технического решения;
- подтверждение эффективности разработанных методов расчета;

- сравнительные эксплуатационные и динамико-прочностные испытания моноблочных крестовин;
- металлографические исследования моноблочных крестовин в сечениях, в которых при полигонных испытаниях возникают изломы, анализ причин возникновения;
- предложения по использованию разработанных методов расчета.



Рисунок 1.10 – Задачи, решаемые для разработки метода, получения эффективных конструкторских решений по проектированию моноблочных крестовин

Выводы по первой главе

1 Зарубежный опыт эксплуатации показал, что моноблочные крестовины и крестовины с непрерывной поверхностью катания в большей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к конструкциям, работающим под воздействием высоких нагрузок.

2 В отечественной практике применение крестовин с непрерывной поверхностью катания не решает всех проблем стрелочного хозяйства в области повышения ресурса крестовин для массовой продукции, применяемой на российских железных дорогах.

3 Эксплуатационные испытания первой моноблочной крестовины с четырьмя приварными рельсовыми окончаниями, изготовленной в РФ, выявили низкие ресурсные показатели, связанные с выходом ее из строя из-за трещин в литой части сердечника.

2 ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ КРЕСТОВИН С НЕПОДВИЖНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

2.1 Дефекты крестовин

2.1.1 Классификация дефектов крестовин

Крестовина в силу конструкционных особенностей, связанных с наличием вредного пространства, различного вида соединений деталей из углеродистого и высокомарганцовистого литья, а также рельсового проката является наиболее динамически нагруженным элементом стрелочного перевода. При этом в отличие от остальных элементов стрелочного перевода (рамные рельсы, острия, рельсы крестовины и соединительных путей) на которые приходится только часть нагрузки, от общего количества пропущенного по переводу груза, пропорциональная доли движения по основному и боковому пути, на крестовину приходится 100% такой нагрузки.

Дефекты крестовин, выявляемые на сети железных дорог России, подвергаются исследованиям и систематизации, результаты которых отражены в «Классификаторе дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов», последняя версия которого была утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 27.09.2019 № 2143р и введен в действие с 1 октября 2019 года. В разделе «Дефекты крестовин» отражена следующая информация:

- наименование дефектов и повреждений крестовин;
- основные причины появления и развития дефектов;
- расположение дефектов;
- обозначение дефектов;
- изображение дефектов, в том числе схематическое;
- способ выявления дефектов

- указания по эксплуатации крестовин в зависимости от характера дефекта, группы и класса пути [21].

В действующей редакции классификатора дефектов выделено 17 дефектов, относящихся к крестовинам с неподвижным сердечником. Все дефекты по причинам их появления и развития можно разделить на следующие основные категории:

- дефекты из-за естественных деградиционных процессов при эксплуатации изделия;
- дефекты, связанные с нарушением технологии изготовления заводом-производителем (производственный брак);
- дефекты из-за нарушения условий эксплуатации и норм содержания стрелочной продукции, а также технологии производства работ по обслуживанию крестовин при эксплуатации;
- дефекты, связанные с особенностями конструкции изделия.

В реальных условиях эксплуатации причина появления и развития дефектов стрелочных переводов имеет как правило комплексный характер с превалированием какой-либо из причин.

По виду дефекты крестовин можно разделить на:

- выкрашивания и отслоения;
- седловины;
- сплывы металла;
- трещины и выколы металла поверхностей катания;
- трещины в сварных соединениях элементов крестовин;
- усталостные трещины литой части крестовины;
- усталостные трещины рельсовых элементов.

Дефектом, характерным для всех конструкций крестовин с неподвижным сердечником, является отслоение и выкрашивание на поверхности катания литой части усовика и сердечника в зоне перекатывания из-за повышенного динамического воздействия колес (ДС.14.2, ДУ.14.2) Рисунок 2.1. При проходе

колес через эту зону, характеризующуюся наличием вредного пространства возникают ударные динамические силы, которые приводят к интенсивной пластической деформации высокомарганцовистой стали, следствием которой является образование наплывов. Несвоевременное удаление таких наплывов приводит к отслоениям и выкрашиванию металла [21].

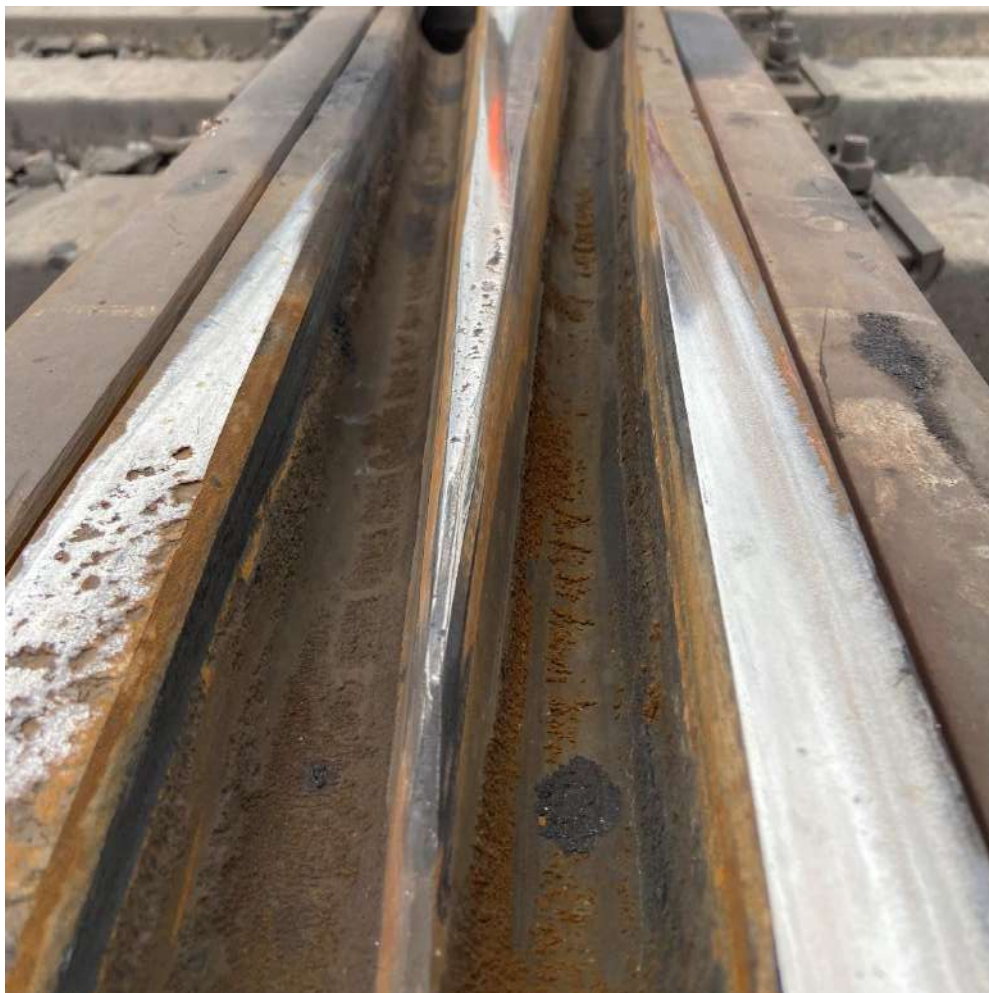


Рисунок 2.1 – Выкрашивание на поверхности катания литой части усовика и сердечника в зоне перекатывания

2.1.2 Новые дефекты крестовин

В ходе углубленного анализа работы крестовин из высокомарганцовистой стали на магистральных путях ОАО «РЖД», при разработке конструкции моноблочной крестовины, были выявлены новые виды дефектов крестовин с

приварными рельсовыми окончаниями, которые не отражены в Классификаторе дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов.

Способы выявления дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов, в том числе крестовин включают в себя внешний осмотр, ультразвуковую и цветную дефектоскопию, контроль геометрических параметров осуществляется средствами измерений [22]. При этом отливки крестовин из высокомарганцовистой стали не дефектоскопируются ультразвуком.

Одним из вновь выявленных дефектов крестовин является трещина в продольном шве рельсовых окончаний (Рисунок 2.2). Наиболее вероятной причиной отказов крестовин данного вида является ослабевание болтового соединения рельсовых усиков и сварного сердечника в зоне рельсовых окончаний под воздействием циклического нагружения от колес подвижного состава и вибрации. Возникновению и развитию дефекта способствовала укладка крестовины в путь на подкладки, ранее эксплуатировавшийся в этом месте крестовины, без их демонтажа с железобетонного основания.



Рисунок 2.2 – Новый вид дефекта крестовин с приварными рельсовыми окончаниями – трещина в продольном шве рельсовых окончаний

Замена установленных на заводе-производителе подкладок на другие может приводить к образованию суммарного зазора между подошвой усовика, рельсовых окончаний и ребрами подкладки сверх установленной ГОСТ 33535-2015 [23] величины, что в свою очередь исключает возможность удержания приварных рельсов рельсовых окончаний от поперечных перемещений при ослаблении вышеуказанных болтовых соединений. Дефект может как выходить, так и не выходить на отверстия в рельсовых окончаниях. Эти же причины могут вызывать появление и развитие трещин выходящих на отверстия приварных рельсовых окончаний крестовины (ДСс.26.2).

Крестовины с такими дефектами являются остродефектными и должны подлежать немедленной замене. Для их выявления может применяться визуальный осмотр, а также использоваться методы ультразвуковой и цветной дефектоскопии.

Еще один вид дефекта – выкрашивание металла на поверхности катания приварных рельсовых окончаний (Рисунок 2.3) – был выявлен при обследовании стрелочных переводов в границах Западно-Сибирской железной дороги в 2023 году.



Рисунок 2.3 – Новый вид дефекта крестовин с приварными рельсовыми окончаниями – выкрашивание металла на поверхности катания приварных рельсовых окончаний

В данном случае причинами выкрашивания металла на поверхности катания приварных рельсовых окончаний могут являться потеря упругих свойств основания и повышенная жесткость балластного слоя, а также низкое качество рельсового проката или локализация контакта в зоне выкружки головки рельса. Такая локализация наблюдается при работе перевода в нетиповых условиях или при его неправильной укладке в путь. Дефект выявляется визуальным осмотром.

При внесении изменений в классификатор дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов необходимо учесть новые виды стрелочной продукции, получающее распространение на сети железных дорог России, и внести новые виды дефектов. На Рисунке 2.4 представлены предлагаемые для внесения изменения в таблицу 1 действующей редакции классификатора дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов.


Наименование дефектов и повреждений элементов и основные причины их появления и развития	Расположение дефектов по длине элемента	Обозначение	Схематическое изображение дефекта
Трещины в продольном шве рельсовых окончаний	Вне стыка	ДСс.10.2	
Выкрашивание металла на поверхности катания головки приварных рельсовых окончаний	Вне стыка	ДСс.14.2	

Рисунок 2.4 – Новые виды дефектов крестовин для классификатора дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов

Интенсивность развития дефектов зависит от грузонапряженности участка, где эксплуатируется элемент инфраструктуры, условий эксплуатации, а также качества и своевременности обслуживания. Таким образом, срок службы и интенсивность дефектообразования стрелочной продукции зависит в том числе от соблюдения установленных норм содержания [24].

Таким образом, система обслуживания стрелочных переводов должна постоянно совершенствоваться и учитывать конструктивные особенности современных изделий, а также появление новых видов дефектов и причины их образования [25].

2.2 Методика анализа показателей эксплуатационной надежности крестовин

С точки зрения теории надежности работоспособность крестовин стрелочных переводов может характеризоваться следующими основными состояниями:

- исправное;
- работоспособное;
- неисправное (не работоспособное);
- предельное;

В зависимости от типа крестовины, класса, группы железнодорожного пути, скорости движения, а также величины износа, вида и размера дефекта изделие может быть отнесено к одному из вышеуказанных состояний. При этом изделие в работоспособном состоянии может иметь повреждения его элементов, не влияющие на эксплуатацию и безопасность движения поездов (например, выкрашивания, глубиной до 1 мм и др.).

Изделие характеризуемое, по причине наличия повреждении или износа, как неисправное в конкретных условиях эксплуатации, в случае изменения условий эксплуатации может характеризоваться как работоспособное. Переход крестовины из неисправного состояния в работоспособное также может быть реализован за

счет ликвидации причины отказа по средствам ремонта (вытачивания дефектов, наплавки недостающих размеров и т.д.). В отдельных случаях допускается пропуск поездов по неисправным крестовинам со скоростью 5 - 25 км/ч.

Предельное состояние крестовины подразумевает неработоспособное состояние, при котором не допускается ее дальнейшая эксплуатация, а ремонт невозможен или неэффективен. В зависимости от вида отказа предельное состояние может классифицироваться как опасное, а элемент стрелочного перевода относится к остродефектным.

Частичные восстанавливаемые отказы элементов стрелочного перевода ликвидируются в пути в рамках работ по текущему содержанию, поэтому их можно относить к регламентным работам по обслуживанию стрелочных переводов. Большинство отказов крестовин по дефектам и износу являются невосстанавливаемыми [26].

Для железнодорожных крестовин основными показателями надежности являются вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и среднее время безотказной работы (средняя наработка до отказа) [27; 28; 29].

При сборе данных по отказам крестовин, необходимых для получения показателей надежности, не учитывались данные сплошной смены металлических частей стрелочных переводов, а также выходы элементов в результате возникновения случаев особого учета, сроки службы и отказы крестовин после восстановления их наплавкой, так как они не связаны с показателями надежности крестовин [30].

Статистический материал был получен на основе информации по отказам крестовин стрелочных переводов, изъятых из пути в 2019-2021 гг. на Западно-Сибирской, Восточно-Сибирской, Дальневосточной, Куйбышевской, Южно-Уральской, Горьковской, Северо-Кавказской и Северной железных дорогах.

Данные по крестовинам в зависимости от наработки до изъятия группировались по интервалам $\Delta t = 25$ млн т брутто.

В каждом интервале наработки определялись показатели надежности: $R(t)$ – вероятность безотказной работы, $\lambda(t)$ – интенсивность отказов и $f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа. Эти величины вычислялись по формулам [31]:

$$R(t) = \frac{\bar{N}(t)}{N}, \quad (1)$$

где $\bar{N}(t)$ – число элементов, безотказно работающих в момент t ;

N – общее число элементов;

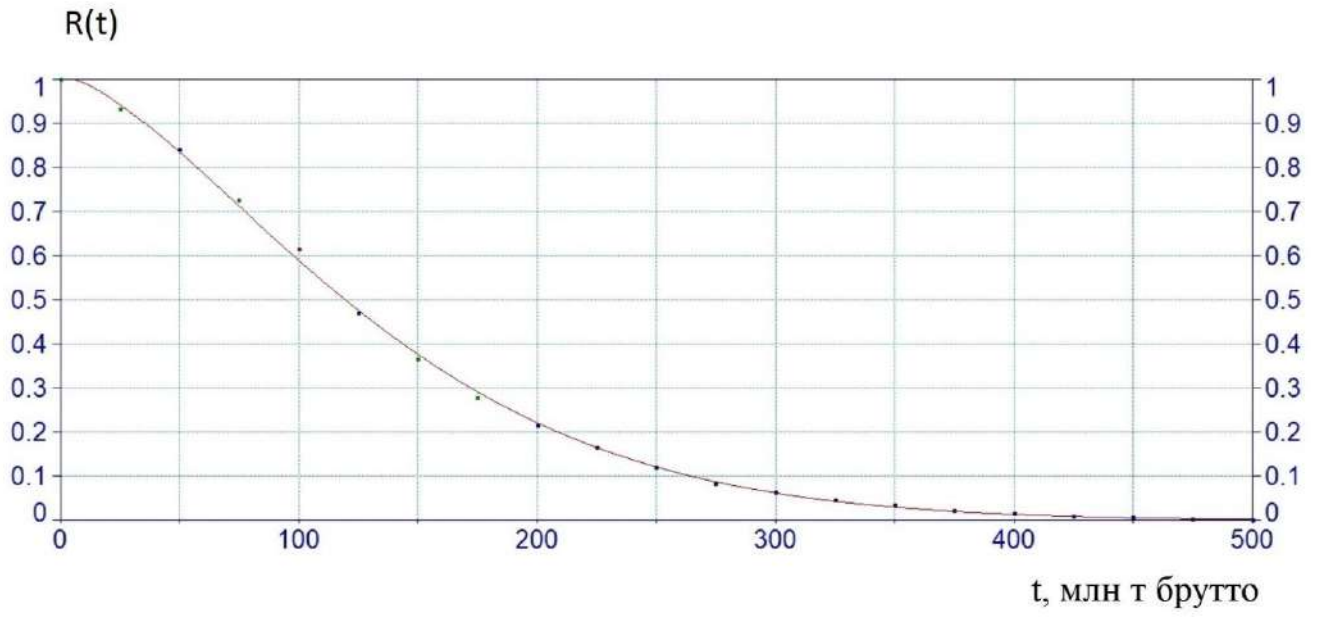
$$\lambda(t) = \frac{\bar{N}(t) - \bar{N}(t + \Delta t)}{\bar{N}(t) \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t). \quad (3)$$

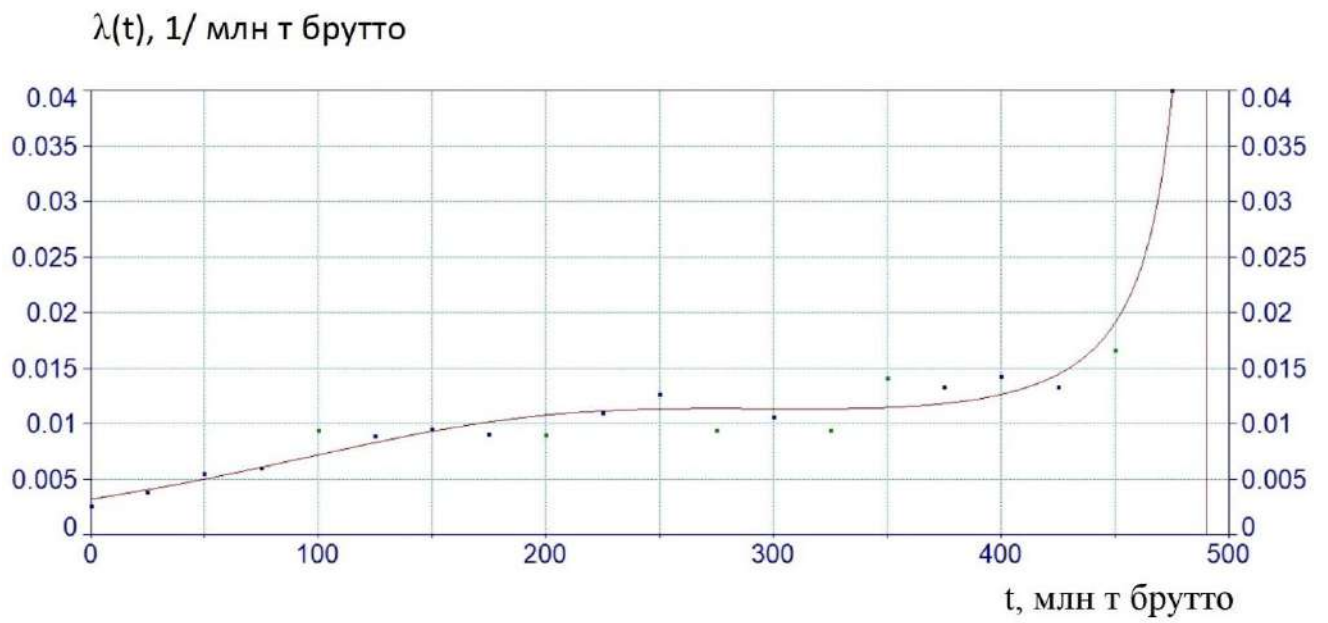
По полученным значениям были построены графические зависимости $\lambda(t)$, $R(t)$ и $f(t)$ [32; 33].

2.3 Статистика отказов крестовин

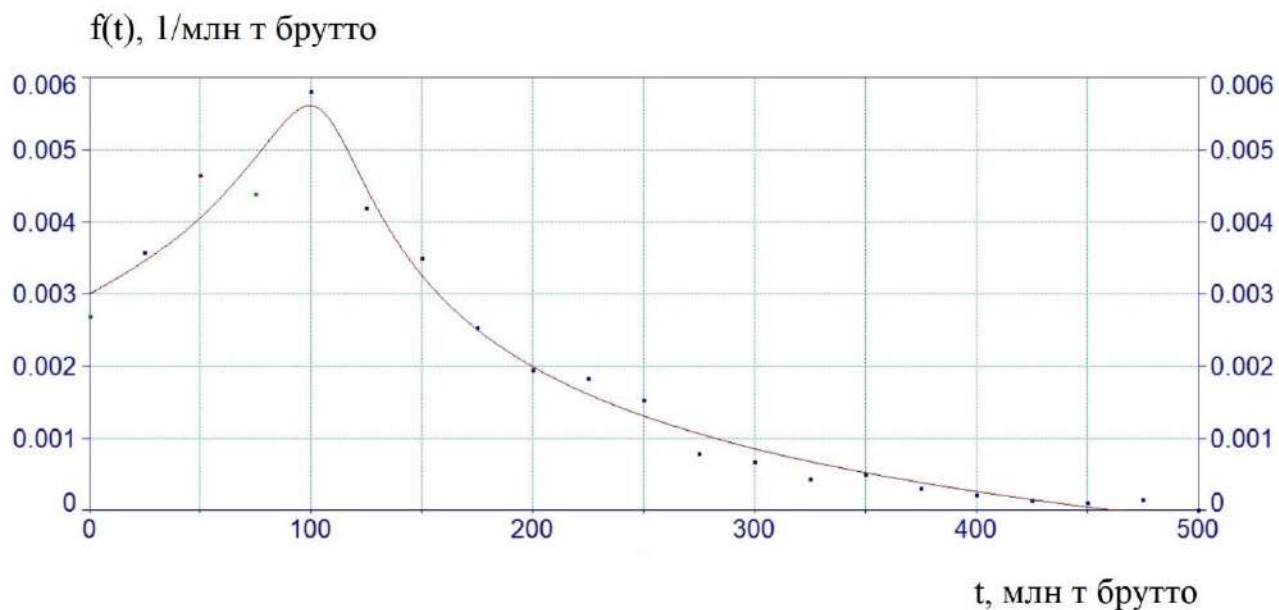
Для установления зависимости показателей надежности крестовин от наработки, экспериментальные данные обрабатывались с использованием программного продукта Table Curve 2D. На Рисунке 2.5 показаны графические зависимости вероятности безотказной работы, интенсивности отказов и плотности распределения наработки до отказа крестовин из высокомарганцевистой стали типа Р65 марки 1/11 на инфраструктуре ОАО «РЖД», отказавших в 2019-2021 годах, полученные по данным с дорог, а также приведены их аналитические аппроксимации.



а)



б)



в)

Рисунок 2.5 – Графики показателей надежности крестовин типа Р65 марки 1/11 изъятых из пути по дефектам за 2019-2021 гг.: а) вероятность безотказной работы крестовин, б) интенсивность отказов крестовин, в) плотность распределения наработки до отказа крестовин

Проанализировав зависимости, представленные на Рисунке 2.5 получаем модель вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln R(t) = a + b \cdot t^{1,5} \\ \lambda(t) = \frac{a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2}{1 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3} \\ \frac{df(t)}{dt} = \frac{a_4 \cdot t + a_3}{b_4 + 2 \cdot b_5 \cdot t + b_6 \cdot t^2} f(t) \\ F(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad t \geq 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

Данная модель удовлетворяет соответствующим показателям крестовин и характеризует период их службы тремя основными этапами:

- начальный этап, отличающийся ранними отказами, связанными со скрытыми дефектами производственного характера;
- период стабильной работы;

- период интенсивных отказов, связанных с достижением предельного состояния или окончательным выходом изделия из строя [34].

Форма кривой, характеризующей интенсивность отказов, свидетельствует о достаточно высоком уровне качества выпускаемой продукции.

Вероятность безотказной работы в основной период работы описывается функцией, представленной ниже:

$$\ln R(t) = (9,43 + 0,5 \cdot t^{1,5}) \cdot 10^{-3}. \quad (5)$$

Полученное уравнение может послужить инструментом при анализе влияния условий работы крестовин из высокомарганцевистой стали на показатели надежности, прогнозировании выхода из строя крестовин с позиции, планирования организации работ по их замене, формирования бюджета соответствующих затрат, проведения предпроектных расчетов при текущих системе ведения стрелочного хозяйства и интенсивности движения.

В случае изменения условий эксплуатации, например, повышение интенсивности движения и осевых нагрузок, для обеспечения существующих ремонтных схем необходимы элементы инфраструктуры с показателями надежности, сопоставимыми с существующими, в исходных условиях эксплуатации [35; 36].

Таким образом, в рамках решения задачи по повышению провозной способности и ресурса путевой инфраструктуры, а также разработки конструкции железнодорожного пути с ресурсом 2,5 млрд т брутто, необходимо проведение мероприятий по созданию и постановке на производство стрелочной продукции, отвечающей потребностям перевозочного процесса и системе обслуживания, при минимальных затратах на ведение путевого хозяйства. Периодичность замены элементов стрелочных переводов должна соответствовать перспективным ремонтным схемам, и быть кратной, в периоды между капитальными ремонтами пути, что в свою очередь также позволяет сократить затраты на содержание пути [37; 38; 39].

2.4 Распределение отказов крестовин по видам дефектов (причинам отказов)

В процессе эксплуатации крестовины из высокомарганцовистой стали подвергаются воздействию многоцикловых ударных динамических нагрузок от колес подвижного состава. В результате этого в деталях крестовин могут возникать и развиваться дефекты, имеющие усталостный характер.

Общий анализ причин выхода из строя крестовин показал, что их отказы в большей степени характеризуются износом и выкрашиванием металла на рабочих поверхностях. Полученные по отказам крестовин стрелочных переводов данные приведены на Рисунке 2.6. Так, доля дефектов, связанных с выкрашиванием металла крестовин (ДУ.12.2, ДС.13.2, ДУ13.2, ДС.14.2, ДУ14.2) составляет 32 %, кроме того изъятие из пути по причине выкрашивания наплавленного слоя на поверхности катания литой части усовика и сердечника (ДС.18.2, ДУ.18.2) составляет 19 %. Выкрашивание наплавленного слоя, как правило, происходит из-за нарушения технологии наплавки (некачественная шлифовка перед наплавкой, нарушение режимов наплавки и т.п.), а также не удаленных перед наплавкой дефектов в основном металле отливки. При этом доля остальных дефектов в сумме составляет 7,8 %.

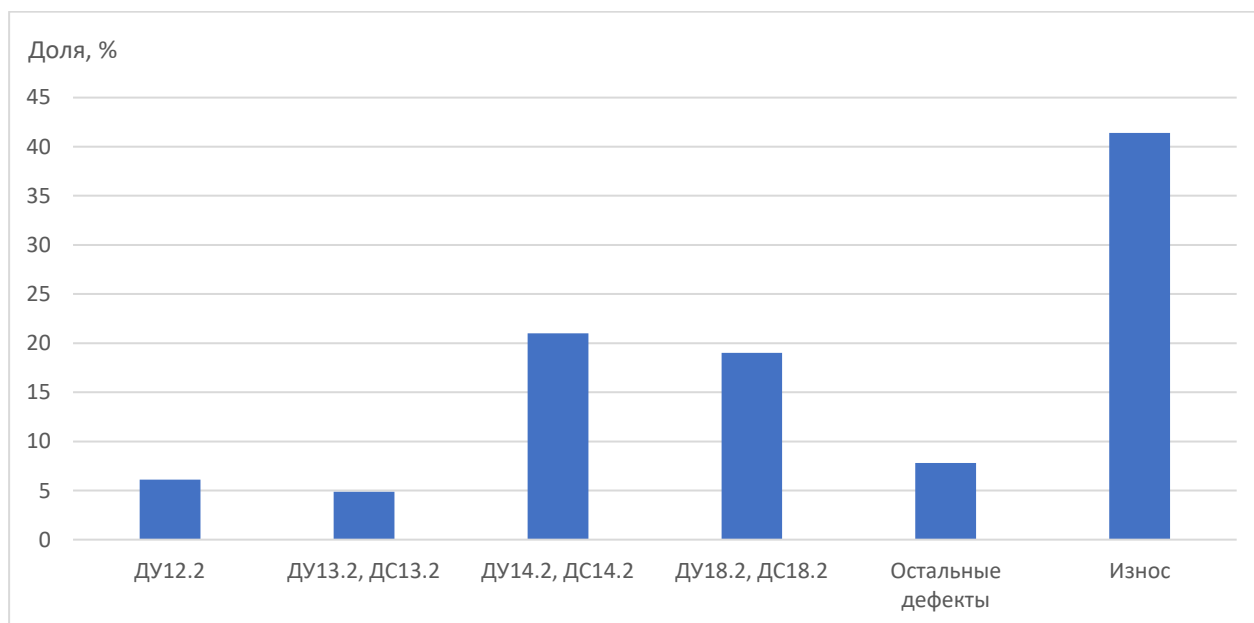


Рисунок 2.6 – Распределение отказов крестовин по видам дефектов (причинам отказов)

В соответствии с имеющимися статистическими данными максимальное значение средней наработки в год до замены крестовин стрелочных переводов в период с 2019 по 2021 год, составляет 175 млн т брутто.

Средняя наработка до изъятия из пути крестовин с неподвижным сердечником за период с 2019 года по 2021 год в зависимости от дороги имела колебания от 144 млн т брутто на Куйбышевской до 214 млн т брутто на Северо-Кавказской железной дороге. Значение данного показателя имеет значительные колебания в зависимости от условий эксплуатации и имеет большой разброс значений от года к году.

Выводы по второй главе

1. Наблюдения за работой крестовин показывают, что главным фактором, определяющим их отказы, является недостаточная конструктивная прочность в условиях высокого уровня воздействия подвижного состава.

2. В ходе проведения исследований было выявлено несколько дефектов крестовин из высокомарганцевистой стали, которые отсутствуют в «Классификаторе дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов». Наиболее вероятная причина, ранее не описанного, вида отказов у крестовин – трещина в продольном шве рельсовых окончаний – нарушение требований конструкторской документации и ГОСТ 33535-2015.

Другой «новый» вид дефекта крестовин – выкрашивание металла на поверхности катания приварных рельсовых окончаний. В данном случае причинами отказов по этому виду дефектов может являться потеря упругих свойств основания и повышенная жесткость балластного слоя, а также низкое качество рельсового проката или локализация контакта в зоне выкружки головки рельса. Такая локализация наблюдается при работе перевода в нестандартных условиях или при его неправильной укладке в путь.

3. Основные дефекты крестовин связаны с выкрашиванием металла (ДУ.12.2, ДС.13.2, ДУ13.2, ДС.14.2, ДУ14.2). Доля крестовин, изъятых из эксплуатации, по причине достижения предельного состояния, связанного с данными дефектами, составляет 32 %. Изъятие из пути по причине выкрашивания наплавленного слоя на поверхности катания литой части усовика и сердечника (ДС.18.2, ДУ.18.2) составляет 19 %. При этом доля остальных дефектов в сумме составляет 7,8 %.

4. Для достижения задачи по созданию конструкции пути с повышенным ресурсом требуется создание конструкций крестовин, имеющих повышенный ресурс, кратный сроку службы остальных элементов перевода за счет ликвидации условий возникновения основных видов дефектов и уменьшения интенсивности их износа.

3. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА КРЕСТОВИН

Крестовина как элемент инфраструктуры, должна обеспечивать выполнение следующих основных требований: безопасность; учет видов подвижного состава на обращение которых должен быть рассчитан перевод; соответствие системе обслуживания; ресурсные требования к элементам перевода [2; 40], а также быть технологичной на всех стадиях производства.

С целью достижения требуемых показателей, при проектировании крестовин должны быть решены конструкторские, металлургические и технологические задачи, позволяющие обеспечить «проливаемость» (заполнение литейной формы) и бездефектность отливки крестовины, достижение соответствия всех геометрических параметров изделия конструкторской документации, соответствие физико-механических свойств материалов требованиям нормативных документов.

Над проблемой увеличения ресурса крестовин работают специалисты в России и за рубежом. В этой области существует три основных направления для совершенствования конструкции крестовины: применение новых и модифицированных материалов; упрочнение рабочих поверхностей; разработка конструкции, наилучшим образом отвечающей условиям работы изделия [41; 42].

3.1 Применение новых и модифицированных материалов

Основными деталями крестовин, подверженными поражению дефектами, являются сердечники, литые блоки моноблочных и цельнолитых крестовин, рельсовые усовики, а также приварные рельсовые окончания. В Российской и мировой практике для изготовления железнодорожных крестовин широко используется высокомарганцовистая аустенитная сталь Гадфильда (110Г13Л). Эта сталь характеризуется низким пределом текучести, устойчива к высоким статическим и динамическим нагрузкам, и значительно упрочняется под действием холодной деформации.

Учитывая эти свойства сталь 110Г13Л плохо обрабатывается резанием, а изделия из нее производятся преимущественно методом литья. Детали, изготовленные из высокомарганцевистой стали под действием внешних нагрузок в процессе эксплуатации могут самоупрочняться, что также наблюдается на рабочих поверхностях крестовин. [43; 44; 45].

Изготовление крестовин из высокомарганцевистой стали было освоено Российскими стрелочными заводами в 1952 году. В целях повышения ресурса железнодорожных крестовин непрерывно ведутся работы по повышению механических свойств и эксплуатационных характеристик высокомарганцевистой стали. В данном направлении был выполнен большой комплекс работ. Обзор результатов исследований, направленных на улучшение свойств отливок из высокомарганцевой стали достаточно полно представлен в [46].

В различное время были выпущены опытными партиями крестовины со следующими видами усовершенствования металла: легирование молибденом; раскисление силикокальцием, лигатурой алюминия и магния, пироклором; обработка синтетическими шлаками и продувка азотом; снижение содержания фосфора; введение модификаторов; местным легированием в зоне рабочих поверхностей; системой «холодильников» с направленной кристаллизацией металла в отливке; различными способами заливки металла в формы и т.д. Целью работы являлось исследование влияния модифицирования на возможность улучшения литейных свойств стали 110Г13Л и увеличение износостойкости отливок сердечников и крестовин.

Крестовины, легированные молибденом, имели некоторое преимущество перед контрольными в более замедленном развитии выкрашиваний и меньшей интенсивности износа в послеотказный период. По основному показателю – наработке до отказа – опытные крестовины уступали контрольным, поэтому дальнейший их выпуск был признан нецелесообразным.

Крестовины из стали 110Г13Л, раскисленной силикокальцием, имели неустойчивое преимущество перед контрольными по износу. При их наплавке наблюдалось быстрое выкрашивание наплавленного и основного металла на

глубину до 30 мм. В процессе эксплуатации развитие дефектов шло, примерно, как у контрольных. В связи с этим данный способ раскисления высокомарганцовистой стали крестовин также не был внедрен для серийного производства.

Крестовины из стали, раскисленной лигатурой алюминия и магния снимались с пути в основном по износу и выкрашиванию, не имели преимущества перед контрольными по тоннажу отказа, поэтому они также не были рекомендованы для серийного производства.

Средний тоннаж отказа крестовин из стали, обработанной синтетическими шлаками, был меньше, чем у контрольных в 1,12 раза. Опыт по обработке стали 110Г13Л этим способом также был прекращен.

Не получено преимущества перед контрольными крестовинами, обработанными одновременно синтетическими шлаками и азотом. Средний тоннаж отказа по 20 опытным крестовинам оказался примерно равным тоннажу отказа контрольных крестовин.

Из взятых под наблюдение крестовин из стали, обработанной азотом, только 60 % имели преимущество от 1,05 до 1,45 раза по тоннажу отказа в сравнении с контрольными. Опытные крестовины изымались из пути в большинстве случаев по износу. По дефектам в виде глубокого выкрашивания было изъято 6 % крестовин.

Крестовины из стали, раскисленной пирохлором, не дела преимуществ по тоннажу отказа по износу. По дефектостойкости эти крестовины также были в равном положении с контрольными.

Крестовины из стали 110Г13Л с пониженным содержанием фосфора, имели низкий тоннаж отказа из-за малой стойкости по износу [47].

Одной из последних работ, проведенной в 2022 году было применение модификаторов INSTEEL R7 и силикокальция марки СК-30 химический состав которых приведен в Таблице 3.1.

Выплавка стали производилась по штатной технологии. Модификаторы в необходимом количестве отдавались при выпуске металла в ковш в период наполнения 1/3 ковша на раскисленный алюминием металл. От каждой опытной плавки отбирались дополнительные пробы металла в виде топориковых проб

непосредственно перед выпуском металла из печи, которые впоследствии проходили термообработку вместе с пробами этой же плавки, прошедшей модифицирование.

Таблица 3.1 – Химический состав модификаторов

Марка модификатора	Массовая доля основных элементов, %							Фракция, мм
	Mg	Ca	Ba	Al	La+Ce	Si	Ti	
INSTEEL R7	≤ 2,0	10,0-14,0	5,0-8,0	≤ 2,0	5,0-8,0	40,0-50,0	8,0-12,0	1-10
СК-30	-	30,6	-	1,37	-	60,14	-	10-50

Проведенные лабораторные исследования не показали значительных отличий в механических свойствах и структуре металла в сравнении с серийно выплавляемой сталью.

За весь многолетний опыт производства отливок крестовин из высокомарганцевистой стали в России и за рубежом так и не удалось получить значимого результата по повышению ресурса крестовин за счет модифицирования стали 110Г13Л и изменения её химического состава.

В настоящее время в РФ требования к крестовинам железнодорожным из высокомарганцевистой стали аустенитного класса марки 110Г13Л регламентируются межгосударственным стандартом ГОСТ 7370-2015 «Крестовины железнодорожные. Технические условия», а в странах Европы EN 15689:2009 «Железные дороги - Путь - Стрелки и крестовины - Компоненты крестовин из литой аустенитной марганцевистой стали» (EN 15689:2009 Railway applications - Track - Switches and crossings - Crossing components made of cast austenitic manganese steel).

Требования данных стандартов к химическому составу высокомарганцевистой стали достаточно близки. Оба стандарта не допускают добавление легирующих элементов отличных от указанных в тексте стандартов. При этом значительно отличаются по подходу к контролю механических свойств стали, напрямую влияющим на прочность и срок службы изделия.

Сравнение основных требований ГОСТ 7370-2015 и EN 15689:2009 по химическому составу и контролю механических свойств высокомарганцевистой стали представлены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнение требований к стали 110Г13Л регламентированных ГОСТ 7370- 2015 и EN 15689:2009

Наименование испытываемой продукции	Наименование испытаний и (или) определяемых характеристик	Диапазон определения по ГОСТ 7370-2015	Диапазон определения по EN 15689:2009
Крестовины железнодорожные из высокомарганцевистой стали аустенитного класса марки 110Г13Л	Химический состав (массовая доля элементов):		
	Углерод	(0,95-1,35) %	(0,95-1,3) %
	Марганец	(11,0-18,0) %	(11,5-14,0) %
	Кремний	(0,20-1,05) %	не более 0,65 %
	Фосфор	не более 0,09 %	не более 0,05 %
	Сера	не более 0,02 %	не более 0,03 %
	Никель	в сумме не более 0,5 %	не более 1,75 %
	Молибден		не более 0,75 %
	Хром		не более 0,50 %
	Медь		не более 0,30 %
	Алюминий		не более 0,045 %
	Механические свойства		
	Временное сопротивление	от 687 Н/мм ²	-
	Предел текучести	от 353 Н/мм ²	-
	Относительное удлинение	от 16 %	-
	Относительное сужение	от 16 %	-
	Ударная вязкость	от 17 кгс·м/см ²	-
	Ударный изгиб	-	глубина трещин не более 7 мм
	Микроструктура		
	Аустенитная без карбидов	наличие - отсутствие	наличие - отсутствие

В соответствии с ГОСТ 7370-2015 механические свойства и микроструктуру высокомарганцевистой стали контролируют для каждой плавки на каждой садке

печи нагрева под термическую обработку. EN 15689:2009 предполагает проверку механических свойств стали испытанием на ударный изгиб. Если образец не выдерживает испытания на удар, то данный образец должен быть подвергнут металлографическому исследованию для изучения микроструктуры и определения причин сбоя.

Рельсовый прокат для производства стрелочной продукции, предназначенной для эксплуатации на инфраструктуре магистральных железных дорог России, изготавливается в соответствии с национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 51685-2022 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» данный стандарт разработан с учетом основных положений европейского регионального стандарта EN 13674-1:2011 «Железные дороги. Путь. Рельсы. Часть 1. Рельсы Виньоля 46 кг/м и более» (EN 13674-1:2011 «Railway applications — Track — Rail — Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above», NEQ).

В настоящее время подобраны сварочные материалы и режимы для приварки рельсовых окончаний, изготовленных из рельсов дифференцированно термоупрочненных с прокатного/отдельного нагрева общего назначения ДТ350. С целью повышения эксплуатационных характеристик крестовин в целом необходимо обеспечить возможность применения рельсов, имеющих более высокие эксплуатационные характеристики.

Кроме того, ГОСТ Р 51685-2022 предполагает возможность изготовления и поставки рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости ДТ370ИК, также в настоящее время проходят испытания рельсы категории ДТ400ИК. Для применения таких рельсов при производстве моноблочных крестовин необходимо проведение комплекса работ по отработке режимов сварки приварных рельсовых окончаний к цельнолитому блоку крестовины, а также подтверждению эффективности такого решения и безопасности конструкции с учетом применяемых технологий сварки [48; 49].

3.2 Упрочнение рабочих поверхностей крестовин

В настоящее время во многих отраслях промышленности все большее распространение получает поверхностное упрочнение деталей, работающих в тяжелых условиях. Применение поверхностного упрочнения позволяет достигать повышенной долговечности и усталостной прочности за счет обеспечения высоких показателей твердости и износостойкости упрочненных рабочих поверхностей, и вместе с тем достаточно высокой вязкости, пластичности и трещиностойкости основного металла изделия.

В зависимости от особенностей производственного процесса методы поверхностного упрочнения могут обладать достаточно высокой производительностью, и в ряде случаев показывают более высокую эффективность по сравнению с обычной технологией термической обработки. Также поверхностное упрочнение целесообразно применять при производстве деталей, имеющих различные требования к свойствам основного металла и поверхностного слоя, обусловленные особенностями работы изделия [50].

Крестовины стрелочных переводов в процессе работы испытывают повышенные ударные динамические силы и трение на рабочих поверхностях, поэтому они должны обладать хорошей вязкостью и высокой износостойкостью, для исключения разрушения под действием нагрузки от колес подвижного состава.

Методы поверхностного упрочнения металлов делятся на следующие виды:

- термические;
- механические;
- химико-термические;
- газотермическое напыление;
- наплавка;
- комбинированные.

3.2.1 Рекристаллизованные и рекристаллизованные с последующим упрочнением энергией взрывной волны крестовины

Аустенитная структура отливок из стали 110Г13Л достигается термической обработкой (закалкой), что обеспечивает высокую вязкость и сопротивление изделий ударноабразивному износу. [51]. Таким образом для упрочнения термическим методом поверхности катания крестовин из высокомарганцовистой стали, подвергающихся объемной закалке, возможно применить рекристаллизацию.

Эксплуатационные испытания рекристаллизованных крестовин типа Р65 марки 1/11 проводились в 70-80 гг. двадцатого века на инфраструктуре Северной железной дороги совместно с комбинировано упрочненными крестовинами методами рекристаллизации и энергией взрывной волны. По поражаемости дефектами результаты обоих видов упрочнения не отличались друг от друга.

Отказы по дефектам происходили из-за поверхностного выкрашивания. Процент крестовин с дефектами в виде разного размера поверхностного выкрашивания был одинаковым как у упрочненных, так и у контрольных, не упрочненных, крестовин. Существенных отличий по эксплуатационным качествам крестовин, рекристаллизованных с последующим упрочнением энергией взрывной волны и упрочненных только взрывом, выявлено не было [47].

3.2.2 Нанесение износостойких покрытий газотермическим методом

С целью обеспечения высоких трибологических свойств в технике получили широкое распространение различные методы поверхностного упрочнения, в том числе и процессы газотермического напыления износостойких покрытий. Однако специфика таких покрытий, сопряжена с нестабильностью показателей качества напыленного слоя: степень расплавленности порошкового материала, количество и размер пор, а также характер границы между покрытием и основой [52; 53; 54]. От этих показателей зависят адгезионная прочность и уровень остаточных

напряжений в слое покрытия. Так, относительно невысокий уровень адгезионной прочности может являться причиной разрушения покрытий в виде отслоений и сколов частиц покрытия в процессе эксплуатации изделия, что, в целом снижает его работоспособность [55].

Предварительная механическая обработка поверхности изделий производится на начальной стадии нанесения газотермических покрытий (газопламенных, плазменных, электродуговых и детонационных). Её назначение состоит в активации поверхности детали: очищение от грязи, масел, и окисных пленок, а также формирования требуемого микрорельефа, поскольку прочность сцепления покрытия с основой существенным образом зависит от чистоты и шероховатости поверхности изделия. Сцепление покрытия с основой при газотермическом напылении происходит за счет приваривания расплавленных частиц порошка и сил механического зацепления, величина которых зависит от высоты микронеровностей. При этом необходимо по возможности максимально сократить промежуток времени между операцией предварительной механической обработки и реализацией собственно процесса напыления покрытий (с целью сохранения поверхности в энергетически активном состоянии) [56].

Так как аустенит отличается большой вязкостью, сталь Гадфильда плохо обрабатывается режущим инструментом, а под воздействием динамических нагрузок, под влиянием холодной деформации происходит ее самоупрочнение, что в свою очередь значительно затрудняет процесс подготовки поверхности.

Учитывая данные факты применение газопламенных методов упрочнения поверхности катания крестовин из высокомарганцовистой стали не выглядит перспективным.

3.2.3 Механические методы упрочнения крестовин

Упрочнение поверхности катания крестовин методами чеканки, дробеструйной обработкой и обкатки роликом не дали положительного результата. Вместе с достижением необходимого уровня твердости на поверхности металла

образовывались микротрещины, которые в процессе эксплуатации приводят к выкрашиванию металла и быстрому выходу крестовин из строя. Кроме того, данные виды упрочнения являются малопроизводительными, из-за чего технологии их применения не были доработаны и уступили место упрочнению энергией взрывной волны.

3.2.4 Упрочнение энергией взрывной волны

С 1964 г. в технологии изготовления крестовин стрелочных переводов из высокомарганцовистой стали для их упрочнения применяется энергия взрывной волны.

Эксплуатационные испытания опытных партий крестовин, проводившиеся ВНИИЖТ (ЦНИИ МПС) и путеобследовательскими станциями ЦП МПС, позволили выбрать оптимальные пластические взрывчатые вещества, а также технологические режимы для их применения при серийном упрочнении сердечников. В 1978 году специалистами Новосибирского стрелочного завода совместно с Уральским отделением ВНИИЖТ были разработаны технологический процесс, технические условия и технологическая инструкция на упрочнение взрывом сердечников железнодорожных крестовин в цеховых условиях.

За время своего существования данная технология постоянно совершенствовалась. В последнем варианте технология была реализована с применением специальных ленточных взрывных зарядов (далее – ЛВЗ) ТУ 2292-008-07511703-93.

В 2022 году на основе альтернативного продукта были поставлены на производство новые ЛВЗ. При принятии к применению новых ЛВЗ должна быть подтверждена их эффективность, соответствие характеристик крестовин, упрочненных новыми ЛВЗ предъявляемым к ним требованиям.

В настоящее время высокомарганцовистая сталь (Гадфильда) является основным материалом для изготовления железнодорожных крестовин, а также других изделий, работающих в тяжелых условиях, что определяет интерес к ней

российских и зарубежных ученых. Исследователи до сих пор не пришли к единому мнению о природе формирования упроченного слоя под действием внешней нагрузки. Работы в основном направлены на повышение эксплуатационных свойств, прочностных характеристик и износостойкости, в зависимости от химического состава и режимов термической обработки [46]. Работа в этом направлении ведется отечественными стрелочными заводами совместно с АО «ВНИИЖТ».

3.3 Наплавка крестовин

С целью продления срока службы крестовин из высокомарганцовистой стали применяется их ремонт с использованием электродуговой наплавки и механической обработкой в соответствии с ТУ 32 ЦП-819-671-2013 «Отремонтированные крестовины стрелочных переводов. Технические условия».

Данные технические условия распространяются на острые и тупые крестовины стрелочных переводов и глухих пересечений типов Р65 и Р50, марок 1/18, 1/11, 1/9, 1/6 и 2/9, сборные с литым сердечником из высокомарганцовистой стали в общей отливке с изнашиваемой частью усювиков, в том числе, сварные; цельнолитые, моноблочные.

Ремонт электродуговой наплавкой производится в стационарных условиях и в пути. В крестовинах, отремонтированных наплавкой, восстановлению подвергаются литые части усювиков и сердечников из стали 110Г13Л [57].

Эффективность применения электродуговой наплавки для увеличения ресурса крестовин типа Р65 марки 1/11 различными дирекциями инфраструктуры отражена в Таблице 3.3. Наибольшее распространение применение такого метода продления срока службы крестовин получило на Свердловской, Горьковской, Восточно-Сибирской железных дорогах.

Таблица 3.3 – Сравнение эффективности применения электродуговой наплавки на инфраструктуре различных дирекций инфраструктуры

ДИ	Средний пропущенный тоннаж до замены без наплавки, млн т брутто	Доля крестовин с наплавкой, %	Средний пропущенный тоннаж до замены с наплавкой, млн т брутто	Среднее увеличение ресурса при наплавке, млн т брутто
ГОРЬК	171	48,31	219	71
ДВОСТ	170	15,53	173	42
В-СИБ	168	66,57	232	46
З-СИБ	152	2,38	214	50,9
КБШ	144	27,15	232	85,7
СВЕРД	179	42,11	209	54
С-КАВ	214	17,08	233	93
Ю-УР	185	21,9	200	62

3.4 Конструкционные методы повышения ресурса крестовин

Основой повышения ресурса крестовин является её конструкция, поэтому резервы повышения ресурса и эксплуатационных качеств крестовин должны опираться на выбор рациональных конструктивных решений. Самой массовой конструкцией на сети железных дорог России являются крестовины типа Р65 марки 1/11.

Наиболее распространенным дефектом сборных крестовин с неподвижным сердечником является отслоение и выкрашивание на поверхности катания литой части усовика и сердечника в зоне перекатывания из-за повышенного динамического воздействия колес (ДС.14.2, ДУ.14.2). При проходе колес через эту зону возникают ударные динамические силы, которые приводят к интенсивному образованию наплывов высокомарганцовистой стали, а несвоевременное их удаление к отслоениям и выкрашиванию металла [21].

Конструкция моноблочных крестовин исключает местный износ поверхности катания концов сердечника крестовины в зоне примыкания рельсов, характерное для крестовин с вкладышно-накладочным окончанием заднего вылета.

В силу конструктивных особенностей применение моноблочных крестовин исключает появление дефектов по кодам: ДС.10.1, ДУ.12.2, ДУ.22.2, ДС.29.1, ДСс.26.2, ДСс.10.2 (рассмотренному в разделе 2), ДУ.42.2, ДС.50.1, ДС.60.1, ДС.60.2, ДС.63.1. Они в значительно меньшей степени склонны к появлению дефектов по кодам ДС.14.2, ДУ.14.2. В соответствии с анализом и статистикой причин отказов крестовин с неподвижным сердечником, ориентировочно, общая дефектность моноблочных крестовин, в силу их конструктивных особенностей, ниже на 21% по сравнению с серийно выпускаемыми конструкциями.

В большей степени точность отливки и возможность получения геометрии, заложенной в конструкции изделия, определяется технологией изготовления форм. При этом конструктивные особенности крестовины из высокомарганцовистой стали в значительной степени будут влиять на прочность и на возникновение дефектов, угрожающих безопасности движения в процессе эксплуатации, а также её долговечность.

Важным вопросом при проектировании крестовин является правильное распределение напряжений металла в отливке с целью обеспечения плавного изменения жесткости по длине крестовины и исключения возникновения опасных отказов изделия при обеспечении технологичности его производства. Достижение данных целей может быть реализовано за счет устройства и правильного расположения в конструкции продольного силового элемента отливки [58].

Учитывая высокий потенциал и перспективность конструкции моноблочных крестовин, выявленный в ходе полигонных испытаний на Экспериментальном кольце, а также мировой опыт эксплуатации подобных изделий в качестве объекта исследования была выбрана моноблочная крестовины типа Р65, марки 1/11 с четырьмя приварными рельсовыми окончаниями.

Для разработки эффективных конструктивных решений крестовин целесообразно использовать расчетные методы на основе моделирования, позволяющие апробировать различные варианты конструкции в короткое время и с минимальными затратами.

Выводы по третьей главе

1. Применяемые в России методы повышения ресурса крестовин за счет различных способов упрочнения металла позволяют повысить их эксплуатационные качества и должны применяться при их изготовлении в зависимости от технологических возможностей заводов-изготовителей.

2. В отечественной и зарубежной практике одним из наиболее эффективных методов упрочнения крестовин из высокомарганцовистой стали является воздействие на поверхность катания энергией взрывной волны.

3. Дальнейшее повышение ресурса крестовин необходимо основывать на конструктивных решениях, позволяющих исключить образование целого ряда дефектов и снизить предпосылки для возникновения наиболее часто встречающихся дефектов, служащих причиной отказов крестовин.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА МОНОБЛОЧНЫХ КРЕСТОВИН, УЛУЧШЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОНОБЛОЧНЫХ КРЕСТОВИН

4.1 Предпосылки для построения моделей крестовины

Применявшийся в различных работах метод расчета крестовин основан на представлении крестовины как балки конечной длины, лежащей на n - упругих опорах, работающей под воздействием циклической нагрузки от проходящих по ней колес подвижного состава. Такая модель крестовины, учитывает многократное приложение нагрузок, а также учитывается, что усталостные процессы могут зависеть от образования и развития имеющихся концентраторов напряжений в крестовине, снижающих ее ресурс [59].

Усталостное разрушение характеризуется постепенным накоплением повреждений в материале с последующим их развитием и образованием трещин. Места образования трещин непосредственно связаны с концентраторами напряжений, которые зависят от конструктивных особенностей, геометрии, а также от наличия литейных дефектов отливок моноблока.

Как уже указывалось, с точки зрения механики крестовина представляет собой балку, установленную на упругие опоры (Рисунок 4.1). При этом сама крестовина имеет различную геометрию и площадь в различных ее поперечных сечениях, а точка приложения усилий непрерывно перемещаясь вдоль крестовины постоянно меняет свое расположение относительно поперечной оси в зависимости от сечения. Соответственно для каждого поперечного сечения будут свои жесткость, моменты инерции и сопротивления, а также момент, создаваемый прикладываемой нагрузкой. При этом существенными особенностями работы железнодорожных крестовин являются упругость основания и цикличность нагружения [60; 61; 62].

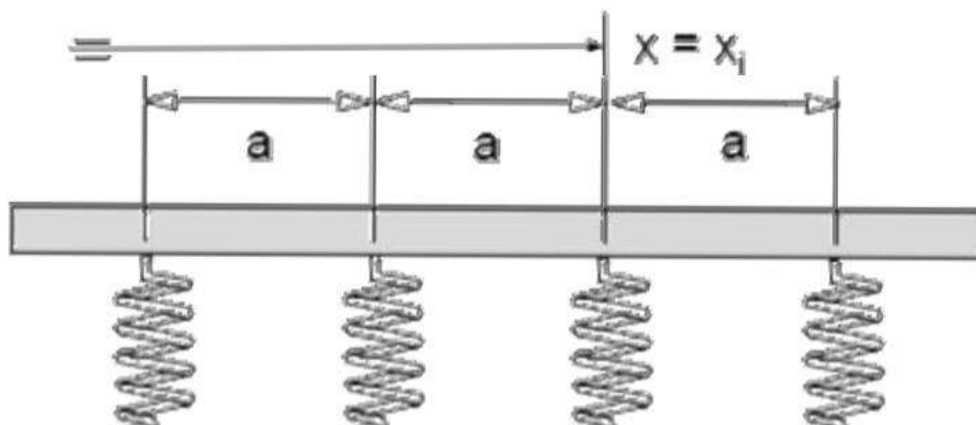


Рисунок 4.1 – Дискретное опирание крестовины

Современные методы проведения расчетов и анализа позволяют решать такие задачи без упрощений, которые влияют на точность получаемого результата. С целью решения задачи был выбран подход, позволяющий, не прибегая к упрощениям получить решение, удовлетворяющее уравнениям механики деформируемого твёрдого тела с необходимой точностью.

Упругое основание моноблочной крестовины обусловлено наличием прокладок-амортизаторов между цельнолитым блоком крестовины и подкладкой, а также между подкладкой и железобетонным брусом. Жесткость этих прокладок регламентируется ГОСТ Р 56291-2014 и составляет 50-150 МН/м [63]. При этом жесткость прокладок определяется как отношение приращений нагрузки и деформации по формуле:

$$k = \frac{\Delta P}{\Delta h}, \quad (6)$$

где k – жесткость прокладки,

ΔP – приращение нагрузки,

Δh приращение деформации [64].

Модуль упругости прокладок, выраженный как распределенная жесткость подрельсового основания пути:

$$U_{\text{пр}} = \frac{k}{l} = \frac{\Delta P}{l \cdot \Delta h}. \quad (7)$$

В отечественной практике параметр $U_{\text{пр}}$ – модуль упругости, определяется в большей части экспериментальным путем и данный параметр представляет собой погонный упругий отпор основания, отнесенный к единице прогиба. По данным Г.М. Шахунянца [59] излишняя жесткость пути увеличивает динамические взаимодействия пути и подвижного состава.

Модуль упругости пути под крестовиной может быть определен из зависимости:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_{\text{пр}}} + \frac{1}{U_{\text{шп}}} + \frac{1}{U_{\text{бал}}} + \frac{1}{U_{\text{нс}}}, \quad (8)$$

где U – модуль упругости пути под цельнолитым блоком крестовины,

$U_{\text{шп}}$ – шпал,

$U_{\text{бал}}$ – модуль упругости балластного слоя,

$U_{\text{нс}}$ – модуль упругости нижнего строения пути.

Современная конструкция железнодорожного пути с железобетонным основанием имеет значительно большую жесткость в сравнении с путем на деревянных шпалах, а также характеризуется более высокими динамическими силами и вибрациями [65; 66; 67]. При этом путь с большей жесткостью склонен к более интенсивному накоплению расстройств [68].

Прокладки-амортизаторы на дорогах Восточного полигона – это единственный элемент пути, который в течение 6-7 месяцев обеспечивает снижение воздействия от подвижного состава на элементы верхнего строения пути, так как смерзшиеся балласт и земляное полотно практически несжимаемы. По результатам предварительного анализа, проведенного АО «ВНИИЖТ» за шесть месяцев, когда путь находится в смерзшемся состоянии на Забайкальской и Восточно-Сибирской дорогах выход рельсов почти в два раза выше, чем за оставшиеся полгода. Очевидно, что на это существенное влияние оказывает повышенная жесткость пути в зимний период [69].

При этом жесткость прокладок в условиях пониженных температур значительно увеличивается, также потеря упругости связана с длительной работой в условиях циклического нагружения, деградационными процессами,

протекающими под влиянием факторов окружающей среды и химических веществ. Таким образом прокладки-амортизаторы должны быть не только морозостойкими, но и достаточно упругими во время продолжительной работы [70].

Кроме того, в конструкциях переводов для холодного климата целесообразно применять крестовины низкотемпературной надежности, отливки для которых изготовлены из высокомарганцовистой стали с повышенной ударной вязкостью при температурах минус 60 °С [71].

Принимая во внимание условия работы крестовины, её прочность должна оцениваться по критериям прочности под воздействием статической и циклической нагрузки [72; 73]. Условия прочности должны быть обеспечены при сочетании наиболее неблагоприятных факторов и нагрузок на конструкцию, то есть при модуле упругости пути под крестовиной, стремящемся к модулю упругости пути с замерзшим балластом.

Учитывая высокий потенциал и перспективность конструкции моноблочных крестовин, выявленный в ходе полигонных испытаний на Экспериментальном кольце, а также мировой опыт эксплуатации подобных изделий в качестве объекта исследования была выбрана моноблочная крестовины типа Р65, марки 1/11 с четырьмя приварными рельсовыми окончаниями.

На основе результатов эксплуатационных испытаний в качестве моделируемого объекта был выбран цельнолитой блок моноблочной крестовины типа Р65, марки 1/11 как базовый несущий элемент. При проектировании конструкции крестовины рассмотрены три варианта модели, в которых учитывалась сложность и трудоемкость процесса изготовления литейных форм, и были выделены характерные опасные зоны 1 и 2 (Рисунок 4.2).

Опасные зоны соответствуют местам образования трещин в цельнолитом блоке крестовины, выявленных при проведении полигонных испытаний. Расположение первой опасной зоны обусловлено увеличением расстояния между боковыми поверхностями клина сердечника, по мере удаления от математического центра крестовины в сторону заднего торца и как следствие снижением перераспределения доли нагрузки на боковую поверхность клина

противоположную нагружаемой. Вторая опасная зона характеризуется перераспределением нагрузки между боковой поверхностью литого усовика и внешней боковой поверхностью цельнолитого блока от его горла до пазухи, расположенной со стороны переднего торца.

Первая модель имеет два продольных ребра проходящих по центру отливки (Рисунок 4.2), и полностью соответствует геометрии первой крестовины, вышедшей из строя при проведении полигонных испытаний на Экспериментальном кольце. Такая конструкция была спроектирована на основе отечественного опыта эксплуатации цельнолитых крестовин из высокомарганцовистой стали. С точки зрения конструкции и сложности изготовления литейной формы данный вариант является самым простым.

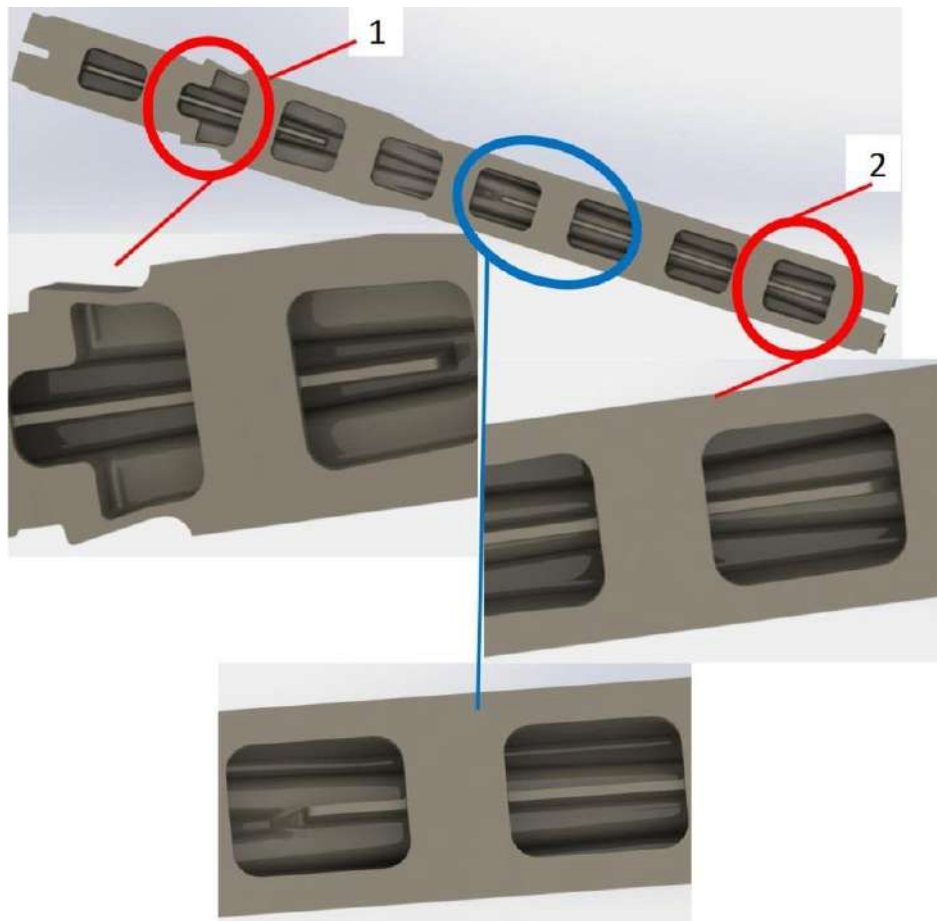


Рисунок 4.2 – Первая модель конструкции, имеющая два продольных ребра проходящих по центру отливки, с обозначенными опасными зонами: 1 – со стороны заднего торца крестовины; 2 – со стороны переднего торца крестовины

Второй вариант модели имеет два продольных ребра начинающихся от тела отливки со стороны заднего ее торца и объединяющихся в районе сечения с шириной сердечника (на уровне измерения) – 50 мм. Два коротких продольных ребра клина идут от тела отливки со стороны переднего торца и объединяются в одно ребро, сопрягающееся с ребрами, расположенными с противоположной стороны (Рисунок 4.3).

Ребра жесткости в таком варианте конструкции, в отличие от первого, располагаются в первой и второй опасных зонах под местами приложения усилий от проходящих колес. Переход в зоне сопряжения ребер выполнен в виде понижения их высоты до уровня диафрагмы, что обусловлено особенностями технологии изготовления литейной формы. Учитывая геометрию соединения и перехода двух ребер, расположенных со стороны заднего торца отливки, в одно, данный вариант является наиболее технологически сложным для реализации.

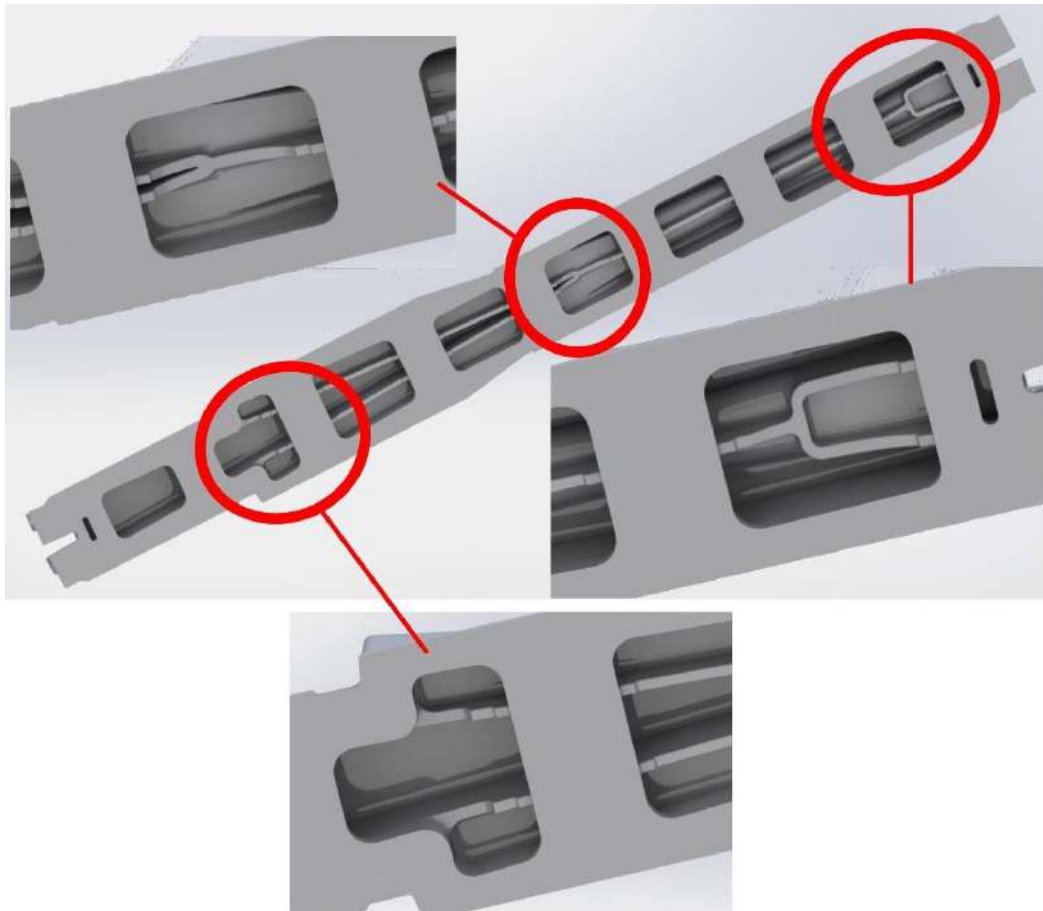


Рисунок 4.3 – Вторая модель конструкции, со сдвоенными продольными ребрами жесткости со стороны переднего и заднего торца крестовины

Модель в третьем исполнении отличается от второго варианта тем, что ребра, расположенные со стороны заднего торца отливки, объединяются в районе сечения с шириной сердечника крестовины 80 мм, а два противоположных ребра в районе ее горла (Рисунок 4.4). Таким образом повышается технологичность изготовления литейной формы в сравнении со вторым вариантом и усиливается конструкция со стороны переднего торца.

Ребра имеют увеличенную высоту по сравнению с первой и второй конструкциями, что с одной стороны должно способствовать увеличению прочностных характеристик изделия, а с другой одновременно снижению его технологичности. Изготовление литейной формы данной отливки по технологической сложности является промежуточным между первым и вторым вариантами.

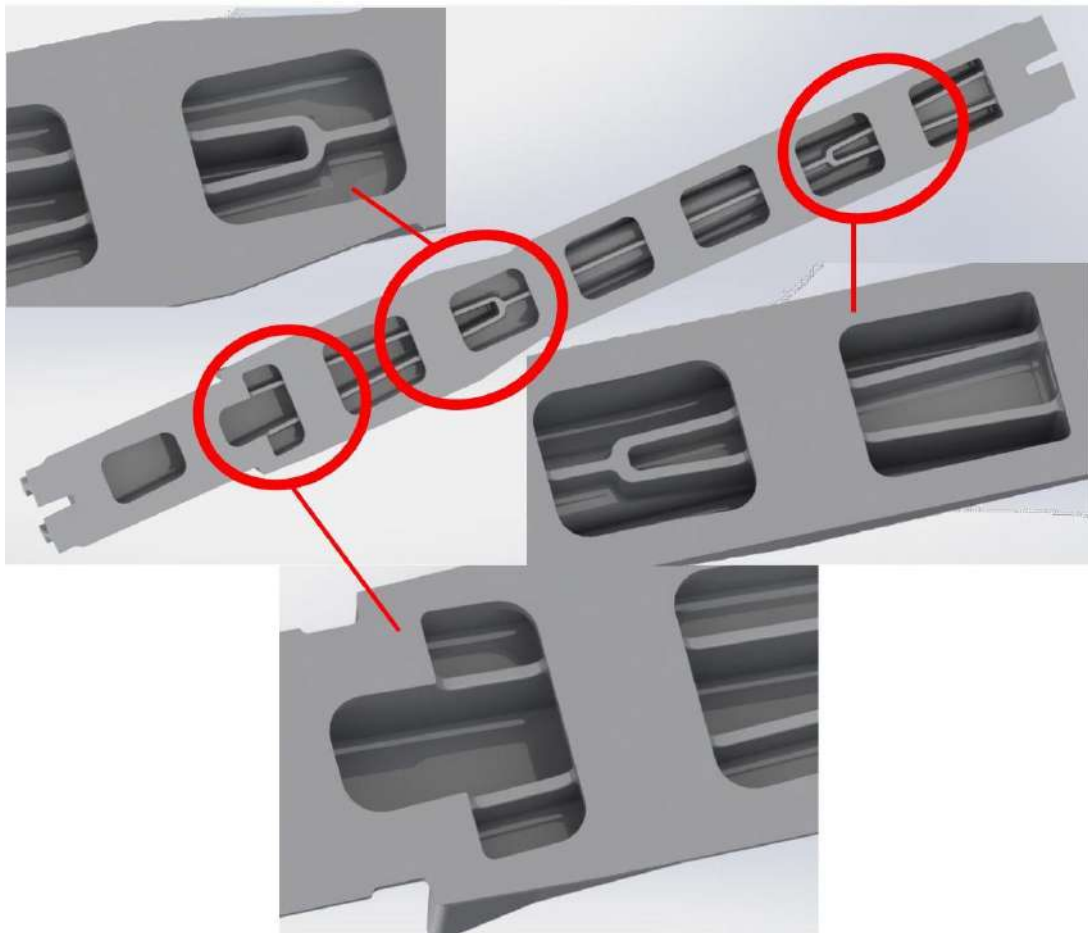


Рисунок 4.4 – Третья модель конструкции со сдвоенными продольными ребрами жесткости увеличенной длины со стороны переднего торца отливки и укороченным со стороны заднего торца, и увеличенной высотой всех ребер

Данные сочетания расположения ребер в конструкции крестовин были выбраны с целью проведения анализа влияния длины, высоты и места расположения ребер относительно поверхности катания на особенности её работы.

Анализ напряжённого состояния и оценка прочности цельнолитого блока моноблочной крестовины выполнены для всех трех вариантов конструкций рассчитываемого объекта. Для этого были подготовлены 3D модели под формат конечно-элементного комплекса ANSYS [74; 75] посредством системы ANSYS DesignModeler с одинаковой геометрией поверхности катания, а также внешними, сопрягаемыми при сборке крестовины, размерами (Рисунок 4.5).

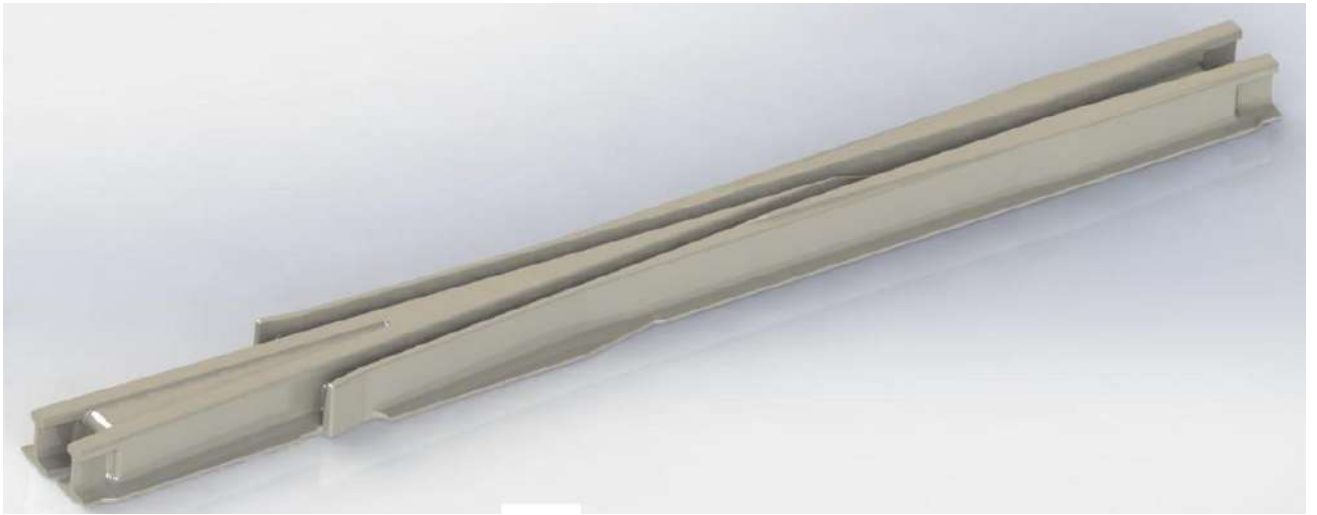


Рисунок 4.5 – 3D модель цельнолитого блока моноблочной крестовины
(наружные поверхности)

Составление математической модели осуществлялось с использованием расчетной платформы ANSYS Workbench. На данном этапе работ для проведения конечно-элементного моделирования были выбраны следующие модели поведения конструкции: нестационарный структурный анализ (Transient Structural), статический прочностной анализ (Static Structural) и явной динамики (Explicit Dynamics) [76; 77; 78].

4.2 Описание физико-механических характеристик материалов, исходные данные и граничные условия

При моделировании использовалась модель изотропного поведения материала (Isotropic Elasticity). Соответственно, модуль упругости первого рода (модуль Юнга E) равен $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона – 0,3; объемный модуль упругости (K) – $1,6667 \cdot 10^{11}$ Па; модуль сдвига (G) – $7,6923 \cdot 10^{10}$ Па [78; 79]. Ввод пределов текучести на растяжение-сжатие и пределов прочности на растяжение-сжатие осуществляем на основе данных [79; 80] и экспериментальных результатов лабораторных исследований фактически выплавляемой стали (Таблица 4.1). Полный объем выборки составил 100 плавок. Механические свойства стали 110Г13Л после термической обработки на исследуемых образцах соответствовали ГОСТ 7370.

Таким образом, предел текучести при растяжении (Tensile Yield Strength) и предел текучести при сжатии (Compressive Yield Strength) равны $380 \div 490$ МПа. Предел прочности при растяжении (Tensile Ultimate Strength) и предел прочности при сжатии (Compressive Ultimate Strength) соответственно равны $810 \div 920$ МПа. При моделировании используем нижние значения характеристик.

Таблица 4.1 – Механические свойства стали 110Г13Л после термической обработки на исследуемых образцах

№ плавки	Предел прочности, кгс/мм ²	Предел текучести, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс×м/см ²	Группа металла
155849	89,8	49,0	31,7	27,5	22,5	2
657466	93,9	49,0	42,0	36,4	32,3	1
657468	92,1	49,0	33,7	30,6	27,8	1
657487	81,4	49,0	22,2	21,0	31,9	3
205822	92,9	49,0	36,7	34,9	28,6	1
657497	89,2	49,0	32,0	29,4	22,6	2

4.3 Подготовка исходных данных для многоциклового усталостного анализа

Многоциклоый усталостный анализ проводился методом конечных элементов с использованием программной системе ANSYS. С помощью раздела Life были заданы усталостные характеристики материала. Принимаем во внимание, что для стали 110Г13Л при 10^6 циклах нагружения $\sigma_{-1} \approx 176 \div 196$ МПа [79].

Кривая Велера, необходимая для оценки усталостной долговечности, была восстановлена по имеющимся данным, представленным на Рисунке 4.6. Для получения функциональной зависимости $\sigma_{-1}(N)$ использовался программный продукт для обработки статистических данных TableCurve 2D. На Рисунке 4.6 представлена обозначенная функциональная зависимость, которая описывается следующим выражением:

$$\sigma_{-1}(N) = 182.78873 + 11831.041 \cdot N^{-0.49416464}. \quad (9)$$

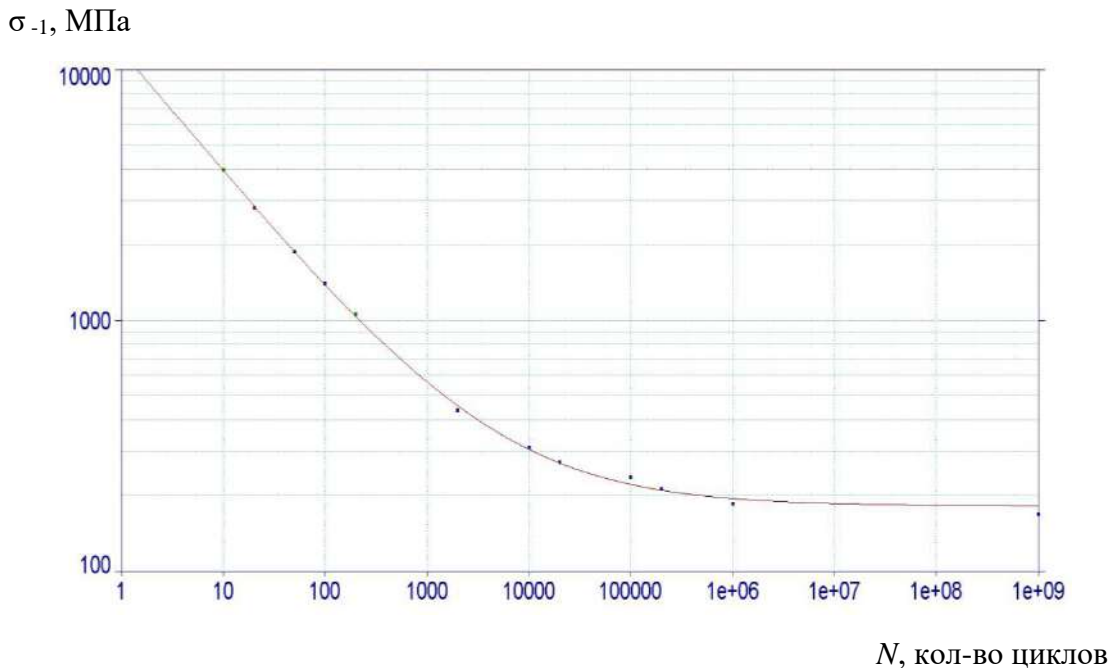


Рисунок 4.6 – Функциональная зависимость $\sigma_{-1}(N)$ для стали 110Г13Л

Коэффициент: трения-качения («стальное колесо по стали») – 0,001-0,05; трения-скольжения («сталь-сталь» - без смазки) – 0,15.

Меширование выполнялось на следующих параметрах: метод разбиения на конечные элементы – тетрагональная сетка; максимальный размер конечных элементов – 50 мм; размер конечных элементов в контактной зоне, а также на внутренних поверхностях крестовины – 2-4 мм; параметры сгущения сетки к зоне контакта (Inflation): максимальное количество слоев сгущения – 6, инкремент роста (Growth Rate) – 1,2 (Рисунок 4.7).

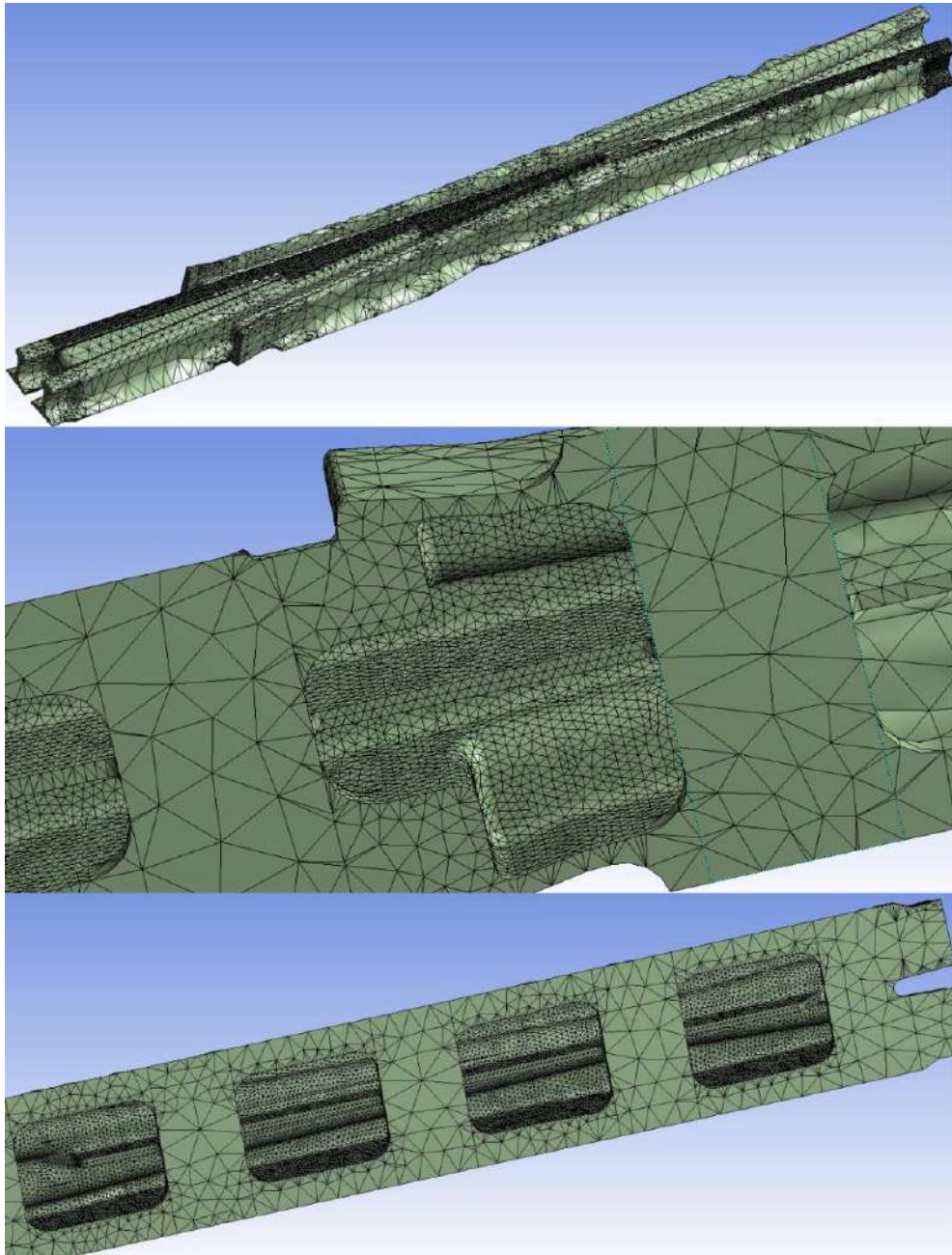


Рисунок 4.7 – Конечно-элементная модель конструкции с одним ребром

Нагрузка на ось колесной пары составляет 270000 Н. Соответственно, нагрузка на колесо равна 135000 Н. Учтены инерционные нагрузки.

В расчетной модели выделены и обозначены следующие контактные поверхности (Рисунок 4.8): Contact bodies – контактные поверхности вагонного колеса; Target bodies – контактные поверхности стрелочного перевода. Тип контакта – фрикционный-Frictional (с учетом трения-качения). Использован расширенный метод Лагранжа при обновлении матрицы жесткости на каждой итерации.

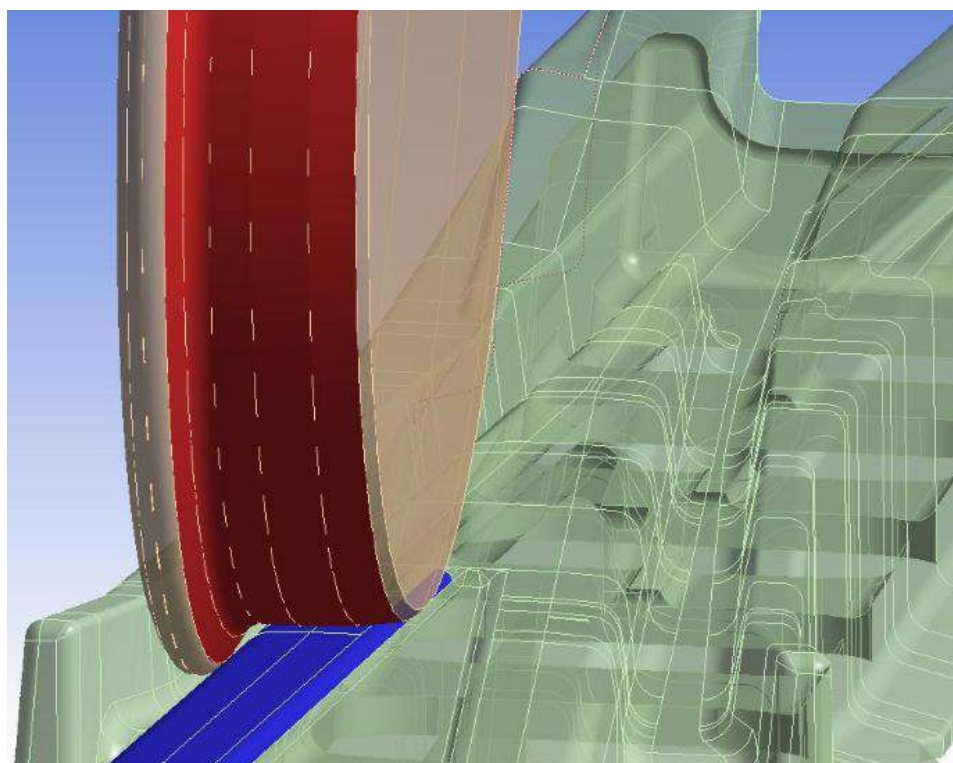


Рисунок 4.8 – Зона контакта колеса и крестовины

В настройках конечно-элементного анализа (Analysis Settings) были выбраны следующие параметры: количество начальных подшагов – 20, минимальное количество подшагов – 10, максимальное количество – 100; активирован контроль больших деформаций; активирован нелинейный контроль: вариант метода Ньютона-Рафсона – полный; активирован учет конвергенции нагрузки.

Нижняя опорная поверхность цельнолитого блока моноблочной крестовины была выбрана в качестве неподвижной опоры (fixed support).

4.4 Моделирование вариантов конструкции крестовины

Моделирование первого варианта конструкции с двумя продольными ребрами, проходящими по центру отливки. Моменту времени τ_1 соответствуют положения железнодорожных колес, представленные на Рисунке 4.9. Каждый последующий момент времени τ_n характеризует следующее положение колеса, отличающееся от предыдущего на расстояние 15 мм.

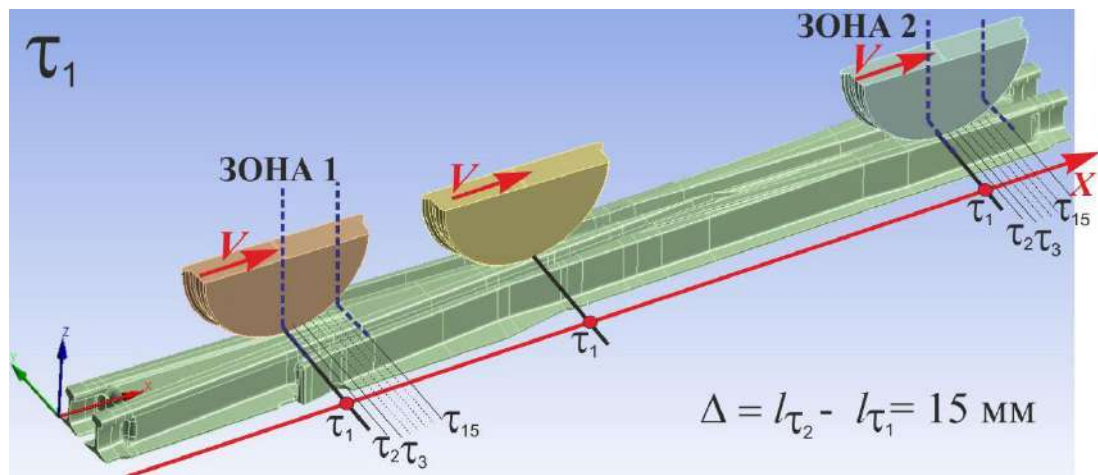


Рисунок 4.9 – Перемещение колеса относительно цельнолитого блока моноблочной крестовины в процессе моделирования

На Рисунке 4.10 представлено поле распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (МПа) в цельнолитом блоке моноблочной крестовины для момента времени τ_1 .

Эквивалентные напряжения по Мизесу определяются соотношением:

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}}. \quad (10)$$

Поля распределения коэффициента запаса на статическую и усталостную прочность представлены на Рисунках 4.11 и 4.12 соответственно.

Аналогичным образом были получены картины распределения полей для других сечений крестовины.

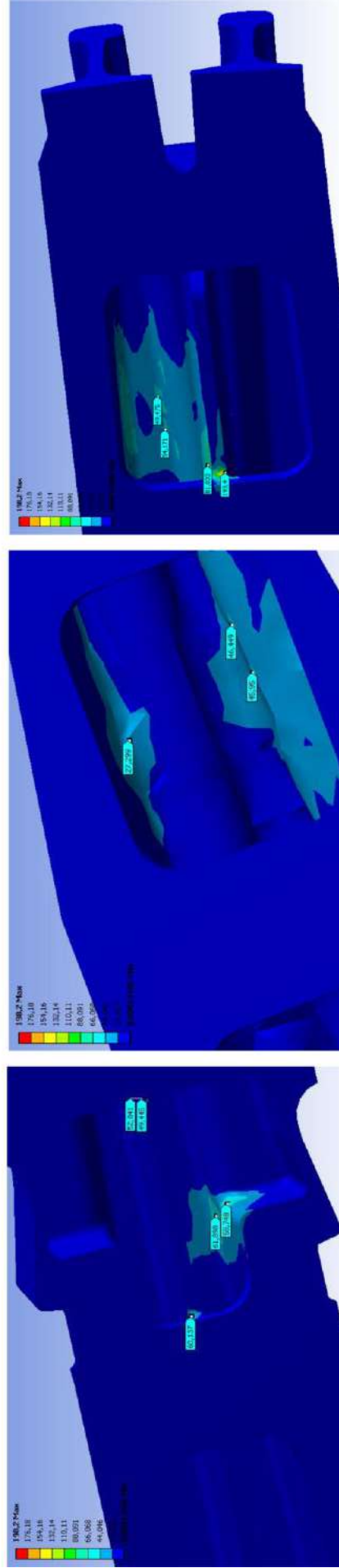
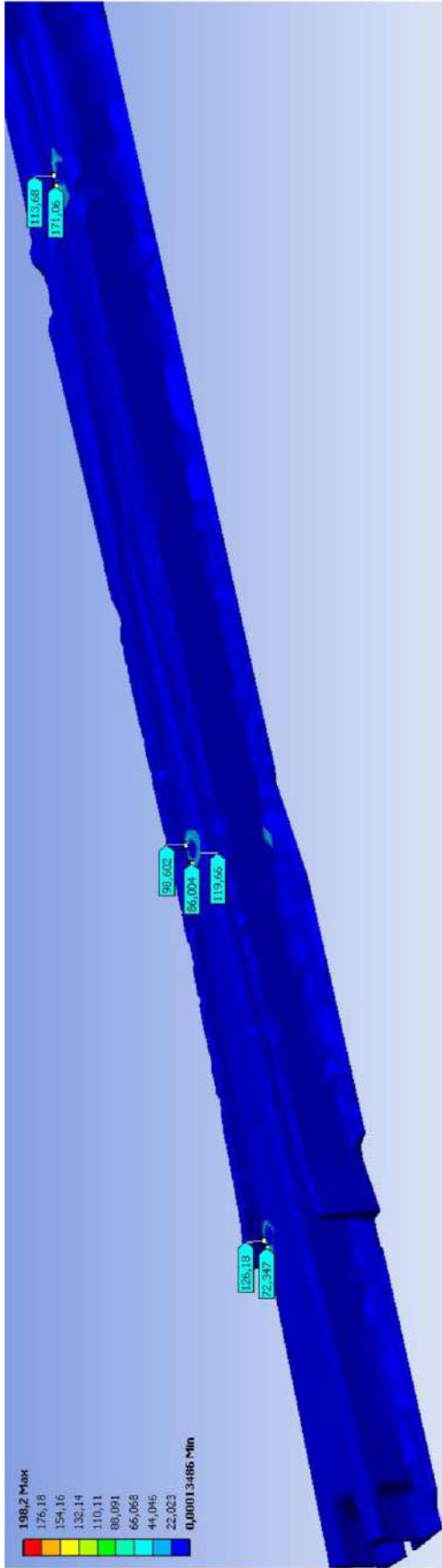


Рисунок 4.10 – Поле распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (МПа) в цельнолитом блоке моноблочной крестовины для момента времени τ_1

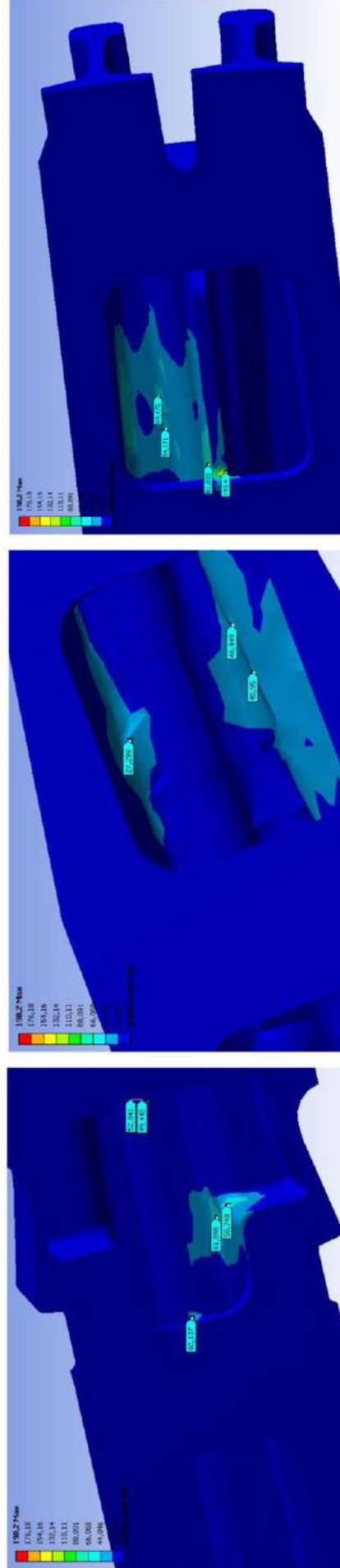
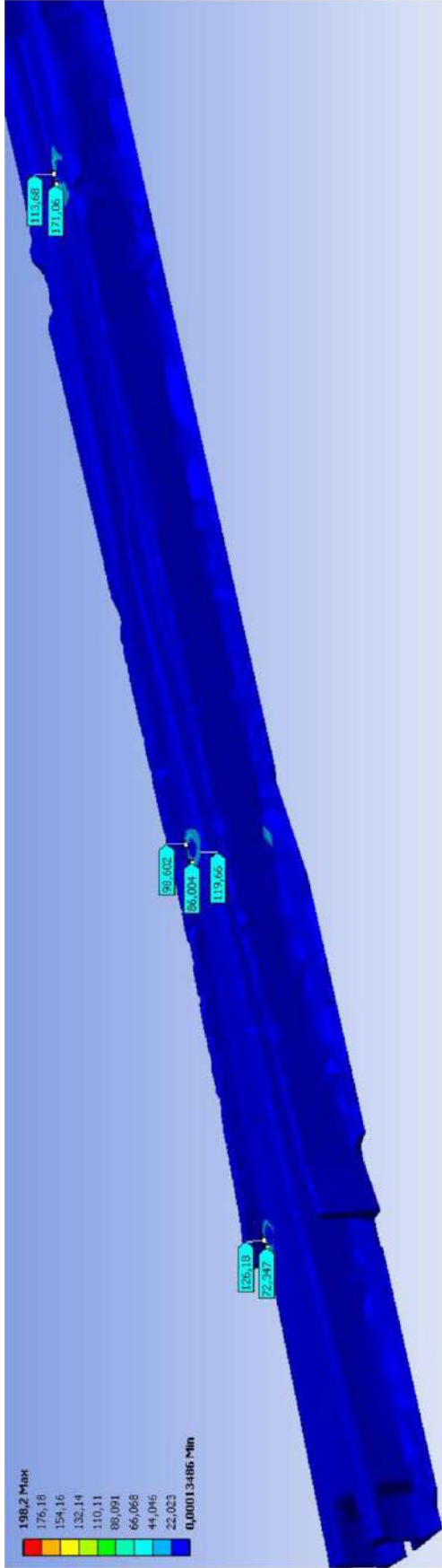


Рисунок 4.11 – Распределение коэффициента запаса прочности при статической нагрузке для цельнолитого блока моноблочной крестовины для момента времени τ_1

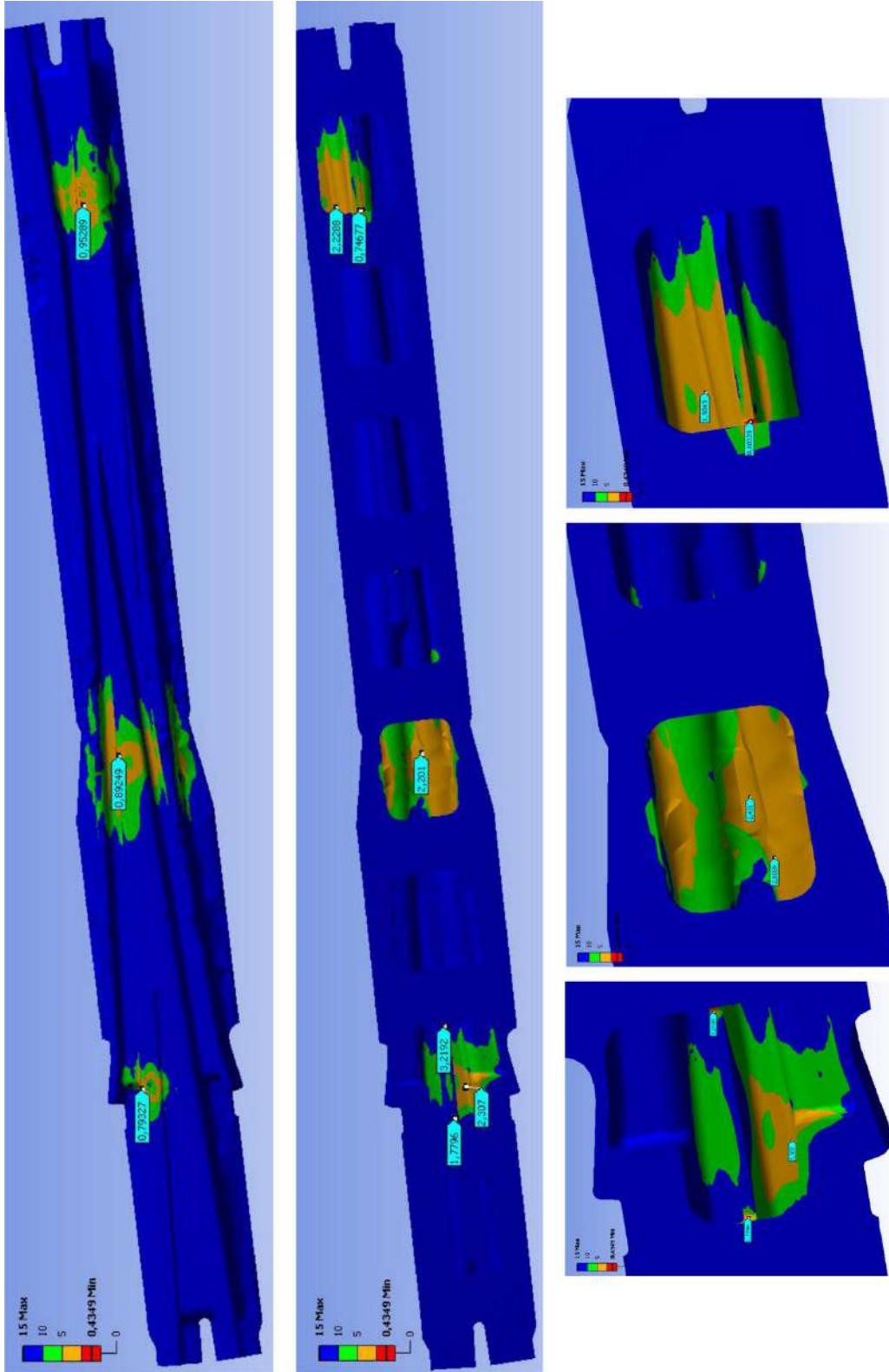


Рисунок 4.12 – Распределение коэффициента запаса на усталостную прочность для цельнолитого блока моноблочной крестовины для момента времени τ_1

Как видно из Рисунков 4.10 – 4.12 опасные зоны крестовины, выявленные в результате моделирования, полностью совпадают с картиной разрушения, представленной на Рисунках 1.8 и 1.9. Таким образом подтверждается, что причиной образования трещин являлось накопление усталостных повреждений материала на концентраторах напряжений.

Учитывая тот факт, что коэффициент запаса прочности при статической нагрузке в разы больше коэффициента запаса на усталостную прочность, и в таком случае не будет оказывать влияния на условие прочности изделия, его расчет для второго и третьего варианта конструкции не производился.

Моделирование второго варианта конструкции со сдвоенными продольными ребрами жесткости со стороны переднего и заднего торца крестовины.

Моделирование данного вида конструкции было произведено аналогично конструкции с двумя продольными ребрами, проходящими по центру отливки. На Рисунках 4.13 и 4.14 представлено поле распределения эквивалентных напряжений в опасных зонах. Поле распределения коэффициента запаса на усталостную прочность представлено на Рисунках 4.15.

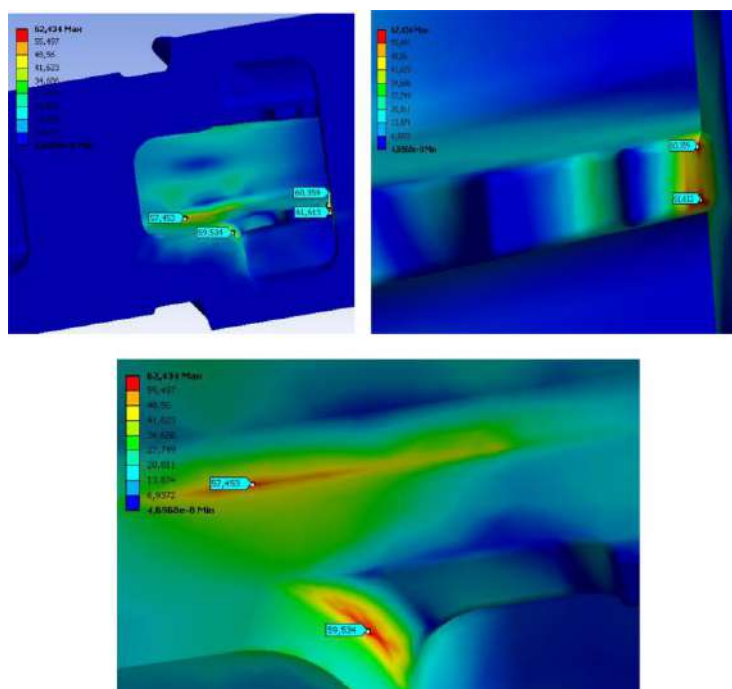


Рисунок 4.13 – Поле эквивалентных напряжений в первой опасной зоне
(значения в МПа)

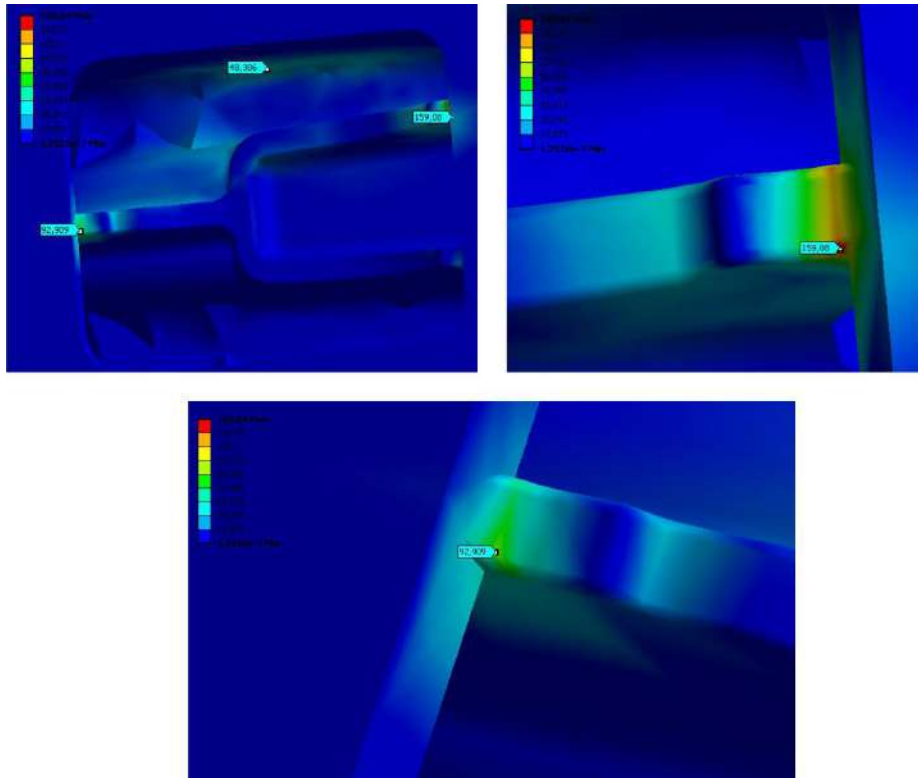


Рисунок 4.14 – Поле эквивалентных напряжений во второй опасной зоне
(значения в МПа)

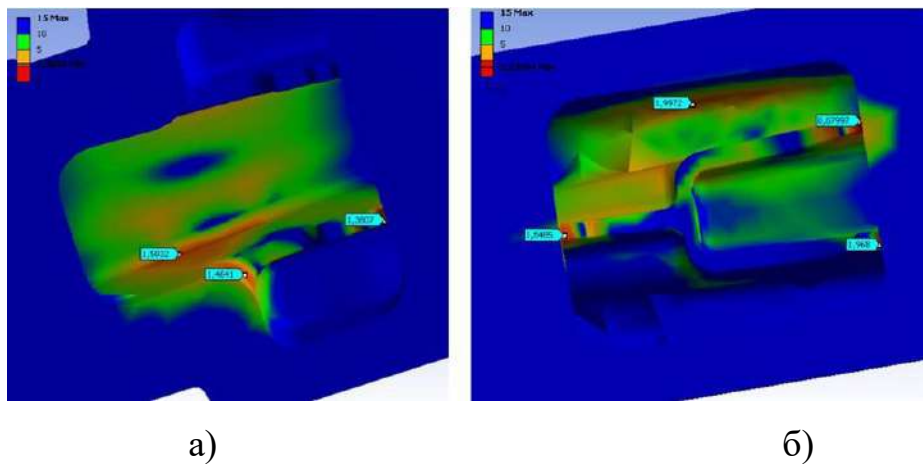


Рисунок 4.15 – Коэффициент запаса на усталостную прочность:
а) в первой опасной зоне; б) во второй опасной зоне

Моделирование третьего варианта конструкции со **сдвоенными продольными ребрами жесткости** увеличенной длины со стороны переднего торца отливки, укороченными со стороны заднего торца и увеличенной высотой всех ребер.

На Рисунках 4.16 и 4.17 представлено поле распределения эквивалентных напряжений в опасных зонах. Поле распределения коэффициента запаса на усталостную прочность представлено на Рисунке 4.18.

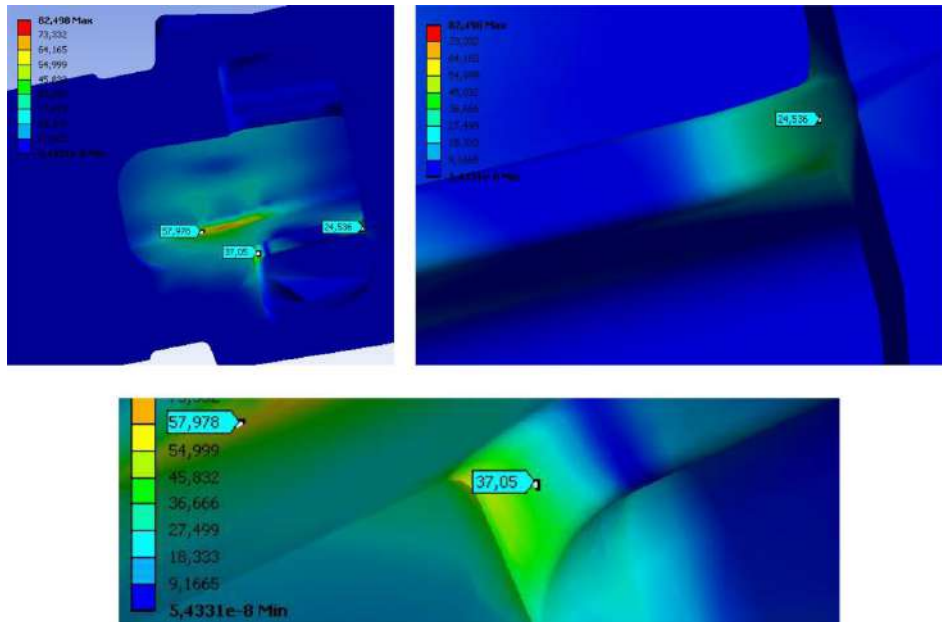


Рисунок 4.16 – Поле эквивалентных напряжений в первой опасной зоне
(значения в МПа)

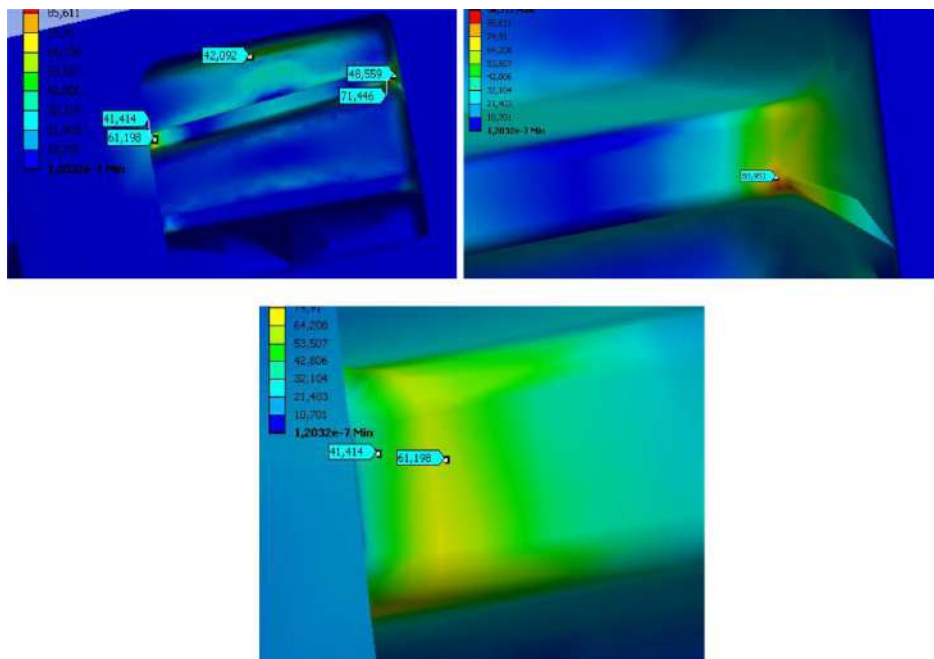


Рисунок 4.17 – Поле эквивалентных напряжений во второй опасной зоне
(значения в МПа)

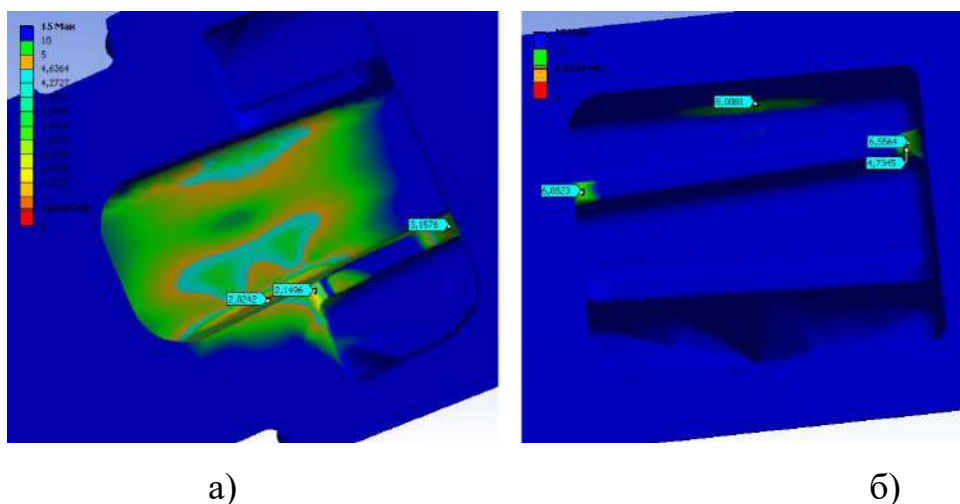


Рисунок 4.18 – Коэффициент запаса на усталостную прочность:
 а) в первой опасной зоне; б) во второй опасной зоне

4.5 Результаты численного моделирования

В ходе проведенного конечно-элементного моделирования определено напряженно-деформированное состояние трех вариантов конструкций моноблочной крестовины, находящейся в условиях многоциклового усталостного воздействия.

Полученные в процессе моделирования максимальные уровни эквивалентных напряжений и минимальные значения коэффициента запаса на усталостную прочность в опасных зонах 1 и 2 (Рисунок 4.2) для всех видов конструкций представлены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчета для моделей 1 – 3

Вариант конструкции	Эквивалентные напряжения <i>max</i> , МПа		Коэффициента запаса на усталостную прочность, <i>min</i> , МПа	
	1 зона	2 зона	1 зона	2 зона
1	376	221	0,36	0,46
2	62	159	1,38	1,63
3	58	81	2,02	4,73

Установлено, что из всех рассмотренных конструкций цельнолитой крестовины, наименьшей прочностью в условиях многоциклового усталостного воздействия обладает первый вариант (конструкция с одним ребром), а третья конструкция обладает лучшими прочностными характеристиками.

Таким образом целесообразно при проектировании моноблочных крестовин продольные ребра жесткости располагать непосредственно под поверхностью катания.

Принимая во внимание отличие в 2,3 раза коэффициента запаса на усталостную прочность между 1 и 2 зонами третьей конструкции, а также его локализацию, для увеличения коэффициента запаса в первой опасной зоне необходимо провести изменение конструкции путем смещения, существующего ребра жесткости в сторону области контакта колеса с поверхностью катания крестовины, или введения дополнительного элемента жесткости, ребра, как показано на рисунке 4.19. Данные решения позволят усилить конструкцию крестовины, повысить ее долговечность и безотказность работы.

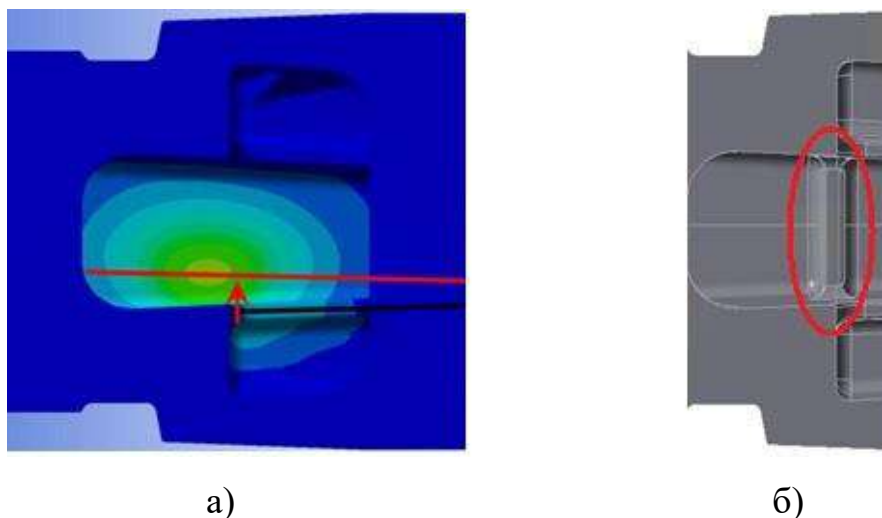


Рисунок 4.19 – Рекомендуемые варианты конструкции: а) смещение места расположения ребра жесткости относительно зоны контакта колеса с поверхностью катания крестовины (вид снизу отливки); б) введение дополнительного ребра жесткости в конструкцию крестовины

С учетом существующих технологических возможностей по изготовлению отливок реализация конструкции крестовины со смещенным ребром (Рисунок 4.19 а) не представляется возможной. Это обусловлено недостаточным для сохранения целостности литейной формы расстоянием между расчетным местом расположения ребра и внутренней поверхностью стенки отливки, поэтому необходимо применять вариант конструкции, представленный на Рисунке 4.19 б).

Введение дополнительного ребра жесткости в конструкцию крестовины (Рисунок 4.19 б) позволило в первой опасной зоне снизить уровень эквивалентных напряжений до 47 МПа, а также увеличить коэффициент запаса на усталостную прочность до 4,18.

Выводы по четвертой главе

1. Для разработки методов моделирования крестовин в качестве объекта исследования целесообразно выбрать моноблочную крестовину типа Р65, марки 1/11 с четырьмя приварными рельсовыми окончаниями, как перспективный вариант конструкции.

2. Для исследования напряженно-деформированного состояния моноблочной крестовины с целью совершенствования ее конструкции был разработан метод, позволяющий анализировать особенности геометрии ее сечений.

3. Результаты исследования напряжений в моноблочных крестовинах должны быть подтверждены испытаниями конструкций непосредственно в пути.

4. В результате моделирования был получен усовершенствованный вариант моноблочной крестовины. В соответствии с полученными результатами моделирования третий вариант конструкции, с учетом включения в него дополнительного ребра жесткости является приоритетным для постановки на производство.

5 ДИНАМИКО-ПРОЧНОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОНОБЛОЧНЫХ КРЕСТОВИН

В период с 2014 по 2019 год на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ», станциях Исилькуль и Чемской Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры были проведены динамико-прочностные и эксплуатационные испытания стрелочных переводов типа Р65 марки 1/11 проектов Н01.001.0000.00 и Н01.004.0000.00 на железобетонном подрельсовом основании, разработанные и изготовленные на основе и с учётом опыта длительной эксплуатации конструкций перевода проекта 2750.00.000.

Основные геометрические параметры модернизированных стрелочных переводов обеспечивают его взаимозаменяемость с эксплуатируемым переводом, проекта 2750. В конструкции переводов проектов Н01.001.0000.00 и Н01.004.0000.00 применены стрелки с гибкими остряками, моноблочные крестовины с четырьмя приварными рельсовыми окончаниями, контррельсы из уголка контррельсового СП850.

Улучшены профиль поверхности катания крестовины и конструкция контррельсового узла, позволяющие снизить динамику взаимодействия пути и подвижного состава в пределах стрелочного перевода, предотвратить преждевременный отказ элементов, уменьшить их расстройство и интенсивность износа. В конструкции перевода также применены прокладки-амортизаторы с повышенным ресурсом [81].

5.1 Методика проведения испытаний

Динамико-прочностные испытания моноблочной крестовины проводились в составе модернизированного стрелочного перевода типа Р65 марки 1/11 проекта Н01.004.0000.00 на железобетонном подрельсовом основании с шурупно-дюбельным креплением в условиях интенсивной эксплуатации на стрелочном

переводе № 38 на I-м главном пути станции Чемской Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» от воздействия обращающихся поездов.

Условия, в которых проводились испытания, характеризуются следующими данными: грузонапряжённость участка Обь – Проектная, на котором расположена станция Чемской, составляет 128,3 млн т км брутто на км в год; скорости движения поездов 80 км/ч по прямому пути и 40 км/ч по боковому пути стрелочного перевода. На участке преимущественно грузовое движение.

Для оценки напряжённо-деформированного состояния крестовинного узла стрелочного перевода типа Р65 марки 1/11 проекта Н01.004.0000.00 при проведении динамико-прочностных испытаний предусмотрена регистрация:

- напряжений в элементах крестовины и контррельсового узла;
- упругих деформаций и перемещений элементов крестовинного узла;
- упругих изменений ширины колеи.

Величины параметров регистрировались аттестованными приборами (усилителями и датчиками) электротензометрическим методом.

Напряжения регистрировались с использованием тензорезисторов, перемещения – тензометрических измерителей перемещений.

Схемы расположения приборов представлены на Рисунках 5.1 – 5.4.

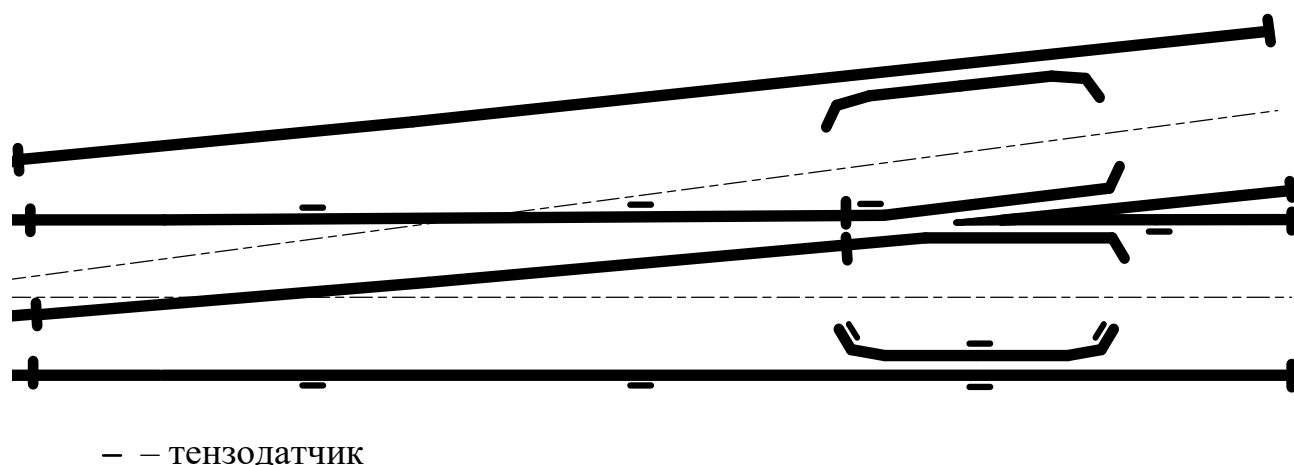


Рисунок 5.1 – Схема установки тензодатчиков на стрелочном переводе типа Р65 марки 1/11 по прямому пути

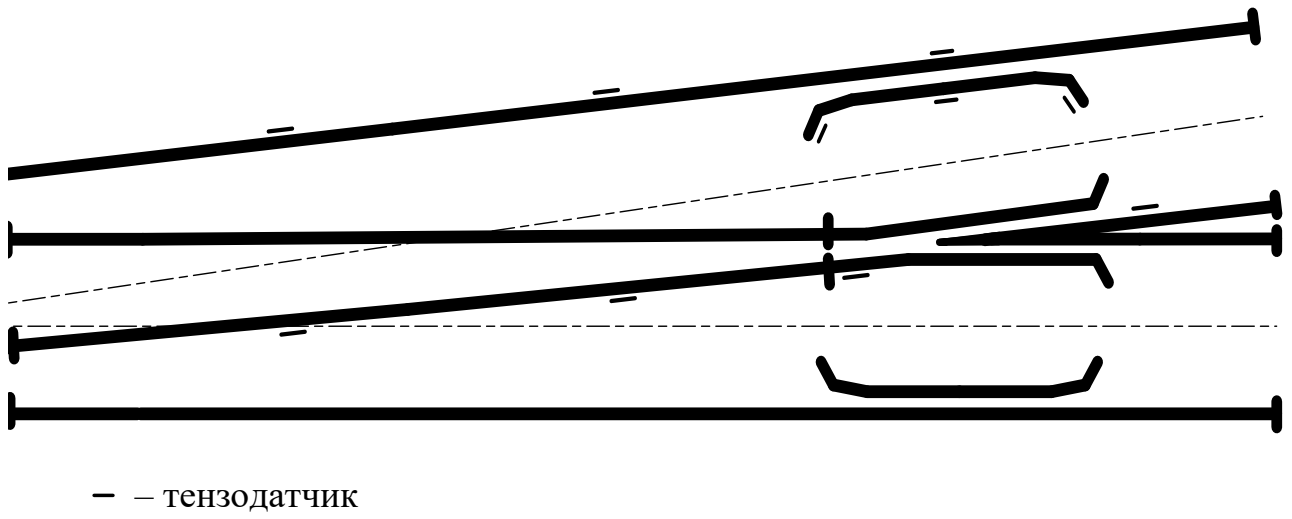


Рисунок 5.2 – Схема установки тензодатчиков на стрелочном переводе типа Р65 марки 1/11 по боковому пути

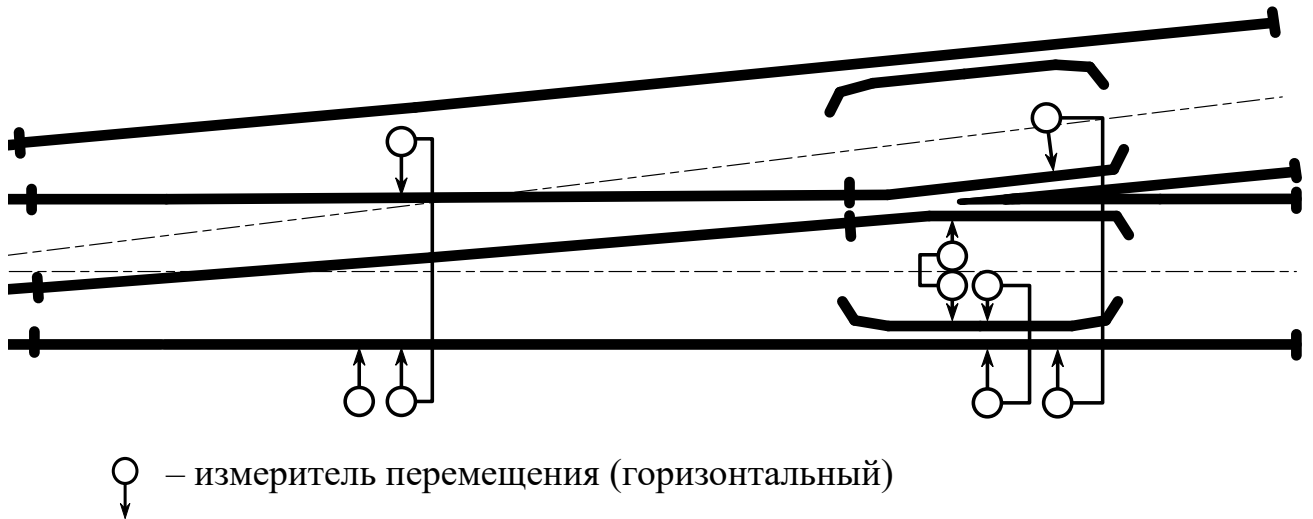
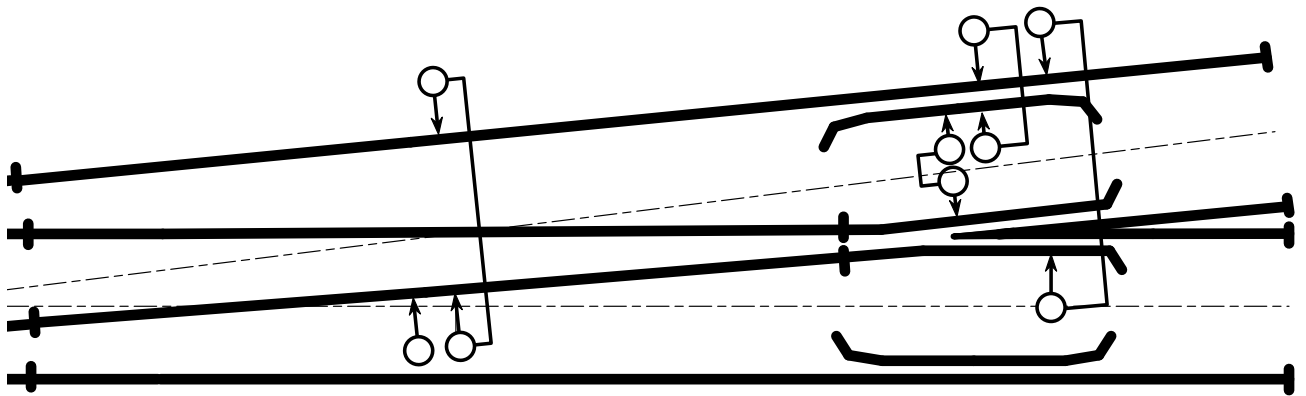


Рисунок 5.3 – Схема измерения деформаций на стрелочном переводе типа Р65 марки 1/11 по прямому пути



○ – измеритель перемещения (горизонтальный)
 ↓

Рисунок 5.4 – Схема измерения деформаций на стрелочном переводе типа Р65 марки 1/11 по боковому пути

В качестве испытательных, для проведения динамико-прочностных и эксплуатационных испытаний, использовались обращающиеся по I-му главному пути станции Чемской Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» поезда в установленном режиме скоростей. Дополнительно, для проведения динамико-прочностных испытаний, использовался испытательный поезд, сформированный по схеме локомотив – два грузовых вагона – локомотив. При проведении динамико-прочностных испытаний с использованием дополнительно испытательного поезда, поездки осуществлялись по прямому и боковому путям стрелочного перевода в пошерстном (ПШ) и противощерстном (ПРШ) направлениях. Скорости движения испытательного поезда реализовывались по прямому пути от 25 км/ч до 160 км/ч и до 50 км/ч по боковому пути с интервалом в 20-25 км/ч. Для испытательного поезда было выполнено по 6 циклов (ПШ-ПРШ) поездок с указанными скоростями.

5.2 Напряжённое состояние элементов крестовинного узла

5.2.1 Напряжённое состояние крестовины

Расположение тензодатчиков, регистрирующих напряжения в кромках подошвы литой и приварных рельсовых частей крестовины моноблочной конструкции стрелочного перевода проекта Н01.004.0000.00 представлены на Рисунке 5.5.



а)



б)

Рисунок 5.5 – Расположение датчиков на крестовине стрелочного перевода:

а) в зоне литой части б) в зоне приварных рельсовых окончаний

В результате проведенной работы получены данные о напряжениях в наиболее нагруженных местах рельсовых элементов стрелочного перевода и крестовины.

Максимальные зарегистрированные напряжения в кромках подошвы приварной рельсовой части крестовины стрелочного перевода проекта Н01.004.0000.00 от воздействия электровоза 2ЭС6 и грузовых вагонов обращающихся по I-му главному пути при скорости 80 км/ч, достигали величины 132 МПа, от воздействия вагонов 117 МПа. Максимальные зарегистрированные напряжения от воздействия маневрового локомотива ТЭМ18Д опытного поезда при движении по боковому пути при скоростях движения до 40 км/ч достигали 125 МПа, от воздействия вагонов – 114 МПа. Наибольшие зарегистрированные напряжения в рельсовых окончаниях крестовины не превышают допускаемые, ограниченные величиной 240 МПа.

Максимальные зарегистрированные напряжения в кромках подошвы литой части крестовины стрелочного перевода проекта Н01.004.0000.00 от воздействия электровоза 2ЭС6, тепловоза ТЭМ18Д и грузовых вагонов, обращающихся по прямому и боковому путям стрелочного перевода, не превышают 80 МПа. Наибольшие зарегистрированные напряжения в кромках подошвы литой части крестовины не превышают допускаемые, составляющие 110 МПа.

Осциллограмма напряжений в кромках подошвы литой части крестовины моноблочной конструкции представлена на Рисунке 5.6.

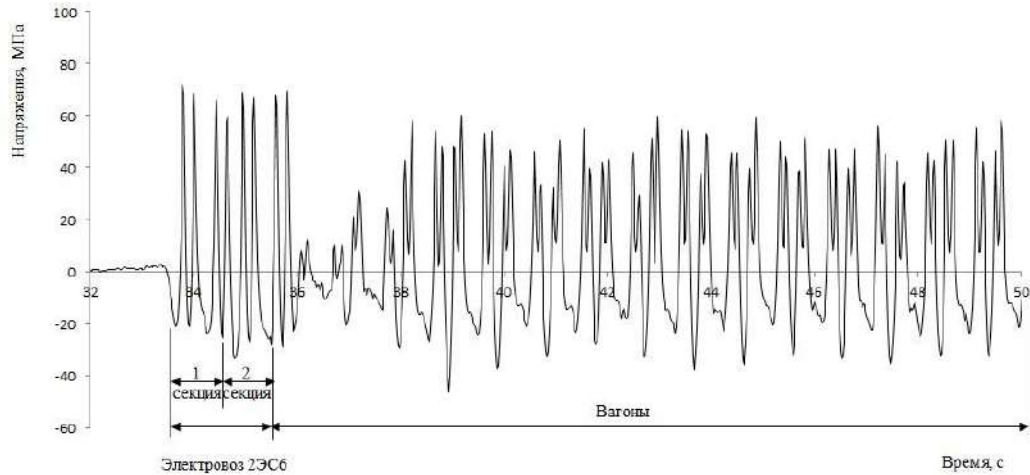


Рисунок 5.6 – Осциллограмма напряжений в кромках подошвы литой части крестовины моноблочной конструкции от воздействия электровоза 2ЭС6 и грузовых вагонов

5.2.2 Напряжённое состояние контррельса

Напряжения в контррельсах из профиля СП850 регистрировались от воздействия электровоза 2ЭС6 и грузовых вагонов, обращающихся по прямому пути, а также от маневрового тепловоза ТЭМ18Д и грузовых вагонов, обращающихся по боковому пути стрелочного перевода со скоростями до 80 км/ч и 40 км/ч соответственно. Расположение тензодатчиков на контррельсе представлено на Рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 – Расположение тензодатчиков на контррельсе стрелочного перевода проекта Н01.004.0000.00

Максимальные напряжения в контррельсе прямого пути от воздействия подвижного состава поезда, обращающегося по прямому пути стрелочного перевода достигали величины 155 МПа. В контррельсе бокового пути наибольшие напряжения достигали 167 МПа. Наибольшие зарегистрированные напряжения в контррельсе не превышают допускаемые, составляющие 330 МПа.

5.2.3 Напряжённое состояние элементов креплений

Расположение тензодатчиков на клеммах SKL 12-32 представлено на Рисунке 5.8.



а)

б)

Рисунок 5.8 – Расположение тензодатчиков на клеммах SKL 12-32 стрелочного перевода Н01.004.0000.00

Осциллограмма напряжений в клемме скрепления SKL 12-32 от воздействия подвижного состава представлена на Рисунке 5.9. Максимальные зарегистрированные напряжения в клеммах SKL 12-32 не превышали 150 МПа. Замечаний по работе скреплений SKL 12-32 на период проведения динамико-прочностных испытаний стрелочного перевода не было.

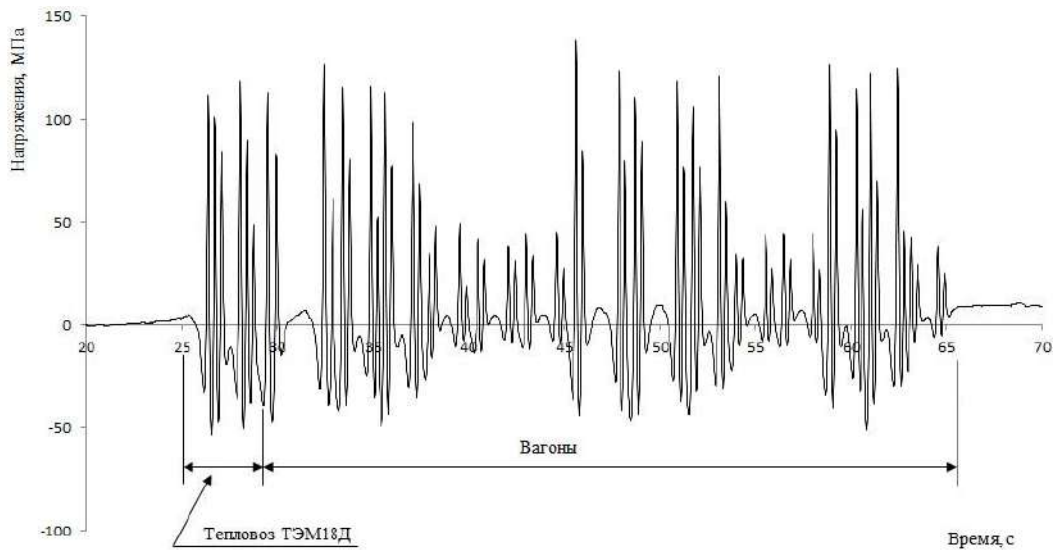


Рисунок 5.9 – Осциллограмма напряжений в клемме SKL 12-32

5.3 Упругие изменения ширины колеи

Наибольшие упругие изменения ширины колеи в зоне крестовины стрелочного перевода проекта Н01.004.0000.00 не превышали 4,0 мм в сторону её уширения при движении поезда по боковому пути, как от воздействия локомотивов, так и от воздействия вагонов. При движении поезда по прямому пути наибольшие упругие изменения ширины колеи в зоне крестовины не превышали величины 2,5 мм.

Зарегистрированные наибольшие величины упругих изменений ширины колеи отвечают требованиям обеспечения безопасности движения поездов. Осциллограмма упругих изменений ширины колеи в зоне крестовины стрелочного перевода проекта Н01.004.0000.00 при движении поезда по боковому пути представлена на Рисунке 5.10.

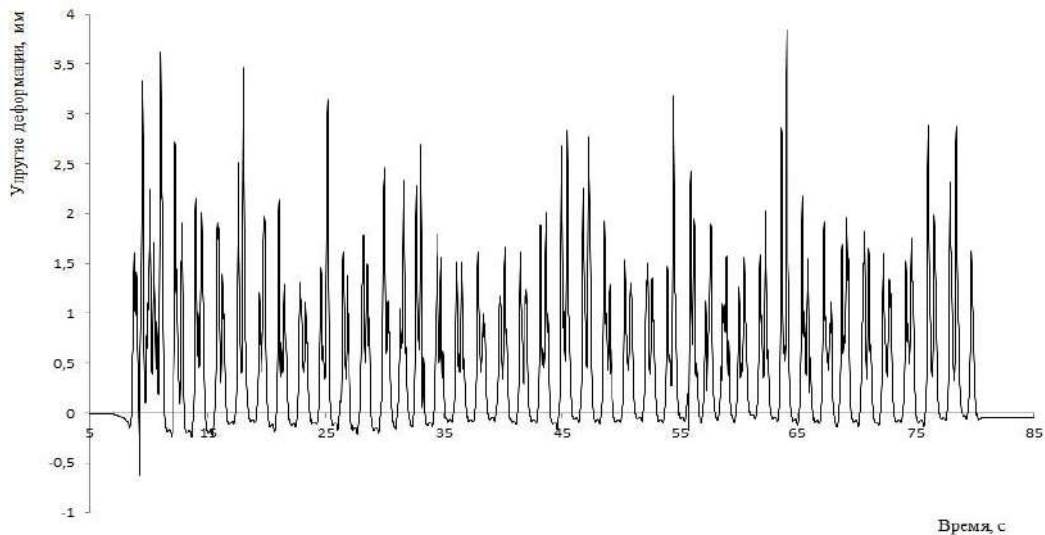


Рисунок 5.10 – Осциллограмма упругих изменений ширины колеи по боковому пути в зоне крестовины стрелочного перевода типа Р65 марки 1/11 проекта Н01.004.0000.00

Выводы по пятой главе

1. Наибольшие зарегистрированные напряжения в кромках подошвы литой части крестовины не превышают допустимых значений и составляют 80 МПа.
2. Наибольшие зарегистрированные величины упругих изменений ширины колеи в зоне крестовинного узла не превышали 2,5 и 4,0 мм по прямому и боковому пути соответственно. Указанные значения упругих изменений ширины колеи направлены в сторону увеличения и соответствуют требованиям обеспечения безопасности движения.
3. Результаты проведенных динамико-прочностных испытаний стрелочного перевода типа Р65 марки 1/11 проекта Н01.004.0000.00 на железобетонных брусках свидетельствуют о том, что конструкция крестовины стрелочного перевода отвечает требованиям обеспечения безопасности движения поездов что подтверждает результаты расчетов, выполненных методом моделирования.

6 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КРЕСТОВИН

6.1 Эксплуатационные испытания моноблочных крестовин

В апреле 2017 г. на станции Исилькуль Входнинской дистанции пути Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры для подтверждения технических характеристик было уложено пять стрелочных переводов проекта Н01.001.0000.00 на железобетонном основании. Два из них, №5 и №35, изначально были уложены с моноблочными крестовинами проекта Н.01.002.3000.00 первой конструкции. Данные крестовины вышли из строя до достижения гарантийной наработки, составляющей 80 млн т брутто [82, 83]. После изъятия из пути крестовин первой конструкции в состав стрелочных переводов №5 и №35 были уложены крестовины того же проекта второй и третьей конструкции соответственно.

Стрелочные переводы № 5 и № 35 находятся на 1 пути, по которому обращается подвижной состав с нагрузкой на ось до 25 тс. Эксплуатационные условия характеризуются следующими данными: грузонапряжённость участка, на котором расположена станция Исилькуль, составляла до 186,7 млн т км брутто на км в год; скорости движения поездов до 80 км/ч по прямому пути и 40 км/ч по боковому пути стрелочного перевода. На участке преимущественно грузовое движение.

Целью эксплуатационных испытаний являлось определение ресурсных показателей крестовин в условиях реальной эксплуатации, определение видов и причин возникновения отказов, износостойкости элементов крестовин, а также наличия влияния условий эксплуатации на отказы крестовин.

В процессе испытаний определялись следующие показатели:

- износ элементов каждого из объектов испытаний в зависимости от наработки;
- возникновение дефектов в элементах каждого из объектов испытаний (дефектостойкость) по видам дефектов;
- ресурсные показатели.

Дополнительно, с целью оценки влияния конструктивных особенностей крестовин стрелочных переводов на стабильность их эксплуатационной работы, исследовалось изменение состояния геометрии параметров их рельсовой колеи. Состояние рельсовой колеи и желобов на стрелочном переводе контролировалось по параметрам, приведенным в Таблицах 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1 – Контролируемые параметры рельсовой колеи в зоне крестовины стрелочного перевода

Место измерения	Нормативное значение, мм	Допуски, мм
Размеры ширины колеи		
В переднем стыке крестовины: - по прямому пути - по боковому пути	1520	+3/-3
	1520	+3/-3
В сечении сердечника 40 мм - по прямому пути - по боковому пути	1520	+3/-3
	1520	+3/-3
В заднем стыке крестовины: - по прямому пути - по боковому пути	1520	+3/-3
	1520	+3/-3

Таблица 6.2 – Контролируемые параметры ширины желобов в крестовине и рельсе крестовины с контррельсом стрелочного перевода

Место измерения		Нормативное значение, мм	Допуски на содержание, мм
Крестовина	Горло	62	+6 -1
	Сечение сердечника 40 мм	46	+2 -2
	В конце отвода усовиков	64	+5 -2
	На входах усовиков	86	+7 -2
Контррельс	На входах	86	+7 -2
	В конце отводов	64	+6 -2
	В прямой части контррельса	44	+3 -2
	В конце отводов	64	+6 -2
	На входах	86	+7 -2

Фиксация, контролируемых в процессе испытаний параметров, производилась путем периодических обследований объектов испытаний. Величины контролируемых параметров измерялись с помощью прямых измерений непосредственно в пути. Наличие (отсутствие) дефектов определялось визуально.

Размеры дефектов определялись с помощью: штангенциркуля, линейки и рулетки. Износ рельсовых элементов и крестовин определялся штангенциркулем ПШВ. Для измерения ширины рельсовой колеи использовались путевые шаблоны.

6.1.1 Результаты эксплуатационных испытаний моноблочной крестовины второй конструкции в составе стрелочного перевода

В процессе испытаний выявились дефекты в железобетонном основании стрелочных переводов. На переводных брусках №27, 28, 29 по правой нити по прямому направлению имелись поперечные трещины по внешней выкружке в подрельсовой части.

После наработки 50-55 млн т брутто отмечался, спływ металла по дефекту ДКу.44.2 на контррельсе из профиля СП850 (Рисунок 6.1), который был удален. Наблюдался также износ контррельса. На момент наработки 235,6 млн т брутто по крестовине износ контррельса составлял 2,2 мм.

В процессе эксплуатации регулярно выявлялись факты несвоевременного удаления наплывов металла на боковой выкружке образовавшихся под воздействием ударных динамических нагрузок от колес подвижного состава по кодам ДС.13.2, ДУ.13.2 (Рисунок 6.2), что привело в выкрашиванию металла на рабочих поверхностях.

При проведении эксплуатационных испытаний ширина колеи и желобов на стрелочном переводе находились в пределах регламентируемых норм и допусков, отклонений критического расстояния между элементами крестовины и контррельсового узла превышающих установленные нормы не отмечено, соответствующие значения представлены в Таблице 6.3. Отказов в работе скреплений за время проведения испытаний не наблюдалось.



Рисунок 6.1 – Сплыв металла контррельса (дефект ДКу.44.2) из уголкового профиля на стрелочном переводе типа Р65 марки 1/11 проекта Н01.001



Рисунок 6.2 – Наплывы металла на боковой выкружке клина моноблочной крестовины по кодам ДС.13.2, ДУ.13.2

Таблица 6.3 – Состояние рельсовой колеи и ширины желобов в зоне крестовины стрелочного перевода и значения критических расстояний

Место измерения		Нормативное значение, мм	Наработка, млн т брутто						
			2	22	53	99	147	201	236
Размеры ширины колеи, мм									
В переднем стыке крестовины:		1520±3	1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522
- по прямому пути			1523	1523	1523	1523	1523	1523	1523
- по боковому пути									
В сечении сердечника 40 мм		1520±3	1523	1523	1523	1523	1523	1523	1523
- по прямому пути			1519	1519	1519	1519	1519	1519	1519
- по боковому пути									
В заднем стыке крестовины:		1520±3	1523	1523	1523	1523	1523	1523	1523
- по прямому пути			1519	1519	1519	1519	1519	1519	1519
- по боковому пути									
Ширина желобов (прямой/боковой путь, мм)									
Крестовина	Горло	62 ⁺⁶ ₋₁	64	64	64	63	62	64	64
	Сечение сердечника 40 мм	46±2	48/47	46/47	45/47	46/47	44/47	46/47	48/47
	В конце отвода усювиков	64 ⁺⁵ ₋₂	64/64	64/64	63/64	63/64	63/64	63/64	63/64
	На входах усювиков	86 ⁺⁷ ₋₂	85/85	85/85	84/85	84/85	84/85	84/84	84/84
Контррельс	На входах (передний)	86 ⁺⁷ ₋₂	85/84	85/84	85/84	85/84	85/84	85/84	85/84
	В конце отводов	64 ⁺⁶ ₋₂	63/62	63/62	63/62	63/62	62/62	63/62	63/62
	В прямой части контррельса	44 ⁺³ ₋₂	43/43	43/43	43/43	43/43	45/43	43/43	43/43
	В конце отводов	64 ⁺⁶ ₋₂	62/63	62/63	62/63	62/63	62/63	62/63	62/63
	На входах (задний)	86 ⁺⁷ ₋₂	85/85	85/85	85/85	85/85	85/85	85/85	85/85
Критическое расстояние между рабочими гранями, мм									
По прямому пути:		не более 1435 не менее 1474	1432	1434	1435	1432	1434	1434	1432
- контррельса и усювика			1480	1480	1480	1480	1478	1480	1480
- контррельса и сердечника									
По боковому пути:		не более 1435 не менее 1474	1429	1429	1429	1429	1429	1429	1429
- контррельса и усювика			1476	1476	1476	1476	1476	1476	1476
- контррельса и сердечника									

Крестовина второй конструкции была изъята по дефекту ДС.30Г.2 – горизонтальное расслоение литой части сердечника крестовины (Рисунок 6.3). Пропущенный тоннаж на момент изъятия 236 млн т брутто. Горизонтальная трещина сердечника располагалась в районе улавливающего желоба – опасная зона номер 1. Износ литых усювиков прямого и бокового пути составил соответственно 4,4 мм и 2,1 мм. Износ сердечника в сечении с шириной на уровне измерения «40 мм» – 3,8 мм. На рабочей поверхности сердечника имелись выкрашивания глубиной до 1,5 мм.

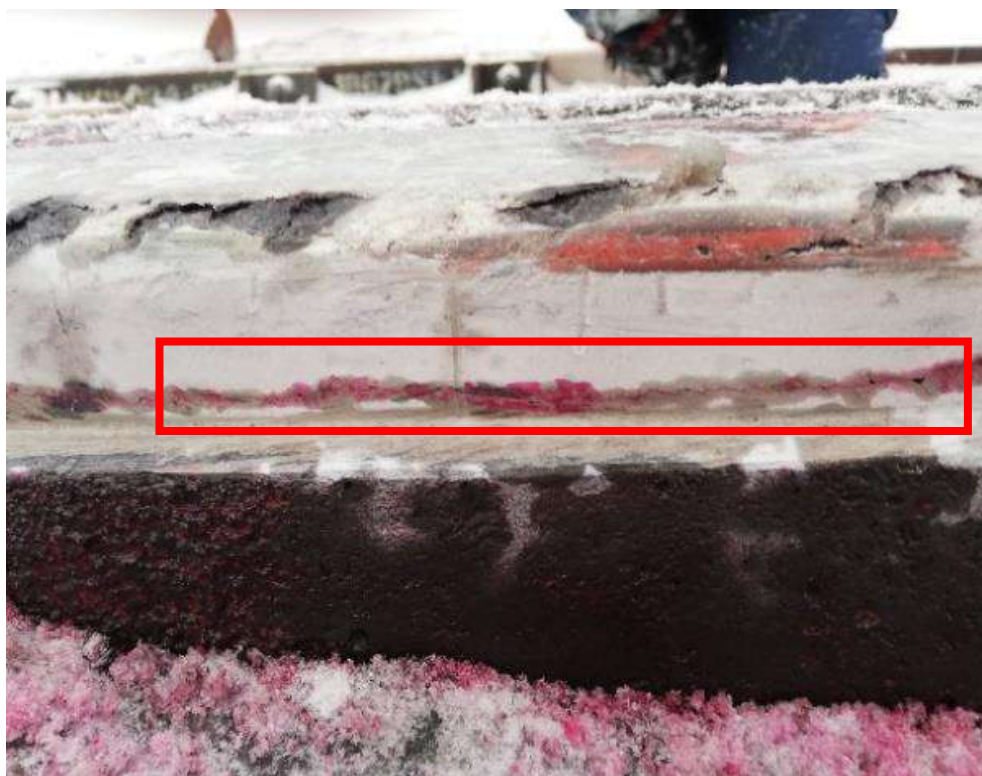


Рисунок 6.3 – Результат проверки трещины методом цветной дефектоскопии, подозрение на дефект ДС.30Г.2

6.1.2 Результаты эксплуатационных испытаний моноблочной крестовины третьей конструкции в составе стрелочного перевода

В процессе испытаний этой крестовины на стрелочном переводе также было обнаружено появление дефектов железобетонного основания. Поперечные трещины по внешней выкружке в подрельсовой части присутствовали на большей части переводных брусьев как по основному, так и по боковому пути. В зоне брусьев №58, №59, №60, №61 стрелочного перевода выявлено провисание крестовины до 4 мм. В зоне флюгарочных брусьев наблюдалась просадка.

После наработки 384 млн. т брутто произведена замена подрельсовых прокладок в зоне контррельсового узла прямого направления по причине их разрушения (Рисунок 6.4).



Рисунок 6.4 – Разрушение подрельсовых прокладок в зоне контррельсового узла стрелочного перевода

При наработке 430 млн т брутто рельс крестовины в зоне контррельса прямого направления был поражен дефектом ДХ.11.2 (Рисунок 6.5). На момент изъятия крестовины рельс продолжал эксплуатироваться.



Рисунок 6.5 – Выкрашивание металла поверхности катания рельса крестовины в зоне контррельса прямого направления по дефекту ДХ.11.2

В ходе испытаний ширина колеи стрелочного перевода и желобов его элементов соответствовала регламентируемым, отклонение критического расстояния от номинального размера не превышало допустимых значений. Результаты измерений представлены в Таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Состояние рельсовой колеи и ширины желобов в зоне крестовины стрелочного перевода и значения критических расстояний

Место измерения		Нормативное значение, мм	Наработка, млн т брутто								
			2	21	54	100	151	197	311	407	432
Размеры ширины колеи											
В переднем стыке крестовины:		1520±3									
- по прямому пути			1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522
- по боковому пути		1519	1519	1519	1519	1519	1519	1519	1519	1519	
В сечении сердечника 40 мм		1520±3									
- по прямому пути			1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522
- по боковому пути		1519	1519	1519	1519	1519	1519	1519	1519	1519	
В заднем стыке крестовины:		1520±3									
- по прямому пути			1521	1521	1521	1521	1521	1521	1521	1521	1521
- по боковому пути		1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520	
Ширина желобов (прямой/боковой путь, мм)											
Крестовина	Горло	62 ⁺⁶ ₋₁	62	62	62	62	61	63	63	63	63
	Сечение сердечника 40 мм	46±2	46/46	46/46	44/46	44/46	45/46	44/45	45/45	45/45	47/45
	В конце отвода усювиков	64 ⁺⁵ ₋₂	64/63	64/63	64/63	64/63	63/63	63/63	63/62	63/62	64/62
	На входах усювиков	86 ⁺⁷ ₋₂	87/85	87/85	87/85	87/85	87/85	86/85	86/85	86/84	86/84
Контррельс	На входах (передний)	86 ⁺⁷ ₋₂	85/86	85/86	85/86	85/86	85/86	85/86	85/86	85/86	85/86
	В конце отводов	64 ⁺⁶ ₋₂	63/65	63/65	63/65	63/65	63/65	63/65	63/65	63/65	63/65
	В прямой части контррельса	44 ⁺³ ₋₂	44/45	44/45	44/45	44/45	44/45	44/45	44/45	44/45	44/45
	В конце отводов	64 ⁺⁶ ₋₂	65/63	65/63	65/63	65/63	65/63	65/63	65/63	65/63	65/63
	На входах (задний)	86 ⁺⁷ ₋₂	86/88	86/88	86/88	86/88	86/88	86/88	86/88	86/88	86/88
Критическое расстояние между рабочими гранями											
По прямому пути:											
- контррельса и усювика		не более 1435	1431	1431	1433	1433	1432	1433	1432	1432	1430
- контррельса и сердечника		не менее 1474	1477	1477	1477	1477	1477	1477	1477	1477	1477
По боковому пути:											
- контррельса и усювика		не более 1435	1429	1429	1429	1429	1429	1430	1430	1430	1430
- контррельса и сердечника		не менее 1474	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475

В ходе испытаний также регулярно выявлялись не удаленные своевременно напльвы высокомарганцовистой стали на боковой выкружке как и на крестовине второй конструкции, эксплуатировавшийся в составе стрелочного перевода №5.

Опытный образец данной конструкции был изъят из эксплуатации после наработки 432 млн т брутто по причине сверхнормативного износа – 7,2 мм. Трещин в теле крестовины не выявлено.

6.2 Эксплуатационные испытания крестовин, упрочненных новыми ленточными взрывными зарядами

Для оценки влияния упрочнения энергией взрывной волны на ресурсные показатели, износостойкость и отказоустойчивость крестовин были проведены сравнительные эксплуатационные испытания крестовин проекта 2750.03.000, производства АО «НСЗ», в составе стрелочных переводов, уложенных в главных путях сети ОАО «РЖД» в границах Западно-Сибирской железной дороги на станциях: Чик, Коченево, Световская и Камень-на-Оби. Места и даты укладки, а также условия эксплуатации опытных крестовин приведены в Таблице 6.5.

Вместе с упрочненными крестовинами была произведена укладка неупрочненных крестовин проекта 2750.03.000 в аналогичных условиях эксплуатации, для проведения контрольных наблюдений. Схема укладки экспериментальных и контрольных крестовин проекта 2750 на примере станции Чик Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры представлена на Рисунке 6.6.

В ходе наблюдений установлено снижение трудоемкости содержания на начальной стадии эксплуатации крестовин, упрочненных энергией взрывной волны. Потребность в производстве работ по удалению шлифовкой наплывов металла, с целью недопущения развития дефектов по кодам ДС.14.2, ДУ.14.2 и ДС.13.2, ДУ.13.2 снизилась в 2 раза (1 раз в месяц) в сравнении с неупрочненными крестовинами (2 раза в месяц) [84].

Таблица 6.5 – Характеристики опытных крестовин и участков, на которых проводились испытания

Станция	№ стрелочного перевода	Категория крестовины	№ крестовины	Грузонапряженность, млн т брутто	Скорость движения пасс./груз., км/ч	Дата укладки
Коченево	11	1 ВВ	333	114,6	100/80	15.03.2022
Коченево	16	1 ВВ	314	114,6	100/80	14.03.2022
Коченево	17	1 ВВ	361	114,6	100/80	22.03.2022
Коченево	8	1 ВВ	2337	114,6	100/80	15.03.2022
Чик	22	1 ВВ	850	114,6	100/80	06.07.2022
Чик	28	1 ВВ	1133	114,6	100/80	05.07.2022
Чик	29	1 ВВ	556	114,6	100/80	18.07.2022
Мошково	3	1 ВВ	763	101,6	100/80	13.05.2022
Мошково	5	1 ВВ	766	101,6	100/80	13.05.2022
Мошково	6	1 ВВ	771	101,6	100/80	17.05.2022
Мошково	12	1 ВВ	739	101,6	100/80	17.05.2022
Камень-на-Оби	17	2 ВВ	465	132,3	100/80	01.04.2022
Камень-на-Оби	19	1 ВВ	478	132,3	100/80	04.04.2022
Камень-на-Оби	27	2 ВВ	480	132,3	100/80	22.04.2022
Камень-на-Оби	29	1 ВВ	464	132,3	100/80	11.04.2022
Камень-на-Оби	63	2 ВВ	463	132,3	100/80	22.04.2022
Световская	1	1 ВВ	762	132,3	100/80	18.05.2022
Световская	2	1 ВВ	724	132,3	100/80	16.05.2022
Световская	14	1 ВВ	759	132,3	100/80	16.05.2022
Световская	16	1 ВВ	722	132,3	100/80	16.05.2022

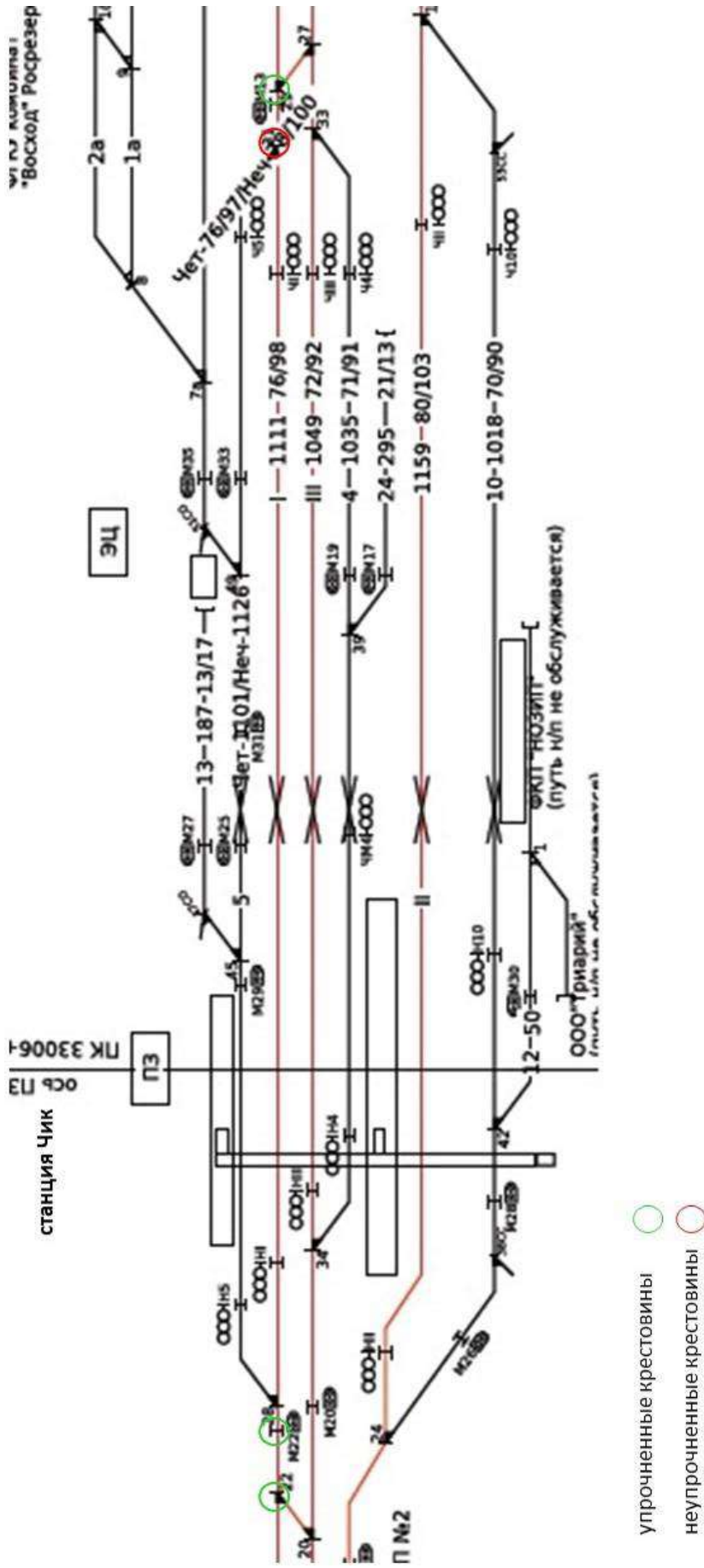


Рисунок 6.6 – Схема укладки опытной партии упрочненных крестовин стрелочных переводов проекта 2750 на станции Чик Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры

Зависимость среднего значения вертикального износа упрочненных и не упрочненных крестовин от наработки представлена на Рисунке 6.7. На основании прогноза по интенсивности износа преимущество упрочненных крестовин составляет 32%.

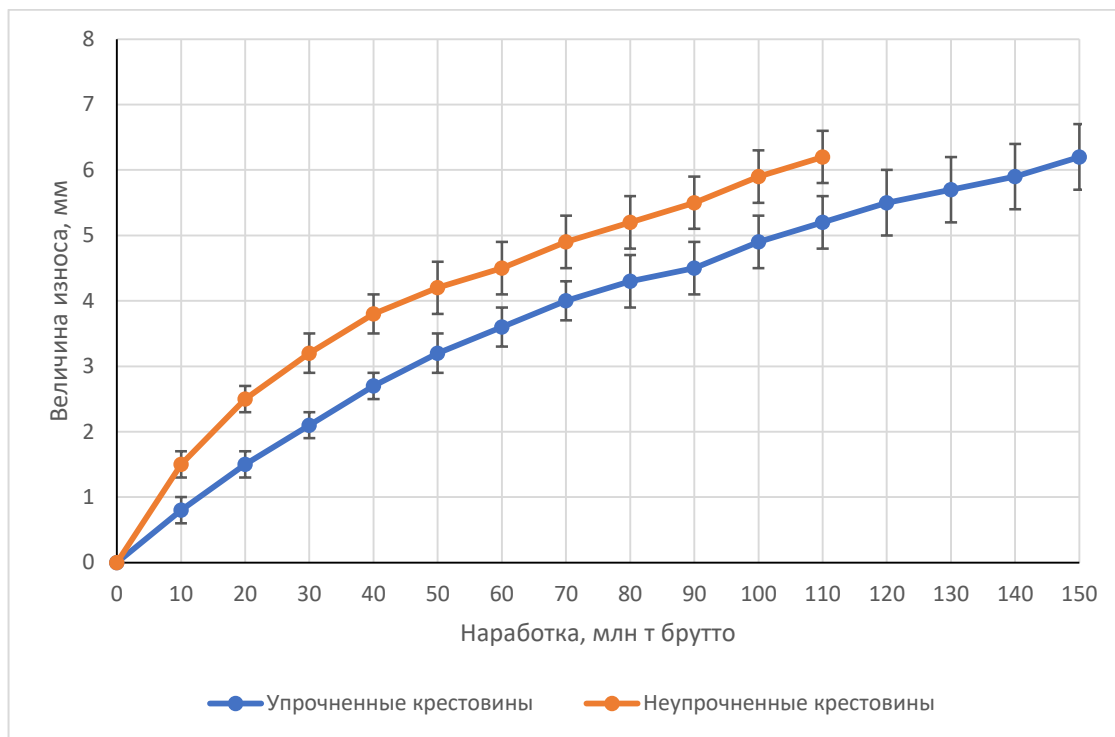


Рисунок 6.7 – Зависимость среднего значения вертикального износа упрочненных и неупрочненных крестовин

С учетом наработанного тоннажа можно судить о характере вертикального износа до величины 6 мм, являющейся предельной нормативной для сборных и цельнолитых крестовин, эксплуатируемых на главных путях со скоростями движения 61 – 100 км/ч. При этом в соответствии с классификатором дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов, утвержденным распоряжением от 27.09.2019 №2143/р, максимальная величина износа таких крестовин может составлять до 12 мм.

Износ крестовин в основном связан с наклепом – пластическим уплотнением поверхностного слоя металла, которое приводит к повышению твердости поверхности катания и образованию наплывов. Пластическая деформация металла является неизбежным следствием упрочнения стали 110Г13Л. Как видно из

графика (Рисунок 6.7) износ неупрочненных крестовин характеризуется большей интенсивностью до наработки 30 млн т брутто, что обусловлено высокой степенью и интенсивностью пластической деформации неупрочненного поверхностного слоя металла на первой стадии эксплуатации. Доэксплуатационное упрочнение сердечников снижает интенсивность пластических деформаций металла при наклепе на начальной стадии эксплуатации и приводит к увеличению срока службы крестовины – повышению износостойкости. После наработки неупрочненными крестовинами тоннажа более 30 млн т брутто износ упрочненных и неупрочненных крестовин имеет сопоставимую интенсивность.

Взятые под наблюдение крестовины имели дефекты, которые развивались с ростом пропущенного тоннажа. Это дефекты связанные с выкрашиванием металла на поверхности катания литой части усовика и сердечника в зоне перекатывания из-за повышенного динамического воздействия колес (ДС.14.2, ДУ.14.2). Нарботка на 01.09.2023 по крестовинам, взятым под наблюдение приведена в Таблице 6.6.

На 01.09.2023 из эксплуатации изъяты 5 крестовин из 20 наблюдаемых. Из них одна при наработке 138,45 млн т брутто по причине предельного износа сердечника, превышающего допустимую для эксплуатации в соответствующих условиях величину – 6 мм. При этом эксплуатация данной крестовины без наплавки может быть продолжена на станционных, подъездных и приемоотправочных путях с установленными скоростями движения, а также в главных путях со скоростями движения до 40 км/ч до достижения предельного состояния в соответствии с классификатором дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов.

Четыре крестовины были изъяты по причинам, не связанным с достижением предельного состояния по износу поверхностей катания, подвергшихся доэксплуатационному упрочнению энергией взрывной волны.

Таблица 6.6 – Нарботка по опытным крестовинам на 01.09.2023 г.

Станция	№ стрелочного перевода	№ крестовины	Тоннаж пропущенный на 01.09.2023	Дата изъятия	Причина изъятия
Коченево	11	333	167,98		
Коченево	16	314	113	10.03.2023	дефект ДУ.14.2 (в неупрочненной зоне)
Коченево	17	361	138,45	06.06.2023	износ сердечника
Коченево	8	2337	167,98		
Чик	22	850	69	10.02.2023	дефект ДСс.26.3
Чик	28	1133	74	03.03.2023	дефект ДУ.14.2 (в неупрочненной зоне)
Чик	29	556	157,3	-	-
Мошково	3	763	132,5	-	-
Мошково	5	766	132,5	-	-
Мошково	6	771	131,38	-	-
Мошково	12	739	131,38	-	-
Камень-на-Оби	17	465	187,76	-	-
Камень-на-Оби	19	478	187,67	-	-
Камень-на-Оби	27	480	180,15	-	-
Камень-на-Оби	29	464	184,13	-	-
Камень-на-Оби	63	463	180,15	-	-
Световская	1	762	170,72	-	-
Световская	2	724	171,45	-	-
Световская	14	759	171,45	-	-
Световская	16	722	138,16	14.06.2023	дефект ДС 98.3

Крестовины с заводскими номерами 314 и 1133 были изъяты при наработке 113 и 74 млн т брутто соответственно, по причине образования дефекта ДУ.14.2 глубиной более 3 мм на длине 201 мм (Рисунок 6.8). Причинами образования дефекта являются ударные динамические силы от колес подвижного состава, которые приводят к перенаклепу высокомарганцовистой стали, несвоевременное удаление наплывов марганцовистой стали – к отслоениям и выкрашиванию металла. Следует иметь в виду, что возникновению таких дефектов могут способствовать заводские дефекты в отливке [21].



Рисунок 6.8 – дефекта ДУ.14.2 на крестовине № 314

Крестовина с заводским номером 850, эксплуатировавшаяся на станции Чик в составе стрелочного перевода № 22 была изъята по дефекту ДСс.26.2 – трещина от технологического отверстия при сварке рельсовых окончаний крестовины (Рисунок 6.9) после пропуска 69 млн т брутто. Дефект был выявлен 10.02.2023 дефектоскопом РДМ-35 №141.



Рисунок 6.9 – Трещина от технологического отверстия при сварке рельсовых окончаний на крестовине № 850

Крестовина с заводским номером 722, эксплуатировавшаяся на станции Световская в составе стрелочного перевода № 16 была изъята по дефекту ДС.98.3 (Рисунок 6.10) после пропуска 138,16 млн т брутто. Дефект был выявлен 23.05.2023 дефектоскопом Авикон-15 №18040.



Рисунок 6.10 – Крестовина № 722 с дефектом ДС.98.3

Результаты по наработке крестовинами, выход из строя которых не был связан с достижением предельного состояния по износу поверхности катания, подвергшейся доэксплуатационному упрочнению энергией взрывной волны, в расчете средней величины вертикального износа не учитывались.

С учетом фактического выхода части крестовин по дефектам при дальнейшей эксплуатации реальный эффект упрочнения ориентировочно составит 24-29 % в зависимости от реальных условий эксплуатации.

Выводы по шестой главе

1. В целом эксплуатационные испытания моноблочных крестовин различных конструкций подтверждают полученные при моделировании данные. Места образования трещин совпадают с местами и направлениями области с пониженной

величиной коэффициента запаса на усталостную прочность, а наработанный до отказа тоннаж хорошо коррелирует с минимальными величинами коэффициентов запаса на усталостную прочность для крестовин первой и второй конструкций.

2. Окончательное подтверждение предлагаемого метода моделирования конструкции крестовин может быть сделано по результатам металлографического исследования, на основании установления причин выхода из строя крестовины второй конструкции, а именно природы образования трещины.

3. На основании результатов наблюдений, полученных в ходе эксплуатационных испытаний крестовин, упрочненных энергией взрывной волны, в период проведенных наблюдений по интенсивности износа преимущество упрочненных крестовин составляет в среднем 32 % в сравнении с неупрочненными.

4. С учетом фактического выхода части крестовин по дефектам при дальнейшей эксплуатации реальный эффект упрочнения ориентировочно составит 24-29 % в зависимости от реальных условий эксплуатации.

7 ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛА КРЕСТОВИН

С целью выявления причин зарождения и развития трещин, приводящих к выходу из строя крестовин, была сформирована методика исследований металла крестовин после их изъятия из пути, позволяющая оценить наличие влияния специальных процессов производства на образование трещин. Что в дальнейшем позволит сделать вывод о пригодности применения предлагаемого метода моделирования конструкции крестовин.

В соответствии с предложенной методикой, для получения обоснованных оценок влияния конструкции крестовины на образование трещины, комплекс работ по исследованиям металла должен включать в себя:

- определение химического состава;
- определение механических свойств;
- определение твердости;
- макроструктурные исследования;
- микроструктурные исследования.

Исследование проводилось на моноблочной крестовине второй конструкции, изъятый из пути после образования трещины сердечника в районе улавливающего желоба первой опасной зоны.

Для подтверждения характеристик крестовин, упрочненных новыми ЛВЗ, серийно выпускавшимся до августа 2018 г., были также проведены исследования металла по указанным выше показателям.

7.1 Выявление причин зарождения и развития трещин, приводящих к выходу из строя крестовин

7.1.1 Характеристика объекта исследования

Отбор образцов основывался на принципе обеспечения достоверности и обоснованности результатов исследований в количестве, необходимом и достаточном для проведения таких исследований. Объект исследования: образцы из крестовины типа Р65 марки 1/11, № 8, чертёж Н 01.002.3100.01, плавка № 156081. Образцы промаркированы номерами с 21 по 25. Схема расположения вырезанных образцов представлена на Рисунке 7.1.

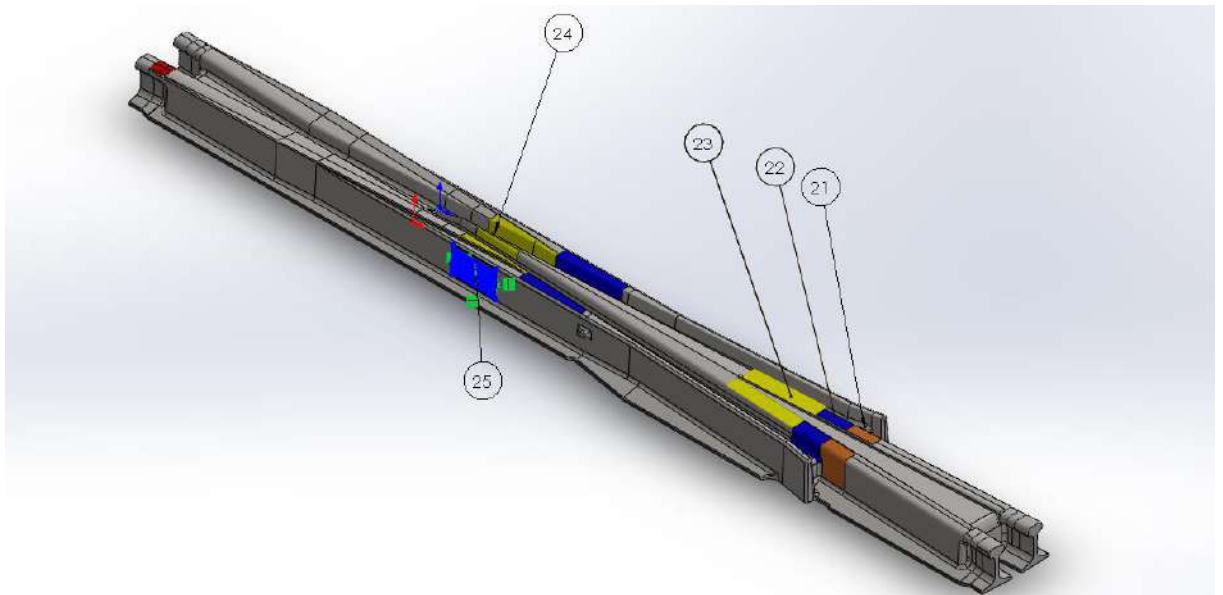


Рисунок 7.1 – Схема расположения вырезанных образцов из цельнолитого блока моноблочной крестовины

Образцы № 21, 22, 23, вырезанные из клина литой крестовины в районе улавливающего желоба с продольной трещиной на боковой поверхности (Рисунок 7.2); образец № 24, вырезанный из клина в зоне перекатывания колёс подвижного состава; образец № 25, вырезанный из левого усовика.

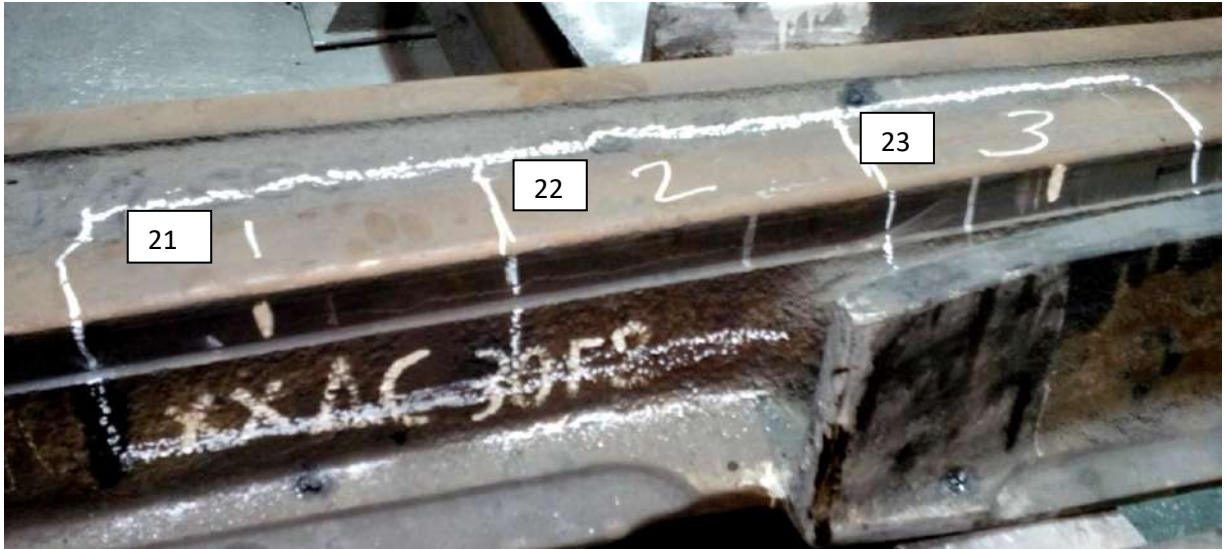


Рисунок 7.2 – Продольная трещина на боковой поверхности клина литой крестовины с разметкой для отбора образцов

При визуальном осмотре вмятины, забоины и другие следы механических повреждений на поверхности крестовины не выявлены. По дефектности отливка крестовины полностью соответствует ГОСТ 7370.

После проведения резки кусков на поверхности излома со стороны внутренней поверхности отливки наблюдаются следы продуктов окисления (корродирование под воздействием окружающей среды) (Рисунок 7.3), что свидетельствует о том, что зарождение и развитие продольной трещины происходило от внутренней поверхности клина крестовины в течение длительного времени.



Рисунок 7.3 – Поверхность излома отливки

7.1.2 Определение химического состава

Определение химического состава проведено по ГОСТ Р 54153-2010 [85] на спектрометре Q6 COLUMBUS с программным обеспечением QMatrix, результаты представлены в Таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Химический состав стали по ГОСТ Р 54153-2010

Объект исследования	Массовая доля элементов, %											
	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Ti
Ковшевая проба плавка № 156081	1,22	14,70	0,55	0,036	<0,003	0,014	0,08	0,02	0,08	0,07	0,02	0,001
Образец № 24	1,22	14,70	0,55	0,036	<0,003	0,014	0,08	0,02	0,08	0,07	0,02	0,001

Результаты исследований химического состава образцов свидетельствуют о том, что металл из которого изготовлена отливка литого блока моноблочной крестовины по химическому составу соответствует требованиям ГОСТ 7370-2015 для стали 110Г13Л.

7.1.3 Определение механических свойств

Испытания на растяжение проведены по ГОСТ 1497-84 [86] на машине разрывной ИР 5047-50-11. Испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78 [87] на маятниковом копре ИО-5003-0,3-11. Механические свойства, полученные в результате испытаний, представлены в Таблице 6.7.

Таблица 7.2 – Механические свойства

Объект исследования	Предел прочности, кгс/мм ²	Предел текучести, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²	Группа металла
Топориковая проба, плавка № 156081	91,1	49,0	37,0	26,6	24,0	2
Образец № 24	92,8	51,8	36,0	31,9	20,5	2
Образец № 25	92,0	50,2	39,3	29,4	21,7	2

Механические свойства образцов № 24, 25, вырезанных из тела отливки соответствуют механическим свойствам, полученным на образцах, изготовленных из топориковой пробы (образец-свидетель) плавки стали из которой была залита отливка цельнолитого блока моноблочной крестовины, что свидетельствует о стабильности механических свойств готовой продукции. Группа металла – 2, механические свойства соответствуют требованиям ГОСТ 7370-2015.

7.1.4 Определение твердости

Измерение твердости произведено по методу Бринелля по ГОСТ 9012-59 [88] на твердомере ТШ-2М, результаты измерений представлены в Таблице 7.3

Таблица 7.3 – Результаты измерения твердости

Объект исследования	Твердость, НВ					
	Расстояние от поверхности катания					
	10 мм	15 мм	20 мм	25 мм	30 мм	40 мм
Образец № 24	207	212	212	212	207	207
Образец № 25	212	212	207	207	207	207

Расстояние от поверхности катания измерялось от крайней верхней точки поверхности образцов. Твёрдость на поверхности катания и расстоянии 5 мм от нее не измерялась, так как вследствие высокой степени наклёпа и наличия трещин, возникших в результате эксплуатации, измерения будут некорректны.

7.1.5 Макроструктурные исследования

Макроструктурные исследования проведены при помощи микроскопа МПБ-3. Для исследований макроструктуры из образцов с номерами 21, 22, 24, 25 были изготовлены шлифы в поперечном сечении относительно поверхности катания.

Образец № 21. Со стороны поверхности катания на глубину до 15,0 мм наблюдается зона равноосной структуры с размером зёрен от 0,6 до 1,2 мм. Далее

вглубь до внутренней поверхности наблюдается зона равноосной мелкозернистой структуры с размером зёрен от 0,3 до 0,5 мм.

Величина зерна в исследуемом образце по методу сравнения с эталонными шкалами варьируется от 1 балла до размера, превышающего стандартный ряд шкал, согласно ГОСТ 5639-82.

Образец № 22. Со стороны поверхности катания на глубину до 15,0 мм наблюдается зона равноосной структуры с размером зёрен от 0,6 до 1,2 мм. Далее вглубь до внутренней поверхности наблюдается зона равноосной мелкозернистой структуры с размером зёрен от 0,3 до 0,5 мм.

Величина зерна в исследуемом образце по методу сравнения с эталонными шкалами варьируется от 1 балла до размера, превышающего стандартный ряд шкал, согласно ГОСТ 5639-82.

Со стороны внутренней поверхности наблюдается усадочная раковина и рыхлота уходящая вглубь на 3 мм.

Образец № 24. Со стороны поверхности катания на глубину до 9,0 мм наблюдается зона наклёпа металла. На расстоянии (9,0 - 48,0) мм от поверхности катания наблюдается зона равноосной структуры с размером зёрен от 0,2 до 0,4 мм.

Со стороны боковых поверхностей на глубину до 2,0 мм наблюдается зона равноосной структуры с размером зёрен от 0,5 до 1,0 мм. Далее вглубь наблюдается зона равноосной структуры с размером зёрен от 0,2 до 0,4 мм.

Величина зерна в исследуемом образце по методу сравнения с эталонными шкалами варьируется от 1 балла до размера, превышающего стандартный ряд шкал, согласно ГОСТ 5639-82.

Образец № 25. Со стороны поверхности катания на глубину до 6,0 мм наблюдается зона наклёпа металла. На расстоянии от 6,0 до 45,0 мм от поверхности катания наблюдается зона равноосной структуры с размером зёрен от 0,7 до 1,0 мм.

Со стороны боковых поверхностей на глубину до 2,0 мм наблюдается зона равноосной структуры с размером зёрен от 0,5 до 0,8 мм. Далее вглубь наблюдается зона равноосной структуры с размером зёрен от 0,7 до 1,0 мм.

Величина зерна в исследуемом образце по методу сравнения с эталонными шкалами варьируется от 1 балла до размера, превышающего стандартный ряд шкал, согласно ГОСТ 5639-82.

7.1.6 Микроструктурные исследования

При проведении металлографических исследований структуры металла использовались образцы, изготовленные из крестовины в зоне поверхности катания, а также поперек поверхности излома. Микрошлифы изготавливали по методике [89] с шлифованием на алмазных пастах и полировке на окиси хрома.

Исследования микроструктуры проведены с помощью металлографического комплекса на базе микроскопа Zeiss Axiovert 25 с программным обеспечением Thixomet Pro. Для химического травления поверхности образцов использовался следующий реактив – 4 % раствор азотной кислоты в дистиллированной воде.

Исследования образцов металла, вырезанных из отливки крестовины, показали, что зарождение и развитие продольной трещины происходило от внутренней поверхности клина крестовины в районе улавливающего желоба. Дефектов литейного характера в зоне зарождения выявлено не было (Рисунок 7.4) [12]. При этом зона зарождения трещины у внутренней поверхности крестовины имеет очень высокую плотность полос сдвига, которая снижается по мере удаления от поверхности. Высокая плотность полос сдвига свидетельствует о перенаклепе, результатом которого явилось образование микротрещин (Рисунок 7.5). Такие изменения зеренной структуры, характерны для воздействия внешних нагрузок на сталь 110Г13Л.

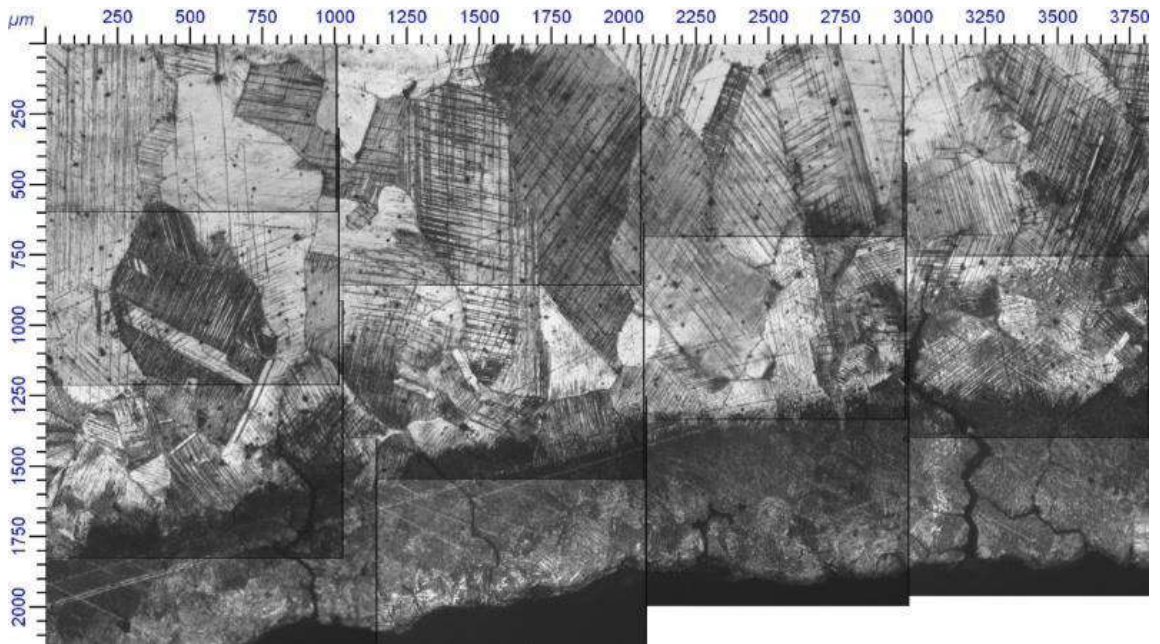
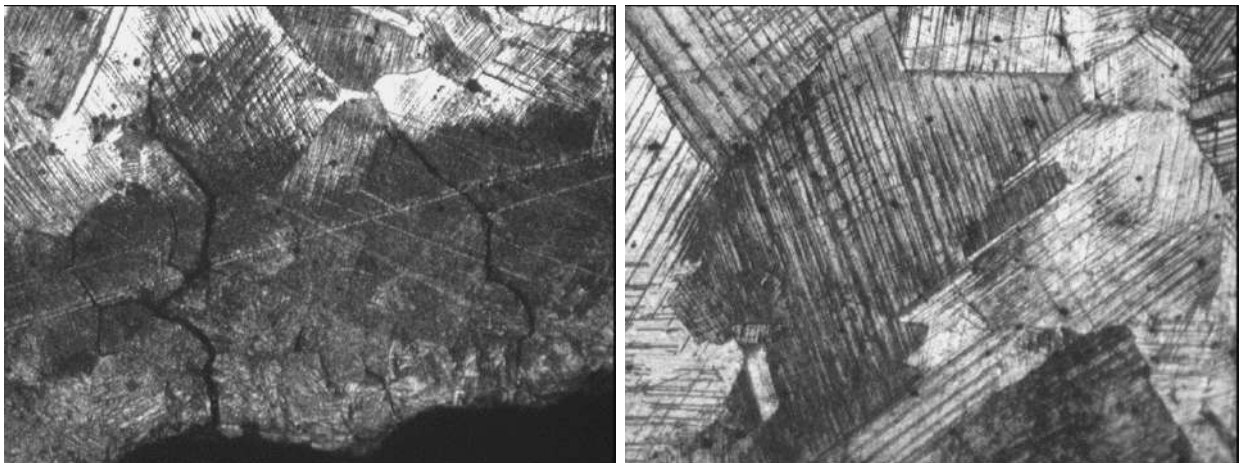


Рисунок 7.4 – Микроструктура в зоне зарождения трещины.



х 70

х 140

а)

б)

Рисунок 7.5 – Микроструктура: а) микротрещины в перенаклепанном поверхностном слое в зоне зарождения трещины, б) полосы сдвига в аустенитной структуре в более глубоких слоях.

Как известно, внешняя нагрузка вызывает пластическую деформацию, что в стали 110Г13Л приводит к двойникованию кристаллов аустенита и росту количества дислокаций. С увеличением степени пластической деформации количество дефектов кристаллической решетки возрастает, растет величина

внутренних напряжений, прочность металла возрастает, пластичность падает – происходит наклеп металла. При перенаклепе происходит локальное уменьшение плотности металла в более деформированных зонах и образование микротрещин. Дальнейшее воздействие знакопеременных нагрузок приводит к объединению микротрещин в магистральную, вдоль фронта продвижения которой также образуются полосы сдвига (Рисунок 7.6).



х 140

Рисунок 7.6 – Полосы сдвига, образовавшиеся у поверхности трещины под воздействием знакопеременных нагрузок.

Очевидно, что причиной образования трещин, при эксплуатации моноблочных крестовин являлись недостатки конструкции.

У поверхности катания, подвергавшейся эксплуатационному воздействию, наблюдаются полосы сдвига. Плотность полос сдвига и глубина их распространения от поверхности катания увеличивается в сечениях наиболее подверженных внешней нагрузке Рисунок 7.7.

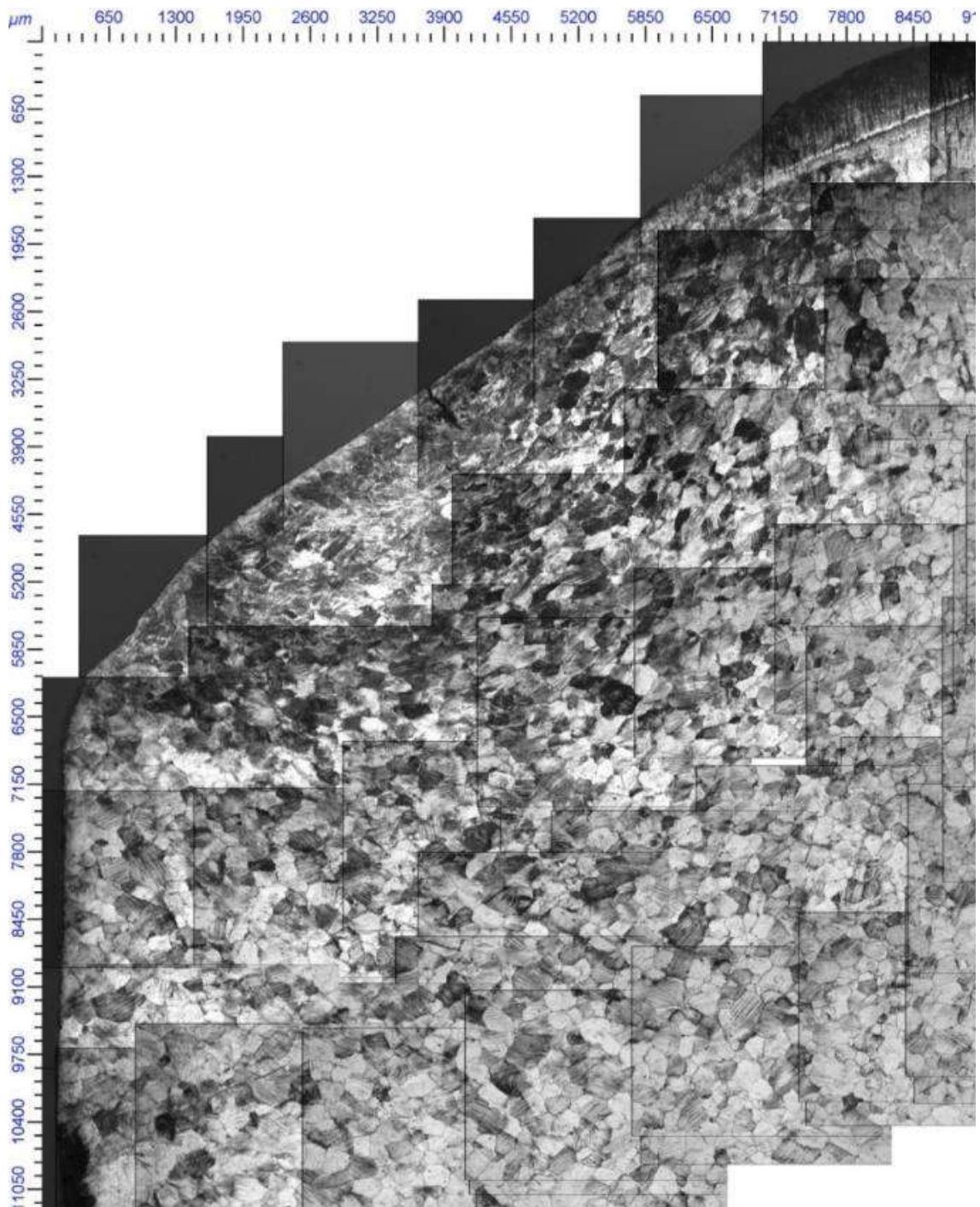


Рисунок 7.7. – Перенаклеп аустенитной структуры у поверхности катания под воздействием колес подвижного состава.

В зоне перенаклёпа также наблюдается трещины, распространяющиеся параллельно поверхности катания (Рисунок 7.8). На поверхности катания наблюдаются трещины, уходящие вглубь металла под углом $\sim 45^\circ$ на глубину до 0,5 мм (Рисунок 7.9).

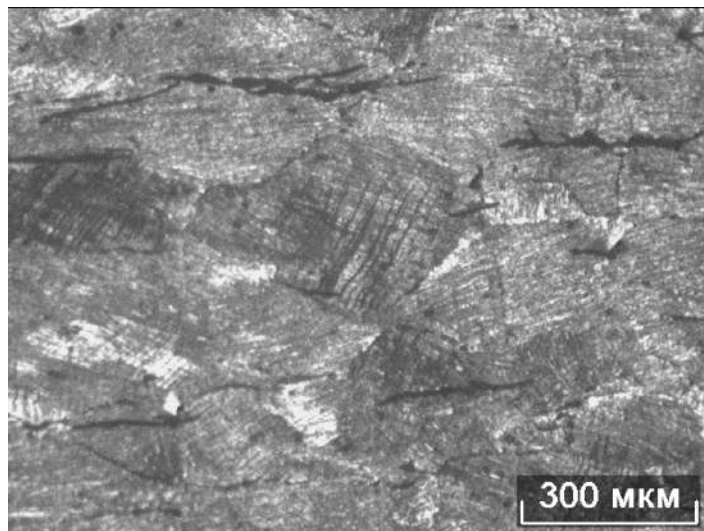


Рисунок 7.8 – Аустенит с полосами сдвига и микротрещины

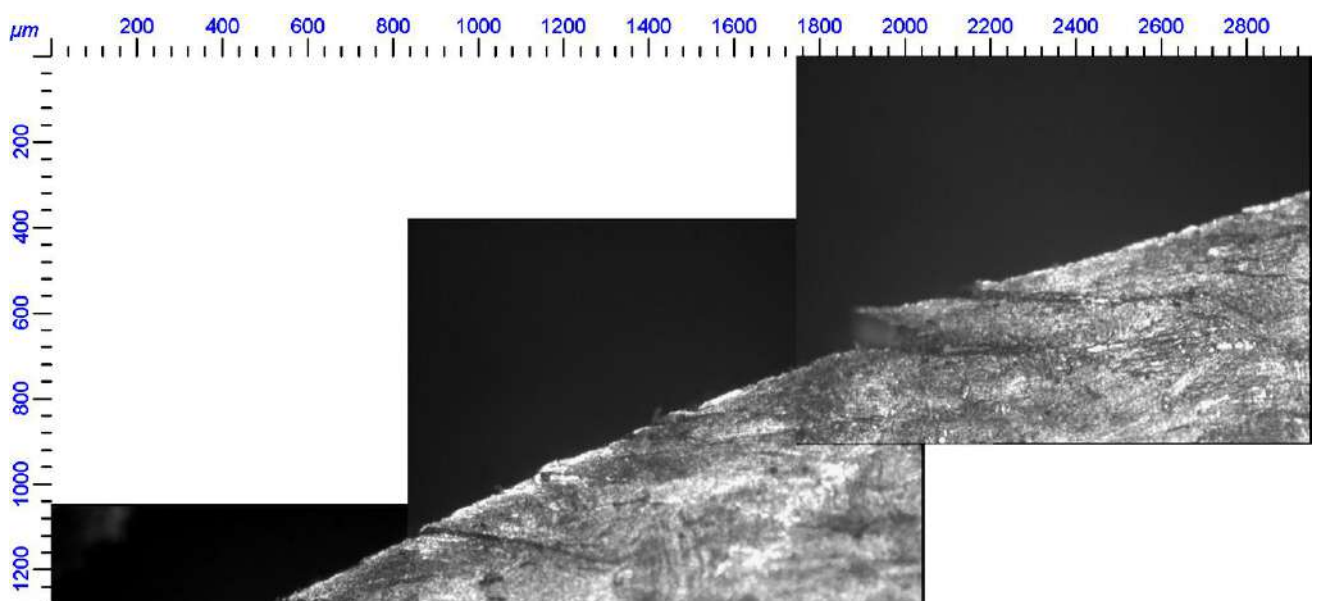


Рисунок 7.9 – Микротрещины на поверхности катания

Микротрещины у поверхности катания при дальнейшей эксплуатации без удаления дефектного слоя приводят к расслоению металла и выкашиванию [90].

7.2 Исследование металла крестовин, упроченных энергией взрывной волны

Исследования металла крестовин, упроченных энергией взрывной волны, имеют характерные особенности, связанные с технологией упрочнения, поэтому отбор образцов для исследования металла следует производить из сердечника и литых усовиков в сечениях с шириной сердечника от 12 до 50 мм.

7.2.1 Характеристика объекта и методы проведения исследований

Объект исследования: образцы, вырезанные из сердечника типа Р65 марки 1/11, упроченного энергией взрывной волны, № 282, чертёж 2750.03.010, плавка № 209040. Образцы промаркированы номерами 282.1, 282.2 и 282.3. Образец 282.1 вырезан из левой литой усовой, 282.3 – из правой, 282.2 вырезан из клина сердечника. Схема расположения вырезанных образцов представлена на рисунке 7.10.

Упрочнение сердечника производилось по технологии, освоённой в производстве на Новосибирском стрелочном заводе. Методы проведения исследования металла соответствуют описанным в пунктах 6.1.2 – 6.1.6. Методика проведения работ дополнительно учитывает зоны влияния энергии взрывной волны в процессе реализации технологии упрочнения.

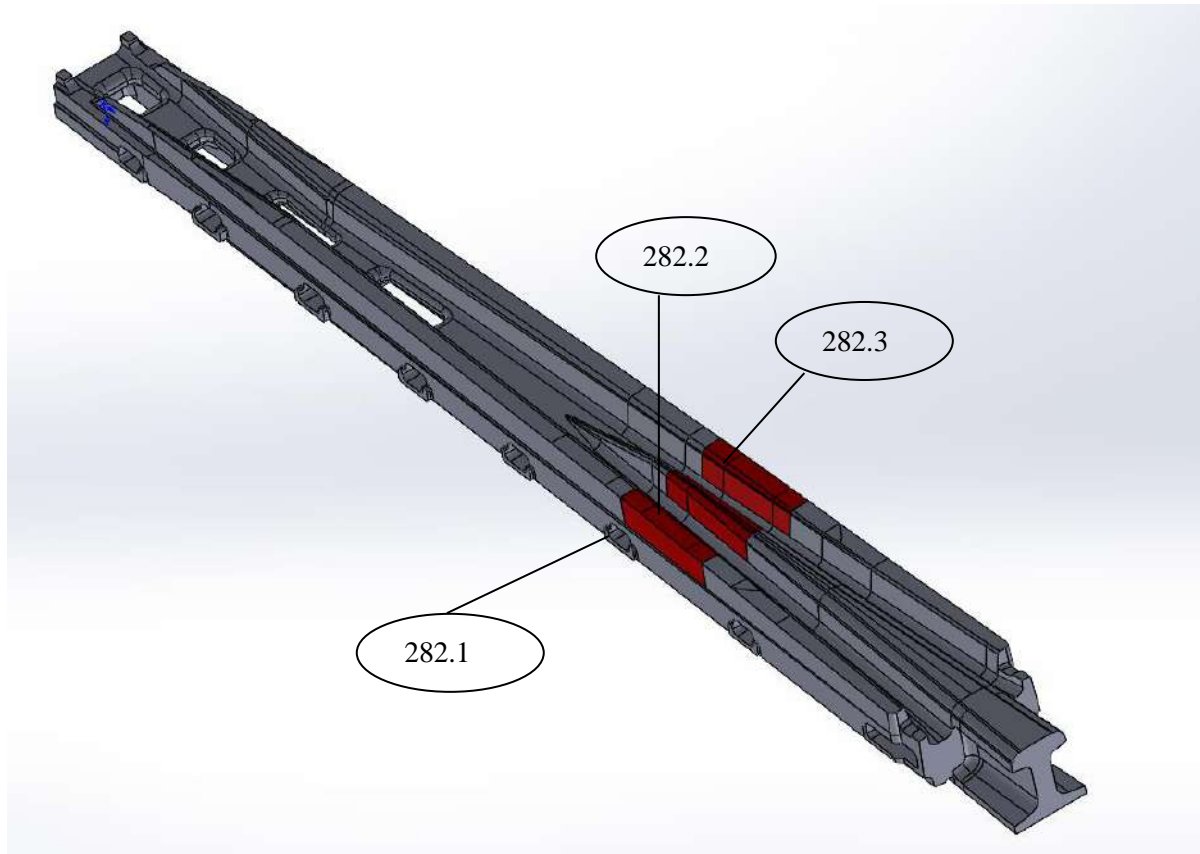


Рисунок 7.10 – Схема расположения образцов, вырезанных из сердечника, упрочненного энергией взрывной волны

7.2.2 Определение химического состава

Химический состав стали, который был определен в результате исследования представлен в Таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Химический состав стали по ГОСТ Р 54153-2010

Объект исследования	Массовая доля элементов, %											
	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Ti
Ковшечая проба, плавка № 209040	1,22	14,61	0,55	0,025	<0,0020	0,01	0,11	0,064	0,076	0,026	0,004	1,22

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о соответствии химического состава исследованных образцов требованиям ГОСТ 7370-2015 для стали 110Г13Л.

7.2.3 Определение механических свойств

Испытания на растяжение проведены по ГОСТ 1497-84 на машине разрывной ИР 5047-50-11. Испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре ИО-5003-0,3-11 Механические свойства, полученные в результате испытаний, представлены в Таблице 7.5.

Таблица 7.5 – Механические свойства

Объект исследования	Предел прочности, кгс/мм ²	Предел текучести, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²	Группа металла
Топориковая проба плавка № 209040	98,0	45,0	39	34	284	1
Образец № 282.1	94,0	45,0	33	28	265	1
Образец № 282.2	92,0	43,0	37	33	258	1
Образец № 282.3	94,0	49,0	36	31	261	1

Механические свойства образцов № 282.1, 282.2, 282.3, вырезанных из тела отливки соответствуют требованиям ГОСТ 7370-2015.

7.2.4 Определение твердости

Результаты измерений твердости представлены в Таблице 7.6 Расстояние от поверхности катания измерялось от крайней верхней точки поверхности образцов.

Твердость на поверхности и по глубине упрочненного слоя исследованных образцов соответствует требованиям ГОСТ 7370-2015 и технологической инструкции на упрочнение поверхность катания литых сердечников, моноблочных и цельнолитых крестовин методом взрыва.

Таблица 7.6 – Распределение твердости по глубине упрочненного слоя

Объект исследования	Твердость, НВ						
	Расстояние от поверхности катания*						
	На поверхности	5 мм	10 мм	15 мм	20 мм	25 мм	30 мм
Образец № 282.1	363	352	352	345	341	341	331
Образец № 282.2	363	363	359	363	352	341	341
Образец № 282.3	359	352	350	341	345	337	321

7.2.5 Макроструктурные исследования

Для исследований макроструктуры из образцов были изготовлены шлифы в поперечном сечении относительно поверхности катания.

Образец № 282.1 От поверхности катания на глубину до 13 мм наблюдается зона равноосной мелкозернистой структуры с размером зерен до 0,2 мм. Далее вглубь наблюдается зона равноосной структуры с размером зерен до 2,0 мм.

Образец № 282.2 От поверхности катания на глубину до 10 мм наблюдается зона равноосной мелкозернистой структуры с размером зерен до 0,2 мм. Далее вглубь наблюдается зона равноосной структуры с размером зерен до 2,5 мм.

Образец № 282.3 От поверхности катания на глубину до 11 мм наблюдается зона равноосной мелкозернистой структуры с размером зерен до 0,3 мм. Далее вглубь наблюдается зона равноосной структуры с размером зерен до 2,0 мм.

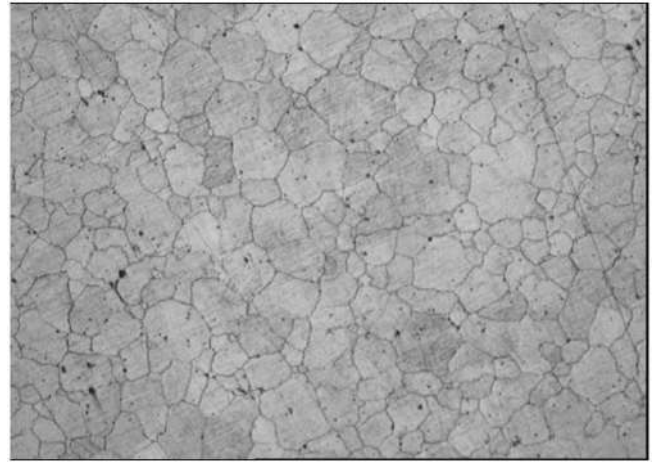
7.2.6 Микроструктурные исследования

Микроструктура исследованных образцов – аустенит. Карбидные включения не выявлены. От поверхности до 25 мм наблюдаются полосы сдвига (Рисунок 7.11),

что вызвано упрочнением взрывом. Плотность полос сдвига ближе к основному металлу снижается. (Рисунок 7.12).

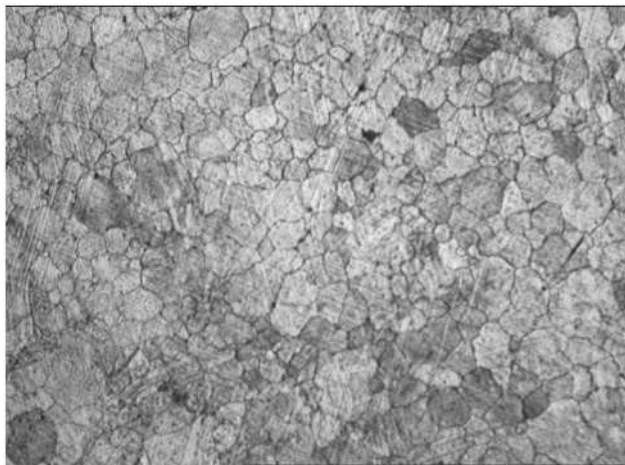


x70



x35

Рисунок 7.11 – Аустенит с полосами сдвига



x35

а)



x35

б)

Рисунок 7.12 – Структура упрочненного слоя образцов: а) на глубине 10 мм, б) на глубине 25 мм

Микроструктура исследованных образцов соответствует требованиям ГОСТ 7370.

Выводы по седьмой главе

1. Химический состав, микроструктура и механические свойства стали, из которой были изготовлены цельнолитой блок моноблочной крестовины и сердечник проекта 2750, упрочненный энергией взрывной волны, соответствуют требованиям ГОСТ 7370-2015 для стали 110Г13Л.

2. Исследования образцов металла, вырезанных из отливки крестовины, показали, что продольная трещина на боковой поверхности клина литого сердечника развивалась длительное время. Дефектов литейного характера в зоне зарождения не выявлено. Причиной образования трещины являются недостаточные прочностные характеристики второго варианта конструкции литой части моноблочной крестовины.

3. Выкрашивание поверхности катания вызвано ударными динамическими нагрузками от колес подвижного состава, которые приводят к перенаклепу высокомарганцевистой аустенитной стали и образованию дефектного слоя металла, в том числе наплывов. Несвоевременное удаление, как наплывов металла, так и всего дефектного слоя приводит к отслоениям и выкрашиванию металла.

4. Исследования образцов металла, вырезанных из отливки упрочненного сердечника показали, что применение новых ленточных взрывных зарядов позволяет производить упрочнение поверхности катания литых сердечников крестовин из высокомарганцевистой стали (110Г13Л) методом взрыва в соответствии с имеющейся технологией завода-производителя, и получать продукцию соответствующую предъявляемым к ней требованиям по качеству [90].

8 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МОНОБЛОЧНОЙ КРЕСТОВИНЫ ПРЕДЛОЖЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Улучшение эксплуатационных характеристик элементов верхнего строения пути, а также их компонентов, позволяют снизить затраты на ремонт и эксплуатацию железнодорожного пути, за счет увеличения ресурса изделий и как следствие межремонтных сроков.

Ресурс основного стрелочного перевода, применяемого на главных путях железных дорог, проекта 2750 составляет 350 млн т брутто. Российскими стрелочными заводами освоено производство малообслуживаемых переводов для тяжеловесного движения, с ресурсом от 500 млн т брутто и, взаимозаменяемых по своим геометрическим размерам с переводом проекта 2750. Их конструктивные особенности позволяют обеспечить возможность эксплуатации изделий с повышенными осевыми нагрузками до 27 тс. К таким стрелочным переводам относятся переводы проектов Н01.001, Н01.004, 53103, ВСП 014.

При этом для переводов проектов Н01.001 и Н01.004 были разработаны исполнения с моноблочными крестовинами с описанным в работе вариантом конструкции. Начиная с 2024 года запланировано наращивание поставок переводов проекта Н01.004 на сеть железных дорог ОАО «РЖД». Сравнение технических характеристик стрелочных переводов проектов 2750 и Н01.004 представлены в Таблице 8.1 [91, 92].

Таблица 8.1 – Технические характеристики стрелочных переводов проектов 2750 и Н01.004

Характеристики	2750.00.000 (проект ПТКБ ЦП)	Н01.004.0000.00 (проект АО «НСЗ» аналог 2750.00.000)
Вид	обыкновенный	обыкновенный
Тип основания	железобетонные брусья	железобетонные брусья
Тип рельса	Р65	Р65
Марка	1/11	1/11
Вид крестовины	сборная с приварными рельсовыми окончаниями	моноблок
Ширина колеи, мм	1520	1520
Полная длина, мм	34858	34858
Длина стрелки, мм	16080	16080
Длина крестовины, мм	6995	6995
Радиус бокового пути, м	300	300
Максимальная статическая нагрузка на рельс, кН	245	270
Ресурс стрелочного перевода, млн т брутто	350	500 (750)
Максимальная скорость движения, км/ч: -по прямому пути -по боковому пути	140 50	140/160* 50
Максимальная длина отгрузочного места, мм	18770	18770
Максимальная масса отгрузочного места, т	3,5	3,5
Масса (без брусьев) не более, т	16,5	16,5
Проект железобетонных брусьев	ВНИИЖТ 98-01.00.000	ВНИИЖТ 2014-01

Примечание: * с приводом СП-6 и гарнитурой 17425-00-00 140 км/час;
с приводом СП-12 и гарнитурой 18037-00-00 160 км/час.

При расчете эффективности применения моноблочных крестовин использованы следующие материалы:

- Правила технической эксплуатации железных дорог, утвержденные приказом Минтранса России от 21 декабря 2010 г. № 286 [93].
- Распоряжение МПС РОССИИ от 19 декабря 2002 г. № С-1241у «О введении нормативных сроков службы стрелочных переводов» [94].
- Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути, утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 18 января 2013 г. № 75р [95].
- Единичные стоимости капитального ремонта в 2020 году и калькуляции по статьям расходов.
- Выгрузка работ на стрелочных переводах из системы ЕКАСУИ за 2019 год.
- Методические рекомендации по обоснованию эффективности инноваций на железнодорожном транспорте, утвержденные руководителем Департамента технической политики МПС 26.04.1999 № ЦТех0-11 [96].
- Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 27.12.2007 №2459р [97].

8.1 Расчет экономии годовых текущих расходов при использовании моноблочных крестовин

Экономия годовых текущих затрат при использовании моноблочных крестовин, вместо применяемых в настоящее время, серийно выпускаемых конструкций в первую очередь обуславливается увеличением их ресурса.

Наработка элементов стрелочного перевода и его отдельных частей до отказа зависит от пропущенного тоннажа, а также климатических условий региона, где эксплуатируется изделие, а также соблюдения норм укладки и содержания. Как

отмечалось ранее, максимальное значение средней наработки за год до замены «жестких» крестовин в период с 2019 по 2021 год составляет 175 млн. т брутто. Данное значение средней наработки до замены принимаем для оценки эффективности применения крестовин.

Учитывая существенные изменения геометрии стрелочных переводов, разработанных и изготовленных для эксплуатации с колеей 1520 при укладке с колеей 1435 на Калининградской железной дороге, что приводит к их неправильной работе, статистика замены крестовин по данной дороге не учитывалась.

Как показали результаты исследования, ресурс моноблочных крестовин при их правильном и своевременном обслуживании, может превысить ресурс типовых конструкций до 2 – 2,5 раз при неизменности перевозочного процесса.

Срок службы крестовин стрелочного перевода определяется по формуле:

$$T_{\text{сл}} = \frac{T_p}{\Gamma_{\text{год}}}, \quad (11)$$

где $T_{\text{сл}}$ – срок службы крестовины, года,

T_p – средний ресурс (срок службы) крестовин, млн т,

$\Gamma_{\text{год}}$ – среднегодовая грузонапряженность линии, млн т.

Средний срок службы серийно выпускаемых крестовин на путях со среднегодовым грузопотоком 100 млн т составит:

$$T_{\text{слс}} = \frac{175}{100} = 1,75 \text{ года}$$

При использовании моноблочных крестовин новой конструкции, ожидаемый средний срок службы составит:

$$T_{\text{слм}} = \frac{175 \cdot 2,5}{100} = 4,375 \text{ года}$$

Стоимость замены отдельной крестовины стрелочного перевода рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{кр}} = (P_{\text{укл}} + P_{\text{кр}}), \quad (12)$$

где $Z_{\text{кр}}$ – расходы, связанные с укладкой новых крестовин, руб.,

$P_{\text{укл}}$ – стоимость доставки и укладки крестовины, руб.,

$P_{кр}$ – стоимость крестовины, руб.

Таким образом стоимость замены отдельной крестовины проекта 2750 с учетом стоимости крестовин и трудозатрат по её замене составляет:

$$З_{крс} = (8\ 109 + 215\ 856) = 223\ 965 \text{ руб.}$$

При этом стоимость замены отдельной крестовины стрелочного перевода проекта Н01.004 будет равна:

$$З_{крм} = (8\ 109 + 536\ 799) = 544\ 908 \text{ руб.}$$

Годовые текущие затраты на замену крестовины стрелочного перевода определяются по формуле:

$$З_{год} = \frac{З_{кр}}{T_{сл}}, \quad (13)$$

Таким образом среднегодовые текущие затраты на замену крестовины стрелочного перевода составят:

- для проекта 2750 (сборная крестовина с приварными рельсовыми окончаниями):

$$З_{годс} = \frac{223\ 965}{1,75} = 127\ 980,00 \text{ руб.}$$

- для проекта Н01.004 (моноблочная крестовина)

$$З_{годм} = \frac{544\ 980}{4,375} = 124\ 566,86 \text{ руб.}$$

Экономия годовых текущих затрат на замену одной крестовины составит:

$$\Delta Z_{год} = Z_{годс} - Z_{годм} = 127\ 980,00 - 124\ 566,86 = 3\ 413,14 \text{ руб.}$$

Исходя из общего количества стрелочных переводов на главных путях сети железных дорог ОАО «РЖД», равного 53 547 шт., суммарная экономия годовых текущих затрат на замену крестовин по всей инфраструктуре составит:

$$\Delta Z_{год} \cdot N = 3\ 413,14 \cdot 53\ 547 = 128\ 763\ 408 \text{ руб. или } 128,76 \text{ млн руб.}$$

Поскольку на данном этапе исследования затруднительно достаточно точно определить снижение затрат на текущее содержание моноблочных крестовин в расчете они не учитывались.

При этом за счет меньшего количества элементов и соединений в конструкции моноблочной крестовины увеличивается стабильность ее работы и общая надежность системы, соответственно снижаются трудозатраты на проверку и обслуживание данных соединений, а также устранение дефектов, появление которых напрямую или косвенно связано с особенностями конструкции. Например, дефекты зоны перекатывания колес с рельсовых усовиков на литые связанные с особенностями конструкции сборных крестовин, не актуальны для моноблочных крестовин, по причине отсутствия такой зоны.

8.2 Расчет стоимости жизненного цикла стрелочных переводов с моноблочными крестовинами

8.2.1 Условия достижения экономической эффективности стрелочного перевода как системы

Последнее время в отечественной и зарубежной практике при определении рациональных решений по применению сложных технических изделий все чаще применяется такие понятия, как «обеспечение надежности, эксплуатационной готовности, ремонтпригодности и безопасности» (RAMS – Reliability, Availability, Maintainability, Safety) и «стоимость жизненного цикла» (LCC – Life Cycle Cost). Отдельные показатели RAMS и LCC находят широкое применение при организации закупок по конкурентным процедурам. Выбор наиболее выгодного предложения основывается на обеспечении наименьшей стоимости жизненного цикла изделия с обеспечением показателей надежности, эксплуатационной готовности, ремонтпригодности и безопасности.

Основной целью оценки стоимости жизненного цикла является получение исходных данных для принятия решений, на всех и/или отдельных стадиях жизненного цикла продукции. Стоимость жизненного цикла определяется с учетом эксплуатационных затрат, расходов на приобретение, а также утилизацию изделия и доходов (при их наличии), связанных с реализацией вышедшего из строя изделия

или его составных частей. Достижение низкой стоимости жизненного цикла во многом зависит от эффективности управления показателями RAMS на стадии проектирования и разработки продукции [98; 99].

Таким образом главным критерием выбора при определении рациональных решений по применению сложных технических изделий становится экономическая эффективность, а не стоимость продукции.

При этом экономический эффект от работы системы достигается не только от увеличения ресурсных показателей отдельных ее элементов, но также от применения равноресурсных (или с кратным ресурсом) и малообслуживаемых конструкций. Применительно к настоящей работе такой системой является стрелочный перевод, а ее элементами: крестовины; рельсы рамные с остяком (ремкомплекты); рельсы крестовины с контррельсом и рельсы соединительных путей (рельсы); скрепления; брусья.

LCC определяется как с учетом дисконтирования (фактора времени), так и без него.

Формула для определения LCC с учетом дисконтирования выглядит следующим образом:

$$LCC = C_{\text{пр}} + \sum_{t=1}^T (Z_{\text{год}t} - L_t) \cdot a_t, \quad (14)$$

где $C_{\text{пр}}$ – расходы, связанные с приобретением, доставкой и укладкой нового стрелочного перевода, руб.,

T – конечный год эксплуатации,

t – текущий год эксплуатации,

$Z_{\text{год}t}$ – годовые эксплуатационные расходы, руб.,

L_t – годовые эксплуатационные расходы, руб.,

a_t – коэффициент дисконтирования.

Без учета фактора времени LCC определяется из выражения:

$$LCC = C_{\text{пр}} + Z_{\text{год}} \cdot T, \quad (15)$$

Экономическая эффективность применения стрелочного перевода проекта Н01.004 достигается за счет следующих характеристик:

- Увеличения ресурса стрелочного перевода до 700 млн т брутто в сравнении с типовым стрелочным переводом проекта 2750, ресурс которого составляет 350 млн т брутто.
- Увеличения ресурса стрелочной части более чем в 2 раза (рельсы рамные с остряками) за счет оптимизации геометрии перекатывания остряк – рамный рельс и новой элементной базы (дополнительные связные полосы, возможно применение подшпальных прокладок).
- Увеличения ресурса крестовины за счет применения моноблочной крестовины.
- Применения роликовых устройств, обеспечивающих экономию за счет исключения работ по смазке подушек стрелочных башмаков.
- Применения рельсовых скреплений (шурупное прикрепление с упругими клеммами), не требующих периодического обслуживания на протяжении жизненного цикла.

Кроме того, на снижение стоимости жизненного цикла также повлияют и другие факторы, эффект от которых невозможно оценить на текущий момент в связи с малым количеством уложенных стрелочных переводов и малой наработкой:

- Роликовые устройства не только позволяют отказаться от смазки стрелочных подушек, но и существенно снижают усилия на переводной механизм – это продлевает срок его службы и сокращает регламентные работы по проверке. Стрелочный перевод необходимо проверять «на закладку 2-4» в два раза реже чем обычный перевод.
- Новая геометрия перевода дает возможность повысить скорости движения подвижного состава до 160 км/ч по основному направлению в следствии изменения геометрии крестовинного узла (крестовина и рельс крестовины с контррельсом), а также применения гарнитуры электропривода с внешним замыкателем (далее замыкателем).
- Увеличение ресурса рельсовых элементов соединительных путей за счет применения рельсового проката новых категорий.

8.2.2. Определение экономической эффективности

На сегодняшний день для участков пути с грузонапряженностью более 50 млн т брутто в год применяются схемы ремонта с периодичностью выполнения капитального ремонта 1400 млн т брутто, установленные Правилами технической эксплуатации железных дорог, утвержденными приказом Минтранса России от 21 декабря 2010 г. № 286. При этом предусмотрены средние (РС) и подъемные (РП) ремонты при проведении которых в том числе планируется очистка балласта. Целевой показатель в соответствии с белой книгой составляет 1500 млн т брутто.

Срок службы стрелочных переводов, определяемый прежде всего их конструкцией, не увеличивался с начала 2000-ых годов, поскольку конструкция переводов не менялась (типовые переводы разработаны более 20 лет назад), отражен в распоряжении (МПС РОССИИ) от 19 декабря 2002 г. № С-1241у «О введении нормативных сроков службы стрелочных переводов». Критерии выбора стрелочных переводов, подлежащих капитальному ремонту на новых и старогодных материалах, определены в Технических условиях на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути, утвержденных распоряжением ОАО «РЖД» от 18 января 2013 г. № 75р.

Таким образом, ремонтная схема типового стрелочного перевода проекта 2750 и его элементов представлена на Рисунке 8.1.

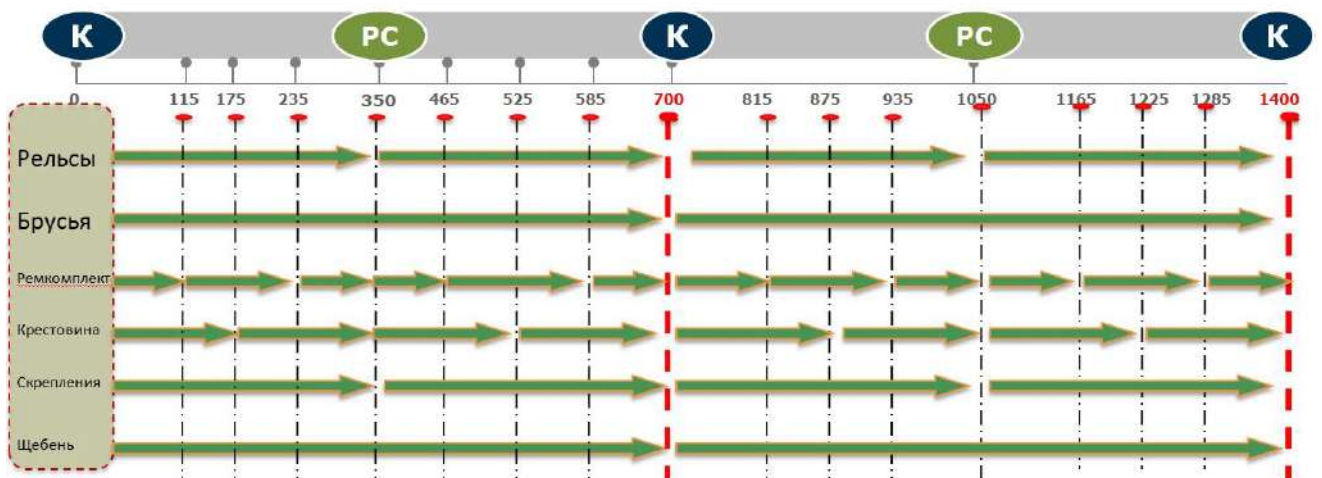


Рисунок 8.1 – Ремонтная схема типового стрелочного перевода проекта 2750

Затраты на проведение капитальных ремонтов ($K_{рс1}$ и смену металлических частей) типового стрелочного перевода на протяжении межремонтного срока 1400 млн т брутто составят:

$$Z_{общ1} = P_{кап1} + P_{рс1} + P_{кап1} + P_{рс1}, \quad (16)$$

где $P_{кап1}$ – для расчета применяем единичную стоимость замены стрелочного перевода по программе капитального ремонта 1 уровня в 2021 году согласно калькуляции Октябрьской дирекции по ремонту пути проекта 2750, с учетом актуальной стоимости стрелочного перевода 2750, таким образом $P_{кап1}$ принимаем равным 4 806 244 руб.,

$P_{рс1}$ – для расчета применяем единичную стоимость по сплошной смене металлических частей стрелочных переводов в 2021 году согласно калькуляции Октябрьской дирекции инфраструктуры, с учетом актуальной стоимости стрелочного перевода 2750, таким образом $P_{рс1}$ принимаем равным 2 292 584 руб.

Затраты на замену ремкомплектов стрелочного перевода не учтенные в капитальном ремонте и сплошной смене металлических частей составят:

$$Z_{рк} = (P_{укл} + P_{рк}), \quad (17)$$

где $Z_{рк}$ – расходы, связанные с укладкой новых ремкомплектов, руб.,

$P_{укл}$ – стоимость доставки и укладки ремкомплектов, руб.,

$P_{рк}$ – стоимость ремкомплекта, руб.

Таким образом стоимость отдельной замены ремкомплектов проекта 2750 с учетом их стоимости и трудозатрат по замене составляет:

$$Z_{рк} = (10\,937 + 169\,053) = 179\,990 \text{ руб.}$$

Стоимость отдельной замены крестовины проекта 2750 с учетом её стоимости и трудозатрат по замене была рассчитана в пункте 7.1 и составляет 223 965 руб.

Для расчета затрат на текущее содержание одного стрелочного перевода, взята выгрузка всех работ на стрелочных переводах на главных путях из системы ЕКАСУИ. Далее исключены работы, непосредственно не связанные с конструкцией стрелочного перевода (очистка от снега, снятие бокового наката и

так далее), а также затраты на замену основных элементов стрелочного перевода (ремкомплекты, крестовины), учтенные ранее. Затраченная на указанные работы в 2020 году сумма равняется 1 338,377 млн руб., что при общем количестве стрелочных переводов на главных путях равном 53 545 шт. составило 25 тыс. руб. на 1 стрелочный перевод.

Основными препятствиями к увеличению периодичности выполнения капитальных ремонтов стрелочных переводов свыше 700 млн т брутто являются: замена ремкомплектов и крестовин, загрязненность щебня, выход из строя железобетонных брусьев и элементов узла скрепления.

Решением указанной проблемы для достижения равноресурсности пути и стрелочных переводов с целью единовременной замены является применение стрелочных переводов на новой элементной базе с усиленными брусьями постоянного поперечного сечения и подшпальными прокладками.

Подшпальные прокладки широко применяются за рубежом на стрелочных переводах и отдельных участках пути. На железных дорогах Германии (Deutsche Bahn) и других европейских стран применение таких прокладок обязательно на линиях с высокой грузонапряженностью и осевыми нагрузками или высокими скоростями движения подвижного состава. Использование подшпальных прокладок дает такие положительные эффекты как:

- увеличение площади контакта подрельсового основания и балласта, что приводит к равномерному распределению нагрузки от подвижного состава и увеличению их ресурса;
- повышение сопротивления пути поперечному сдвигу;
- снижение интервала по подбивке подрельсового основания до 3 раз;
- создание равножесткого основания стрелочного перевода за счет перераспределения действующих сил от подвижного состава.

Экономический эффект от применения усиленных брусьев постоянного поперечного сечения с подшпальными прокладками, может быть получен за счет уменьшения вибродинамического воздействия на балласт и соответственного

увеличения ресурса работы балластного слоя и элементов перевода с обеспечением стабильности положения пути по длине перевода.

Применение стрелочных переводов проекта Н01.004 с подшпальными прокладками планируется на особогрузонапряженных участках пути с тоннажем более 100 млн т брутто в год. Стрелочные переводы проекта Н01.004 без подшпальных прокладок предполагается применять на участках с грузонапряженностью от 50 до 100 млн т брутто.

Таким образом для проекта Н01.004.00.0000 ремонтные схемы стрелочных переводов и его элементов будут соответствовать представленным на Рисунках 8.2 и 8.3 для конструкции пути с ресурсом 1,4 млрд т брутто и 2,1 млрд т брутто соответственно.

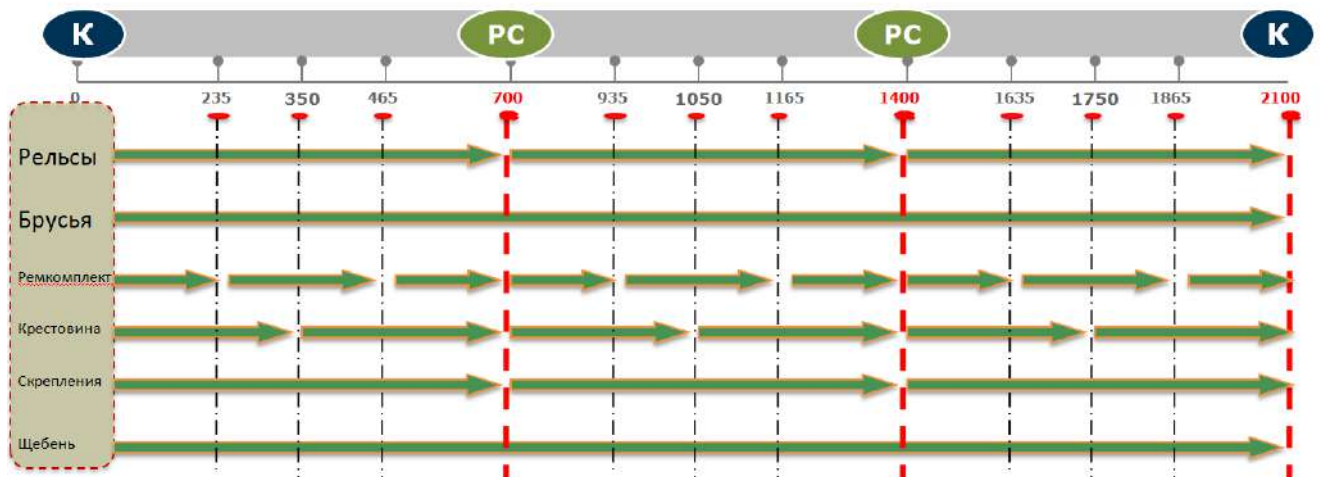


Рисунок 8.2 – Ремонтная схема стрелочного перевода проекта Н01.004 с подшпальными прокладками для конструкции пути с ресурсом 2,1 млрд т брутто

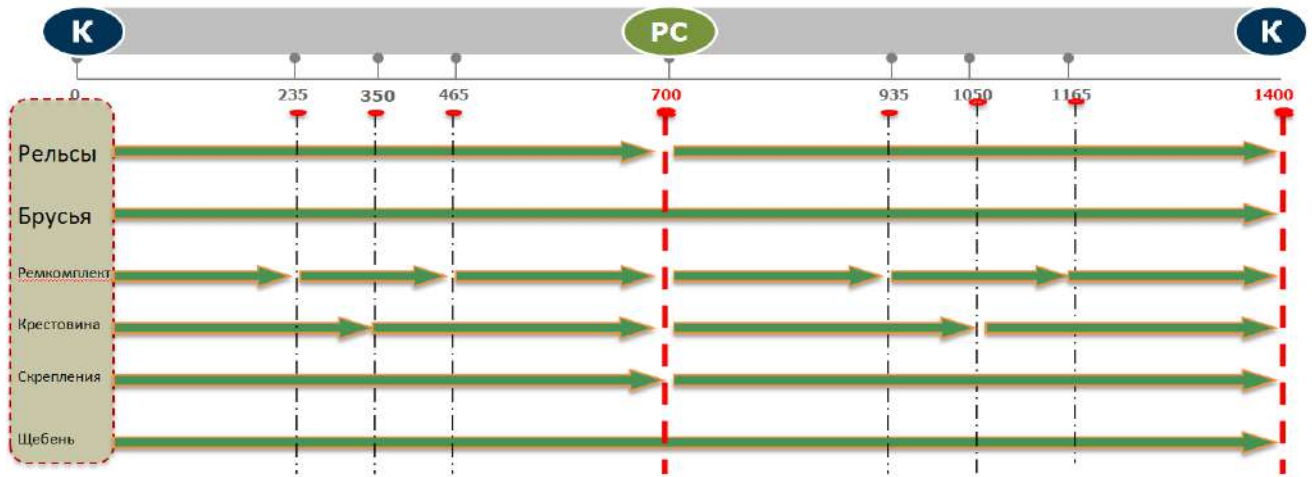


Рисунок 8.3 – Ремонтная схема стрелочного перевода проекта Н01.004 без подшпальных прокладок для конструкции пути с ресурсом 1,4 млрд т брутто

Затраты на проведение капитальных ремонтов ($K_{рсп}$ и смену металлических частей) стрелочного перевода проекта Н01.004 на протяжении межремонтного срока 1400 и 2100 млн т брутто составят:

$$Z_{общ1} = P_{кап2} + P_{рс2}, \quad (18)$$

$$Z_{общ2} = P_{кап3} + P_{рс2} + P_{рс2}, \quad (19)$$

где $P_{кап2}$ – единичная стоимость замены стрелочного перевода проекта Н01.004 по программе капитального ремонта 1 уровня составит 7 510 976 руб. (к утвержденной стоимости металлических частей проекта Н01.004 прибавляем стоимость бруса в соответствии с калькуляциями и стоимость укладки),

$P_{кап3}$ – единичная стоимость замены стрелочного перевода проекта Н01.004 с ПШП по программе капитального ремонта 1 уровня составит 8 245 494 руб. (к утвержденной стоимости металлических частей проекта Н01.004 прибавляем стоимость бруса с подшпальными прокладками в соответствии с калькуляциями и стоимость укладки),

$P_{рс2}$ – стоимость сплошной смены металлических частей стрелочного перевода проекта Н01.004 составит 4 360 834 руб. (стоимость металлических частей плюс стоимость укладки).

По результатам испытаний определено, что ресурс крестовины и стрелки стрелочного перевода Н01.004 более чем в 2 раза увеличен в сравнении с переводом проекта 2750.

Затраты на замену ремкомплектов и крестовин стрелочных переводов перевода Н01.004 не учтенные в капитальном ремонте и сплошной смене металлических частей составят 482 430 руб. и 544 908 руб. соответственно.

С учетом опыта подконтрольной эксплуатации образцов стрелочных переводов новых конструкций можно сделать вывод о сокращении затрат на основные типы работ связанные с конструкцией пути минимум на 30 %. Таким образом с учетом ранее посчитанных затрат на 1 стрелочный перевод, расходы на текущее содержание одного стрелочного перевода проекта Н01.004 составят $0,7 \cdot 25\,000 = 17\,500$ руб.

8.2.3 Результаты расчета стоимости жизненного цикла стрелочных переводов с моноблочными крестовинами

Экономический эффект от применения стрелочного перевода проекта Н01.004 с подшпальными прокладками в сравнении с типовым стрелочным переводом на участках с грузонапряженностью более 100 млн т брутто заключается в следующих базовых показателях:

- Чистый денежный поток на один перевод за жизненный цикл составляет 7,39 млн. руб.
- Чистый дисконтированный денежный поток – 468 тыс. руб. при внутренней норме рентабельности 12,5%.
- Простой срок окупаемости составит 10,2 лет, дисконтированный срок окупаемости – 17,2 лет.

Экономический эффект от применения стрелочного перевода проекта Н01.004 без подшпальных прокладок в сравнении с типовым стрелочным

переводом на участках с грузонапряженностью от 50 до 100 млн т брутто заключается в следующих базовых показателях:

- Чистый денежный поток на один перевод за жизненный цикл составляет 3,21 млн. руб.
- Чистый дисконтированный денежный поток – 341 тыс. руб. при внутренней норме рентабельности 13,1%.
- Простой срок окупаемости составит 7,7 лет, дисконтированный срок окупаемости – 10,7 лет.

Необходимо отметить, что при росте серийности производства, с увеличением коэффициента закрепления операций происходит снижение соответствующих затрат и стоимости изделия, что повышает его конкурентоспособность на рынке, а также приводит к росту экономического эффекта от применения такой продукции.

Дополнительная эффективность от применения данного стрелочного перевода заключается в увеличении пропускной способности в связи с увеличенным интервалом ремонтов, уменьшении отказов технических средств благодаря применению надежных конструкций, увеличению допустимой нагрузки на ось и возможности повышения скоростей движения по прямому направлению, улучшение экологической обстановки, связанное с применением роликовых устройств, не требующих смазки и так далее. При этом возможно снижение ожидаемого увеличения среднего ресурса таких крестовин в зависимости от конкретных условий и влияния человеческого фактора при эксплуатации.

Выводы по восьмой главе

1. Рассчитанная экономия годовых текущих затрат на отдельную замену моноблочных крестовин стрелочного перевода, без учета снижения затрат на текущее содержание, составляет 3 413 руб. в расчете на одну крестовину или 128,76 млн. руб. для всей сети ОАО «РЖД».

2. Расчет стоимости жизненного цикла также показал эффективность применения моноблочных крестовин в составе стрелочных переводов новой конструкции. При замене серийных конструкций на новые, дисконтированный срок окупаемости стрелочного перевода для конструкции пути с ресурсом 1,4 млрд т брутто составит 10,7 лет, а для конструкции пути с ресурсом 2,1 млрд т брутто – 17,2 лет.

3. Применение моноблочных крестовин экономически целесообразно как в составе серийных стрелочных переводов, так и в составе новых линеек стрелочной продукции с повышенными ресурсными показателями конструкции пути.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационного исследования получены следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Установлено, на основе результатов анализа данных по отказам крестовин с неподвижными элементами, что серийно выпускаемые крестовины стрелочных переводов имеют недостаточную эксплуатационную стойкость и нуждаются в доработке. При этом значительное число крестовин получает отказы из-за недостатков конструктивного характера.

2. Получена функциональная зависимость вероятности безотказной работы крестовин вида: $lnR(t) = (9,43 + 0,5 \cdot t^{1,5}) \cdot 10^{-3}$. Данная зависимость может послужить инструментом при анализе влияния условий работы крестовин из высокомарганцевистой стали на показатели надежности, прогнозировании выхода из строя крестовин с позиции, планирования организации работ по их замене, формирования в бюджете дирекций инфраструктуры соответствующих затрат, проведения предпроектных расчетов при текущих системе ведения стрелочного хозяйства и интенсивности движения.

3. Выявлены новые виды дефектов крестовин, которые должны быть включены в «Классификатор дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов».

4. Определены наиболее перспективные методы повышения ресурсных показателей крестовин из высокомарганцевистой стали, заключающиеся в:

- применении металла с более высокими прочностными характеристиками;
- изменении конструкции крестовин;
- изменении технологии изготовления крестовин, за счет применения упрочнения поверхности катания.

5. Установлено, по результатам металлографических исследований, что причиной излома моноблочных крестовин являлась недостаточная усталостная прочность цельнолитого блока.

6. Разработан метод, и модели на его основе для исследования напряженно-деформированного состояния моноблочных крестовин с целью совершенствования их геометрии, позволяющие рассматривать все особенности геометрии сечений и работы под нагрузкой моноблочных крестовин.

7. Рекомендовано использование разработанного метода определения прочности конструкции крестовин при проектировании аналогичных изделий, что позволит значительно сократить время разработки и постановки на производство новых крестовин, а также исключить затраты на разработку и изготовление литейной оснастки, и на проведение испытаний опытных образцов крестовин [100].

8. Получен, в результате моделирования, усовершенствованный вариант моноблочной крестовины.

9. Подтверждена эффективность упрочнения крестовин из высокомарганцевистой стали энергией взрывной волны с применением новых ленточных взрывных зарядов.

10. Расчет затрат жизненного цикла показал эффективность применения моноблочных крестовин в составе стрелочных переводов новой конструкции. При замене серийных конструкций на новые, дисконтированный срок окупаемости стрелочного перевода для конструкции пути с ресурсом 1,4 млрд т брутто составит 10,7 лет, а для конструкции пути с ресурсом 2,1 млрд т брутто – 17,2 лет.

11. Предлагаемая конструкция моноблочной крестовины включена в состав стрелочных переводов для условий тяжеловесного и интенсивного движения. Крестовины освоены в серийном производстве и сертифицированы на соответствие требованиям ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта».

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глюзберг, Б.Э. Стрелочное хозяйство российских железных дорог: проблемы и перспективы / Б.Э. Глюзберг // РСП Эксперт. – 2015. – № 3. – С. 36 – 37.
2. Глюзберг, Б.Э. Модернизация и совершенствование стрелочных переводов / Б.Э. Глюзберг // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 7. – С. 54 – 57.
3. Трегубчак, П.В. Современные конструкции стрелочных переводов для тяжеловесного движения / П.В. Трегубчак // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 9. – С. 14–18.
4. Глюзберг, Б.Э. Перспективы развития стрелочной продукции для российских железных дорог / Б.Э. Глюзберг // Материалы Международной 9-ой Всероссийской научно-практической конференции «Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство». – М. : МГУПС.– 2015. – С. 34–38.
5. Мониторинг стрелочных переводов // Ж.-д. трансп. за рубежом. Сер.3: ЭИ / ЦНИИТЭИ МПС. 2003. Вып. 2. С. 27 – 31 : ил. - International Railway Journal.– 2002. № 8. р. 27–28.
6. Глюзберг, Б.Э. Актуальные проблемы стрелочного хозяйства / Б.Э. Глюзберг // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 7. – С. 45–48.
7. Михайлова, В.П. Эксплуатационные испытания типовых и опытных стрелок и крестовин с выдачей технических решений по повышению их качества и надежности / В.П. Михайлова // Реферат отчета ВНИИЖТ выполненного по теме 08.01.24.84.00,00 р. I
8. ГОСТ 33477-2015. Система разработки и постановки продукции на производство. Технические средства железнодорожной инфраструктуры. Порядок разработки, постановки на производство и допуска к применению. – Введ. 2016-07.01. – М. : Стандартинформ. – 2016. – 45 с.

9. Королев, В.В. Напряженное состояние элементов скоростного стрелочного перевода / В.В. Королев // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформ : сб. науч. тр. конф. ВНИИЖТ. М : Интекст. – 2003. – С. 231–235.

10. Глюзберг, Б.Э. Подход к анализу надежности соединений и пересечений рельсовых путей / Б.Э. Глюзберг // Особенности системы ведения рельсового хозяйства на российских ж.д. Труды АО "ВНИИЖТ" М. : ООО «РАС». – 2017. – С. 101–107.

11. Глюзберг, Б.Э. Увеличение ресурса крестовин стрелочных переводов / Б.Э. Глюзберг, В.В. Королев, И.В. Шишкина // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XV межд. науч.-тех. конференции. М. : РУТ (МИИТ). – 2018. – С.186–187.

12. ГОСТ 7370. Крестовины железнодорожные. Технические условия: межгосударственный стандарт. – Введ. 2016-07-01. – М. : Стандартинформ.– 2015.– 61 с.

13. Vossloh [Электронный ресурс]: сайт компании / Vossloh – Режим доступа: <https://www.vossloh.com/>, свободный.

14. EN 15689:2009 «Железные дороги - Путь - Стрелки и крестовины - Компоненты крестовин из литой аустенитной марганцовистой стали» (EN 15689:2009 Railway applications - Track - Switches and crossings - Crossing components made of cast austenitic manganese steel).

15. Voestalpine [Электронный ресурс]: сайт компании / Voestalpine – Режим доступа: <https://www.voestalpine.com/>, свободный.

16. 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 технологий в путевое хозяйство» Сб. мат. 12-ой н.-т. конф. РУТ МИИТ, М.: ИЦ «АИСНТ». – 2018. – С. 127–129.

17. Ларкин, А.В. Основные направления качества производства стрелочной продукции для железных дорог России: дис.... канд. техн. наук: 05.22.06. – ВНИИЖТ, Москва, 1998 – 260 с.

18. Глюзберг, Б.Э. Элементы стрелочных переводов для российских железных дорог / Б.Э. Глюзберг, В.В. Королев, И.В. Шишкина // Сб. мат. н.-т. конф. с международным участием Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2019. – Т. 14. – № 14 (14). С. 17–20.

19. Королев, В.В. Система учета дефектов элементов стрелочных переводов / В.В. Королев, И.В. Шишкина // Сб. мат. н.-т. конф. с международным участием Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство М., 2016 – Том: 9. – № 9 (9). – С. 190–195

20. Ермаков, В.М. Комплексная система реализации ресурсосбережения в современных условиях работы железнодорожного пути: дис. ... док. тех. наук: ПГУПС / В.М. Ермаков. – М., 2000. – 435 с.

21. Классификаторе дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов, утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 27.09.2019 № 2143р введен в действие с 1 октября 2019 года.

22. Шишкина, И.В. Неразрушающий контроль рельсовых элементов стрелочных переводов на железных дорогах России / И.В. Шишкина, С.А. Голубков, Д.О. Макухин, О.Д. Никифоров, П.С. Макаров, А.А. Французов // Студент инновации России. – 2017. – № 4. – С. 35–44.

23. ГОСТ 33535-2015. Соединения и пересечения железнодорожных путей. Технические условия. Введ. 2016-08-01. М. : Стандартинформ, 2016.– 53 с.

24. Глюзберг, Б.Э. Стратегия исследований и разработок в области стрелочного хозяйства / Б.Э. Глюзберг // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 2. – С. 11–14.

25. Королев, В.В. Система учета дефектов элементов стрелочных переводов / В.В. Королев, И.В. Шишкина // «Внедрение современных конструкций и технологий в путевое хозяйство» Сб. мат. 9-ой н.-т. конф. МГУПС МИИТ, М. : ИЦ «АИСНТ». – 2016. – С. 188–193.

26. Глюзберг, Б.Э. Определение безотказности стрелочных переводов и их элементов / Б.Э. Глюзберг // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2014. – № 7 – С. 35–42.

27. Bateman, D. Upgrading S&C for the future // The Permanent Way Institution. 2002. Vol. 140. № 4. p. 347–353.
28. Bonaventura, C. S. Increasing speed through turnouts // Railway Track & Structures. 2004. N 7. p. 20–23.
29. Davis, D. D. Railroad switch design and failure mode analysis // Railway Track & Structures. 2003. N 6. p. 19-21.
30. Глюзберг, Б.Э. Стрелочные переводы / Б.Э. Глюзберг, М.Ф. Вериги, В.Г. Альбрехт, А.М. Тейтель // Труды ЦНИИ МПС. Вып.546, М., 1976.
31. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск: уч. пос./ Шубин, Р.А. Тамбов : Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. ISBN 978-5-8265-1086-5.
32. Gluzberg V., Korolev V., Shishkina I., Berezovsky M., Tregubchak P., Zverkova N. Reliability indicators of railway joints and crossings // IOP Conference series: Materials Science and Engineering 8. Сер. «VIII International Scientific Conference Transport of Siberia 2020». – 2020. – Том 918.
33. Хвостик, М.Ю. Мониторинг повреждаемости рельсов типа Р65 при различных условиях эксплуатации на сети железных дорог России / М.Ю. Хвостик, Л.А. Джанполодова, И.В. Шишкина, Г.А. Берестень // «Повышение эффективности устойчивости содержания железнодорожного пути» Труды ОАО «ВНИИЖТ» ВМГ Принт, Москва, 2014. – С. 105–111.
34. Deformations and life periods of the switch chairs of the rail switches / V. Glusberg, A. Loktev, V. Korolev, I. Shishkina, M. Berezovsky, P. Tregubchak // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1258. – P. 184-196. – DOI 10.1007/978-3-030-57450-5_17. – EDN NMIOZS.
35. Глюзберг, Б.Э. Влияние нагрузок подвижного состава на сроки службы элементов стрелочных переводов / Б.Э. Глюзберг // Современные способы совершенствования работы ж.д. транспорта – М. : МГУПС. – 2016. – С. 157–158.
36. Третьяков В.В. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой / В. В. Третьяков, И. Б. Петропавловская, В. О. Певзнер, Т. И. Громова,

И. В. Третьяков, К. В. Шапетько, И. С. Смелянская, А. С. Томиленко // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т. 75. – № 4. – С. 233–238.

37. 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.

38. Королев, В.В. Организация работ по контролю рельсовых элементов стрелочных переводов на железных дорогах России / В.В. Королев, В.А. Мальцев // «Внедрение современных конструкций и технологий в путевое хозяйство» Сб. мат. 7-ой н.-т. конф. МГУПС МИИТ, М. : ИЦ «АИСНТ». – 2014. – С. 45–52.

39. Глюзберг, Б.Э. Подготовка технических средств и нормативной документации по стрелочному хозяйству для линий высокоскоростного движения / Б.Э. Глюзберг, В.В. Королев // Конструкции железнодорожных путей и вопросы технического обслуживания высокоскоростных магистралей: сб. мат. н.-т. конф. ПГУПС. – 2010.

40. Глюзберг, Б.Э. Проблемы стрелочного хозяйства высокоскоростной железнодорожной магистрали ВСЖМ - 1 / Б.Э. Глюзберг // Транспортное строительство. Сборник статей второй всероссийской научно-технической конференции. Москва. – 2021. – С. 14–22.

41. 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.

42. Березовский, М.Е. Современные технологии изготовления стрелочных переводов для высокоскоростного движения / М.Е. Березовский, П.В. Трегубчак, И.В. Цитцер // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – № 12. – С. 124–126.

43. Зыкова, А.П. Модифицирование стали 110Г13Л / А.П. Зыкова, С.Н. Федосеева, Д.В. Лычагин //Матер. VII Межд. научно-техн. конф. «Современные проблемы машиностроения». Курск, 2015. – С. 86-90.

44. Мулявко, Н.М. Анализ эксплуатационной стойкости отливок из стали 110Г13Л / Н.М. Мулявко // Известия Челябинского научного центра. – 2001. – № 4 (13). – С. 28–30.
45. Ахметов, А.Б. Влияние модифицирования кальцием на структуру стали Гадфильда и морфологию образующихся в ней неметаллических включений / А.Б. Ахметов, Г.Д. Кусаинова, А.А. Кусжанова, А.Э. Ильясов, С.Н.Шаркаев // Электрометаллургия. – 2017. – № 3. – С.8–12.
46. Сеницкий, Е.В. Обзор результатов исследований, направленных на улучшение свойств отливок из высокомарганцевой стали / Е.В. Сеницкий, А.А. Нефедьев, А.А. Ахметова, М.В. Овчинникова, И.Б. Хренов, Д.А. Дерябин // Теория и технология металлургического производства. – 2016. – № 2 (19). – С. 24–57.
47. Михайлова, В.П. Статистический анализ сроков службы и дефектостойкости типовых и опытных стрелок и крестовин / В.П. Михайлова // Реферат отчета ЦНИИ, выполненного по теме 204-П-79, р. I, а.
48. ГОСТ Р 51685-2022. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – Введ. 2022-12-14. – М. : Московский институт стандартизации.– 2023. – 96 с.
49. EN 13674-1:2011 «Железные дороги. Путь. Рельсы. Часть1. Рельсы Виньоля 46 кг/м и более» (EN 13674-1:2011 «Railway applications — Track — Rail — Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above», NEQ).
50. Алексеев, В.С. Материаловедение: Конспект лекций: уч. пос. / В.С. Алексеев // ЭКСМО. – 2008, – 160 с. ISBN 978-5-699-26919-8.
51. Чуманов, И.В. О влиянии химического состава металла на режим термической обработки отливок из стали марки 110Г13Л / Чуманов, И.В., Порсев, М.А. // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: металлургия. – 2012. – № 39 (298). – С. 59–63.
52. Чёсов, Ю.С., Зверев Е.А. Методика нанесения плазменных износостойких покрытий / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 2 (55). – С. 156–165.

53. Веселов, С.В. Особенности микроструктуры износостойких плазменных покрытий / С.В. Веселов, Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, П.В. Трегубчак, В.В. Базаркина, В.С. Ложкин // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2010. – № 4 (49). – С. 35–37.

54. Béjar M.A., Henríquez R. Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing // *Materials and Design*. – 2009. – Vol. 30, N 5. – P. 1726–1728. – doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.006.

55. Зверев, Е.А. Оценка работоспособности износостойких плазменных покрытий после высокотемпературного воздействия токами высокой частоты / Е.А. Зверев, В.Ю. Скиба, П.В. Трегубчак, Н.В. Вахрушев, К.А. Парц, А.К. Жигулев // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2016. – № 3. – С. 65–70.

56. Чёсов, Ю.С. Исследование процессов предварительной механической обработки под напыление газотермических покрытий / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, П.В. Трегубчак, Н.В. Вахрушев // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2014. – № 1. – С. 90–95.

57. ТУ 32 ЦП-819-671-2013. Отремонтированные крестовины стрелочных переводов. Технические условия, утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 16.12.2013 г. № 2776р.

58. Трегубчак, П.В. Проектирование конструкции моноблочных крестовин для тяжелых условий эксплуатации / П.В. Трегубчак // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. – 2023. – Т. 82 – № 2 – С. 146 – 156.

59. Шахунянц, Г.М. Железнодорожный путь: учебник для вузов ж.-д. трансп. / Г.М. Шахунянц. – 3-е изд., перераб и доп. – М. : Транспорт. – 1987. – 479 с.

60. Коренев, Б.Г. Некоторые задачи балок на упругом основании / Б.Г. Коренев, М.Н. Ручимский // *Научное сообщение №120 Центрального научно-исследовательского института промышленных сооружений*. М. : Стройиздат. – 1955. – 54 с.

61. Муравский, Г.Б. Неустановившиеся колебания балки, лежащей на упругом основании, при действии подвижной нагрузки / Г.Б. Муравский // Изв. АН СССР, ОТн Мех. и машиностроения, 1962. – №1. – 117 с.
62. Муравский, Г.Б. Действие подвижной нагрузки на балку бесконечной длины, лежащую на упругом основании / Г.Б. Муравский // Тр. МИИТ. Вып.134. – 1961. – С. 54– 84.
63. ГОСТ Р 56291–2014. Прокладки рельсовых креплений железнодорожного пути. Технические условия. Введ. 2015–05–01. – М. : Стандартиформ, 2015. – 28 с.
64. Расчеты и проектирование железнодорожного пути : учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта / под ред. В. В. Виноградова и А. М. Никонова. – М. : Маршрут. – 2003. – 486 с.
65. Барабошин, В.Ф. Вредные вибрации пути и борьба с ними / В.Ф. Барабошин, Н.И. Ананьев // М. : Транспорт. – 1972. – 48 с.
66. Першин, С.П. Приближенная статистическая оценка влияния неравножесткости пути на характеристики его напряженно-деформированного состояния / С.П. Першин // Вестник ВНИИЖТ. – 1971. – № 5. – С. 7 – 10.
67. Кулагин, М.И. Неровности на поверхности катания рельсов и их влияние на динамическое давление колеса на рельс [Текст] / И.М. Кулагин // Труды ЦНИИ МПС. – М., 1959. – Вып. 177. – С. 125.
68. Лысюк, В.С. Влияние жесткости и неровностей пути на деформации, вибрации и силы взаимодействия его элементов / В.С. Лысюк // Труды ЦНИИ МПС. – М., 1969. – Вып. 370. – С. 169.
69. Ермаков, В.М. Дифференцированные требования к конструкции пути и его элементам [Текст] / В.М. Ермаков // Путь и путевое хозяйство, 2004. – № 10. – С. 11– 14.
70. Петров, А.В. Влияние низких температур на жесткость узлов рельсовых креплений безбалластной конструкции пути: дис.... канд. техн. наук: 2.9.2. – РУТ МИИТ, Москва, 2022 – 224 с.

71. Трегубчак, П.В. Конструктивные особенности стрелочных переводов для работы в условиях низких температур / П.В. Трегубчак // Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции История и перспективы развития транспорта на севере России, 2023. – № 1. – С. 49-51.
72. Riley P. The Benefits of S&C Design Convergence // Permanent Way Institution, 2007. Vol. 125. № 1. p. 23– 24.
73. 61. South G. NR 60 S&C and the Way Forward // Permanent Way Institution., 2007. Vol. 125. № 1. p. 19– 21.
74. Морозов, Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера. Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский – М. : ЛЕНАНД, 2008. – 456 с.
75. Басов, К.А. ANSYS: справочник пользователя / К.А. Басов – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
76. Lee H.-H. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15. - SDC Publications, 2014.- 600 p. ISBN-10: 1585039071, ISBN-13: 978-1585039074
77. Chen X., Liu Y. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. 1st. ed. - CRC Press, 2014. – 411 p. ISBN-10: 1439873844, ISBN-13: 978-1439873847.
78. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering Analysis with ANSYS Software. 1st Ed. - Butterworth-Heinemann, 2007. – 480 p. ISBN-10: 075066875X, ISBN-13: 978-0750668750.
79. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд. доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко – М. : Машиностроение. – 2003. – 784 с.
80. Сорокин, В.Г. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общей ред. В.Г. Сорокина. – М. : Машиностроение. – 1989. – 640 с.
81. Титаренко, М.И. Новый стрелочный перевод от новосибирцев / М.И. Титаренко // Путь и путевое хозяйство, 2018. – № 8. – С. 16-18.

82. Условия гарантии качества стрелочной продукции, порядок предъявления и рассмотрения претензий к поставщикам и заводам-изготовителям стрелочной продукции для ОАО «Российские железные дороги», утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 10 июля 2008 г. № 1462р.

83. Сосков, А.Г. Эксплуатация крестовин в условиях тяжеловесного движения на Западно-Сибирской дороге/ А.Г. Сосков // Путь и путевое хозяйство, 2021. – № 10. – С. 2–4.

84. Горькова, Т.Н. На шахунянцевских чтениях / Т.Н. Горькова, И.В. Мочалова // Путь и путевое хозяйство, 2023. – № 1. – С. 14–19.

85. ГОСТ Р 54153-2010. Сталь. Метод атомно-эмиссионного спектрального анализа. – Введ. 2012-01-01. – М. : Стандартиформ, 2012. – 28 с.

86. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1986-01-01. – М. : Стандартиформ, 2008. – 22 с.

87. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 1979-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 9 с.

88. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Введ. 1960-01-01. – М. : Стандартиформ, 2007. – 39 с.

89. Кример, Б.И. Лабораторный практикум по металлографии и физическим свойствам металлов и сплавов / Е.В. Панченко, Л.А. Шишко, В.Н. Николаева. – Москва : Металлургия, 1966.

90. Трегубчак, П.В. Особенности работы металла в зоне образования дефектов моноблочной крестовины / П.В. Трегубчак // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ), 2023. – Т. 82 – № 4. – С. 359–368.

91. Плотников, К.П. Перевод стрелочный типа Р65 марки 1/11 на железобетонных брусках / К.П. Плотников, В.Р. Глейм, А.Ю. Левчук, Г.О. Ча, П.В. Трегубчак, В.Ю. Скиба // Научно-исследовательские публикации. – 2015. – №11 (31). – С. 102-107.

92. Трегубчак, П.В. Конструкторско-технологическая подготовка производства стрелочной продукции для грузонапряженных участков железных дорог / П.В. Трегубчак // Особенности системы ведения рельсового хозяйства на российских железных дорогах Труды АО «ВНИИЖТ». – 2017. Т. 82. – № 4. – С. 148–153

93. Правила технической эксплуатации железных дорог, утвержденные приказом Минтранса России от 21 декабря 2010 г. № 286.

94. Распоряжение МПС РОССИИ от 19 декабря 2002 г. № С-1241у «О введении нормативных сроков службы стрелочных переводов».

95. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути, утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 18 января 2013 г. № 75р.

96. Методическими рекомендациями по обоснованию эффективности инноваций на железнодорожном транспорте, утвержденными руководителем Департамента технической политики МПС 26.04.1999 г. № ЦТех0-11.

97. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 27.12.2007 г. №2459р.

98. ISO/TS 22163:2017 Железные дороги. Система менеджмента качества. Требования к системам менеджмента бизнеса для предприятий железнодорожной отрасли: ISO 9001:2015 и частные требования, применимые в железнодорожной отрасли. – 84 с.

99. Гольдин, С.Л. Факторы RAMS и опыт внедрения стандартов RAMS при поставках подвижного состава / Гольдин С.Л. // Железные дороги мира, 2008. – № 11 – С. 58-66.

100. Титаренко, М.И. Результаты испытаний моноблочной крестовины марки 1/18 Новосибирского стрелочного завода / М.И. Титаренко, П.В. Трегубчак // Путь и путевое хозяйство, 2023. – № 11. – С. 10-12.