

На правах рукописи

Якушев Алексей Вячеславович



**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ  
НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЙ  
КОНТИНУАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЙ**

Специальность 2.9.3 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов  
и электрификация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Екатеринбург – 2022

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральском государственном университете путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Научный консультант: Смолянинов Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», профессор

Официальные оппоненты: Москвитин Геннадий Викторович, доктор технических наук, профессор по кафедре, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, заведующий лабораторией надежности и долговечности при термомеханических циклических воздействиях

Оганьян Эдуард Сергеевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», главный научный сотрудник отделения динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры

Самошкин Сергей Львович, доктор технических наук, Акционерное общество научная организация «Тверской институт вагоностроения», начальник управления научно-технического обеспечения и развития

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Защита состоится «25» ноября 2022 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 44.2.008.01 на базе ФГБОУ ВО УрГУПС по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д.66, ауд. Б2-15.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте ФГБОУ ВО УрГУПС ([www.usurt.ru](http://www.usurt.ru)). Автореферат размещен на сайте Минобрнауки России ([www.vak.minobrnauki.gov.ru](http://www.vak.minobrnauki.gov.ru)).

Автореферат разослан «25» июня 2022 года.

Отзывы на автореферат, в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять в адрес диссертационного совета по почте.

Ученый секретарь диссертационного совета

Тимухина Е.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Ежегодно на железных дорогах Российской Федерации и Республики Казахстан происходят крушения грузовых вагонов с грузами, в том числе опасными, по причине излома литых рам боковых тележек (см. рис.1). В результате разливов нефтехимических продуктов из вагонов цистерн, кислот и других опасных грузов происходят экологические катастрофы для окружающей среды. Имеются редкие случаи гибели локомотивных бригад при столкновении сошедших с рельсов грузовых вагонов и встречных пассажирских поездов.

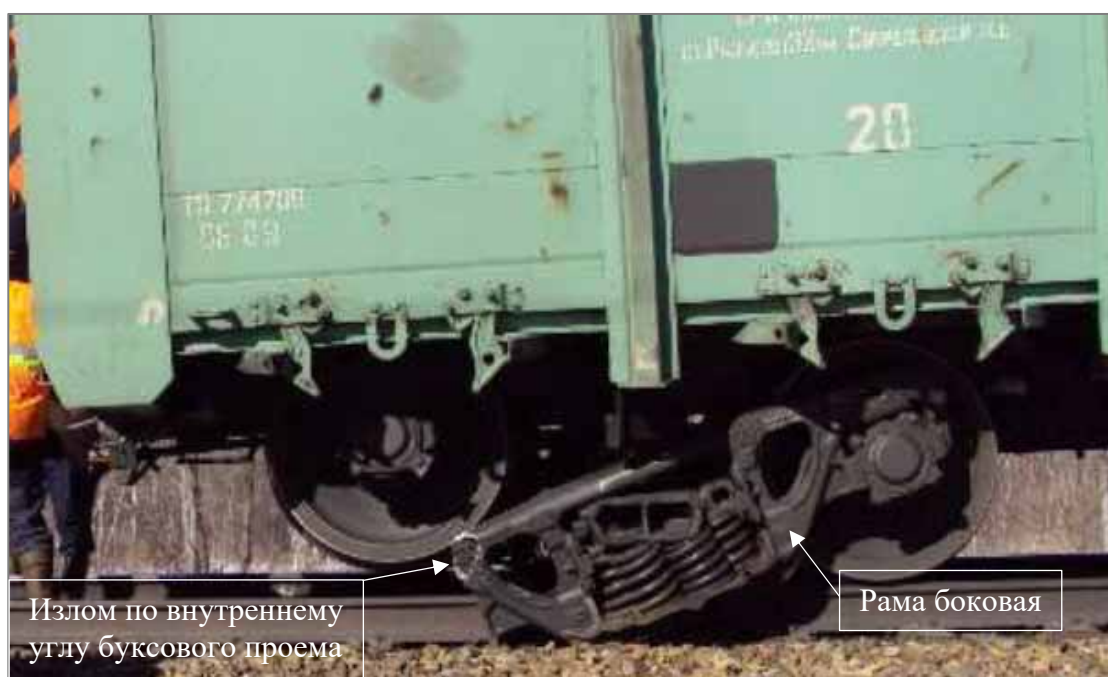


Рис.1. Излом рамы боковой тележки в эксплуатации грузового полувагона

С ростом экономики Российской Федерации товарный грузооборот на железных дорогах повышается, удлиняются гарантийные участки безопасного проследования грузовых поездов на основных направлениях сети железных дорог, увеличиваются в разы межремонтные пробеги тележек грузовых вагонов, проводятся исследования по оценке целесообразности повышения срока службы литых деталей тележек с 32 до 40 лет. С 01 июля 2014 г. в ГОСТ 32400-2013 «Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия» введено требование надежности в том, что рамы

боковые и балки надрессорные не должны переходить в опасное состояние до очередного планового ремонта вагона. В связи с изложенным, остаются и повышаются риски крушений грузовых вагонов в движении поезда из-за разрушения литых рам боковых тележек.

Существующие методы расчета усталостной долговечности от начала эксплуатации до появления усталостной трещины в раме боковой и балке надрессорной литых конструкций, изложенные в нормативной документации, не учитывают стадию развития усталостной трещины, эффект охрупчивания стали с ростом циклической наработки в эксплуатации. Оценки трещиностойкости литых рам боковых в эксплуатации, проводимые некоторыми отечественными учеными, учитывают деградацию коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) после 25 лет эксплуатации, но не рассчитывают КИН непрерывно, после любого срока эксплуатации. Другие ученые дают отдаленные прогнозы срока службы и ресурса литых рам боковых методами континуальной механики или механики разрушений, не охватывают негативные изменения механических свойств сталей. Кроме того, задача о разработке методологии и практических методов решения задач обеспечения безопасности на объектах железнодорожного транспорта входит в «Стратегию развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года». Вопросы создания надежных и научно-обоснованных методик расчета усталостной долговечности литых деталей тележек от начала поставки до перехода в предельное состояние остаются не изученными. Поэтому, необходимо провести научные исследования и разработать методику прогнозирования усталостной долговечности литых деталей тележек с учетом негативных изменений механических свойств в эксплуатации, которая обеспечит безопасность движения поездов.

В диссертации, с помощью установленных взаимосвязей механических свойств литых сталей класса 20Л и циклической наработки литых деталей тележек грузовых вагонов, методами континуальной механики и механики разрушений, исследуется влияние негативных изменений механических свойств на сопротивление усталости. Разрабатывается единая методика по прогнозированию

усталостной долговечности литых деталей тележек с учетом внутренних технологических дефектов, негативных изменений механических свойств, стадии развития усталостной трещины вплоть до разрушения детали, справедливая в континуальной механике и в механике разрушений.

**Целью диссертационной работы** является решение научной проблемы по определению усталостной долговечности литых деталей тележек грузовых вагонов от начала поставки до наступления предельного состояния, путем открытия закономерных связей при описании негативных изменений механических свойств литых сталей, изучаемых методами континуальной механики и механики разрушения, и сведения их в единую теорию.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить **следующие задачи**.

1. Разработать математические модели: циклической деградации механических свойств литых сталей методами континуальной механики; внутреннего технологического дефекта в литой детали методами механики разрушения; распространения усталостной трещины в стенке литой детали методами механики разрушения.

2. Выполнить эксперименты для верификации разработанных математических моделей зарождения и развития усталостной трещины в стенке литой детали, имеющей технологический дефект, на основе циклической деградации механических свойств сталей, методами механики разрушения.

3. Составить единую методику для определения усталостной долговечности литых деталей тележек грузовых вагонов, учитывая негативные изменения механических свойств сталей, справедливую в континуальной механике и в механике разрушений.

4. На основе разработанной методики определить срок службы литой детали тележки грузового вагона по единой теории о вырождении механических свойств сталей от воздействия эксплуатационных нагрузок, методами континуальной механики и механики разрушений.

**Методы исследования.** Процесс накопления усталостных повреждений в стали с мелкозернистой структурой изучался методами математического моделирования, континуальной механики деформирования. Результаты прогнозирования усталостной долговечности, срока службы детали, предельной длины усталостной трещины, размеров допускаемых внутренних технологических дефектов, критерий циклической вязкости разрушений проверялись методами экспериментальной проверки и тензометрии. Оценка напряженно-деформированного состояния литой детали выполнялась методом конечных элементов (МКЭ). Обработка результатов испытаний на усталость проводилась методами математической статистики. Коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) в вершине усталостной трещины подсчитывались методами механики разрушений. Механические свойства литых сталей при растяжении определялись методом полных диаграмм деформирования.

**Научная новизна работы.**

1 Построена единая в континуальной механике и в механике разрушения теория о негативных изменениях механических свойств сталей, связывающая деградацию механических свойств литых сталей класса 20Л с ростом циклической наработки.

2 Разработана методика расчетов процесса вырождения циклической вязкости разрушения в наиболее нагруженных областях литых деталей тележек грузовых вагонов, от начала использования до наступления предельного состояния в эксплуатации – излома по усталостной трещине, позволяющая с единых модельных представлений оценивать усталостную долговечность детали.

3 Определена кинетическая кривая процесса вырождения циклической вязкости разрушения литых сталей класса 20Л для изготовления несущих деталей тележек грузовых вагонов, которая описывает явление охрупчивания сталей от состояния поставки до предельного состояния детали. Установлены параметры кривой.

4 Введено условие эквивалентности по поврежденности стали при циклическом нагружении на разных уровнях максимальных напряжений цикла по

коэффициентам интенсивности напряжений, которое учитывает историю нагружения детали по циклам, и зависимость поврежденности от числа переходов и местоположения в общем спектре нагружений.

5 Установлен единый критерий зарождения и магистрального продвижения усталостной трещины в литой детали тележки грузового вагона, а также перехода её в предельное состояние по циклической вязкости разрушения. Полученные значения циклической вязкости разрушения, при которых начинает продвигаться усталостная трещина в детали, сочетаются с результатами дорогостоящих экспериментов на образцах, вырезанных из надрессорных балок после 25 лет службы. Обнаружено, что значения циклической вязкости разрушения  $K_{fc}$  литой стали класса 20Л могут быть значительно ниже значений, установленных в испытаниях образцов, вырезанных из надрессорной балки после 25 лет службы, и считающиеся ориентиром до сих пор при изучении трещиностойкости рам боковых и балок надрессорных.

**Практическая значимость исследования.** Полученные практические результаты по оценке усталостной долговечности несущих деталей тележек грузовых вагонов методами континуальной механики и механики разрушений позволяют применять любой из них для прогнозирования сроков службы, установления протяженности гарантийных участков безопасного проследования грузовых поездов на основных направлениях сети железных дорог.

Установленный в работе критерий зарождения и развития усталостной трещины по КИН, а также перехода детали в предельное состояние – излом, позволяет выполнять теоретическую оценку соответствия установленным требованиям надежности по недопущению перехода боковой рамы и надрессорной балки тележки в опасное состояние до первого планового ремонта вагона.

Разработанная методика сравнительной экспресс оценки усталостной долговечности, несущей способности и трещиностойкости литых сталей, позволяет сократить количество стендовых испытаний натуральных деталей в пользу статических испытаний микрообразцов.

Сделанные практические рекомендации по улучшению качества литых рам боковых и балок надрессорных тележек грузовых вагонов при производстве сокращают брак и увеличивают усталостную долговечность.

Изобретенный способ упрочнения литых боковых рам с коробчатой конструкцией углов буксовых проемов, путем заливки и затвердевания нанокompозитного материала, способен существенно сократить число изломов с падением на путь при движении поезда.

Современная сервогидравлическая испытательная динамическая машина, изобретенная и построенная во время выполнения диссертационной работы, обеспечивает проведение экспериментов по определению КИН крупногабаритных литых деталей с трещиной, и минимальные энергетические затраты с требуемой точностью приложения испытательной нагрузки.

Предложенная методика расчета размеров внутренних литейных дефектов методами линейной механики разрушений, позволяет рассчитывать допускаемые размеры внутренних технологических дефектов в отливках, без снижения их усталостной долговечности.

Разработанная методика прогноза пробега вагона в километрах, при наличии усталостной трещины в литой детали тележки, позволяет выполнять оценку надежности рам боковых и балок надрессорных для удовлетворения требований ГОСТ 32400-2013, в части обеспечения несущей способности детали после появления усталостной трещины, без перехода в опасное состояние до очередного планового ремонта вагона.

#### **На защиту выносятся:**

1 Единая теория о негативных изменениях механических свойств сталей, устанавливающая закономерные связи деградиационных изменений механических свойств литых сталей с ростом циклического нагружения, определяемые методами континуальной механики и механики разрушения.

2 Методика расчетов процесса негативных изменений циклической вязкости разрушения в наиболее нагруженных областях литых деталей тележек



грузовых вагонов, от начала использования до наступления предельного состояния в эксплуатации – излома по усталостной трещине.

3 Кинетическая кривая процесса вырождения циклической вязкости разрушения литых сталей класса 20Л для изготовления несущих деталей тележек грузовых вагонов, описывающая явление охрупчивания сталей от состояния поставки до предельного состояния детали, а также параметры кривой.

4 Условие эквивалентности по поврежденности стали при циклическом нагружении на разных уровнях максимальных напряжений цикла по циклической вязкости разрушения, позволяющее учесть историю нагружения детали по циклам, и зависимость ее поврежденности от числа переходов и местоположения в общем спектре нагружений.

5 Единый критерий зарождения и продвижения усталостной трещины в литой детали тележки грузового вагона, а также перехода её в предельное состояние по циклической вязкости разрушения.

#### **Реализация результатов работы.**

1. Разработанные методы и способы по увеличению живучести литых рам боковых и балок надрессорных тележек грузовых вагонов, рекомендованы главным инженером Октябрьской железной дороги для практического применения.

2. Построенная испытательная динамическая машина повышенной надежности используется с 2014 г. во ФГБОУ ВО ПГУПС при проведении испытаний по оценке сопротивления усталости и живучести литых рам боковых и балок надрессорных тележек грузовых вагонов.

3. Разработанная методика сравнительной оценки несущей способности, трещиностойкости и запаса сопротивления усталости сталей использовалась в АО «НПК «УРАЛВАГОНЗАВОД», ООО «Научно-исследовательский институт транспортного машиностроения» и ИМАШ УрО РАН для изучения механических свойств сталей инновационных грузовых вагонов производства РМ Рейл РУЗХИММАШ.

4. Изобретенные конструкции литых рам боковых и балок надрессорных повышенного ресурса успешно прошли испытания на усталость с построением кривой усталости.

5. Созданная методика прогнозирования усталостной долговечности литых рам боковых и балок надрессорных, на основе единой теории о негативных изменениях механических свойств сталей в эксплуатации, реализованы в компьютерных программах с пользовательским интерфейсом, являясь коммерческими продуктами.

6. Сформулированные многочисленные рекомендации по повышению качества литых деталей тележек, литых сталей класса 20Л, увеличению сопротивления усталости, допускаемым размерам внутренних технологических дефектов, предельным размерам усталостных трещин, снижению брака при производстве, повышению контролепригодности, внедрению внутренних вставок в литые боковые рамы для предотвращения падения на путь после излома, проектированию испытательных динамических машин реализованы АО «НПК «УРАЛВАГОНЗАВОД», ФГБОУ ВО ПГУПС, ООО УКБВ, РМ Рейл ВКМ-Сталь, РМ Рейл Рузхиммаш, АО «НВЦ «ВАГОНЫ», АО «Тихвинский вагоностроительный завод», ООО НПО «НАНОТЕК», ООО «НИИ Трансмаш», ООО «СтройАтомПроект-Т», CHUNHO CASTING CO LTD (Южная Корея) и др. в течении всего времени выполнения диссертационной работы.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации изложены и одобрены на научно – технических конференциях:

– V – VIII, X, XII, XIII международной научно – технической конференции «Подвижной состав XXI века. Идеи, требования, проекты» (Санкт – Петербург, ПГУПС, 2007 – 2013, 2015, 2017, 2019 гг.);

– международной научно – технической конференции «Прочность материалов и элементов конструкций» (Украина, г. Киев, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2010, 2011 гг.);

– VI Российской научно – технической конференции «Механика микронероводных материалов и разрушение» (г. Екатеринбург, 2010 г.);

- I международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – стратегия развития инновационной экономики» (г. Екатеринбург, УрГЭУ, 2011 г.);
- XI международной научно – практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт – Петербург, СПбПУ, 2011 г.);
- XIII международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта» (Украина, г. Днепропетровск, ДНУЖТ, 2012 г.);
- Республиканской научно – технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (Республика Узбекистан, г. Ташкент, 2013, 2019 гг.);
- международной научной конференции «Научные инновации в международном транспорте» (ITSI – 2021, г. Екатеринбург, УрГУПС);
- международной научно – практической конференции «Железнодорожный транспорт и технологии» (РТТ – 2021, г. Екатеринбург, УрГУПС);
- международной научно – практической конференции «Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление» (TLC2M – 2022, г. Екатеринбург, УрГУПС);
- 9<sup>th</sup> International conference “Railway Bogies and Running Gears” (Hungary, Budapest, 2013).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 80 печатных и электронных работах, из них 36 работ включены в РИНЦ, 6 работ входит в базу данных Scopus, 3 монографии.

Статьи опубликованы в журналах «Транспорт Урала», «Вестник Уральского государственного университета путей сообщения», «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения», «Известия Петербургского государственного университета путей сообщения», «Наука и техника транспорта», «Транспорт Российской Федерации», «Физическая мезомеханика», «Науковедение», «Тяжелое машиностроение», «Заводская лаборатория. Диагностика материалов», «РСИ – Эксперт», «Вестник ТашИИТ» (Узбекистан),

«Поиск» (Казахстан), «Engineering Research» (USA), в научно – технических сборниках УрГУПС, ПГУПС, УрГЭУ, ДВО РАН ИМиМ, Института проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины (Украина), Budapest University of Technology and Economics (Hungary).

Опубликованных работ в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных **Высшей аттестационной комиссией по специальности 05.22.07 (2.9.3), а также приравненных к ним – 23.**

Опубликованных работ в изданиях из базы данных **Scopus – 6.**

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка и четырнадцати приложений. Содержание изложено на 203 машинописных страницах, в том числе включает 20 таблиц, 82 рисунка. Библиографический список содержит 312 наименований на 34 стр. Четырнадцать приложений приведены на 64 стр.

Автор выражает глубокую признательность своему учителю, кандидату технических наук, старшему научному сотруднику ИМАШ УрО РАН Владимиру Ивановичу Миронову – за всестороннюю многолетнюю помощь и консультации при выполнении фундаментальных исследований, которые легли в основу диссертационной работы.

Автор благодарен научному консультанту, доктору технических наук, профессору Александру Васильевичу Смольянинову – за поддержку и ценные советы, сделанные в период подготовки диссертационной работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** содержит обоснование актуальности научной проблемы, показывающее ее важное социально-экономическое значение для развития страны согласно «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», формулирование цели и задач исследований, изложение основных научно-обоснованных технических и технологических решений. Отмечается, что в последние семь лет важнейшей целью обеспечения безопасности движения поездов является создание достоверных методов определения сопротивления усталости рам боковых и балок надрессорных ходовых частей,

учитывающих технологические дефекты, живучесть до первого планового ремонта вагона в условиях эксплуатационных нагрузок, и обеспечение назначенного срока службы с вероятностью 95%.

**В первой главе** приведен обзор и анализ исследований в области сопротивления усталости литых несущих деталей двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов и конструкций в других отраслях, литых сталей. Выполнен анализ методов проектирования, расчета сопротивления усталости и надежности, ресурсных испытаний, изготовления, эксплуатации балок надрессорных и рам боковых литых конструкций, приведенных в отечественных и зарубежных нормативных документах. Сделано сравнение с методами решения проблемы сопротивления усталости стальных несущих конструкций в других отраслях.

Основы современных методов изучения сопротивления усталости, надежности и трещиностойкости ходовых частей железнодорожного подвижного состава изложены в работах отечественных ученых: Д.Я. Антипина, Н.С. Бачурина, В.Б. Беловодского, В.В. Болотина, А.П. Буйносова, А.В. Великанова, С.В. Вершинского, В.А. Двухглавова, В.П. Ефимова, О.Б. Камаева, Т.Е. Коньковой, А.М. Краснобаева, В.В. Кобищанова, И.А. Лагерева, Н.А. Махутова, В.И. Миронова, Э.С. Оганьяна, А.М. Орловой, А.Э. Павлюкова, В.С. Плоткина, С.И. Попова, В.А. Пранова, В.А. Рейхарта, А.Н. Савоськина, С.Л. Самошкина, А.В. Смольянинова, П.А. Устича, В.Н. Цюренко, Л.А. Шадура, Л.М. Школьника, и других ученых; а также зарубежных ученых: Е.П. Блохина, А. Веллера, И.Ф. Пастухова, и других ученых. В работах подчеркивается отрицательное влияние внутренних литейных дефектов в наиболее нагруженных сечениях на усталостную прочность рам боковых и балок надрессорных, описываются особенности технологий получения литых деталей, пути минимизации дефектов литья и приемы по снижению вероятности их появления, устанавливаются предельные размеры технологических дефектов после изготовления, эксплуатационных трещин, уточняется нагруженность несущих деталей тележек грузовых вагонов и обосновывается необходимость реализации эксплуатационного спектра в лабораторных испытаниях натуральных деталей. Приводятся способы и результаты теоретических расчетов

пробега грузовых вагонов, ограничением которого является ресурс рамы боковой тележки. Прогнозы сопротивления усталости строятся на основе модели поврежденности Пальмгрена-Майнера, что накладывает существенные погрешности, в сравнении с реальными пробегами тележек грузовых вагонов, даже с использованием поправочных эмпирических коэффициентов. Живучесть балок надрессорных и рам боковых оценивается на основе методов линейной механики разрушения по Гриффитсу, по критериям коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), либо в натурных испытаниях.

Большой вклад в изучение механических свойств литых сталей для изготовления несущих деталей тележек подвижного состава внесли исследования: В.Н. Змеевой, С.Г. Лебединского, Д.Л. Мерсона, Г.В. Москвитина, А.Н. Полякова, Т.П. Севериновой, А.В. Сухова, В.А. Татаринцева, и других ученых. В работах изучены характеристики трещиностойкости литых сталей 20Л, 20ГЛ, 20ГТЛ, 20ГФЛ, 20ФТЛ, 25Л, методами механики разрушения, на образцах вырезанных из натуральных балок надрессорных тележек грузовых вагонов в состоянии поставки, после 13 и 25 лет эксплуатации при нерегулярном внецентренном растяжении в лабораторных условиях. Приведены значения пределов текучести и временного сопротивления сталей 20Л и 20ГФЛ после 13 и 25 лет службы балок надрессорных и рам боковых тележек грузовых вагонов. Выявлено охрупчивание литых сталей, выражающееся в понижении пластических свойств в сравнении со сталями в состоянии поставки. Установлено, что по результатам испытаний образцов из шести марок литых сталей для изготовления рам боковых и балок надрессорных имеют сильный разброс количества циклов нагружений в зависимости от длины трещины. Однако, сохраняется общая тенденция изменения скорости роста трещины от коэффициентов интенсивности напряжений для всех шести марок сталей, на основе которой устанавливается единая кинетическая диаграмма усталостного разрушения литых сталей марки 20Л. В работах Г.В. Москвитина, С.Г. Лебединского изучена особенность торможения скорости роста усталостной трещины в образцах из литой стали 20ГФЛ в виду редких

перегрузок, имеющих в эксплуатационном спектре нагружения литой детали тележки грузового вагона, на основе концепции эффективного КИН.

Фундаментальные основы процессов деформирования и разрушения микронеоднородных материалов, которые применил к литым сталям деталей тележек грузовых вагонов и развил в работе автор, изучались в Уральской научной школе механиков под руководством профессора С.Д. Волкова, и его последователями Д.С. Волковым, В.В. Стружановым, В.И. Мироновым, и другими. Процессы циклической деградации механических свойств конструкционных материалов, которые расширил и дополнил в работе автор, изучались в научных трудах В.И. Миронова.

Существенный вклад в науку о сопротивлении усталости конструкционных однородных материалов и несущих элементов конструкций внесли ученые: Р.Д. Вагапов, В.П. Голуб, А.П. Гусенков, С.В. Жижерин, М.А. Журавков, В.С. Иванова, Л.М. Качанов, Г.Г. Кашеварова, В.П. Когаев, А.А. Лебедев, Н.А. Махутов, В.И. Миронов, Ю.Н. Работнов, А.В. Романов, С.В. Серенсен, Л.А. Сосновский, В.Ф. Терентьев, В.Т. Трощенко, Я.Б. Фридман, А.С. Шестериков, С.С. Щербаков, а также зарубежные ученые Дж.Ф. Белл, В. Бэкофен, Дж. Леметр, Ст. Камминг, Д. Томпсон. В работах изучена природа усталости металлов, конструкционных сталей, сварных конструкций, физические основы, описаны методы механики разрушения на структурном уровне, закономерности изменения механических свойств сталей после циклического нагружения, приводятся общие критерии прочности для использования в расчетах элементов конструкций.

Значимый вклад в улучшение несущих литых деталей тележек грузовых вагонов, развитие методов прогнозирования сопротивления усталости, совершенствование методик испытаний и нормативной базы вносят теоретические и экспериментальные работы, координируемые НП ОПЖТ и Союзом «Объединение вагоностроителей», в УКБВ, НВЦ «Вагоны», ПГУПС, НО «ТИВ», ВНИИЖТ, ВНИКТИ, ИМАШ РАН, НИИ Вагоностроения, ВНИЦТТ, УрГУПС, УО ВНИИЖТ, РУТ (МИИТ), БГТУ, ДНУЖТ, РГУПС, РМ Рейл, а также в авторитетных зарубежных компаниях Amsted Rail (USA, Chicago), Standart Car Truck

Company (United Kingdom). Немаловажную роль в повышении качества литых деталей тележек играют: ФСА Росаккредитация, профильные подразделения и департаменты ОАО «РЖД». Результатами совместных усилий перечисленных структур явилось распространение дорогостоящих зарубежных методов ресурсных испытаний рам боковых и балок наддресорных при вертикальных, продольных и поперечных нагрузках, определенных в поездных испытаниях грузовых вагонов на территорию шести стран СНГ, в т.ч. РФ, в виде серии межгосударственных стандартов. Повысились требования к обеспечению гамма-процентного ресурса с вероятности 90% до 95%, введено подтверждение надежности работы конструкции (живучести) рам боковых и балок наддресорных на стадии «появление опасного отказа (появление усталостной трещины) – переход в опасное состояние (излом)» до очередного планового ремонта вагона.

Обобщенный вывод по результатам анализа работ заключается в том, что использование новых производственных технологий, усиленных конструкций, современных расчетных компьютерных программ, технически сложных и материально затратных экспериментальных методов определения сопротивления усталости литых рам боковых и балок наддресорных не приводит к снижению их опасных отказов и предельных состояний во время движения поезда, и не гарантирует безопасность эксплуатации подвижного состава.

Методологический аппарат прогнозирования сопротивления усталости основан на моделях поврежденности Пальмгрена-Майнера и линейной механики разрушений по Гриффитсу, что не позволяет качественно определять ресурс с учетом места положения циклов напряжений в эксплуатационном спектре, истории нагружения детали на протяжении всего срока службы, включая стадию опасного состояния. Поэтому, для достижения цели диссертационной работы поставлены задачи, перечисленные во введении.

Решение комплекса поставленных задач и формулирование единой теории о вырождении механических свойств при определении усталостной долговечности литых деталей тележек направлено на повышение безопасности функционирования железнодорожного транспорта, что является одним из ключевых



направлений для социально-экономического развития страны согласно «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года».

Поэтому, необходимо продолжить научные исследования по изучению воздействия негативных изменений механических свойств литых сталей на усталостную долговечность несущих деталей тележек грузовых вагонов, чтобы раскрыть резервы конструкций и установить управление ими.

**Вторая глава** посвящена математическому моделированию процесса циклической деградации механических свойств литых сталей для производства рам боковых и балок надрессорных тележек грузовых вагонов, методами континуальной механики деформирования. Литая сталь представляется моделью материала с различными структурными составляющими, который можно изучать методами механики деформируемого твердого тела при квазистатическом растяжении.

Основы деформирования и разрушения микронеоднородных материалов, которые получили применение и развитие в диссертационной работе, заложены создателем известной Уральской научной школы профессором Сергеем Дмитриевичем Волковым.

Изучение поведения литых сталей с феррито – перлитной мелкозернистой микроструктурой после нормализации, позволяет качественно определять изменение механических свойств после воздействия циклической нагрузки. Зависимость статических механических свойств литой стали от количества циклов нагружения изучается на простых дифференцированных моделях, представляющих образец, поперечное сечение которого состоит из плотно упакованных волокон бесконечно малых размеров (см. рис.2а). При этом волокна соприкасаются, но не создают упругих и пластических деформаций на поверхностях, имеют продольные размеры модельного образца, могут обладать упруго хрупкими, упругопластическими или упруго разупрочняющимися свойствами при одноосном растяжении (см. рис.3). Такое представление модельного материала

близко к реальной микроструктуре литой стали после нормализации, состоящей из феррита и перлита с разной микротвёрдостью (см. рис.2б, в).

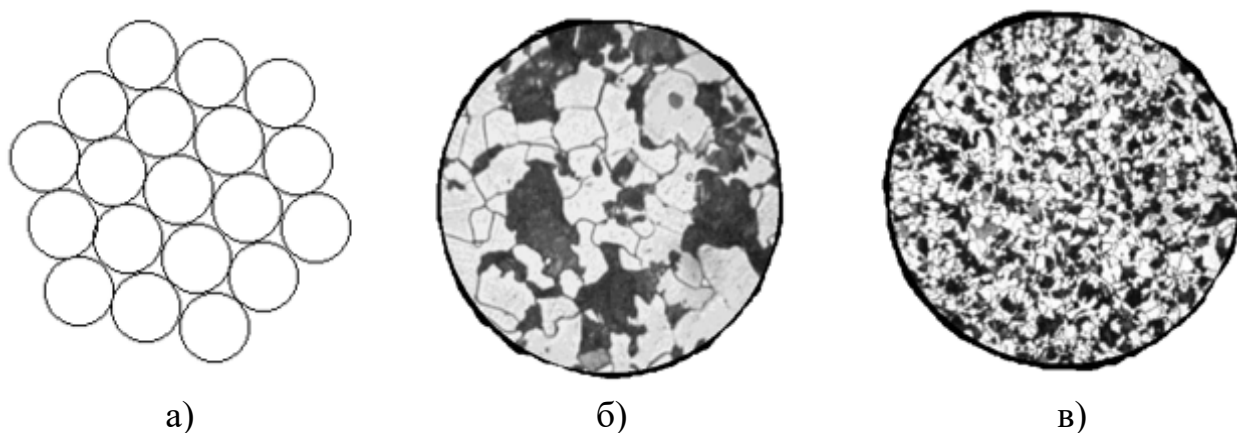


Рис.2. Микроструктура: а) фрагмента поперечного сечения модельного образца из плотно упакованных продольных волокон; б) феррито-перлитная литой стали марки 20ГЛ, мелкозернистая, с равномерным распределением, с кратностью увеличения 500; в) феррито-перлитная литой стали марки 20ГЛ, мелкозернистая, с равномерным распределением, с кратностью увеличения 100

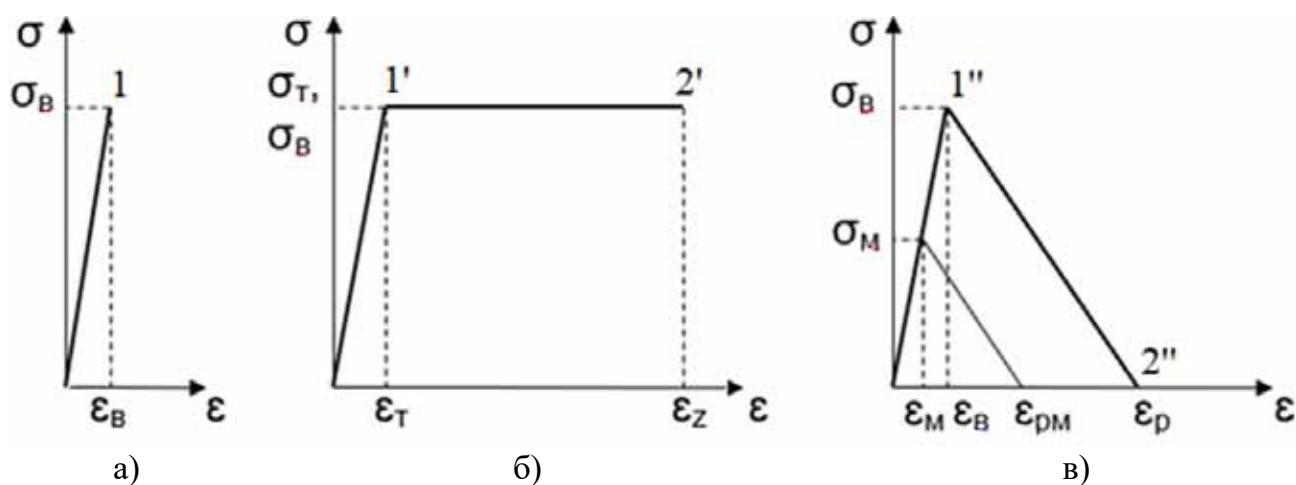


Рис.3. Условные диаграммы одноосного растяжения отдельного волокна модельного образца, имеющего свойства: а) упруго хрупкие; б) упругопластические; в) упруго разупрочняющиеся

Аналитические зависимости модельного образца из  $m$  волокон:

$$- \text{упруго хрупких (см. рис.3а): } \begin{cases} \sigma_k = E\varepsilon, & 0 < \varepsilon < \varepsilon_{Bk}, \\ 0, & \varepsilon \geq \varepsilon_{Bk}, \end{cases} \quad (1)$$

$$- \text{упругопластических (см. рис.3б): } \begin{cases} \sigma_k = E\varepsilon, & 0 < \varepsilon < \varepsilon_{Tk}, \\ \sigma_k = \sigma_{Tk}, & \varepsilon_{Tk} < \varepsilon < \varepsilon_{zk}, \\ 0, & \varepsilon \geq \varepsilon_{zk}, \end{cases} \quad (2)$$

– упруго разупрочняющихся (см. рис.3в):

$$\begin{cases} \sigma_k = E\varepsilon, & 0 < \varepsilon < \varepsilon_{Bk}, \\ \sigma_k = \sigma_{Bk} - D(\varepsilon - \varepsilon_{Bk}), & \varepsilon_{Bk} < \varepsilon < \varepsilon_{pk}, \\ 0, & \varepsilon \geq \varepsilon_{pk}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{– условие равновесия: } \sigma = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sigma_k, \quad (4)$$

$$\text{– условие совместности деформаций: } \varepsilon_k = \varepsilon, \quad (5)$$

где  $\sigma_k$  – текущее напряжение в  $k$  – ом волокне,  $E$  – модуль упругости стали,  $D$  – модуль спада падающей ветви диаграммы,  $\varepsilon$  – текущая деформация,  $\varepsilon_{Tk}$  – деформация предела текучести  $k$  – го волокна,  $\varepsilon_{Bk}$  – деформация перехода на падающую ветвь  $k$  – го волокна,  $\varepsilon_{pk}$  – деформация разрушения  $k$  – го волокна,  $\varepsilon_{zk}$  – деформация разрушения  $k$  – го волокна,  $\sigma_{Tk}$  – предел текучести  $k$  – го волокна,  $\sigma_{Bk}$  – предел прочности  $k$  – го волокна.

Важной особенностью модельного образца является сохранение взаимодействия соседних волокон во время их разрушения при растяжении. В результате разрушения одного волокна, образовавшиеся его части упруго разгружаются, увеличиваясь в диаметре, и раздвигают соседние элементы в модели образуя пору, с перераспределением нагрузки на оставшиеся волокна модели. Так происходит и дальше, вплоть до разрушения последней группы волокон модельного образца. Структурная неоднородность модельного образца с упруго разупрочняющимися волокнами, присущая реальным литым сталям после нормализации, определяется законом нормального распределения деформаций неравномерного перехода волокон на падающую ветвь и деформаций разрушения, распределенных в интервалах  $\{\varepsilon_{B\alpha}; \varepsilon_{B\beta}\}$  и  $\{\varepsilon_{p\alpha}; \varepsilon_{p\beta}\}$  соответственно (см. рис.3в). Условия моделирования неоднородности микроструктуры конструкционных материалов для изготовления элементов конструкций, статистическими законами распределения деформаций в переходных точках диаграммы, при растяжении волокон модели образца, подтвердились в экспериментах В.И. Мирнова с соавторами.

Поведение литой стали изучается на модельном образце при его кинематическом активном растяжении с постепенной разгрузкой, начиная со стадии разрушения первых волокон вплоть до разделения образца на две половины, и определением мгновенных модулей упругости  $\bar{E}_p(\varepsilon)$  и коэффициентов поперечной деформации (КПД)  $\bar{\nu}_p(\varepsilon)$  после приращения деформации. Модули упругости и КПД на восходящей и падающей ветвях (см. рис.3в), определенные после разгрузки одного волокна, с упруго разупрочняющимися свойствами, находятся по формулам:

$$E_u(\varepsilon) = \frac{E\varepsilon_B - D(\varepsilon - \varepsilon_B)}{\varepsilon}, \quad (6)$$

$$\nu_u(\varepsilon) = \nu \frac{E\varepsilon_B - D(\varepsilon - \varepsilon_B)}{E\varepsilon}. \quad (7)$$

В дополненных математических моделях, относительно моделей предложенных В.И. Мироновым, сопротивление усталости отдельных волокон модельного образца при пульсирующем стационарном цикле воздействия растягивающей нагрузкой полагается случайной величиной, распределенной по нормальному закону в интервале  $\{N_{k\alpha}; N_{k\beta}\}$ .

Деградация деформации разрушения с ростом количества циклов нагружений  $n$  находится функцией:

$$\varepsilon_{pk}(\varepsilon_M, n) = \varepsilon_{pk}^0 - k_\varepsilon n^{\alpha(\varepsilon_M)}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_M$  – максимальная деформация стационарного пульсирующего цикла нагружения  $k$  – го волокна (см. рис.3в);  $k_\varepsilon$  – коэффициент, определяемый из критерия усталостного разрушения волокна:

$$\varepsilon_{pk}(\varepsilon_M, N_k) = \varepsilon_{pM}, \quad (9)$$

где  $N_k$  – число циклов, при котором разрушилось  $k$  – ое волокно.

Подставляя функцию (8) с учетом (9) в модели (1) – (7) устанавливается их параметризация по числу циклов нагружений. На рисунке 4 приведены результирующие полные диаграммы растяжения (ПДР) продольной нагрузкой модельного образца, и ее параметры с ниспадающей вплоть до нуля ветвью, построенные с помощью специально разработанного программного кода на языке Visual

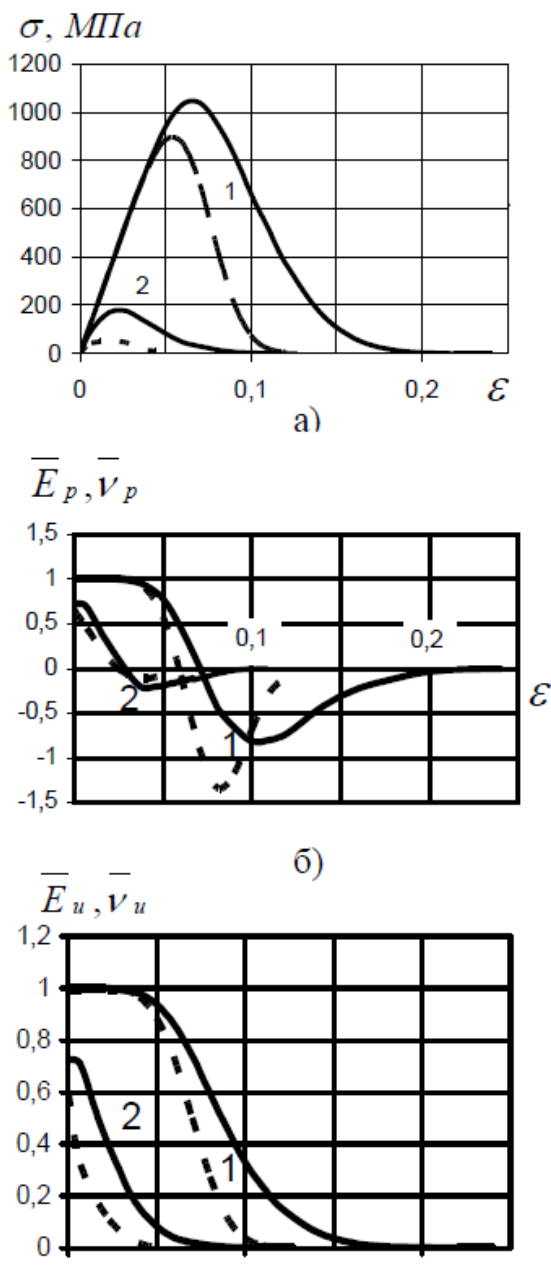


Рис.4. Дegrаdация ПДР, мгновенных модулей и модулей при разгрузке модельного образца из упруго хрупких (штриховые линии) и упруго разупрочняющихся волокон при  $D = E$ :  
 1 – в состоянии поставки стали;  
 2 – после  $n = 135\ 000$  циклов нагружений

Basic for Application в приложении Microsoft Access для модельного образца литой стали из структурных волокон по зависимостям (1) и (3).

ПДР на рисунке 4а для модельного образца из упруго хрупких (кривая 1, штриховая линия) и упруго разупрочняющихся (кривая 1, сплошная линия) волокон показывают наличие существенного запаса по прочности и деформации при наличии падающей ветви диаграммы у отдельных волокон.

Применительно к реальным технологиям проведения термической обработки литых рам боковых и балок надрессорных тележек грузовых вагонов можно отметить, что недогрев или перегрев деталей в печи во время нормализации приводит к появлению зон с пониженной склонностью к пластичности стали, что моделируется на модельном образце из упруго хрупких волокон.

Виртуальное стационарное циклическое нагружение модельного образца одноосной растягивающей пульсирующей нагрузкой, выраженное в подстановке числа циклов  $n$  в функцию (8), приводит к деградации всех параметров ПДР (см. рис.4), например рассчитываемых по формулам (1), (3), (6), (7).

Вырождения исследуемых мгновенных модулей упругости  $\bar{E}_p(\varepsilon)$ , коэффициента поперечной деформации  $\bar{\nu}_p(\varepsilon)$  при активном нагружении (см. рис.4б), модулей при разгрузке  $\bar{E}_u(\varepsilon), \bar{\nu}_u(\varepsilon)$  (см. рис.4в) модельного образца, построенные в относительных координатах в зависимости от  $n$ , происходят наряду с деградацией диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  (см. рис.4а). В экспериментах В.И. Миронова на мини образцах из чугуна доказано наличие отрицательных значений у мгновенных (касательных) модулей упругости и КПД во время активного нагружения, что и наблюдается в модельном образце (см. рис.4б). Вырождение параметров ПДР модельного образца из упругопластических волокон приведено на схожих диаграммах в диссертации. Явление охрупчивания стали 20 после длительной эксплуатации литых деталей тележек грузовых вагонов также описывается в трудах Т.П. Севериновой методами линейной механики разрушений.

Моделирование стадии деформационного разупрочнения на модели образца позволяет установить новые деформационные эффекты, которые заключаются в неминуемом вырождении прочностных, упругих и пластических свойств литой стали. Поэтому, для получения математических моделей реальных литых сталей необходимо проводить эксперименты с записью ПДР в зависимости от числа циклов нагружений. Полученные закономерности необходимо сопоставлять с результатами изучения кинетики разрушения литых сталей, полученными учеными Т.П. Севериновой, В.Н. Змеевой, С.Г. Лебединским и др., основанными на методах линейной механики разрушения и заложенными в нормативные документы по грузовым вагонам, в том числе при рассмотрении технологических дефектов литейного происхождения.

Таким образом, результаты моделирования методами линейной механики деформированного твердого тела, приведенные во второй главе диссертации, устанавливают необходимость продолжения изучения взаимосвязи статических и циклических свойств литых сталей с технологическими дефектами методами механики разрушений.

**В третьей главе** на нестандартном образце моделируется технологический дефект, залегающий внутри стенки натурной литой детали и послуживший

причиной ее излома в эксплуатации, для определения порогового  $K_{th}$  коэффициента интенсивности напряжений (КИН) методами механики разрушений.

В известных трудах Т.П. Севериновой, на которые опирался автор в настоящей работе, изучение характеристик трещиностойкости и охрупчивания механических свойств литых сталей выполняется на стандартных образцах с краевой трещиной при внецентренном растяжении. По результатам ее работ установлены критические размеры эксплуатационных трещин на поверхности балок надрессорных и рам боковых тележек грузовых вагонов, а также предельные размеры внутренних литейных дефектов, от которых не будет развиваться усталостная трещина на протяжении всего срока службы детали. Стоит предположить, что заключения Т.П. Севериновой по результатам испытаний образцов с краевой трещиной при внецентренном растяжении справедливы для поверхностных дефектов в виде эксплуатационных трещин, а для внутренних дефектов литейного происхождения мало применимы.

Решение задачи о прочности металла с несплошностью на удалении от поверхности корректнее обобщить на задачу для пластины, ослабленной отверстием, как например, в плоской задаче теории упругости. В частном случае,

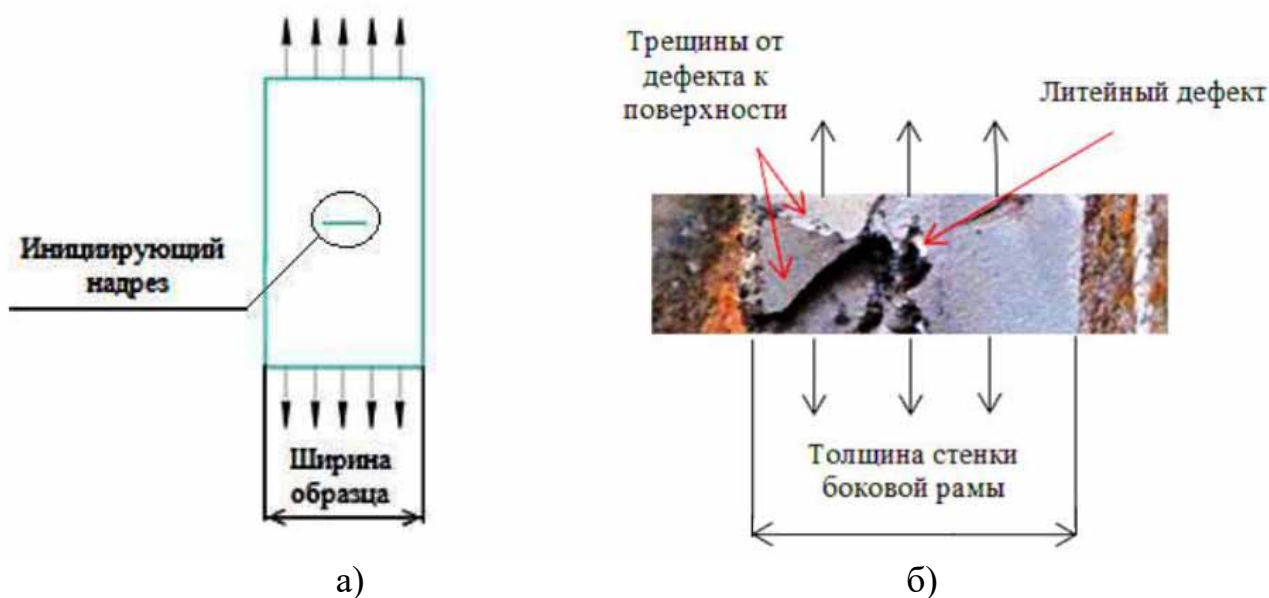


Рис.5. Схемы нагружения образца с центральным трещиноподобным надрезом (а) и стенки рамы боковой с внутренним технологическим дефектом (б)

отверстие в пластине заменяется технологическим дефектом с остроугольными краями (песочные засоры, усадочные раковины, рыхлоты, и т.п. – характерные для натуральных литых деталей). Задача решается на специально разработанном прямоугольном образце с центральным надрезом, инициирующим трещину, при осевом растяжении (см. рис.5).

Такой подход, в отличие от Т.П. Севериновой, ближе к реальным граничным условиям, создаваемым вокруг внутреннего технологического дефекта в углу буксового проема боковой рамы при изгибе.

Ширина образца подобрана по результатам измерений толщин стенок отливок в 66 изломах после натуральных испытаний и эксплуатации, соответствует усредненной толщине стенки 18 мм литой рамы боковой в месте излома. Определение размера инициирующего надреза выполнялось из условия подобия по площади 10 мм<sup>2</sup> описанного прямоугольника наиболее часто встречающимся технологическим дефектам минимальных размеров в 66 изломах рам боковых, которые послужили причиной отказа вагона как единицы подвижного состава.

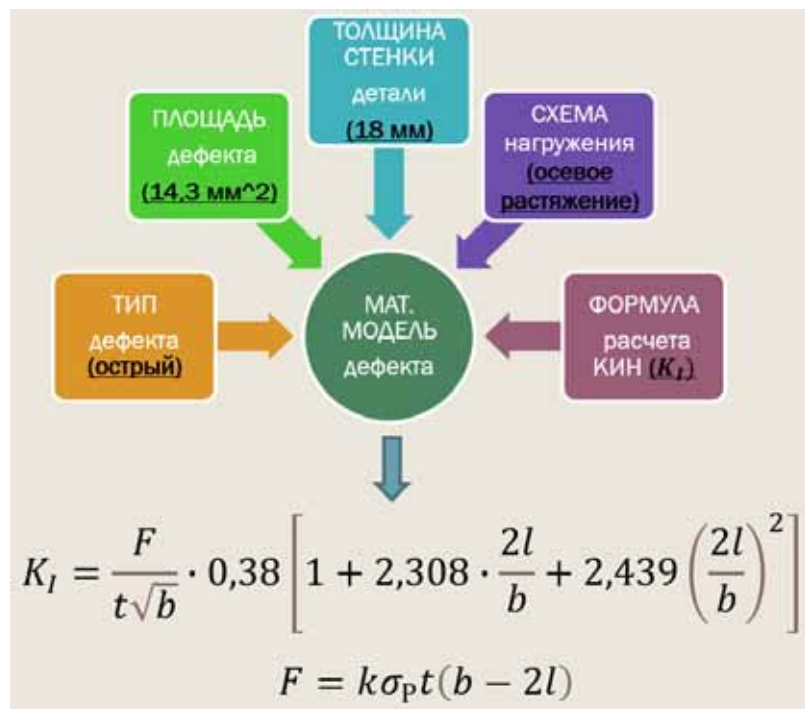


Рис.6. Структурная схема математической модели внутреннего технологического дефекта в стенке литой детали тележки вагона

Габаритные пропорции ширины и длины образца, а также его толщины – 2 мм, установлены по рекомендациям ГОСТ 25.506 – 85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов».

Предложенная модель дефекта в лабораторном образце (см. рис.6) позволит устанавливать взаимосвязь статических и циклических свойств стали при проведении экспериментов



на усталость, изучать интенсивность циклического охрупчивания стали методами линейной механики разрушения, назначать допустимые размеры технологических дефектов в натуральных деталях.

**В четвертой главе** выполняется математическое моделирование стадии устойчивого развития усталостной трещины выходящей на поверхность натурной рамы боковой тележки грузового вагона, с учетом циклического вырождения механических свойств стали, методами механики разрушения. Изучение данной стадии позволит в дальнейшем прогнозировать живучесть литой детали, или длительность перехода детали с развивающейся усталостной трещиной в опасное состояние – излом, выраженную в километрах пробега вагона.

Наряду с пороговым значением коэффициента  $K_{th}$ , определенным на образце из третьей главы, превышение значения которого приводит к устойчивому развитию трещины, добавляется коэффициент циклической вязкости разрушения  $K_{fc}$  – ограничивающий этот процесс. Количество циклов нагружений несущей детали тележки, необходимое для преодоления трещиной пути от  $K_{th}$  до  $K_{fc}$ , будет являться ее живучестью, приведенной к километрам пробега грузового вагона.

В экспериментальных работах Т.П. Севериновой, А.Г. Козлова выявлено вырождение не только порогового КИН  $K_{th}$ , но и  $K_{fc}$  после 13 и 25 лет использования литых балок надрессорных под грузовым вагоном. Так, соответствующие значения эффективных коэффициентов  $K_{fc}^3 = 155 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  в состоянии поставки для стали 20ГФЛ,  $K_{fc}^3_{13 \text{ лет}} = 78 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  для стали 20Л и  $K_{fc}^3_{25 \text{ лет}} = 57 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  для стали 20ГФЛ (см. рис.7) – использованы автором в качестве критериев при определении предельной длины усталостной трещины, вышедшей на поверхность отливки. Критерии отражают процесс охрупчивания механических свойств литых сталей группы 20Л с увеличением срока эксплуатации несущих деталей тележек, который является основой настоящей работы.

Изучение напряженного состояния в окрестностях кончика растущей усталостной трещины, выходящей на поверхность, например от залегающего на

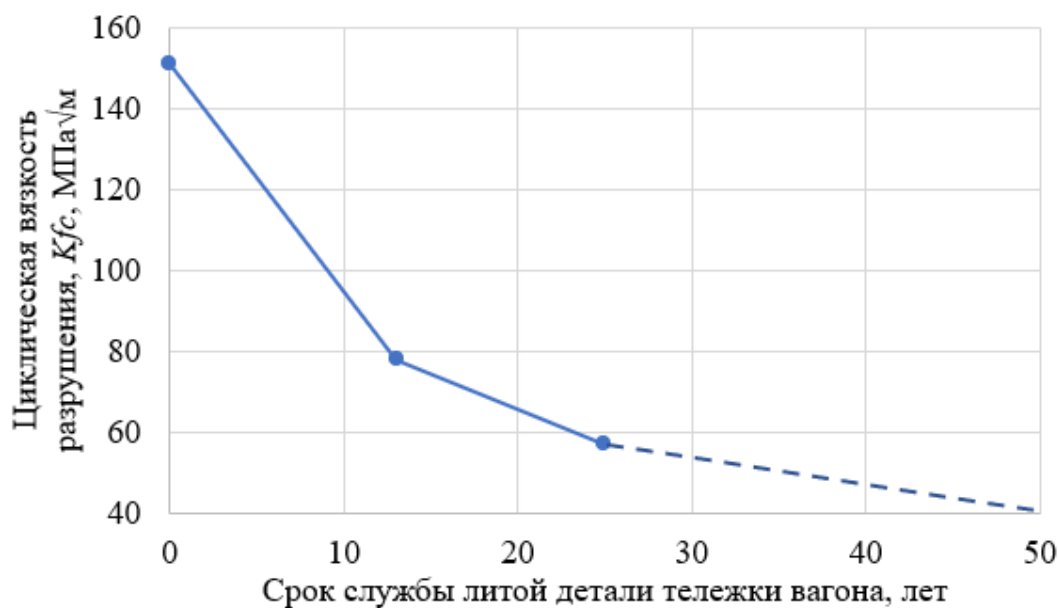


Рис.7. Усредненная кривая деградации циклической вязкости разрушения  $K_{fc}$  литых сталей типа 20Л (сплошная линия) и прогноз изменения в течение срока службы рамы боковой и балки надрессорной тележки (пунктирная линия)

глубине дефекта литейного происхождения, осуществляется численным методом конечных элементов (МКЭ). В поперечное сечение 3D модели рамы боковой с максимальными нормальными напряжениями по Мизесу от воздействия эксплуатационных нагрузок вводится дефект, выходящий на поверхность, соотношения геометрических размеров которого получены после анализа 62 изломов рам боковых за 9 лет эксплуатации. Начальные размеры полу эллипса наружного дефекта:  $l_0 = 10$  мм по поверхности детали,  $a_0 = 3,5$  мм в глубину, площадь  $78,5$  мм<sup>2</sup>, что значительно выше минимальных размеров внутреннего технологического дефекта, установленного в третьей главе. Заданная длина дефекта  $l_0$  соответствует требованиям действующих эксплуатационных документов – критерием отказа балки надрессорной или рамы боковой считается наличие видимой поверхностной трещины длиной 10 – 50 мм. Определение КИН  $K_I$  при отрыве на границах трещины первоначальной длины выполняется в программе ANSYS.

Соблюдение критерия:

$$K_I \geq K_{fc}^3, \quad (10)$$

позволяет увеличивать длину трещины до  $l_i = l_0 + \Delta l_i$ , где  $i$  – номер шага. Если условие (10) не выполняется, то фиксируется предельная длина усталостной трещины. В качестве  $K_{fc}^{\exists}$  критерия (10) могут использоваться значения после 13 или 25 лет эксплуатации отливок, приведенные выше.

Результаты численных экспериментов, полученные с Д.В. Расщепкиной на 3D моделях литых рам боковых из стали 20ГЛ различных конструкций, по вычислениям предельных длин усталостных трещин развивающихся во внутренних углах буксовых проемов, показаны на рисунке 8.

Из рисунка 8 видно, что с увеличением срока эксплуатации боковой рамы под вагоном длина предельной усталостной трещины снижается, после достижения которой произойдет хрупкий долом конструкции за относительно малый по циклам нагружений промежуток времени. Выявленная зависимость чувствительна к вырождению механических свойств стали с увеличением числа циклов нагружений или километров пробега вагона.

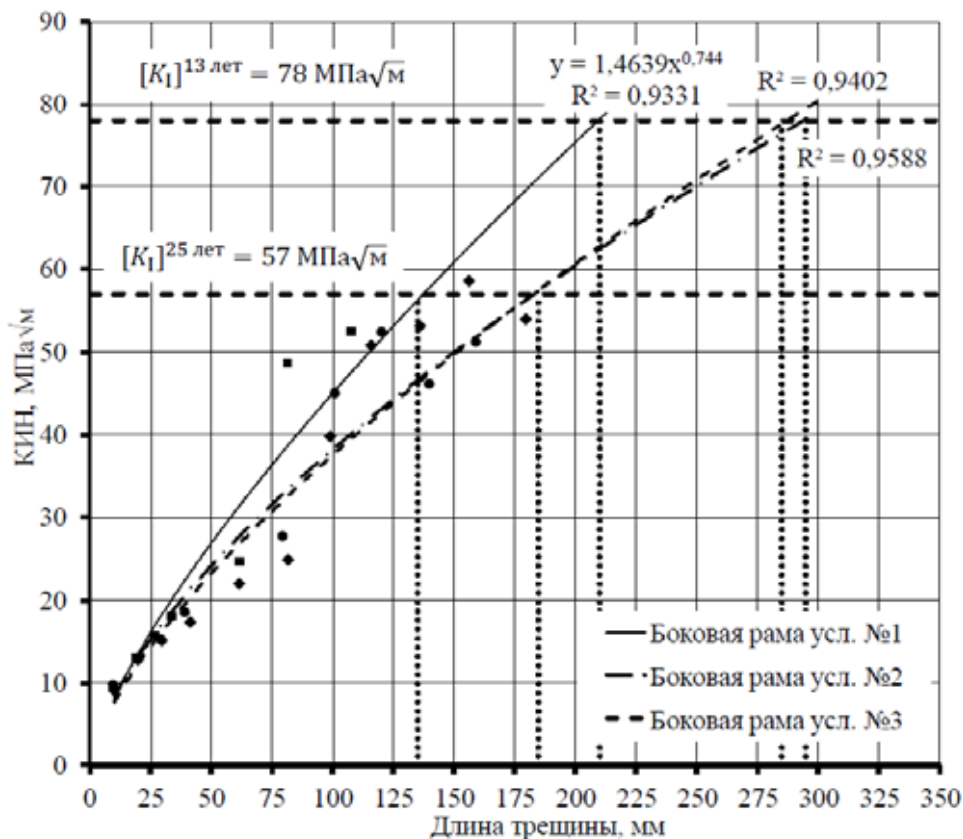


Рис.8. Зависимость КИН  $K_I$  от длины усталостной трещины  $l_i$  во внутреннем углу буксового проема различных рам боковых тележек вагонов

Учитывая полученные расчетные результаты, математическая модель развития усталостной трещины в литой детали тележки грузового вагона имеет вид, приведенный на рисунке 9.



Рис.9. Математическая модель развития усталостной трещины в литой детали тележки грузового вагона

Расчетные длины усталостных трещин (см. рис.8) позволяют сравнивать различные конструкции литых деталей тележек на стадии проектирования и делать прогнозы по живучести.

**В пятой главе** верифицируются разработанные математические модели: процесса циклической деградации свойств стали на микроструктурном уровне, страгивания усталостной трещины от залегающего на глубине технологического дефекта, распространения поверхностной усталостной трещины в стенке литой детали.

Взаимосвязь статических и циклических свойств на сталях марок 20ГЛ, 20ГЛА, 20ФЛ проверялась на специально изобретенном, изготовленном и внедренном комплексе испытательного оборудования, состоящим из: динамической испытательной машины повышенной жесткости с кинематическим одноосным возбуждением, оригинального устройства для испытаний мини образцов на растяжение с кольцом повышенного сопротивления и датчиком силы, датчика

перемещений вилочного типа, нагружающего гидропресса, системы регистрации и визуализации сигналов с датчиков. На способ и устройство для испытаний мини образцов с кольцом повышенного сопротивления получен патент на изобретение. Комплекс позволяет проводить циклическую тренировку специальных мини образцов, на которых в последствии строится полная диаграмма растяжения (ПДР) с ниспадающей вплоть до нуля ветвью.

На рисунке 10 приводятся ПДР, построенные на изобретенном комплексе испытательного оборудования, осредненные по десяти мини образцам из литых сталей для изготовления несущих деталей тележек вагонов марок 20ГЛ, 20ГЛА, 20ФЛ.

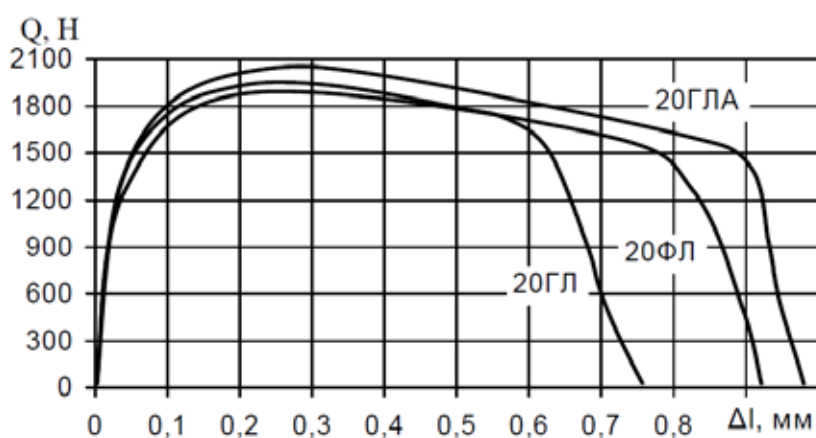


Рис.10. Полные диаграммы растяжения мини образцов из литых сталей

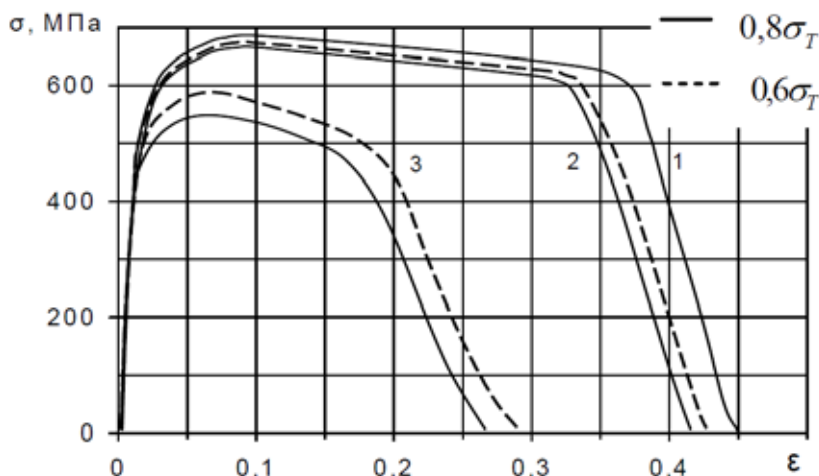


Рис.11. Вырождение полной диаграммы растяжения мини образцов из литой стали 20ФЛ:

1 – в состоянии поставки; 2 – после наработки  $n / N = 0,3$ ; 3 – после наработки  $n / N = 0,6$

20ФЛ.

Из ранних работ В.И. Миронова следует, что меньшая длина ПДР соответствует пониженной пластичности стали, а увеличение угла наклона падающей ветви показывает склонность стали к хрупкому разрушению или пониженную трещиностойкость. Поэтому, согласно рисунку 10 предполагается, что литая деталь тележки грузового вагона, отлитая из стали 20ГЛА, будет иметь наибольшую долговечность по циклам, но низкую трещиностойкость. Сравнительные натурные испытания на усталость

рам боковых и балок надрессорных из сталей 20ГЛ и 20ГЛА на динамической испытательной машине подтвердили прогноз по долговечности и живучести, сделанный по ПДР на мини образцах.

На рисунке 11 показано вырождение ПДР для стали 20ФЛ, или переход изначально пластичной стали в хрупкое состояние с ростом количества циклов нагружений мини образцов. В диссертации приводятся вырожденные ПДР для стали 20ГЛ.

Верифицированные математические модели процесса циклической деградации свойств литых сталей группы 20Л на микроструктурном уровне определены выражениями деформационного:

$$\varepsilon_p(\sigma_{M1}, n) = 0,3884 - 0,3832 \left( \frac{n}{72800} \right)^{1,4}; \quad (11)$$

$$\varepsilon_p(\sigma_{M2}, n) = 0,3884 - 0,3815 \left( \frac{n}{45200} \right)^{1,9}; \quad (12)$$

и силового типов:

$$S(\sigma_{M1}, n) = 610 - 350 \left( \frac{n}{72800} \right)^{1,9}, \quad (13)$$

$$S(\sigma_{M2}, n) = 610 - 265 \left( \frac{n}{46200} \right)^{1,9}, \quad (14)$$

где  $\sigma_{M1}$  и  $\sigma_{M2}$  – максимальные уровни напряжений циклов нагружений,  $n$  – число циклов нагружений.

Сопротивление усталости для одного перехода напряжений цикла с уровня  $\sigma_{M1}$  на  $\sigma_{M2}$  определится формулой, подтвержденной экспериментальными результатами:

$$N_* = n_1 + N_2 \left[ 1 - \frac{n_1}{N_1} \left( \frac{S_0 - \sigma_{M1}}{S_0 - \sigma_{M2}} \right)^{\frac{1}{m}} \right], \quad (15)$$

где  $S_0$  – предел прочности стали,  $m$  – показатель степени.

Результаты опытов с мини образцами из литых сталей группы 20Л, приведенные в диссертации, устанавливают взаимосвязь статических и циклических свойств, охрупчивание пластичной стали в состоянии поставки с увеличением количества нагружений в циклических испытаниях.

Верификация модели с залегающим на глубине технологическим дефектом выполнялась с Я.О. Рузметовым на натуральных образцах из стали 20ГФЛ при центральном растяжении, размеры которых определены в третьей главе, вырезанных из вертикальных стенок балки надрессорной тележки грузового вагона в состоянии поставки. Эксперименты потребовали модернизировать машину универсальную для испытаний на усталость УРС – 20 / 6000 путем замены программного обеспечения и системы обратной связи, изготовить специальные самоустанавливающиеся захваты для образцов.

Перед статическими испытаниями образцов проводилось их циклическое нагружение максимальным усилием цикла 1472 Н, коэффициентом асимметрии 0,1, с целью создания исходной усталостной трещины от иницирующего пропилa. Длина трещины с обоих кончиков не превышала 0,8 мм. Площадь описанного прямоугольника у иницирующего надреза с пророщенной усталостной трещиной составила 16,16 мм<sup>2</sup>.

После нанесения усталостной трещины каждый образец обклеивался тензорезисторами с базой измерений 1 мм на удалении 1 мм от кончиков трещины, подключенными к тензометрической станции МПС-036, для регистрации продольных относительно оси приложения силы деформаций. Отступ в  $r = 1$  мм обусловлен условием получения сходимости результатов опытов и зависимостей линейной механики, исключения пластической зоны.

В статических испытаниях выполнялось растяжение образцов с управлением по напряжениям  $\sigma_y$  в месте наклейки тензорезисторов: 100 МПа, 200 МПа и 235 МПа. Установленные уровни напряжений  $\sigma_y$  вблизи кончика нанесенной усталостной трещины соответствуют напряженному состоянию в бездефектных зонах наклонного пояса, углов буксового и рессорного проемов рамы боковой тележки базовой модели от действия вертикальной силы в сокращенных испытаниях на усталость.

Эффективные КИН  $K_I$  для стали в состоянии поставки определены путем подстановки соответствующих напряжениям 100 МПа, 200 МПа и 235 МПа значений нагрузок  $F$  в формулу:

$$K_I = \frac{F}{t\sqrt{b}} \cdot 0,38 \left[ 1 + 2,308 \cdot \frac{2l}{b} + 2,439 \left( \frac{2l}{b} \right)^2 \right]; \quad (16)$$

где  $F$  – усилие растяжения образца,  $t$  – толщина образца,  $b$  – ширина образца,  $2l$  – длина надреза.

Средние эффективные значения  $K_I^3$  по формуле (16) составили (МПа $\sqrt{м}$ ): 5,7, 10,3 и 11,9 – для технологического дефекта площадью описанного прямоугольника 16,16 мм<sup>2</sup>, залегающего внутри стенки наклонного пояса рамы боковой, либо углов буксового и рессорного проемов соответственно, с пределом текучести стали 20ГФЛ на уровне 320 МПа. Теоретический КИН, рассчитанный по формуле (16) от нагрузки  $F$  на образец, создающей напряжение  $\sigma_y = 215$  МПа вблизи кончика инициирующего надреза, равное пределу выносливости рамы боковой тележки модели 18-100, составил  $K_I = 15,3$  МПа $\sqrt{м}$ .

Выражение Ирвина:

$$K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi r} \quad (17)$$

где  $r$  – расстояние от кончика трещины для исключения зоны пластической деформации, используемое в настоящее время для установления размеров внутренних технологических дефектов в литых деталях тележек вагонов, завышает значения КИН относительно формулы (16) на 32%, что и требовалось доказать.

Применение порогового КИН  $K_{th}^3 = 7,1$  МПа $\sqrt{м}$  для сталей класса 20Л, полученного Т.П. Севериновой по выражению Ирвина (17) на образцах с краевой трещиной при внецентренном растяжении, занижает предельные размеры внутренних технологических дефектов. Поэтому, формулу Ирвина (17) необходимо дополнить поправочным коэффициентом  $M = 0,68$ , для определения допускаемых размеров внутренних остроугольных литейных дефектов в стенках боковых рам и надрессорных балок. При этом, пороговое значение остается  $K_{th} = 7,1$  МПа $\sqrt{м}$  для сталей класса 20Л. Такое решение позволит увеличить предельный размер допускаемого по ГОСТ 32400 – 2013 внутреннего литейного дефекта с 7,1 до 9,5 мм<sup>2</sup> в рамах боковых тележек грузовых вагонов, что не противоречит эмпирическим данным.



Модель распространения усталостной трещины в стенке литой детали и установленные критерии идентифицировались в натурных испытаниях на уста-



Рис.12. Испытания на усталость балки надressорной тележки грузового вагона на изобретенной испытательной машине

направлению поперечного сечения балки наносились сквозные симметричные пропилы шириной 1,2 мм, имитирующие усталостную трещину. Общая длина пропила составила 27 мм, что соответствует требованиям эксплуатации, согласно которым наличие видимой трещины длиной 10 – 50 мм по нижнему поясу балки надressорной приводит к отбраковке.

Нанесение усталостной трещины от исходного концентратора в виде пропила до достижения длины 41 мм происходило на протяжении 221 тыс. циклов нагружений с коэффициентом асимметрии 0,15, средней вертикальной нагрузкой цикла 47 тс с амплитудой 35 тс. Затем, вблизи кончиков нанесенной трещины наклеивались тензорезисторы измерения перпендикулярных трещине

лостью балки надressорной из стали 20ГФЛ с поперечным пропилом по центру нижнего пояса. Опыты проведены с Д.В. Расщепкиной на изобретенной, изготовленной и внедренной в эксплуатацию испытательной машине (см. рис.12) для проведения статических и усталостных испытаний вертикальной нагрузкой крупногабаритных деталей железнодорожного транспорта. На испытательную машину автором получен патент на полезную модель.

До проведения испытаний на усталость в наиболее нагруженной зоне балки надressорной типовой конструкции – нижнем поясе, высверливалось сквозное отверстие диаметром 8,5 мм, от которого ножовочным полотном по

деформаций (см. рис.13) и подключались к тензостанции типа МС-036, наподобие экспериментов на пластинах с ослабленной центральной зоной, описанных выше.

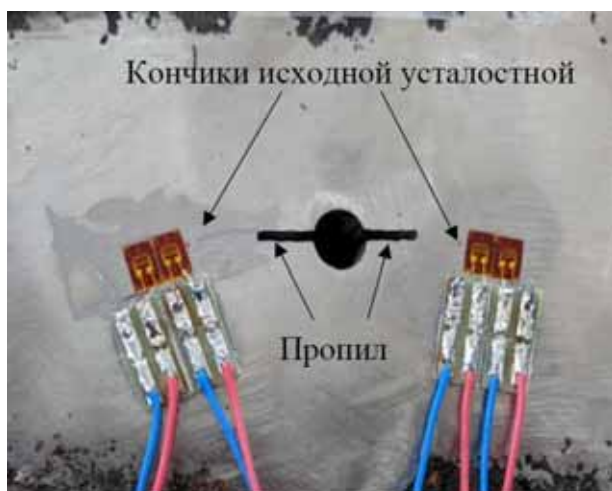


Рис.13. Расположение тензорезисторов вблизи кончиков нанесенной усталостной трещины от сквозного инициирующего пропила в центре нижнего пояса балки надрессорной

сквозной вязкости разрушения  $K_{fc} = 72 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , рассчитанный по формуле Ирвина (17).

Стоит отметить, что в работах Т.П. Севериновой  $K_{fc 13 \text{ лет}} = 78 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  по выражению (17), и определен на образцах с краевой трещиной при внецентренном растяжении, отобранных от балки надрессорной из стали 20ГФЛ после 13 лет эксплуатации.

Сравнивая полученное эмпирическое значение  $K_{fc} = 72 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  с имеющимся критерием  $K_{fc 13 \text{ лет}} = 78 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , можно заключить, что критерии циклической вязкости разрушения, приведенные в четвертой главе, после 13 и 25 лет эксплуатации считаются подтвержденными в натурных испытаниях балки надрессорной и пригодными для использования в расчетах сопротивления усталости литых деталей тележек грузовых вагонов.

Верифицированные модели (11) – (16) используются автором в дальнейшем при описании единой теории о вырождении механических свойств сталей

для изготовления рам боковых и балок надрессорных тележек грузовых вагонов.

**В шестой главе** формулируется единая теория о деградации механических свойств сталей для производства литых деталей тележек грузовых вагонов, ведущим замыслом которой является описание явлений перехода изначально пластичной стали в хрупкое состояние с ростом циклической наработки, методами механики деформируемого твердого тела и механики разрушений. Модель поврежденности литой стали по Пальмгрену-Майнеру противопоставляется разработанной теории.

По уравнениям единой теории можно выполнить оценку усталости литой детали с самых первых циклов нагружения, вплоть до разрушения по трещине, используя механические характеристики стали и методы их определения в механике деформируемого твердого тела, либо определяя коэффициенты интенсивности напряжений методами механики разрушения.

Демонстрация кинетики накопления усталостных повреждений в исследуемой области литой рамы боковой, имеющей хотя бы один остроконечный технологический дефект, отражает все итерационные процедуры (см. рис.14) разработанной единой теории.

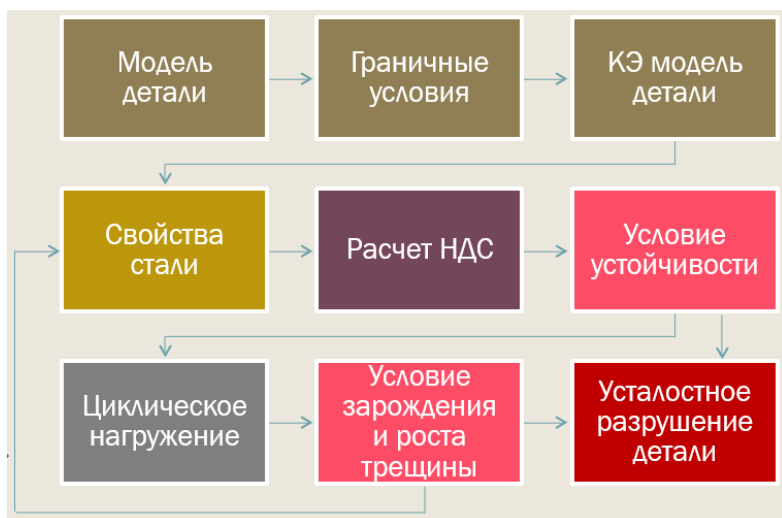


Рис.14. Методика оценки усталостной долговечности на основе разработанных математических моделей единой теории

Область стенки литой рамы боковой с остроугольным дефектом в виде 3D модели CAD (computer-aided design) программы нагружается наибольшим значением от пульсирующей внешней нагрузки  $P$ , создавая напряжения в окрестности концентратора напряжений не выше предела текучести стали. Определяющие уравнения

теории о вырождении механических свойств сталей, справедливые в механике деформируемого твердого тела, сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Уравнения вырождения механических свойств стали в механике деформируемого твердого тела

1	<p>Аналитическое выражение усталостной кривой:  <math>\sigma^\alpha N = \sigma_r^\alpha N_0</math></p>	<p>где <math>\sigma</math> – текущее напряжение,  <math>\sigma_r</math> – предел выносливости,  <math>N_0</math> – базовое число циклов,  <math>\alpha</math> – коэффициент угла наклона кривой усталости</p>
2	<p>Расчетный предел выносливости:  <math display="block">\sigma_r = \frac{\sigma_{-1} + (1 - \psi)\sigma_m}{k/\varepsilon\beta}</math></p>	<p>где <math>\sigma_{-1}</math> – предел выносливости стали при симметричном цикле нагружений,  <math>\sigma_m</math> – среднее напряжение цикла,  <math>\psi</math> – коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла,  <math>k</math> – коэффициент концентрации напряжений,  <math>\varepsilon</math> – коэффициент масштабного фактора,  <math>\beta</math> – коэффициент состояния поверхности</p>
3	<p>Кинетические кривые сопротивления усталости:  <math display="block">S_B(\sigma_M, n) = S_{B0} - k_\sigma n^\beta</math> <math display="block">\varepsilon_P(\sigma_M, n) = \varepsilon_{P0} - k_\varepsilon n^m,</math> <math display="block">E(\sigma_M, n) = E_0 - k_E n^\beta,</math> <math display="block">\nu(\sigma_M, n) = \nu_0 - k_\nu n^\beta</math></p>	<p>где <math>S_{B0}</math> – предел прочности стали в состоянии поставки,  <math>\varepsilon_{P0}</math> – деформация разрушения стального образца в состоянии поставки,  <math>E_0</math> – предел упругости стали в состоянии поставки,  <math>\nu_0</math> – коэффициент поперечной деформации стали в состоянии поставки,  <math>m, \beta</math> – эмпирические коэффициенты,  <math>k_\sigma, k_\varepsilon, k_E, k_\nu</math> – коэффициенты, определяемые из условий усталостного разрушения при стационарном нагружении,  <math>\sigma_M</math> – максимальное эквивалентное напряжение цикла</p>
4	<p>Условия усталостного разрушения:  <math display="block">S_B(\sigma_M, N) \leq \sigma_M</math> <math display="block">\varepsilon_P(\sigma_M, N) \leq \varepsilon_{PM},</math> <math display="block">E(\sigma_M, N) \leq kE_0,</math> <math display="block">\nu(\sigma_M, N) \leq k\nu_0</math></p>	<p>где <math>N = N_B</math> – долговечность по диаграмме Веллера с учетом коэффициента асимметрии цикла,  <math>k</math> – понижающий коэффициент при условии <math>n = N</math></p>

5	<p>Условия эквивалентности двух состояний стали при смене уровня напряжений:</p> $S_B(\sigma_{M1}, n_1) = S_B(\sigma_{M2}, n_2),$ $\varepsilon_p(\sigma_{M1}, n_1) = \varepsilon_p(\sigma_{M2}, n_2),$ $E_1(\sigma_{M1}, n_1) = E_2(\sigma_{M2}, n_2),$ $\nu_1(\sigma_{M1}, n_1) = \nu_2(\sigma_{M2}, n_2)$	<p>где <math>\sigma_{M1}</math> – максимальное напряжение цикла на первом уровне нагружений,  <math>\sigma_{M2}</math> – максимальное напряжение на втором уровне нагружений,  <math>n_1</math> – наработка в циклах при уровне напряжений <math>\sigma_{M1}</math>,  <math>n_2</math> – наработка в циклах при уровне напряжений <math>\sigma_{M2}</math>,  <math>E_1, E_2, \nu_1, \nu_2</math> – текущие значения модулей на первом и втором уровнях нагружений</p>
6	<p>Эквивалентное число циклов нагружений на втором уровне максимальных напряжений цикла:</p> $n_э = n_2 = N_2 \left( \frac{S_{B0} - S_э}{S_{B0} - \sigma_{M2}} \right)^{1/\beta},$ $n_э = n_2 = N_2 \left( \frac{\varepsilon_{p0} - \varepsilon_{pэ}}{\varepsilon_{p0} - \varepsilon_{pM2}} \right)^{1/m},$ $n_э = n_2 = N_2 \left( \frac{E_0 - E_э}{E_0(1 - \kappa)} \right)^{1/\beta},$ $n_э = n_2 = N_2 \left( \frac{\nu_0 - \nu_э}{\nu_0(1 - \kappa)} \right)^{1/\beta}$	<p>где <math>S_э, \varepsilon_{pэ}, E_э, \nu_э</math> – эквивалентные значения до перехода на следующий (второй) уровень,  <math>\varepsilon_{pM2}</math> – деформация разрушения цикла с напряжением <math>\sigma_{M2}</math>,  <math>N_2</math> – долговечность по диаграмме Веллера с учетом коэффициента асимметрии цикла и напряжения <math>\sigma_{M2}</math>,  <math>m, \beta</math> – эмпирические коэффициенты</p>

Исследуемая область разбивается на конечные элементы с помощью любой FEM (finite element method) программы. До применения соотношений таблицы 1 всем конечным элементам (КЭ), из которых состоит область рамы боковой с остроугольным дефектом, задаются механические свойства  $E_0, \nu_0, S_{B0}$  стали в состоянии поставки. Устанавливаются граничные условия и определяется напряженно-деформированное состояние (НДС) в области расположения дефекта.

По формуле (2) в таблице 1 рассчитывается предел выносливости в каждом КЭ, а по формуле (1) таблицы 1 – число циклов до разрушения  $N$  при напряжении  $\sigma$ . По формулам (3) таблицы 1 вычисляются текущие механические свойства  $S_B$  или  $\varepsilon_p, E, \nu$  при  $n = 1$  цикле нагружения. Проверяются условия (4) таблицы 1, не соблюдение которых позволяет продолжить циклическое нагружение на  $n = 1 + \Delta n$  циклов, предварительно присвоив измененные значения  $E$  и  $\nu$  всем КЭ 3D модели исследуемой области рамы боковой.

С изменением НДС в КЭ определяется эквивалентное число циклов на втором уровне напряжений по формулам (6) таблицы 1. Находятся новые значения  $S_B$  или  $\varepsilon_P$ ,  $E$ ,  $\nu$  при  $n = n_э + \Delta n$  по формулам (3) таблицы 1. Итерации продолжаются до соблюдения критериев (4) таблицы 1 в наиболее нагруженном КЭ, которому в последствии назначаются «нулевые» свойства  $E$ ,  $\nu$ , что подразумевает зарождение усталостной трещины длиной, равной размеру КЭ.

Число циклов  $n = N_{TR}$  до разрушения первого КЭ завершает стадию зарождения усталостной трещины. Устойчивое распространение усталостной трещины в рассматриваемой области литой рамы боковой ослабленной остроугольным дефектом происходит путем последовательного «обнуления» механических свойств  $E$ ,  $\nu$  в тех КЭ, в которых соблюдаются критерии (4) таблицы 1, с ростом  $n$ . Начало перехода в неустойчивый рост трещины, т.е. если статического равновесия в КЭ не наступает (см. рис.14), означает предел сопротивления усталости  $n = N_P = N_{TR} + \Delta N$  рамы боковой, стенка которой имеет остроугольный дефект.

Стоит отметить, что после назначения «нулевых» механических свойств разрушенным КЭ по усталости конечно-элементная сетка 3D модели области с дефектом не перестраивается, взаимное расположение и размеры КЭ не меняются, сохраняется история нагружения каждого КЭ.

В диссертации приведен численный пример расчета области литой рамы боковой, ослабленной технологическим дефектом, вырожденные кривые механических свойств  $E$ ,  $\nu$ , полученные методом взаимного обмена результатами программирования на языке VBA (Visual Basic for Application) в программе MS Access и модуля Simulation программы SolidWorks.

Применение модели поврежденности Пальмгрена-Майнера:

$$\Pi = \frac{n}{N(\sigma_M)}, \quad (18)$$

где  $N(\sigma_M)$  – число циклов до разрушения при заданном уровне максимального напряжения цикла  $\sigma_M$ , в расчетах нагруженной области литой рамы боковой, ослабленной технологическим дефектом, исключая стадию развития усталостной трещины, занижает на 40% экспериментальные данные до появления

усталостной трещины, а следовательно, и прогнозы по разработанной теории о негативных изменениях механических свойств.

С целью сопоставления оценок сопротивления усталости по единой теории о вырождении механических свойств стали, в таблице 2 приводятся соотношения для установления поврежденности детали методами линейной механики разрушения по Гриффитсу, имеющей область с остроконечной трещиной, длина которой связывается с поврежденностью.

Таблица 2. Уравнения вырождения циклической вязкости разрушения в механике разрушений

1	Кинетическая кривая циклической вязкости разрушения: $K_{fc}(\sigma_y, n) = K_{fc}^0 - kn^m$	где $K_{fc}^0$ – циклическая вязкость разрушения стали в состоянии поставки, $k$ – коэффициент, определяемый из условия усталостного разрушения
2	Условия усталостного разрушения: $K_{fc}(\sigma_y, N) \leq dK_{fc}^0$ $S_B(\sigma_M, N) \leq \sigma_M$ $E(\sigma_M, N) \leq kE_0$ $\nu(\sigma_M, N) \leq k\nu_0$	где $K_{fc}$ – текущее значение циклической вязкости разрушения стали после $N$ циклов, $d$ – понижающий коэффициент, при условии $n = N$
3	Условие эквивалентности двух состояний стали при смене уровня напряжений: $K_{fc}^1(\sigma_{y1}, n_1) = K_{fc}^2(\sigma_{y2}, n_2)$	
4	Эквивалентное число циклов нагружений на втором уровне максимальных напряжений цикла: $n_3 = n_2 = N_2 \left( \frac{K_{fc}^0 - K_{fc}^1}{K_{fc}^0(1 - d)} \right)^{1/m}$	

Уравнения в таблице 2 обобщаются на концептуальный подход в таблице 1, и включают эффект вырождения циклической вязкости разрушения  $K_{fc}$  с первых циклов нагружений.

Сравнение результатов расчета усталостной долговечности области литой рамы боковой, ослабленной технологическим дефектом, полученных по

разработанной единой теории методами механики деформируемого твердого тела (таблица 1) и линейной механики разрушений (таблица 2) показало близкие значения. Однако, уравнения механики разрушений приводят к более консервативному прогнозу долговечности.

Разработанные алгоритмы тестируются в решении прикладной задачи по расчету срока службы литой детали тележки грузового вагона.

Объектом расчета выбрана литая рама боковая тележки грузового вагона модели 18 – 100, с осевой нагрузкой 23,5 тс, т.к. для нее известны результаты ходовых прочностных испытаний. Количество максимальных напряжений циклов в буксовом проеме рамы боковой за один год – 8703847, установленных по результатам ходовых прочностных испытаний во ВНИИЖТ, произвольно сведено в блок из тридцати переходов с наибольшей разницей напряжений (см. рис.15).



Рис.15. Блок максимальных напряжений циклов в буксовом проеме боковой рамы тележки 18-100 из тридцати переходов

В специально разработанных авторских программах на языке VBA выполнялся поцикловый расчет поврежденности металла в буксовом проеме рамы боковой тележки модели 18 – 100 при нестационарном нагружении по закону на рисунке 15.



Результатами расчетов являются количества циклов до соблюдения соответствующих критериев разрушения (см. табл. 1 и 2) в исследуемой области рамы боковой. На практике это означает возникновение опасного состояния, или появление усталостной трещины. Полученные циклы делятся на количество циклов в год, и получается срок службы детали груженого вагона до появления усталостной трещины в годах.

Длительность нахождения детали в опасном состоянии до перехода в предельное состояние не рассчитывалась, т.к. неизвестно напряженное состояние в окрестностях трещины в условиях ходовых прочностных испытаний. Доля порожнего пробега вагона принималась 40%.

Учет негативных изменений механических свойств в процессе нестационарного нагружения буксового проема рамы боковой предложено выполнить путем умножения полученных циклов на коэффициент 1,395, установленный по результатам расчетов области литой рамы боковой, ослабленной технологическим дефектом.

Применяя исходные данные шестой главы, значение предела выносливости  $\sigma_r = 139$  МПа для литой детали тележки, и авторские расчетные программы, получены прогнозы срока службы рамы боковой тележки 18 – 100 в циклах и в блоках (см. рис. 15). Зная число блоков нагружений за 1 год – 554, подсчитывался срок службы в годах. Умножением предельного числа циклов нагружений боковой рамы на длину неровности рельсов 20 м рассчитывается пробег в км.

Срок службы в буксовом проеме рамы боковой тележки модели 18 – 100 по разработанной единой теории составил 46,1 лет или 8,02 млн. км наработки, а по гипотезе Пальмгрена – Майнера 33 года или 5,75 млн. км наработки. Оба прогноза соответствуют нормативному сроку службы рамы боковой 32 года. Однако, предсказание по выдвинутой теории превышает порог для эксплуатации боковых рам тележек модели 18 – 100 в 37 лет, установленный с учетом продления, разрешенного ОАО «РЖД» в период с 2007 по 2013 годы.

Таким образом, конструкция рамы боковой тележки модели 18 – 100 имеет запас сопротивления усталости 20% и соответствует требованиям

ГОСТ 33211 – 2014 «Вагоны грузовые Требования к прочности и динамическим качествам» и «Нормы для расчета на прочность и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных), 1996 г».

Выполненные прогнозы и выводы не учитывают наличие в буксовом проеме рамы боковой внутренних литейных дефектов, разнотолщинности стенок, и других пороков литья, а также стадию развития усталостной трещины, нарушение режимов эксплуатации, влияние пониженных температур.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенные исследования научной проблемы позволили зафиксировать следующие основные результаты и сделать соответствующие выводы:

1. Выполнен анализ исследований отечественных ученых, которые прогнозировали сроки службы литых рам боковых тележек грузовых вагонов на основе методов механики разрушений. Данные прогнозы сопоставлены с результатами эксплуатации. Установлено, что прогнозируемый отечественными учеными срок службы более чем в два раза ниже реальных сроков эксплуатации литых рам боковых тележек грузовых вагонов.

2. Проведен анализ исследований отечественных ученых, которые изучили методами механики разрушений явление охрупчивания шести марок литых сталей: 20Л, 20ГЛ, 20ГТЛ, 20ГФЛ, 20ФТЛ, 25Л. Сопоставление кинетики вырождения коэффициентов интенсивности напряжений в указанных сталях, с кинетикой вырождения параметров полной диаграммы растяжения сталей 20ГЛ, 20ГЛА, 20ФЛ, показало их схожесть, и возможность объединения в единую методику, учитывающую негативные изменения механических свойств литых сталей для изготовления несущих деталей тележек грузовых вагонов.

3. Установлено, что объединяющим началом двух разных подходов к описанию явления охрупчивания литых сталей служит кинетическая кривая, параметризованная накопленным повреждением контролируемого показателя от числа циклов нагружений, и условие эквивалентности по поврежденности стали при циклическом нагружении на разных уровнях максимальных напряжений цикла.

4. Разработаны модели для теории вырождения механических свойств литых низколегированных сталей класса 20Л, позволяющие установить интенсивность деградации при циклическом деформировании методами континуальной механики с помощью полной диаграммы растяжения.

5. Построена кривая деградации циклической вязкости разрушения сталей класса 20Л с ростом срока службы литых деталей тележек грузовых вагонов. Подобрана аппроксимирующая зависимость для кинетической кривой, установлены критерии зарождения усталостной трещины, ее устойчивого развития и разрушения литой детали тележки грузового вагона по усталостной трещине.

6. Выявленные закономерности и математические модели деградации сведены в единую методику прогнозирования усталостной долговечности литых деталей тележек грузовых вагонов с учетом негативных изменений механических свойств сталей.

7. Уравнения единой методики позволяют находить значения циклической вязкости разрушения стали с учетом истории нагружения балки надрессорной или рамы боковой тележки в эксплуатации. Зарождение и развитие усталостной трещины происходит при совпадении одного из текущих значений модуля упругости, коэффициента поперечной деформации, либо циклической вязкости разрушения с соответствующими предельными значениями.

8. Выполнен прогноз срока службы рамы боковой тележки грузового вагона на основе спектра максимальных напряжений в эксплуатации. Расхождение результатов по разработанной теории и гипотезе Пальмгрена – Майнера составило 13,1 лет, причем консервативным прогнозом считается расчет по Пальмгрену – Майнеру. Расчетный срок службы рамы боковой тележки модели 18 – 100 по теории о негативных изменениях механических свойств составил 46,1 лет, что выше на 20% назначенного срок службы с учетом продления – 37 лет.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 05.22.07 (2.9.3):*

1. Bumbulevich V.B. Tests of Parts and Units at Stands for Quality Evaluation / Bumbulevich V.B., Nikolaev N.L., Yakushev A.V. // Russian Journal of Heavy Machinery. – 2004. – №4. – p. 11 – 12.
2. Nikolaev N.L. Test of Structural Materials for Quality Assurance / Nikolaev N.L., Yakushev A.V. // Russian Journal of Heavy Machinery. – 2004. – №4. – p. 13 – 14.
3. Миронов, В.И. Метод полных диаграмм в расчете ресурса элементов подвижного состава / В.И. Миронов, А.В. Якушев // Транспорт Урала. – 2007. – N 2 (13). – С.57 – 61.
4. Миронов, В.И. Трещиностойкость несущих деталей вагонов / В.И. Миронов, А.В. Якушев, И.Г. Емельянов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – N 1 (33). – С.56 – 60.
5. Якушев, А.В. Уточнение прогноза долговечности надрессорной балки тележки грузового вагона / А.В. Якушев, В.И. Миронов // Наука и техника транспорта. – 2010. – N 1. – С.71 – 75.
6. Миронов, В.И. Прогнозирование ресурса элементов подвижного состава / В.И. Миронов, А.В. Якушев // Тяжелое машиностроение. – 2010. – N 4. – С.26 – 29.
7. Глебов, С.М. Оптимизация технологии изготовления отливок «Балка надрессорная» тележек грузовых вагонов с применением компьютерного моделирования литейных процессов / С.М. Глебов, М.А. Пречесный, А.В. Якушев // Транспорт Российской Федерации, - 2011. – N 2 (33). – С.63 – 65.
8. Миронов, В.И. Оценка механических свойств вагонных сталей методом полных диаграмм / В.И. Миронов, А.В. Якушев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2011. – Выпуск 3 (28). – С.202 – 211.
9. Миронов, В.И. Разработка экспресс-метода для контроля свойств вагонных сталей / В.И. Миронов, И.Г. Емельянов, А.В. Якушев, и др. // Транспорт Урала. – 2012. – N 2 (33). – С.13 – 17.

10. Якушев, А.В. Разработка и обоснование формы образца с целью построения кинетической диаграммы усталостного разрушения для литых сталей при наличии внутренних литейных дефектов / А.В. Якушев, Я.О. Рузметов, С.О. Комиченко // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2014. – Выпуск 2 (39). – С.129 – 133.

11. Якушев, А.В. Определение предельной длины усталостной трещины в углу буксового проема боковой рамы тележки грузового вагона / А.В. Якушев, Д.В. Расщепкина, А.Н. Баранов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2017. – Том 14, выпуск 4. – С.710 – 719.

12. Расщепкина, Д.В. Работоспособность боковых рам тележек грузовых вагонов после возникновения опасного отказа / Д.В. Расщепкина, А.В. Якушев // Транспорт Урала. – 2018. – N 3 (58). – С.30 – 34.

13. Якушев, А.В. Определение циклической вязкости разрушения стали 20ГФЛ на надрессорной балке тележки грузового вагона при стационарном нагружении / А.В. Якушев, Д.В. Расщепкина, А.А. Петров // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – N 1 (41). – С.40 – 46;

14. Якушев, А.В. Структурно-феноменологические модели металлов для вагоностроения / А.В. Якушев, А.В. Смольянинов, К.М. Колясов // Транспорт Урала. – 2021. – N 4 (71). – С.18 – 23.

15. Якушев, А.В. Теория о деградации механических свойств литых сталей класса 20Л / А.В. Якушев // Транспорт Урала. – 2022. – N 1 (72). – С.8 – 14.

***Патенты на изобретения, патенты на полезную модель – приравненные к публикациям в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

16. Пат. на изобр. 2251676 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G01N3/08. Устройство и способ для испытания образцов материалов на растяжение / Мионов В.И., Андронов В.А., Якушев А.В., и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. унитарное предприятие «Производственное объединение «Уралвагонзавод» им. Ф.Э. Дзержинского. – N 2003130046/28; заявл. 09.10.2003; опубл. 10.05.2005, Бюл. N 13. – 5 с. (***Группа, состоящая из двух изобретений – прим. автора***).

17. Пат. на пол. модель 132364 Российская Федерация, МПК В22С 9/08. Литниковая система для заливки формы отливки надрессорной балки тележки грузового вагона / Бороненко Ю.П., Глебов С.М., Пирайнен В.Ю., Якушев А.В., и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. бюджетное образовательное учрежд. высшего проф. образования «Петербургский государственный университет путей сообщения»; ОАО «Рузаевский завод химического машиностроения». – N 2012158225/02; заявл. 24.12.2012; опубл. 20.09.2012, Бюл. N 26. – 5 с.

18. Пат. на пол. модель 128528 Российская Федерация, МПК В22С 9/08. Литниковая система для заливки формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона / Бороненко Ю.П., Глебов С.М., Пирайнен В.Ю., Якушев А.В., и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. бюджетное образовательное учрежд. высшего проф. образования «Петербургский государственный университет путей сообщения» ; ОАО «Рузаевский завод хим-го машин-ия». – N 2012158227/02; заявл. 24.12.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. N 15. – 5 с.

19. Пат. на пол. модель 144455 Российская Федерация, МПК В61F5/00, В61F 5/52. Боковая рама тележки железнодорожного вагона / Якушев А.В., и др.; заявитель и патентообладатель ООО «СтройАтомПроект-Т». – N 2014111616/11; заявл. 25.03.2014; опубл. 17.07.2014, Бюл. N 23. – 5 с.

20. Пат. на пол. модель 144454 Российская Федерация, МПК В61F5/00. Надрессорная балка тележки грузового вагона / Якушев А.В., и др.; заявитель и патентообладатель ООО «СтройАтомПроект-Т». – N 2014111615/11; заявл. 25.03.2014; опубл. 17.07.2014, Бюл. N 23. – 5 с.

21. Пат. на пол. модель 161341 Российская Федерация, МПК G01М 17/08. Испытательная машина / Якушев А.В., и др.; заявитель и патентообладатель Якушев А.В. – N 2016100278/11 ; заявл. 11.01.2016; опубл. 20.04.2016, Бюл. N 11. – 6 с.

22. Пат. на пол. модель 165307 Российская Федерация, МПК G01М 17/08. Стенд для испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта /

Якушев А.В., и др.; заявитель и патентообладатель Якушев А.В. – N 2016112197/11; заявл. 31.03.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. N 28. – 6 с.

***Монографии:***

1. Якушев, А.В. Прогнозирование усталостного ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов: монография / А.В. Якушев, В.И. Миронов, Я.О. Рузметов. – Ташкент: ООО «Complex Print», 2021. – 136 с.

2. Рузметов, Я.О. Повышение прочности боковых рам тележек грузовых вагонов: монография / Я.О. Рузметов, А.В. Якушев. – Ташкент: ООО «Complex Print», 2021. – 130 с.

3. Расщепкина, Д.В. Оценка ресурса литых деталей тележек грузового вагона после возникновения усталостной трещины: монография / Д.В. Расщепкина, А.В. Якушев, Я.О. Рузметов. – Ташкент: ООО «Complex Print», 2021. – 136 с.

***В прочих изданиях, входящих в базу данных Scopus:***

1. Bumbulevich V.B. Tests of Parts and Units at Stands for Quality Evaluation / Bumbulevich V.B., Nikolaev N.L., Yakushev A.V. // Russian Journal of Heavy Machinery. – 2004. – №4. – p. 11 – 12.

2. Nikolaev N.L. Test of Structural Materials for Quality Assurance / Nikolaev N.L., Yakushev A.V. // Russian Journal of Heavy Machinery. – 2004. – №4. – p. 13 – 14.

3. Mironov, V.I. Special features of fatigue process in 35-type steel / Mironov, V.I., Struzhanov, V.V., Yakushev, A.V. // Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov. – 2004. – №70(6). – p. 51 – 54.

4. Yakushev, A.V. Forecasting freight car truck durability and survivability / Yakushev, A.V., Efimov V.P., Mironov V.I. // Modern Techniques and Technologies. Proceedings of 11<sup>th</sup> Int. scientific and practical conf. of students, postgraduates and young scientists, MTT' 2005. – Tomsk, 2005. – p.70 – 72.

5. Mironov, V. Cyclic degradation of material in vehicle components / V. Mironov, O. Lukashuk, A. Yakushev, etc. // Russian Engineering Research. – New York: Allerton Press, Inc. – 2012. – N 32 (5 – 6). – P. 417 – 422.

6. Iakushev, A. The method for increasing operational reliability of freight bogie side frames by utilizing an internal stiffener / A. Iakushev, S. Komichenko, Y. Ling, etc. // Railway Bogies and Running Gears. Proceedings of 9<sup>th</sup> International conf. – Budapest. – 2013. – P.41 – 47.

Якушев Алексей Вячеславович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ  
НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЙ  
КОНТИНУАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЙ

2.9.3 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация  
Лицензия на издательскую деятельность

---

Сдано в набор	Подписано к печати
Формат бумаги 60x84 1/16	Объем 2 п.л.
Заказ	Тираж 100 экз.

---

Типография