

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Смолянинов Александр Васильевич

Екатеринбург – 2022

Введение.....	6
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ.....	19
1.1 Сопротивление усталости конструкционной стали 20.....	19
1.2 Усталостная долговечность боковых рам и надрессорных балок литой конструкции.....	31
1.3 Негативные изменения механических свойств и циклической трещиностойкости сталей	39
1.4 Поврежденность материалов, изучаемая методом полных диаграмм деформирования.....	43
1.5 Новые методы ресурсных испытаний литых деталей тележек грузовых вагонов.....	46
1.6 Выводы и постановка задач исследований.....	47
ГЛАВА 2 МОДЕЛИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ЛИТЫХ СТАЛЕЙ С УЧЕТОМ НЕГАТИВНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ПРОЦЕССЕ НАРАБОТКИ.....	48
2.1 Структура модели материала. Условия взаимодействия. Ограничения	51
2.2 Структурно-феноменологические модели металлов.....	55
2.3 Исследование поведения испытуемого объема металла в испытательной машине	77
2.4 Основные результаты и выводы по главе 2.....	85
ГЛАВА 3 МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ДЕФЕКТА В СТЕНКЕ ЛИТОЙ ДЕТАЛИ ТЕЛЕЖКИ ВАГОНА	87
3.1 Анализ изломов литых боковых рам тележек с внутренними технологическими дефектами литейного происхождения.....	89
3.3 Определение коэффициента интенсивности напряжений в вершине центрального концентратора на плоском образце при осевом растяжении	98
3.4 Основные результаты и выводы по главе 3.....	104

ГЛАВА 4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДВИЖЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ЛИТОЙ БОКОВОЙ РАМЕ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА	105
4.1 Изучение предельных состояний литых боковых рам тележек грузовых вагонов в эксплуатации	107
4.2 Исходные данные и граничные условия для моделирования нагруженности боковой рамы с поверхностной усталостной трещиной.....	112
4.3 Результаты моделирования продвижения усталостной трещины в литых боковых рамах	118
4.4 Основные результаты и выводы по главе 4.....	123
ГЛАВА 5 ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ.....	124
5.1 Верификация математической модели поврежденности стали, учитывающей негативные изменения механических свойств сталей с увеличением наработки	126
5.2 Экспериментальная проверка порогового коэффициента интенсивности напряжений вблизи вершины остроугольного технологического дефекта	154
5.3 Экспериментальная проверка критериев циклической вязкости разрушения для литых деталей тележек грузовых вагонов	166
5.4 Основные результаты и выводы по главе 5.....	177
ГЛАВА 6 ФОРМУЛИРОВАНИЕ ЕДИНОЙ ТЕОРИИ О НЕГАТИВНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ СТАЛЕЙ И РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ.....	178
6.1 Описание негативных изменений механических свойств литых сталей методом континуальной механики.....	183
6.2 Описание негативных изменений циклической вязкости разрушения литых сталей.....	195
6.3 Прогнозирование срока службы литой боковой рамы тележки грузового вагона.....	198
6.4 Основные результаты и выводы по главе 6.....	201
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	202

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	204
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное) Программа расчета параметров ПДД модели материала Даниэльса с упруго-хрупкими волокнами.....	238
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное) Программа расчета параметров ПДД модели материала Мазинга с упругопластическими волокнами	240
ПРИЛОЖЕНИЕ В (справочное) Программа расчета параметров ПДР модели материала Миронова-Якушева с упруго разупрочняющимися волокнами....	242
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (справочное) Программа расчета усталостной долговечности пластины с отверстием методами континуальной механики при силовом подходе.....	245
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (справочное) Программа расчета усталостной долговечности пластины с отверстием методами механики разрушений при деградации коэффициентов интенсивности напряжений	247
ПРИЛОЖЕНИЕ Е (справочное) Описание изобретения к патенту «Устройство и способ для испытания образцов материалов на растяжение» и акт об использовании	249
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (справочное) Описание полезной модели «Боковая рама тележки железнодорожного вагона».....	257
ПРИЛОЖЕНИЕ И (справочное) Описание полезной модели «Надрессорная балка тележки грузового вагона».....	263
ПРИЛОЖЕНИЕ К (справочное) Описание полезной модели «Литниковая система для заливки формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона»	267
ПРИЛОЖЕНИЕ Л (справочное) Описание полезной модели «Литниковая система для заливки формы отливки надрессорной балки тележки грузового вагона».....	271
ПРИЛОЖЕНИЕ М (справочное) Описание полезной модели «Испытательная машина»	274

ПРИЛОЖЕНИЕ Н (справочное) Описание полезной модели «Стенд для испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта»	280
ПРИЛОЖЕНИЕ П (справочное) Технологическая инструкция «Методика сравнительной оценки усталостной прочности, несущей способности и трещиностойкости сталей»	285
ПРИЛОЖЕНИЕ Р (справочное) Расчет экономической эффективности «Метода оценки усталостной прочности и трещиностойкости литых деталей тележки вагона с помощью нестандартных испытаний микрообразцов»	302

Введение

Актуальность темы исследования. Из года в год на железных дорогах некоторых стран СНГ (Российская Федерация, Казахстан, Таджикистан, Эстония) происходят крушения грузовых вагонов с грузами, в том числе опасными, по причине излома литых боковых рам тележек [3, 4, 9, 81, 82, 83, 85, 109, 145, 204, 233, 245, 260]. 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.

На рисунке 1.1 показано распределение в РФ изломов литых боковых рам тележек грузовых вагонов по годам [3, 204]. Естественно, что боковые рамы чаще

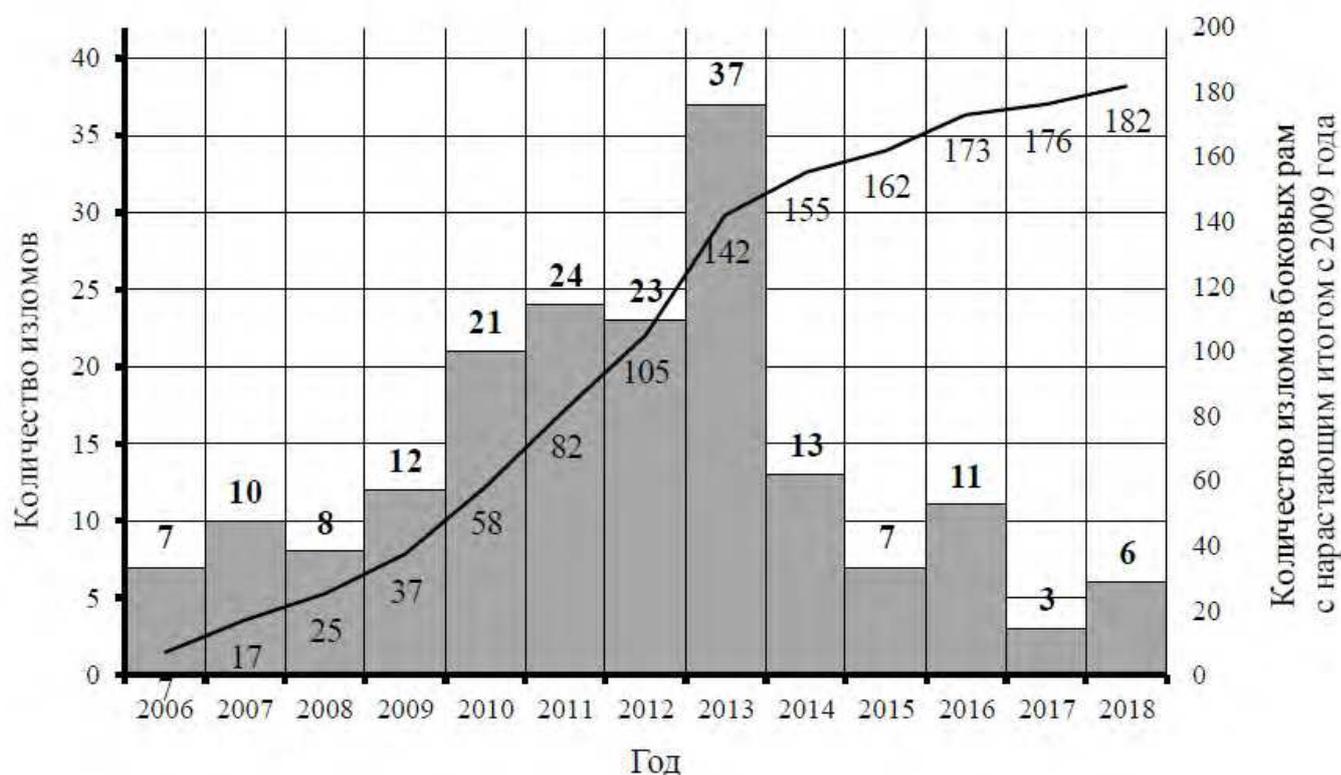


Рисунок 1.1 – Изломы литых боковых рам тележек во время движения грузовых вагонов

ломаются при пониженной температуре воздуха, с ноября по апрель, в зонах внутренних радиусов проемов для колесных пар (рисунок 1.2). Скорое развитие



Рисунок 1.2 – Излом литой боковой рамы тележки полувагона

усталостной трещины вызвано повышением хрупкости литой стали при минусовых температурах и наличием внутренних литейных дефектов. По результатам определения доли вязкой и хрупкой составляющей в изломе стандартных образцов при испытаниях на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78 установлено, что порог хладноломкости стали 20ГЛ, составляет минус 20°C [47]. Данные исследования проводились в лаборатории Уралвагонзавода. В работе [263] подтвержден порог хрупко-вязкого перехода стали 20ГЛ минус 20°C .

Распределение изломов боковых рам под грузовыми вагонами по сроку службы показано на рисунке 1.3 [204]. Разрушения боковых рам до 10 лет использования вызваны нарушениями технологии формовки, термообработки отливок, наличием внутренних литейных дефектов [86], пониженными механическими свойствами сталей в состоянии поставки. Отказы в интервале 20-30 лет (рисунок 1.3) связаны с появлением усталостных повреждений металла боковых рам.

С ростом экономики Российской Федерации товарный грузооборот на железных дорогах растет, увеличиваются протяженности гарантийных участков безопасного проследования грузовых поездов на основных направлениях сети железных дорог, увеличиваются в разы межремонтные пробеги тележек грузовых

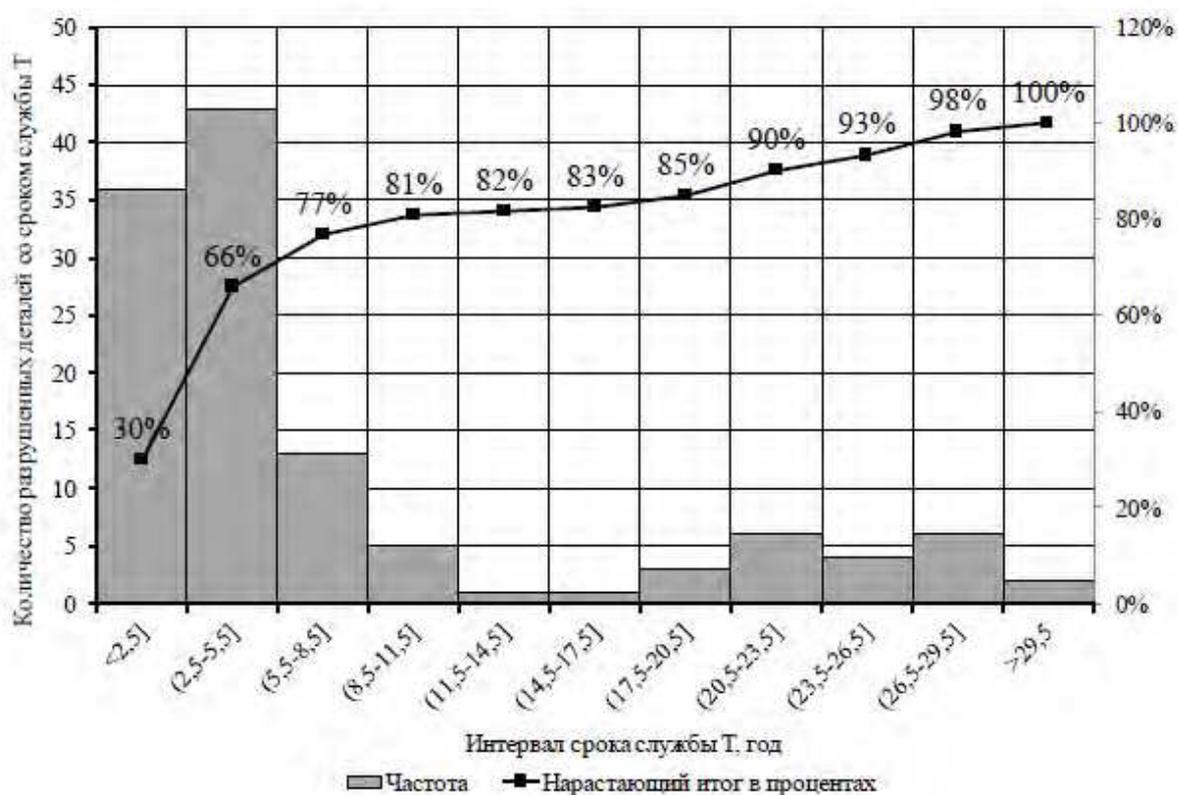


Рисунок 1.3 – Распределение изломов боковых рам под грузовыми вагонами по сроку службы

вагонов, проводятся исследования по оценке целесообразности повышения срока службы литых деталей тележек с 32 до 40 лет. С 1 июля 2014 г. в ГОСТ 32400-2013 введено требование надежности в том, что рамы и балки не должны переходить в опасное состояние до очередного планового ремонта вагона [41]. В связи с изложенным, остаются и повышаются риски крушений грузовых вагонов в движении поезда из-за разрушения литых боковых рам тележек.

Существующие методы расчета усталостной долговечности, от начала эксплуатации до появления усталостной трещины в раме боковой и балке надрессорной литой конструкции, изложенные в нормативной документации [42, 44, 45, 144], не учитывают стадию развития усталостной трещины, эффект охрупчивания стали с ростом наработки в эксплуатации. Оценки трещиностойкости литых боковых рам и надрессорных балок в эксплуатации, проводимые некоторыми отечественными учеными [99, 138, 139, 216 – 220, 222 – 224], учитывают деградацию коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) после 25 лет эксплуатации, но не

рассчитывают КИН непрерывно, после любого срока эксплуатации. Другие ученые [72, 87, 109, 147, 165, 175 – 177, 226, 246, 248, 252, 268, 269, 302, 308, 309, 312] делают отдаленные прогнозы усталостной долговечности литых боковых рам методами механики деформируемого твердого тела [10, 16] или механики разрушений, не охватывают негативные изменения механических свойств стали.

Механика деформируемого твердого тела изучает процессы их разрушения. Критериями являются некоторые значения предельных напряжений в локальной области, достижение которых означает разрушение. Подготовка разрушения, образование и движение трещин в механике деформирования не рассматриваются. Такой подход реализован в нормативных документах по проектированию несущих деталей вагонов. В механике разрушений, процесс зарождения трещин не рассматривается, исходные трещины задаются и рассматривается их движение до определенного размера. После достижения начальной трещиной предельных размеров, деталь считают разрушенной.

Переходом от механики деформирования к механике разрушений может стать достаточно новое направление механики деформируемого твердого тела, впервые предложенное Работновым Ю.Н. и Качановым Л.М. – континуальная механика, в которой применяется феноменологический подход к описанию процессов зарождения и прогрессирования усталостных трещин, поврежденности материала [70, 71, 197 – 200, 237]. В механике континуального разрушения изучаются все стадии деформирования твердого тела, включая стадию разупрочнения [190], которая начинается после преодоления материалом временного сопротивления до зарождения трещины в теле и его разделения на части.

Реализация методов механики разрушений и континуальной механики в нормах по проектированию вагонов еще не наступила [42, 144]. Однако, в разделе 4 ГОСТ 32400-2013 с 2014 г. введено требование надежности по недопущению перехода боковой рамы и надрессорной балки тележки грузового вагона в опасное состояние (возникновение и развитие усталостной трещины) до очередного планового ремонта грузового вагона. По данным эксплуатации [3, 4], развитие видимых усталостных трещин во внутренних проемах для колесных пар боковых рам может

составлять 450-950 км пробега вагона. Максимальная протяженность гарантийных участков безопасного проследования груженых вагонов составляет 2300 км, порожних – 3300 км, рефрижераторных и контейнерных поездов – 4000 км (Распоряжение ОАО «РЖД» от 07.12.2016 N 2475р (ред. 19.03.2018). Об утверждении Положения об организации работы пунктов технического обслуживания грузовых и пассажирских вагонов на инфраструктуре ОАО "РЖД" N 795-2016 ПКБ ЦВ"). Поэтому, развитие усталостной трещины в литых несущих деталях тележки вагона подлежит прогнозированию при их создании. Все известные исследования в области прогнозирования усталостной долговечности литых деталей тележек вагонов проводятся либо методами механики деформирования, либо механики разрушения. Но, остается различие физических представлений о процессах возникновения усталостной трещины в механике деформирования и механике разрушения.

Единая методология прогноза усталостной долговечности несущих деталей тележек отсутствует, т.е. не применяются одни и те же модели и критерии поврежденности материала, от самых первых циклов нагружений, до рассеянных повреждений, прогрессирующих и образующих усталостную трещину, с достижением ее предельной длины. 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» [239].

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 (механики рассеянного разрушения), и механики разрушений, исследуется влияние негативных изменений

механических свойств на сопротивление усталости. Разрабатываются единые методики по прогнозированию усталостной долговечности литых деталей тележек с учетом внутренних технологических дефектов, негативных изменений механических свойств, стадии развития усталостной трещины вплоть до разрушения детали, двумя методами – континуальной механики и механики разрушений.

Степень разработанности темы исследования.

1 Сформулирована единая теория о негативных изменениях механических свойств сталей, с помощью которой устанавливаются закономерные связи негативных изменений механических свойств литых сталей с ростом циклического нагружения, определяемые методами континуальной механики и механики разрушения.

2 На основе единой теории созданы методики прогнозирования усталостной долговечности литых боковых рам и балок надрессорных. Методики реализованы в авторских коммерциализованных программах с пользовательским интерфейсом.

3 Разработанная технологическая инструкция для сравнительной оценки сопротивления усталости, несущей способности и трещиностойкости вагонных марок сталей использовалась в АО «НПК «УРАЛВАГОНЗАВОД» (г. Нижний Тагил), ООО «НИИ Трансмаш» (г. Санкт-Петербург) и ИМАШ УрО РАН Институт Машиноведения (г. Екатеринбург). Результаты применения инструкции позволили выбрать высокопрочные стали повышенного ресурса для изготовления инновационных грузовых вагонов на РМ Рейл РУЗХИММАШ (г. Рузаевка).

4 Рекомендации по повышению качества литых деталей тележек из сталей класса 20Л, увеличению сопротивления усталости боковых рам и надрессорных балок, размерам внутренних технологических дефектов и макротрещин в боковых рамах и надрессорных балках, подбору испытательных динамических машин рассматривались на научно-технических советах в 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).

5 Изобретенные конструкции боковой рамы и надрессорной балки тележки грузового вагона повышенного ресурса успешно прошли циклические испытания с построением кривой усталости.

6 Построенная сервогидравлическая машина улучшенной эффективности используется с 2014 г. в ФГБОУ ВО ПГУПС (г. Санкт-Петербург) при проведении испытаний по оценке сопротивления усталости и живучести литых боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов.

Цели и задачи. 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 стали, с помощью 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 разработанных методик 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.

Научная новизна.

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 нагрузки.

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 страгивания 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 боковых рам и надрессорных балок.

Теоретическая и практическая значимость работы. 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 страгивания и развития усталостной трещины по циклической вязкости разрушения, 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 класса 20Л, позволяет сократить количество стендовых испытаний натуральных деталей в пользу статических испытаний мини образцов.

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 работы, обеспечивает проведение экспериментов по определению коэффициентов интенсивности напряжений в литых деталях 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 км, при наличии усталостной трещины в боковой раме, методами линейной механики разрушений, позволяет выполнять оценку надежности 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.

Личный вклад автора состоит в выборе объектов исследований, обосновании актуальности и перспектив исследований, постановке цели и задач исследований, получении исходных данных и образцов для научных экспериментов, разработке всех испытательных машин и устройств, специальных средств измерений, в проведении всех циклических испытаний образцов и деталей, участии в статических испытаниях, обработке и интерпретации экспериментальных данных.

Лично автором разработаны все специальные компьютерные программы, используемые в работе, выполнены многовариантные расчеты ресурса, срока службы, на прочность, усталостную долговечность объектов исследований. Модели накопления усталостных повреждений в сталях выведены при участии автора.

Теория о негативных изменениях механических свойств сталей в континуальной механике и в механике разрушений, методика расчетов процесса вырождения циклической вязкости разрушения сформулированы и структурированы лично автором.

Кинетическая кривая процесса вырождения циклической вязкости разрушения литых сталей класса 20Л, условие эквивалентности по поврежденности стали при циклическом нагружении на разных уровнях максимальных напряжений цикла по коэффициентам интенсивности напряжений, единый критерий страгивания и магистрального продвижения усталостной трещины в литой детали тележки грузового вагона, а также перехода её в предельное состояние по циклической вязкости разрушения установлены лично автором.

Лично автором проведена апробация результатов исследований, подготовка основных публикаций по выполненной работе, внедрение полученных результатов.

Методология и 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 деталей выполнялась методом конечных элементов (МКЭ). Обработка результатов испытаний на усталость проводилась методами математической статистики. Коэффициенты интенсивности напряжений в вершине усталостной трещины подсчитывались методами механики разрушений. Механические свойства литых сталей при растяжении определялись методом полных диаграмм деформирования.

Положения, выносимые на защиту.

1 Единая теория о негативных изменениях механических свойств сталей, устанавливающая закономерные связи негативных 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 нагрузений.

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.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений и выводов диссертации подтверждается прямым сопоставлением результатов моделирования с экспериментальными данными, корректным использованием методов континуальной механики и механики разрушений, тензометрии и конечных элементов. Полученные результаты и сделанные выводы сопоставлялись со статистически надежными результатами исследований отечественных ученых в области прочности литых деталей тележек и конструкционных сталей, а также с данными эксплуатации. Достоверность выдвинутой теории о негативных изменениях механических свойств сталей подтверждается в экспериментах литых боковых рам и надрессорных балок, а также с образцами, вырезанными из деталей, проведенных на метрологически обеспеченных испытательных машинах.

Обоснованность теоретических результатов диссертационных исследований базируется на общепризнанных законах механики деформируемого твердого тела, механики разрушений, теории упругости, теоретической механики, методах математического анализа и статистики. Обоснованность экспериментальных результатов основана на сопоставлении с общемировыми представлениями о проведении экспериментов, с отечественными стандартными правилами проведения экспериментальных исследований и методиками в вагоностроении, эмпирическими данными других ученых.

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 микронеоднородных 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.);
- 9th International conference “Railway Bogies and Running Gears” (Hungary, Budapest, 2013);
- международной научно-практической конференции «Железнодорожный транспорт и технологии» (RTT-2021, г. Екатеринбург, УрГУПС);
- международной научно-практической конференции «Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление» (TLC2M-2022, г. Екатеринбург, УрГУПС).

Глава 1 Состояние вопроса и обоснование поставленных задач

В 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 надрессорных балок и боковых рам литых конструкций, приведенных в отечественных и зарубежных нормативных документах. Сделано сравнение с методами решения проблемы сопротивления усталости стальных несущих конструкций в других отраслях. По результатам анализа работ сформулированы выводы, задачи исследований с указанием их направленности.

1.1 Сопротивление усталости конструкционной стали 20

Существенный вклад в науку о сопротивлении усталости конструкционных однородных материалов и несущих элементов 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, В.И. Миронов, Ю.Н. Работнов, А.В. Романов, С.В. Серенсен, Л.А. Сосновский, В.Ф. Терентьев, В.Т. Троценко, Я.Б. Фридман, А.С. Шестериков, С.С. Щербаков, а также зарубежные ученые Дж.Ф. Белл, В. Бэкофен, В. Вейбулл, 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.

Понятие *усталости* металла установлено в [35], как процесса постепенного накопления повреждений в металле под действием переменных напряжений, который приводит к изменению механических свойств, зарождению трещин, их распространению и разрушению. *Усталостным повреждением* при многоциклового

усталости называется необратимое изменение механических свойств металла объекта под действием переменных напряжений в упругой области [35] с самых первых циклов. Максимальное напряжение цикла, при котором усталостного разрушения металла объекта не происходит, вплоть до заранее установленного числа циклов испытаний (*базы испытаний*), является *пределом выносливости* материала [35]. Понятия *циклической* и *усталостной долговечности* [35] различаются формами внешних воздействий на объект испытаний, продолжительность которых может приводить к его разрушению или к образованию и росту усталостной трещины – периодическая или случайная (блочная), соответственно.

С введением ГОСТ 27.002-2015 [39] термин «*живучесть*» не применяется в области надежности. Поэтому, для описания свойства литой детали противостоять развитию критических отказов, или появлению излома, применяется термин «*опасное состояние*» – состояние, в котором возникает и развивается усталостная трещина до предельных размеров, что приводит к излому в эксплуатации [39, 40, 41]. Длительность нахождения литой детали тележки в опасном состоянии не входит в назначенный ресурс.

Особенностью усталостного разрушения является то, что изначально пластичный металл становится хрупким под действием многоцикловых переменных напряжений, которые не превышают 0,75 предела текучести для вагонных сталей [42]. С точки зрения структуры металла, под *охрупчиванием* [27, 31, 161, 162, 247] понимается постепенное увеличение доли хрупкой составляющей с одновременным снижением вязкой составляющей в изломе (рисунок 1.4) [41] детали под внешним воздействием многократных переменных нагрузок. Микрорельеф поверхности усталостного излома стали 20ГЛ приведен на рисунке 1.5 [7].

Природу усталости связывают с движением дислокаций и их плотностью, скопление которых приводит к зарождению усталостной трещины в металле [64, 76, 174, 230, 234 – 236, 248, 249, 254, 257 – 259]. На поверхности деталей усталость металла проходит



Рисунок 1.4 – Виды структуры сталей класса 20Л в состоянии поставки (слева – с преобладанием вязкой составляющей в изломе, справа – с преимущественно хрупкой составляющей в изломе), увеличение $\times 3$

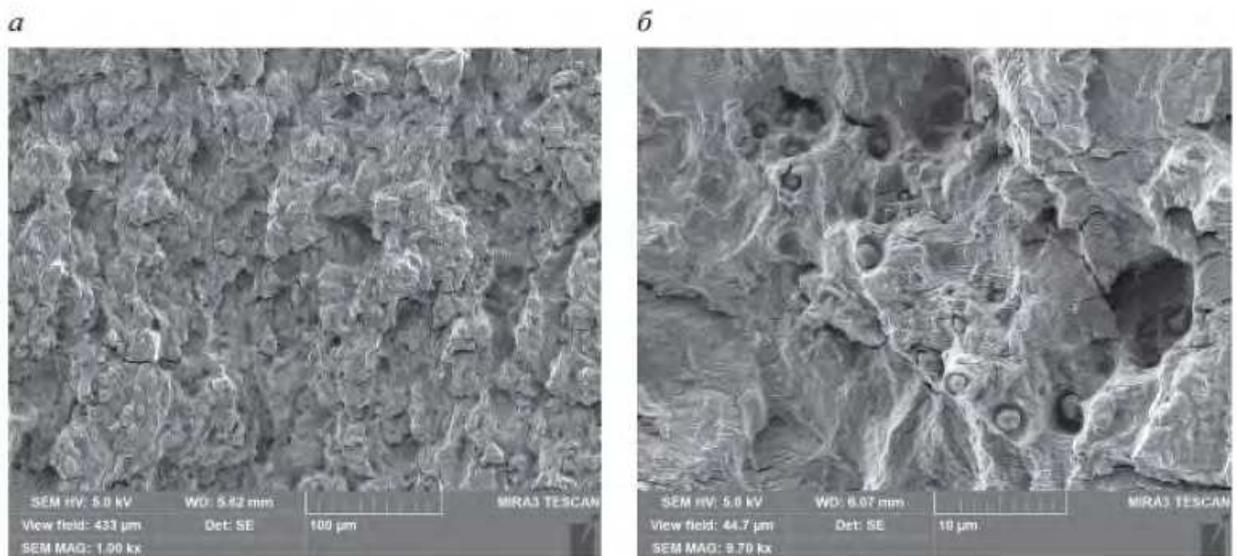


Рисунок 1.5 – Микрорельеф поверхности усталостного излома стали 20ГЛ при увеличении $\times 1000$ (а) и $\times 9700$ (б)

интенсивнее, в виду наличия концентраторов напряжений от микронеровностей поверхности, линий сдвига в отдельных зернах [76], повышенных напряжений при изгибе, наличия обезуглероженного слоя после термообработки в газовых печах.

В экспериментах на стандартных десятикратных цилиндрических образцах из стали 20ГЛ при одноосном циклическом нагружении в упругой области, проводимых по ГОСТ 25.502-79 [37] совместно с Мироновым В.И., установлено, что усталостное разрушение наступало гораздо позже, после удаления поврежденных поверхностных слоев толщиной $t = \sum t_i$. Образцы вырезались из надрессорной балки литой конструкции для тележки грузового вагона, соответствующей по

химическому составу и механическим свойствам требованиям [41]. Три образца диаметром 10 мм, с шероховатостью поверхности Ra 2,5 согласно [33], и микротвердостью 196 HV (рисунок 1.6), подвергались циклическим испытаниям на поверенной машине ГРМ-2А в лаборатории Уралвагонзавода, продольной нагрузкой при мягком нагружении и постоянном среднем напряжении цикла $\sigma_m = 160$ МПа, на уровне максимальных напряжений цикла $\sigma_{max} = 260$ МПа. Средняя долговечность составила $N_1 = 88$ тыс. циклов.

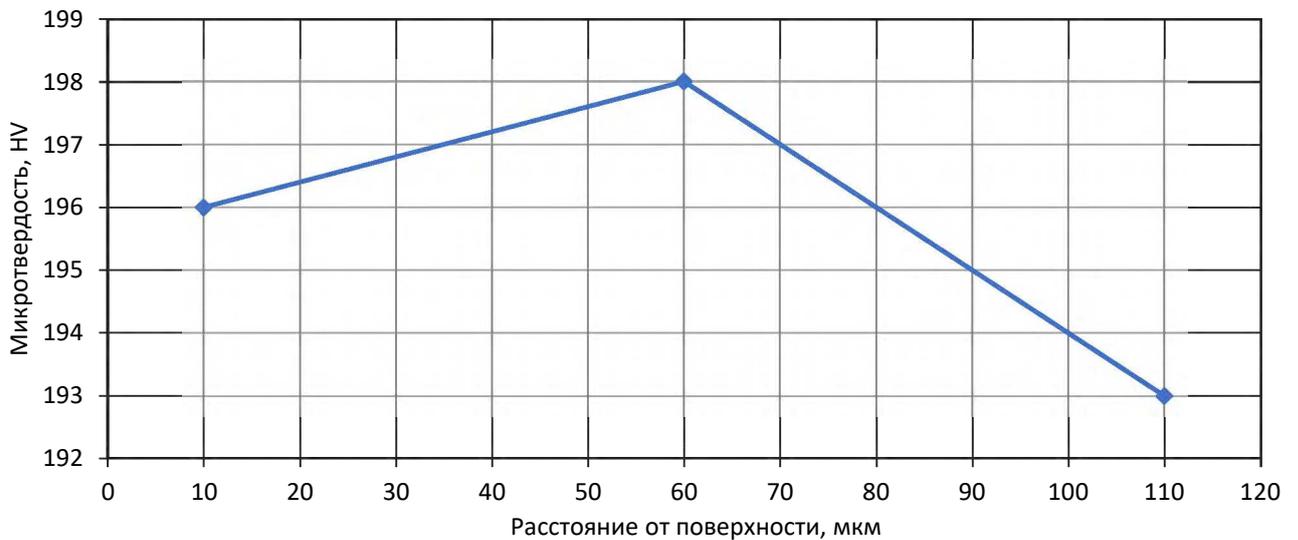


Рисунок 1.6 – Распределение микротвердости поверхностного слоя стандартного образца из стали 20ГЛ в состоянии поставки

Затем, новый образец нагружался при неизменных параметрах цикла до $n_1 = 80$ тыс. циклов, на токарном станке снимался поврежденный поверхностный слой толщиной $t_1 = 0,5$ мм, и снова испытывался до разрушения. Долговечность четвертого образца после первой обточки составила $N_4 = 188$ тыс. циклов. Методика испытаний пятого образца выполнялась в порядке: периодическое нагружение до $n_1 = 80$ тыс. циклов; обточка на $t_1 = 0,5$ мм; периодическое нагружение до $n_2 = 80$ тыс. циклов; обточка на $t_2 = 0,5$ мм; получение долговечности $N_5 = 554$ тыс. циклов. Всего сделали две обточки стандартного десятикратного образца с уменьшением его диаметра до 8 мм. Третью обточку не выполняли, т.к. диаметр образца менее 8 мм при длине рабочей части 100 мм приводил к круговому изгибу при тчении, что

искажало бы чистоту экспериментов. Циклическая долговечность стали 20ГЛ, после двухкратного снятия поврежденного поверхностного слоя с образцов, оказалась выше в 6,3 раза, чем без удаления (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Изменение долговечности стали 20ГЛ после удаления поврежденного слоя толщиной 0,5 мм

Номер образца	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , МПа	Количество циклов, 10^3					
		наработки	до излома	наработки	до излома	наработки	до излома
		без обточки		после первой обточки		после второй обточки	
1,2,3	260	-	88,0	-	-	-	-
4	260	80,0	-	-	188,0	-	-
5	260	80,0	-	80,0	-	-	554,0

Выводом из проведенных экспериментов является то, что охрупчивание поверхностных слоев при одноосном циклическом деформировании в упругой зоне происходит значительно интенсивнее, чем в подповерхностных и в основном металле. Это частично объясняет причину появления усталостных трещин на поверхности литых несущих деталей тележек грузовых вагонов, прошедших термообработку, и имеющих шероховатость поверхностей выше Rz 320 в зонах, подверженных усталостному разрушению. Полученное обоснование преждевременного охрупчивания поверхностных слоев относительно подповерхностных для стали 20ГЛ, могут быть реализованы в способах их восстановления с целью продления сроков службы деталей вагонов.

Интерес представляют металловедческие исследования образцов из ковanej стали 20 [32], проведенные Кирилловой Н.Ю. в работе [74]. Она изучила микроструктуру и химический состав наружного поверхностного слоя кубовой части реакционной колонны нефтехимического аппарата, работающей под давлением 8,0 МПа. Микроструктурный анализ показал, что после 41 года эксплуатации колонны структура стали сохраняется феррито-перлитной [57, 58, 74] (рисунок 1.7). Химический состав стали 20 соответствовал требованиям ГОСТ 1050-2013 [32].

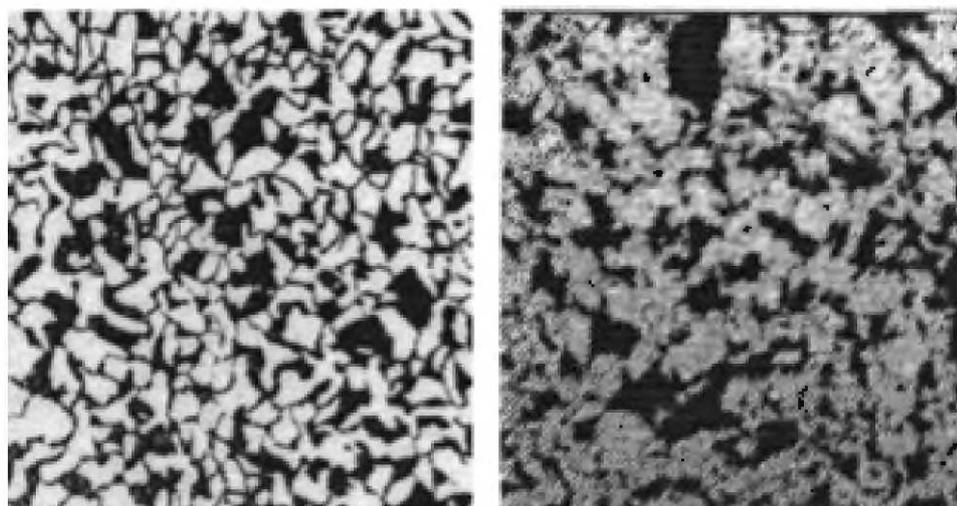


Рисунок 1.7 – Микроструктура наружного поверхностного слоя ковanej стали 20 нефтехимического аппарата при увеличении $\times 50$ (слева – в состоянии поставки, справа – после 41 года эксплуатации)

Однако, содержание марганца (Mn) в феррите, и кремния (Si) в перлите, превысило допустимые в ГОСТ 1050-2013 значения. Повышенное содержание Mn и Si увеличивает прочность поверхностного слоя и снижает пластичность [30, 156], т.е. охрупчивает его. Исследования Кирилловой Н.Ю. объясняют на микроструктурном уровне отрицательное влияние поверхностных слоев на усталостную и циклическую прочность деталей. Данные результаты по изменению химического состава и охрупчивания поверхностных слоев деталей из стали 20 могут быть нейтрализованы методами их восстановления в перспективе, в т.ч. литых деталей тележек грузовых вагонов, для продления срока службы, не прибегая к более дорогостоящим маркам сталей.

Влияние черновой поверхности с литейной коркой по сравнению с гладкой поверхностью, при проектировании литых несущих деталей тележек грузовых вагонов, учитывается коэффициентом $K_{\text{пов}} = 0,80$ [144], либо в составе общего коэффициента снижения предела выносливости детали $K_{\sigma} = 1,0 \dots 1,60$ [42]. В экспериментах на гладких образцах из стали 20ГЛ со снятием поврежденного слоя, получен средний коэффициент влияния поверхности $K_{\text{пов}} = 0,60$.

Характерная геометрия боковых рам и надрессорных балок тележек в прочностных расчетах задается масштабным коэффициентом K_M , значение которого для

размеров менее 50 мм не учитывается [42, 144]. Результаты экспериментов для сталей класса 20Л [284] показали, что с уменьшением диаметра d поперечного сечения цилиндрического образца предел текучести и временное сопротивление увеличиваются (рисунок 1.8). На пятикратных образцах диаметром $d_1 = 10$ мм, вырезанных

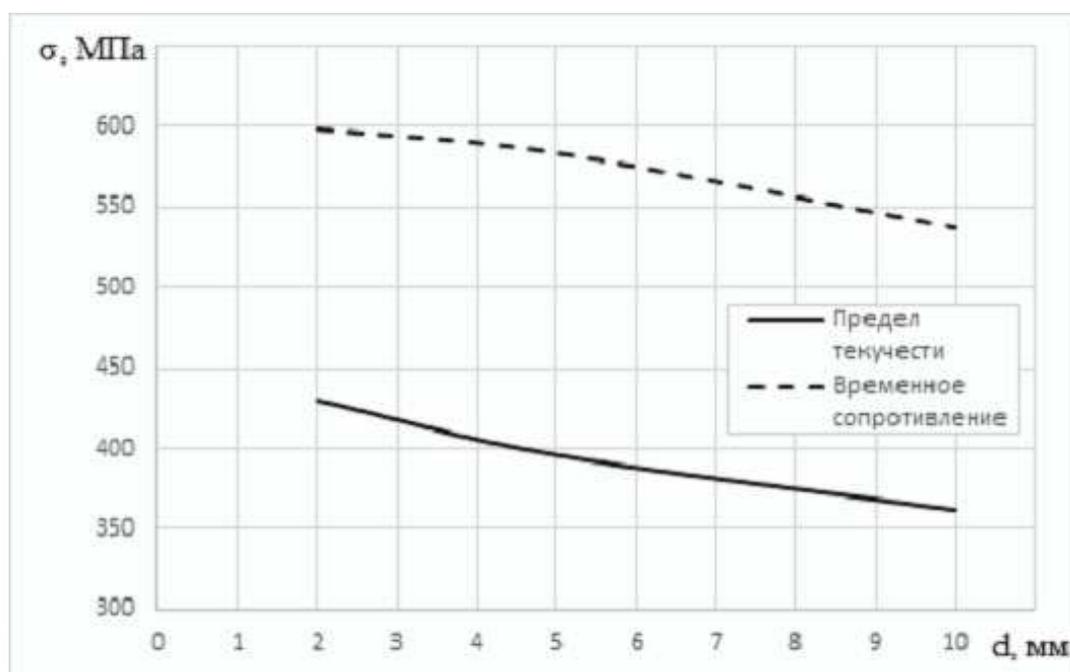


Рисунок 1.8 – Влияние диаметра образца на величину предела текучести и временного сопротивления при статическом растяжении

из пробных брусков для семнадцати плавок стали 20ГЛ, определяли механические свойства. То же самое повторили на пятикратных образцах диаметром $d_2 = 5$ мм, но вырезанных из боковых рам трех разных плавок, в состоянии поставки. Механические свойства однократных образцов диаметром $d_3 = 2$ мм проверяли по оригинальной методике [130, 166, 283, 284] методом полных диаграмм растяжения (ПДР) [118, 127, 166, 267, 276] на образцах, вырезанных из пробных брусков плавок стали 20ГЛ. Результаты полученных усредненных значений предела текучести и временного сопротивления в зависимости от диаметра поперечного сечения образца для стали 20ГЛ показаны на рисунке 1.8.

Эффективный масштабный коэффициент составил $K_M = 0,91$, вместо нормативных 1,0 [144]. Предел текучести и временное сопротивление стали 20ГЛ в детали

оказались выше на 8,5%, чем в пробном бруске. Но в разделе 5 ГОСТ 32400-2013 [41] наоборот – допускается 20% снижение механических свойств в детали относительно пробных брусков. Разработчики нормативных документов [41, 153, 154] объясняют наличие такого требования на протяжении уже 20 лет идентичностью американским стандартам, и разностью условий кристаллизации жидкого металла в отливке и в пробных брусках.

Однако, при проектировании конструкторы руководствуются требованиями раздела 6 ГОСТ 33211-2014 [42] и раздела III «Нормы для расчета на прочность и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» (далее – «Нормы») [144], которые предусматривают коэффициент понижения $\eta_1 = 0,85$ предела текучести σ_T в расчетах допускаемых напряжений при оценке прочности литых несущих деталей тележек вагонов.

Например, в наиболее неблагоприятной ситуации, разработчики обеспечили прочность литой боковой рамы тележки на уровне $\sigma_э = [\sigma] = 0,85 \cdot \sigma_T = 0,85 \cdot 300 = 255$ МПа, где $\sigma_э$ – эквивалентное напряжение [42]. Производитель сдал боковые рамы отделу технического контроля со значением предела текучести детали $\sigma_{Td} = 0,8\sigma_T = 0,8 \cdot 300 = 240$ МПа, по результатам испытаний образцов, вырезанных из детали [41]. Значит, фактическая прочность боковых рам такой плавки не будет соответствовать расчетной прочности, т.к. напряжения от эксплуатационных нагрузок в них будут выше допускаемых на 15 МПа.

На производствах не редки случаи, когда механические свойства в пробных брусках ниже нормативных [41]. Тогда определяют механические свойства на образцах из детали, которые бывают на минимально допустимом уровне, с учетом разрешенного в [41] понижения на 20%. Согласно проведенным опросам проектировщиков литых боковых рам и надрессорных балок, вероятное двадцатипроцентное снижение механических свойств относительно минимально установленных в ГОСТ 32400-2013 величин, не учитывается в прочностных расчетах. Выявленное разногласие в нормативных документах [41, 42] по уровню допускаемых напряжений и фактических значений механических свойств в детали может приводить к преждевременным изломам боковых рам и надрессорных балок в эксплуатации.

Некоторую погрешность накладывают и разные диаметры образцов для определения механических свойств из детали и пробных брусков.

Приближенное среднее значение эффективного коэффициента концентрации напряжений $\bar{K}_\sigma = 1,8$ для основного металла с литой поверхностью, вблизи галтелей радиусом от 50 до 100 мм на литых боковых рамах тележек, выбирается по Нормам [144]. Численные эксперименты на типовом элементе конструкции в виде пластины с отверстием [279], при мягком нагружении на границе, с учетом негативного изменения модуля упругости и коэффициента поперечной деформации, позволили установить $K_\sigma = 2,48$ [284]. Выражение из Норм [144] дает близкое значение:

$$\bar{K}_\sigma = 1 + q(\alpha_\sigma - 1), \quad (1.1)$$

где $q = 0,7$ – коэффициент чувствительности стали 20 к концентрации напряжений;

$\alpha_\sigma = 3$ – теоретический коэффициент концентрации напряжений в боковой раме.

Коэффициент, рассчитанный по формуле (1.1), равен $\bar{K}_\sigma = 2,40$.

Коэффициенты поверхности $K_{\text{пов}}$, масштаба K_M , и концентрации напряжений \bar{K}_σ связаны выражением для определения среднего значения общего коэффициента понижения предела выносливости литой детали относительно предела выносливости гладкого стандартного образца [144]:

$$(\bar{K}_\sigma)_K = \bar{K}_\sigma \frac{K_H \cdot K_y}{K_M \cdot K_{\text{пов}}}, \quad (1.2)$$

где $K_H = 1,2$ – коэффициент неоднородности литой стали [144];

$K_y = 0,9$ – коэффициент влияния упрочняющей поверхности при обдувке дробью поверхности литых деталей [144].

Коэффициент, рассчитанный по формуле (1.2), равен $(\bar{K}_\sigma)_K = 2,43$.

Средний предел выносливости литой детали тележки по амплитуде при базовом числе циклов $N_0 = 10^7$ до 01.07.2016 г. рассчитывали по формуле из [144]:

$$\bar{\sigma}_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{(\bar{K}_\sigma)_K}, \quad (1.3)$$

где $\bar{\sigma}_{-1} = 220$ МПа – средний предел выносливости гладкого образца из стали 20ГЛ, определенный при симметричном изгибе на базе $N_0 = 10^7$ [144].

В ГОСТ 33211-2014 [42] предел выносливости по амплитуде находится из выражения:

$$\sigma_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_M}{K_\sigma}, \quad (1.4)$$

где $\bar{\sigma}_M = 47$ МПа [42] – предел выносливости некоторой базовой стали.

Значения пределов выносливости, например для литой боковой рамы тележки грузового вагона из стали 20ГЛ в зоне внутреннего радиуса проема для колесных пар, или надрессорной балки по нижнему поясу, вычисленные по формулам (1.3) и (1.4), с учетом рекомендаций нормативных документов [42, 144], будут разными: $\bar{\sigma}_{a,N} = 91$ МПа и $\sigma_{a,N} = 47$ МПа. В работе [284] предел выносливости по напряжению в нижнем поясе надрессорной балки составил $\sigma_{r_d} = 139$ МПа для тележки модели 18-194, а среднее напряжение от статической нагрузки номинально загруженного вагона $\sigma_m = 66$ МПа [284]. Тогда, опираясь на исследования в работе [284], предел выносливости по амплитуде $\sigma_{a,N} = \sigma_{r_d} - \sigma_m = 73$ МПа. Сравнивая данное значение с результатами вычислений по формулам (1.3), (1.4), можно сделать вывод о достаточно приближенных оценках пределов выносливости литых деталей по амплитуде согласно ГОСТ 33211-2014 [42] и Норм [144].

В формулах (1.3), (1.4) под *пределом выносливости по амплитуде напряжений* понимается амплитуда наибольшего растягивающего напряжения цикла на поверхности боковой рамы или балки надрессорной, при которой появление усталостной трещины длиной более 10 мм не происходит, вплоть до контрольного числа циклов

испытаний [44, 45], либо до базового числа циклов [43]. Это сочетается с правилами ориентации тензорезисторов при проведении поездных и ресурсных испытаний по [44, 45], а также испытаний на сопротивление усталости согласно ГОСТ 33788-2016 [43]. Данная расшифровка термина «предела выносливости по амплитуде напряжений» уточняет определяющее напряженное состояние на поверхности для прогнозирования усталостной долговечности боковых рам и надрессорных балок, изготовленных по ГОСТ 32400-2013 [41] – одноосное, т.к. их усталостное разрушение начинается с поверхности .

Анализ методик расчета сопротивления усталости [42], проведения поездных и ресурсных испытаний [44, 45], испытаний на сопротивление усталости [43] боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов выявил погрешность в определении напряжений. В расчетах по ГОСТ 33211-2014 [42] прочность литых боковых рам и надрессорных балок при I (сочетания Ia, Ib, Iv) и III расчетных режимах оценивают по критерию Мизеса [42]:

$$\sigma_3 = \sqrt{0,5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (1.5)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, МПа.

Полученные из выражения (1.5) эквивалентные напряжения сравнивают с допускаемыми $[\sigma]_I$ и $[\sigma]_{III}$ для расчетных режимов I и III соответственно [42]:

$$\sigma_3^I \leq [\sigma]_I = \eta_1 \cdot R_B, \quad (1.6)$$

$$\sigma_3^{III} \leq [\sigma]_{III} = \eta_4 \cdot R_B, \quad (1.7)$$

где $\eta_1 = 0,85$ и $\eta_4 = 0,5 \dots 0,65$ – понижающие коэффициенты;

$R_B = 300$ МПа – минимальное значение предела текучести (условного предела текучести) стали 20ГЛ по [41].

Таким образом, прочность (I расчетный режим, сочетания Ia, Ib, Iv) и сопротивление усталости (III расчетный режим) литых деталей считается обеспеченной и соответствующей требованиям [42], если критерии (1.6), (1.7) выполняются. После

изготовления опытной партии, литым деталям проводятся испытания на сопротивление усталости [43], поездные и ресурсные испытания [44, 45], кроме прочих [152, 201, 202]. В этих трех видах испытаний, критерием положительного результата считается значение коэффициента запаса сопротивления усталости, который должен быть не менее 1,80 для боковых рам и надрессорных балок [42], рассчитанного от *предела выносливости по амплитуде напряжений* – наибольшего растягивающего напряжения цикла из главных его компонент [43, 44, 45, 231].

Значение наибольшей компоненты главного напряжения будет всегда выше эквивалентного напряжения, установленное выражением (1.5). Поэтому, знак равенства в формуле (1.7) при проектировании литых несущих деталей тележек грузовых вагонов по [42], может привести к их несоответствию в испытаниях на сопротивление усталости по [43], в поездных и ресурсных испытаниях по [44, 45].

Расхождение расчетных и экспериментальных прогнозов прочности и сопротивления усталости деталей усилится, если учесть разрешенное в [41] двадцатипроцентное снижение предела текучести стали R_b в натурной детали, о чем подробно сообщалось выше.

В работах [110, 269] выявлено повышение предела выносливости гладких образцов и надрессорных балок из стали класса 20Л с понижением температуры до минус 40°C и ниже. Результаты исследований в [50] указывают на снижение предела выносливости гладкого образца из стали 20, после хранения в течение 15 лет при комнатной температуре. Однако, предел текучести и временное сопротивление стали 20 повышаются даже после 50 лет эксплуатации [5], а относительное удлинение стали 20 снижается [50]. Северинова Т.П. [216] и Костенко Н.А. [87] выявили аналогичный тренд на сталях 20Л и 20ГФЛ после 13 и 25 лет эксплуатации литых боковых рам, надрессорных балок, автосцепного устройства.

1.2 Усталостная долговечность боковых рам и надрессорных балок литой конструкции

Основы современных методов изучения сопротивления усталости, надежности и трещиностойкости ходовых частей железнодорожного подвижного состава изложены в работах отечественных ученых: 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, Д.П. Кононова, 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, А.Л. Протопопова, 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. Велера, А. Гриффитса, Дж. Ирвина, Е.О. Орована, И.Ф. Пастухова, и других ученых.

В работах [3, 4, 9, 28, 55, 81, 82, 83, 85, 88, 145, 163, 179 – 181, 182, 205, 206, 208 – 210, 218, 220, 225, 233, 245, 260] подчеркивается отрицательное влияние внутренних литейных дефектов в наиболее нагруженных сечениях на сопротивление усталости боковых рам и надрессорных балок, описываются особенности технологий получения литых деталей [28, 55, 82, 289, 297], пути минимизации дефектов литья и приемы по снижению вероятности их появления, устанавливаются предельные размеры технологических дефектов после изготовления и эксплуатационных трещин, уточняется нагруженность несущих деталей тележек грузовых вагонов [42, 43, 44, 45, 52 – 54, 68, 117, 118, 137, 138, 149, 150, 151, 157, 158, 159, 181, 183, 184, 214, 222, 224, 228, 232, 245, 246, 270, 271, 290, 293, 294, 296, 299, 301, 304, 311] и обосновывается необходимость реализации эксплуатационного спектра в лабораторных испытаниях натуральных деталей. Приводятся способы и результаты теоретических расчетов пробега грузовых вагонов, ограничением которого является ресурс боковой рамы тележки.

Прогнозы сопротивления усталости строятся на основе модели поврежденности Пальмгрена-Майнера [18, 109, 144, 147, 160, 164, 165, 177, 229, 272, 273, 300],

что накладывает существенные погрешности, в сравнении с реальными пробегами тележек грузовых вагонов, даже с использованием поправочных эмпирических коэффициентов. Живучесть надрессорных балок и боковых рам оценивается на основе методов линейной механики разрушения по Гриффитсу [295], по критериям коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) [15, 80, 88, 89, 93, 107, 143, 147, 191 – 196], либо в натурных испытаниях [44, 45, 49, 139, 149, 150, 167, 177, 183, 185, 223, 226, 227, 246, 248, 274, 292, 300, 303, 304, 306, 310].

Требования к макродефектам, их разновидностям, геометрическим размерам, местам расположения, способам исправления и обнаружения в литых боковых рамах и надрессорных балках приведены в [41]. Данные требования устанавливаются после анализа изломов литых деталей в эксплуатации, в стендовых испытаниях натурных деталей, в лабораторных испытаниях образцов, а также исходя из технических достижений самых последних технологий формовки, разрабатываемых с помощью компьютерного моделирования [28]. Однако, нормативные методики оценки прочности литых деталей не позволяют изучить влияние литейных дефектов на сопротивление усталости [25] при проектировании.

В работах [168, 169, 210, 211, 218, 224, 275, 278, 286, 310] сделана попытка обоснования размеров и мест расположения допустимых внутренних литейных дефектов в несущих деталях тележек грузовых вагонов. Особенности литейных и формовочных процессов, множество факторов, влияющих на образование дефектов, сезонный характер – не позволяют получить боковую раму и надрессорную балку без дефектов в зонах повышенного риска отказов. Кроме того, скопление микроскопических несплошностей металла, неметаллических включений (рисунок 1.9) [7], выходящих на поверхность внутреннего радиуса проема для колесных пар, являются трудно обнаруживаемыми, и становятся очагами образования усталостной трещины в эксплуатации.

Состав неметаллических включений изучается методом микрорентгеноспектрального анализа [7]. Неметаллические включения, выстроенные в цепочку, снижают значения ударной вязкости КС с V-образным надрезом по ГОСТ 9454-78 [47]

при минус 60°C, но не влияют на значения механических свойств стали при растяжении образцов по ГОСТ 1497-84 [33].

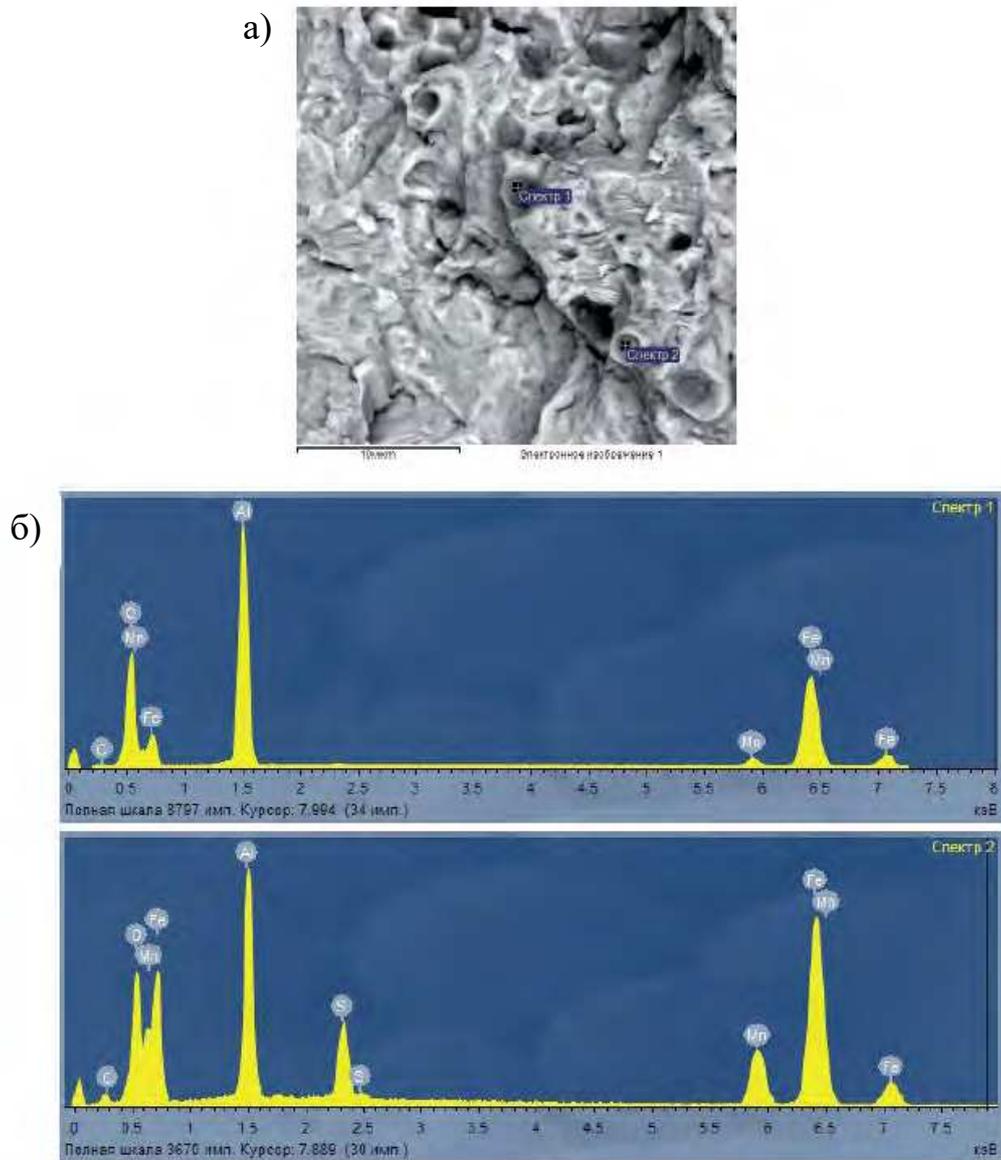


Рисунок 1.9 – Неметаллические включения сферообразной формы на поверхности усталостного излома стали 20ГЛ (а) и их состав (б)

Большой вклад в снижение усталостной долговечности несущих деталей тележек грузовых вагонов вносят макродефекты литейного происхождения [204, 210]. Анализ данных по причинам отказов литых боковых рам тележек грузовых вагонов, сведенных в [3, 4, 9, 82, 83, 85], показывает, что с 2006 по 2018 г. появилось 182 излома после первых 10 лет эксплуатации [204]. Все изломы произошли в виду наличия литейных дефектов в зонах внутренних радиусов проемов для колесных

пар. В шестидесяти шести обследованных изломах литых боковых рам после стендовых циклических испытаний в лаборатории [34, 210] установлено, что самыми массовыми литейными дефектами являются: газовая раковина, песчаная раковина, усадочная раковина, неметаллическое включение, рассеянная газовая пористость (рисунок 1.10). Из рисунка 1.10 следует, что в половине изломов

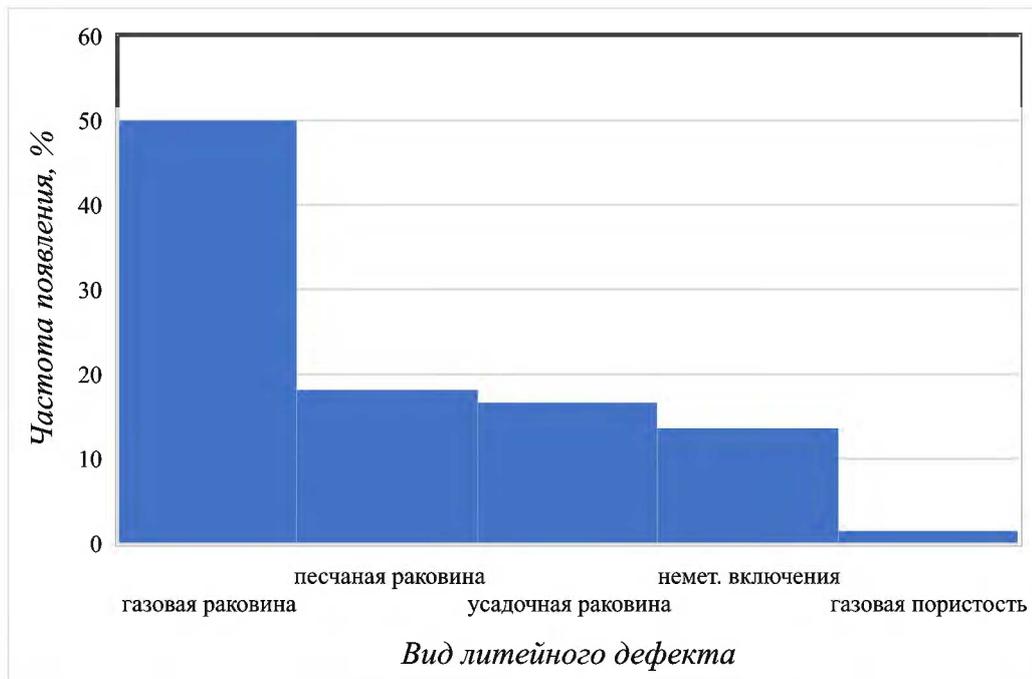
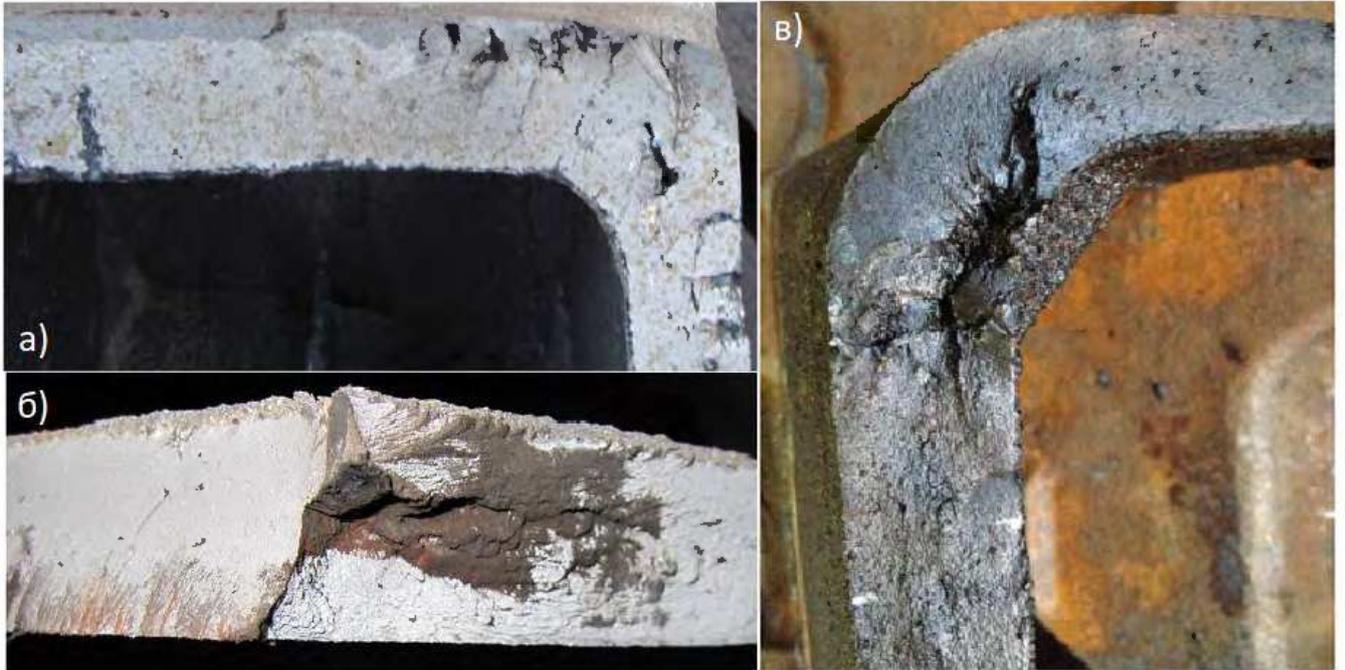


Рисунок 1.10 – Частота появления литейных дефектов в изломах боковых рам после стендовых испытаний

присутствовали газовые раковины, которые являлись очагами зарождения усталостных трещин (рисунок 1.11) наряду с другими дефектами. Разработчики [41] изучили изломы 72 литых боковых рам, произошедших на железных дорогах с 2006 по 2011 г., и обнаружили, что усадочные и газовые раковины [26] не влияют на снижение усталостной долговечности. Это заключение было приведено в «Сводке отзывов на первую редакцию проекта» во время разработки ГОСТ 32400-2013 [41]. Хотя, сведения, приведенные в альбоме-справочнике изломов и дефектов боковых рам тележек грузовых вагонов [3] и на рисунке 1.10 говорят об обратном.

Несмотря на обширные данные по литейным дефектам в литых деталях тележек грузовых вагонов, они не учитываются в нормативных документах по расчетам

сроков службы и усталостной долговечности [42, 144]. Положительным сигналом к развитию расчетных методик является установленное в разделе 5 [46] требование по оценке сопротивления усталости боковой рамы и надрессорной балки литых конструкций с учетом допустимых литейных дефектов.



а - газовые раковины, *б* – неметаллические включения, *в* – усадочная раковина

Рисунок 1.11 – Литейные дефекты в изломах литых деталей тележек грузовых вагонов, как очаги зарождения усталостных трещин в стендовых испытаниях

Линейная гипотеза суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера в виде:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = a, \quad (1.8)$$

где n_i – число циклов напряжений i -го уровня;

N_i – циклическая долговечность при i -ом уровне напряжений;

$a = 1$ – поврежденность детали вагона, рекомендована в Нормах [144] для суммирования повреждающих динамических напряжений.

В вагоностроении гипотеза Пальмгрена-Майнера широко распространена. Однако, мера поврежденности (1.8) делает независимым положение циклов в общем

спектре нагружения детали, не учитывает негативные изменения механических свойств стали. Существуют и другие гипотезы линейного и нелинейного суммирования повреждений материалов, зависящие от механических свойств [12 – 14, 75, 76, 77, 234, 238, 253, 255]. К сожалению, применение таких гипотез часто дает ошибки в прогнозах ресурса, т.к. сумма повреждений a не всегда равна единице, как в теории, а лежит в интервале от 0,2 до 14 [234]. С целью устранения причин расхождений в гипотезу (1.8) вводят дополнительные эмпирические коэффициенты [109]. Например, в работе Махутова Н.А. с соавторами [109], выполнен расчет усталостной долговечности литой боковой рамы тележки грузового вагона по линейной гипотезе суммирования повреждений (1.8), содержащей дополнительный множитель:

$$\frac{N_{\text{сум}}}{N_G} = \frac{1}{n_p^m \sum (\sigma_{ai}/\sigma_{a \text{ max}})^m p_i}, \quad (1.9)$$

где $N_{\text{сум}}$ – суммарное число циклов амплитуд динамических нагрузок за срок службы 32 года;

$\sigma_{ai}/\sigma_{a \text{ max}}$ – относительные амплитуды напряжений ($\sigma_{a \text{ max}}$ – максимальная амплитуда напряжения в блоке нагрузок);

p_i – вероятность появления амплитуды σ_{ai} ;

m – показатель наклона кривой усталости;

n_p – коэффициент перегрузки;

N_G – базовое число циклов.

Прогнозируемый срок службы литой боковой рамы по гипотезе (1.9), с учетом исходных данных в [221], составил всего 2 года [109] при вероятности неразрушения 95%, вместо нормативных 32 лет. Северинова Т.П. в работе [217] на образцах с краевой трещиной из стали 20ГФЛ, вырезанных из надрессорных балок в состоянии поставки, выявила 30% ошибку прогноза длительности роста усталостной трещины по линейной гипотезе суммирования повреждений (1.8), в сравнении с реальными показателями. Трещина развивалась дольше в образце с краевой

трещиной. Ученые продолжают изучать причины отклонений прогнозов ресурса деталей машиностроения, совершенствовать линейные и нелинейные гипотезы суммирования повреждений, что говорит об актуальности исследований проблем кинетики усталостных процессов для повышения достоверности прогнозов усталостной долговечности.

Требование надежности в разделе 4 [41] по отсутствию усталостных трещин в литых боковых рамах и надрессорных балках тележек до очередного планового ремонта грузового вагона подразумевают наличие методик испытаний и расчета длительности опасного состояния, которое протекает от появления усталостной трещины в отливке до ее излома. Опасное состояние не входит в назначенный ресурс. Стандартизованных расчетных методик по изучению поведения боковой рамы и надрессорной балки в опасном состоянии, определению километров пробега вагона при наличии усталостных трещин в литых несущих деталях не существует. В этой связи многие ученые исследуют деградационные отказы боковых рам методами линейной механики разрушения [38, 59, 212], в которых применяется модель поврежденности тела, предложенная Гриффитсом [295]. Ее суть заключается в предположении наличия хотя бы одной остроконечной трещины в бездефектной среде. Определяющим долговечность тела фактором является кинетика развития данной исходной трещины. Длина трещины l служит мерой поврежденности тела, связанной с его долговечностью [234]:

$$\omega_l = l. \quad (1.10)$$

Анализируя представления о поврежденности и долговечности тел Пальмгрена-Майнера (1.8) и Гриффитса (1.10) можно увидеть, что они не имеют ничего общего. На практике это выражается в разных подходах к расчету срока службы до появления видимой трещины длиной от 10 до 50 мм на поверхности литых деталей [43, 44, 45, 265], и к оценке длительности нахождения детали в опасном состоянии [41], т.е. стадии развития усталостной трещины до излома. В работах [204, 213, 284] проведены расчеты усталостной долговечности боковой рамы и надрессорной балки

тележки грузового вагона с учетом усталостной трещины методами континуальной механики поврежденности и линейной механики разрушения. Причем, в [204] одновременно использованы два метода, а в [284] подсчет долговечности ведется с единых математических представлений о поврежденности материала – континуальной механики поврежденности. Полученные срок службы 30 лет [284], и пробег вагона 1398 тыс. км с усталостной трещиной в боковой раме [204], хорошо сочетаются с данными эксплуатации.

В натурных испытаниях несущих литых деталей тележек по [43, 44, 45] продолжительность нахождения в опасном состоянии до наступления предельного состояния – излома, фиксируется в числах циклов. Полученные лабораторные результаты не отражаются в расчетах коэффициента запаса сопротивления усталости боковой рамы и надрессорной балки по [43], или назначенного ресурса по [44, 45]. Хотя, они были бы очень полезны, например, при формировании протяженности гарантийных участков безопасного проследования грузовых поездов на железных дорогах России [1, 277]. Поскольку, часто, литые боковые рамы тележек разрушаются [3, 4] между начальным и конечным пунктами гарантийного участка, после проведения технического обслуживания с пролазкой согласно [265] на пунктах технического обслуживания (ПТО).

1.3 Негативные изменения механических свойств и циклической трещиностойкости сталей

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 [61, 62, 216, 217] изучены характеристики трещиностойкости литых сталей 20Л, 20ГЛ, 20ГТЛ, 20ГФЛ, 20ФТЛ, 25Л, методами механики разрушения, на образцах вырезанных из натуральных надрессорных балок тележек грузовых вагонов в состоянии поставки и после 13 и 25 лет эксплуатации при нерегулярном внецентренном растяжении в лабораторных условиях [216].

Приведены значения пределов текучести и временного сопротивления сталей 20Л и 20ГФЛ после 13 и 25 лет службы надрессорных балок и боковых рам тележек грузовых вагонов [216]. 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 боковых рам и надрессорных балок 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 [62].

В работах Г.В. Москвитина, С.Г. Лебединского [138, 139] 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.

В таблице 1.2 приведены значения стандартных механических свойств по [33], порогового коэффициента интенсивности напряжений K_{th} , циклической вязкости

разрушения K_{fc} литых сталей марок 20Л и 20ГФЛ в состоянии поставки, после 13 и 25 лет службы надрессорных балок и боковых рам тележек грузовых вагонов [216, 217]. Из таблицы 1.2 видно, что эксплуатация несущих деталей тележек

Таблица 1.2 – Механические свойства и циклическая трещиностойкость литых сталей

Марка стали		σ_p , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	K_{th} , МПа $\sqrt{м}$	K_{fc} , МПа $\sqrt{м}$
20Л	в состоянии поставки	220	455	22,0	35,0	8	147
	после 25 лет службы	345	425	6,5	20,0	5,3	57
20ГФЛ	в состоянии поставки	280	550	18,0	24,5	7,1	155
	после 13 лет службы	414	507	8,4	23,5	5,3	78

приводит к охрупчиванию литых сталей, которое проявляется в повышении условного предела текучести σ_p , понижении пластических свойств – относительного удлинения δ и сужения ψ , и понижении параметров циклической трещиностойкости K_{th} и K_{fc} .

Змеева В.Н. и Лебединский С.Г. изучили циклическую трещиностойкость литых сталей шести марок сталей: 20Л, 25Л, 20ГЛ, 20ФТЛ, 20ГТЛ, 20ГФЛ [62]. В общей сложности испытано около двухсот шестидесяти стандартных образцов при внецентренном растяжении с инициирующим надрезом. Результатами работы явились выводы об одинаковой закономерности скорости роста трещины от уровня КИН для всех шести марок литых сталей, и возможности построения объединенной кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) [62].

Анализируя объединенную КДУР, построенную в [62], видно, что пороговые значения K_{th} и циклическая вязкость K_{fc} для шести марок сталей близки между собой. Поэтому, данные таблицы 1.2 можно принять как среднее значение для литых сталей класса 20Л, и распространить на все марки литых сталей по ГОСТ 32400-2013 для изготовления боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых

вагонов. На рисунках 1.12 и 1.13 приведены усредненные кинетические кривые деградации параметров циклической трещиностойкости, построенные по данным таблицы 1.2 и [62, 216, 217]. Пунктирные линии на рисунках 1.12 и 1.13 обозначают прогнозы

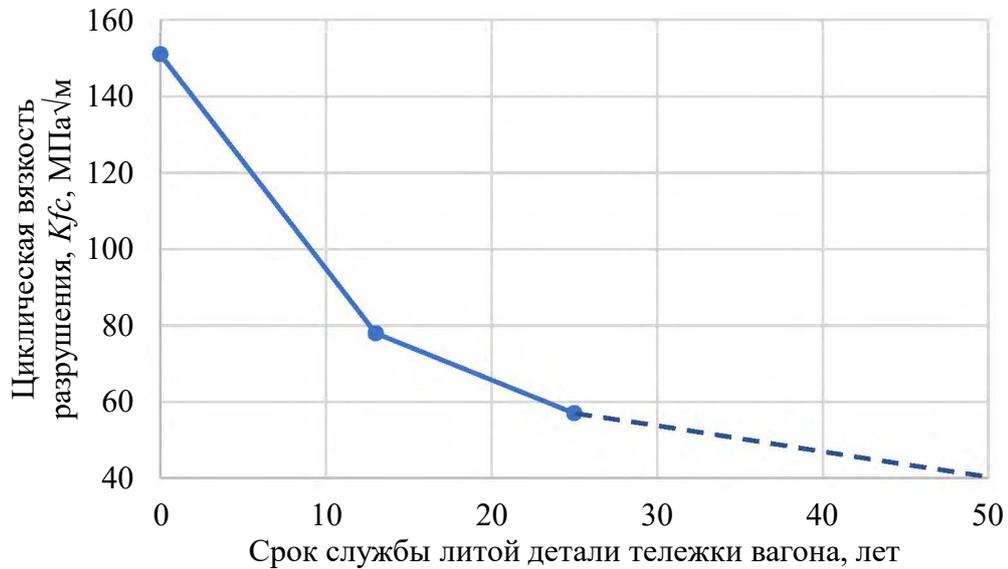


Рисунок 1.12 – Усредненная кинетическая кривая деградации циклической вязкости разрушения K_{fc} литых сталей типа 20Л

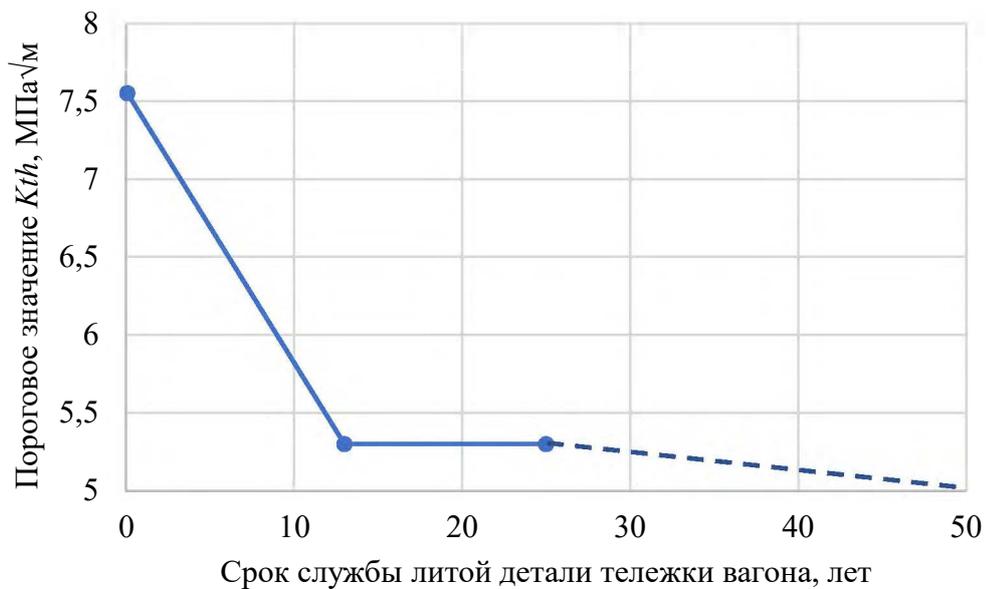


Рисунок 1.13 – Усредненная кинетическая кривая деградации порогового значения K_{th} литых сталей типа 20Л

изменения K_{th} и K_{fc} в течение срока службы боковой рамы и надрессорной балки.

Негативные изменения механических свойств после усталости сталей изучали и другие ученые. Например, в работах Прокопенко А.В. [186 – 189] отмечается снижение микротвердости легированных сталей и титанового сплава вблизи места зарождения усталостной трещины после циклического нагружения (рисунок 1.14) [187]. Данное условие образования микротрещины в металлах

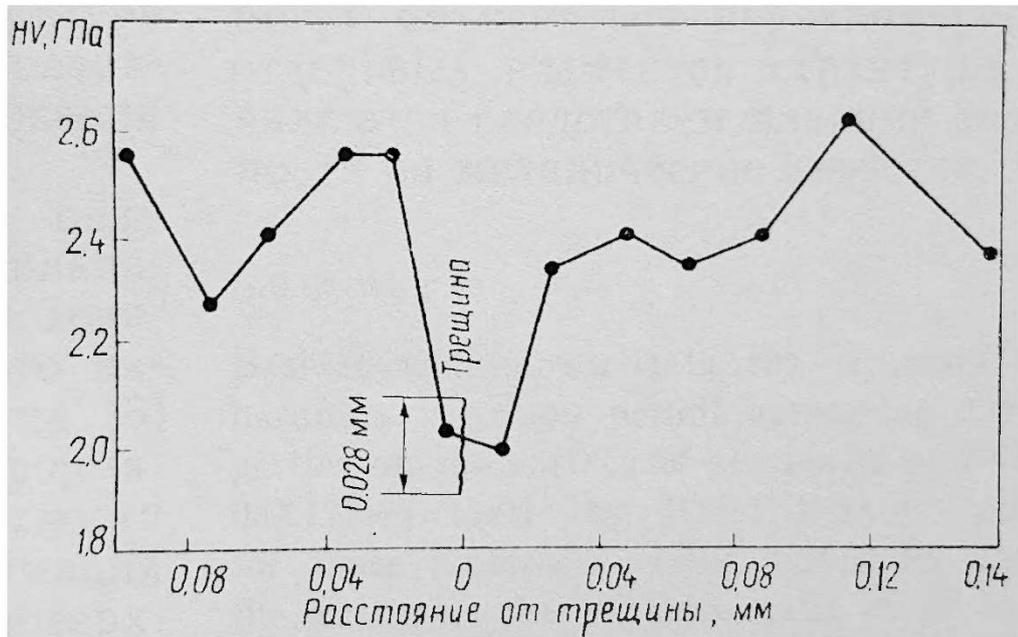


Рисунок 1.14 – Распределение микротвердости вблизи места зарождения усталостной трещины в легированной хромистой стали 20X13 при многоцикловом нагружении

свидетельствует об обязательном снижении прочностных свойств в период подготовки и зарождения разрушения.

1.4 Поврежденность материалов, изучаемая методом полных диаграмм деформирования

Фундаментальные основы процессов деформирования и разрушения микронероводных 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 [121 – 125, 131, 240].

Исследования [121, 240 – 243] относятся к континуальной механике разрушения (механике рассеянного разрушения), являющейся разделом механики деформируемого твердого тела, в которой используется структурно феноменологический подход для описания поврежденности сплошной среды микродефектами, открытой Работновым Ю.Н. [198, 237] и Качановым Л.М.

Структурная неоднородность деформируемого объема материала (сплошной среды), микропоры, их эволюция, разрыхление перед разрушением [264] описывается феноменологическим осредненным показателем – поврежденностью ω . Так, на модели материала, состоящего из упруго-хрупких неоднородных элементов, изучались изменения мгновенных модулей упругости при активном нагружении E и разгрузке E_u на стадии запредельного деформирования, коэффициента поперечной деформации (КПД) при активном нагружении ν_p и разгрузке ν_u [116, 119, 121, 284].

Данная модель материала свойственна чугунам, имеющим структурные составляющие в виде включений графита. Чугун является хрупким материалом. Он мало чувствителен к геометрическим концентраторам напряжений из-за преобладающей внутренней концентрации в виде графита. Пластичным конструкционным сталям такое модельное представление не подходит. На полной диаграмме растяжения

(ПДР) для сталей имеется протяженный участок пластического деформирования (рисунок 1.15) [126]. Поэтому, моделирование поврежденности

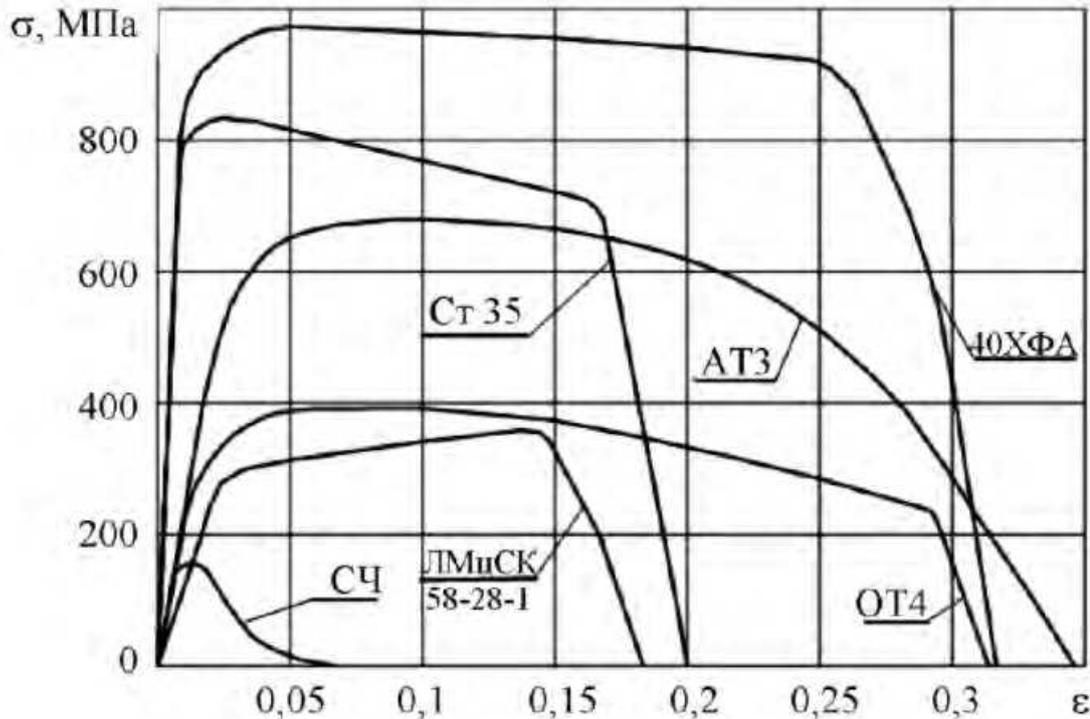


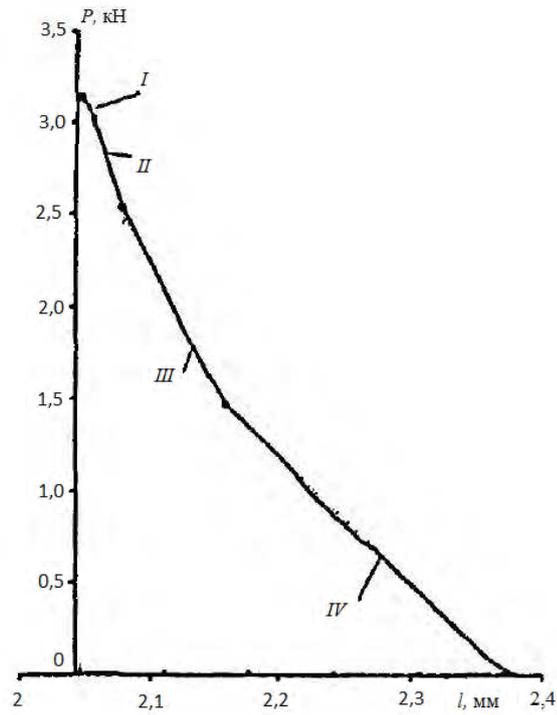
Рисунок 1.15 – Полные диаграммы растяжения конструкционных сталей

в конструкционных сталях необходимо выполнять с позиции других модельных представлений. Трактовке ПДР посвящено достаточно много трудов. В работе [267] ниспадающая ветвь полной диаграммы деформирования (ПДД) разделена на участки (рисунок 1.16). Общая длина падающей ветви ПДД на заключительной стадии деформирования материала зависит от его трещиностойкости. Пологая падающая ветвь на ПДД свидетельствует о повышенной трещиностойкости материала, и наоборот [89, 93, 94].

В работах [120, 121, 126] приведены ПДР нестандартных образцов из углеродистых и легированных сталей после разного количества циклов нагружений. Характерный вид циклических ПДР [120], построенных методами превентивной разгрузки на стадии закритического деформирования [92, 95, 100, 118, 135, 166, 266, 267, 276, 305], показан на рисунке 1.17.

Анализируя труды ученых в отыскании взаимосвязи статических и циклических свойств сталей, можно заключить, что метод построения ПДР устанавливает

такие зависимости, и пригоден для изучения поврежденности литых сталей для вагоностроения.



I – участок зарождения вязкой трещины, *II* – прохождение трещиной толщины образца, *III, IV* – продвижение трещины по ширине образца

Рисунок 1.16 – Ниспадающая ветвь ПДД листового материала

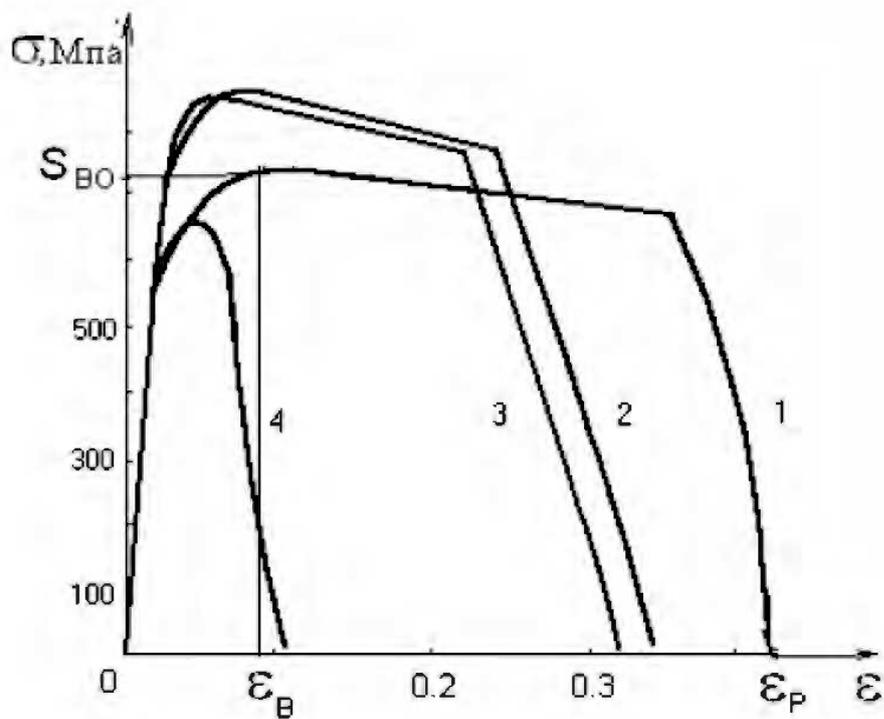


Рисунок 1.17 – Циклические ПДР легированной стали 40X

1.5 Новые методы ресурсных испытаний литых деталей тележек грузовых вагонов

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, ИМАШ РАН, НИИ Вагоностроения, ВНИЦТТ, УрГУПС, Уральское отделение ВНИИЖТ, РУТ, БГТУ, 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 боковых рам и надрессорных балок при вертикальных, продольных и поперечных нагрузках [6], определенных в поездных испытаниях грузовых вагонов на территорию шести стран СНГ, в т.ч. РФ, в виде серии межгосударственных стандартов [44, 45].

Повысились требования к обеспечению гамма-процентного ресурса с вероятности 90% до 95%, введено подтверждение надежности работы конструкций боковых рам и надрессорных балок на стадии «появление опасного отказа (появление усталостной трещины) – переход в опасное состояние (излом)» до очередного планового ремонта вагона.

1.6 Выводы и постановка задач исследований:

а) 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 боковых рам и надрессорных балок не приводит к снижению их опасных отказов и предельных состояний во время движения поезда, и не гарантирует безопасность эксплуатации подвижного состава.

б) 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 работы поставлены задачи, перечисленные во введении.

в) 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».

г) 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.

Глава 2 Модели поврежденности литых сталей с учетом негативных изменений механических свойств в процессе наработки

В настоящей работе, под *негативными изменениями* механических свойств литых сталей понимаются любые изменения предела текучести стали, временного сопротивления, модуля упругости, коэффициента поперечной деформации и предельной деформации с ростом наработки, что приводит к отрицательному влиянию на усталостную долговечность конструкции. Если подходить строго, то указанные механические свойства являются свойствами конкретного образца материала [262], и не должны приписываться всему материалу. Испытывая один и тот же объем и марку материала, но отобранный из разных заготовок в состоянии поставки, прошедших термообработку по режиму нормализации, можно получить разброс значений механических свойств в 20%, о чем сообщалось в первой главе.

Изучение негативного влияния поверхностных слоев на предел выносливости литой стали, результаты которых указывались в первой главе, стирают понятие предела выносливости стали. Каждый раз, удаляя поврежденные поверхностные слои толщиной 500 мкм после наработок $n_1 = 0,9N_1$ и $n_2 = 0,4N_2$, увеличили долговечность N_3 стандартного образца при одноосном растяжении более чем в шесть раз. Для сравнения, в работе [63], толщина поврежденной поверхности металлов составила до 30 мкм после наработки $n = 0,25N$. Об аномалии предела текучести поверхностных слоев легированных хромистых сталей толщиной до 220 мкм, говорится в работе [186].

Можно предположить о достижении базового числа циклов при неизменных параметрах циклического нагружения, после большего количества удалений поврежденных слоев с поверхности образца. К мнению о несуществующем пределе выносливости материала, но с позиции природы усталости, пришел и консилиум механиков во главе с членом-корреспондентом РАН Николаем Андреевичем Махутовым, на одной из конференций с участием автора. Однако, в проектировании и производстве изделий машиностроения необходимо опираться на

фиксированные уровни механических свойств материалов, пусть и определенных на стандартных образцах по [33, 37, 47].

В настоящей работе, все механические свойства сталей изучаются на моделях и нестандартных однократных образцах методом превентивной разгрузки на стадии закритического деформирования с построением полных диаграмм деформирования (ПДД) при одноосном растяжении, или полных диаграмм растяжения (ПДР). Такой метод изучения параметров материалов не стандартизован, используется в фундаментальных исследованиях для исследований кинетики взаимосвязи статических и циклических свойств материалов в различных научных школах в России и за рубежом, например в: АН Украины, Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, ИМАШ УрО РАН Институт машиноведения (г. Екатеринбург). Автор впервые применил метод превентивных разгрузок для описания кинетики накопления усталостных повреждений литых сталей несущих деталей тележек грузовых вагонов.

Негативными изменениями в литых сталях могут быть как снижения механических свойств после первых тысяч циклов периодических нагружений, так и увеличения, о которых излагалось в первой главе. Из обзоров публикаций в первой главе по изменениям механических свойств стали 20 с ростом наработки видно, что она склонна к циклическому упрочнению. То есть, предел текучести σ_T и временное сопротивление σ_B стали 20 возрастают, а относительное удлинение и сужение неизбежно снижаются. Действительно, у сталей марок: 20ГФЛ, 20ГЛ и 20ГТЛ по ГОСТ 32400-2013 [41] – отношение $\sigma_B / \sigma_T > 1,4$. Значит, данные стали являются циклически упрочняющимися по [63]. Стоит отметить, что классификация сталей по склонности к циклическому упрочнению или разупрочнению, предложенной в [63], справедлива до наработки $0,30 - 0,35N$.

Эксперименты на нестандартных однократных образцах с построением ПДР, проводимые на разных материалах в выше указанных научных школах, с наработками выше $0,5N$, показали неизбежное падение не только пластических, но и прочностных свойств. Снижались абсолютно все параметры ПДР, включая модуль упругости. Нарботки менее $0,3N$ приводили к циклическому упрочнению

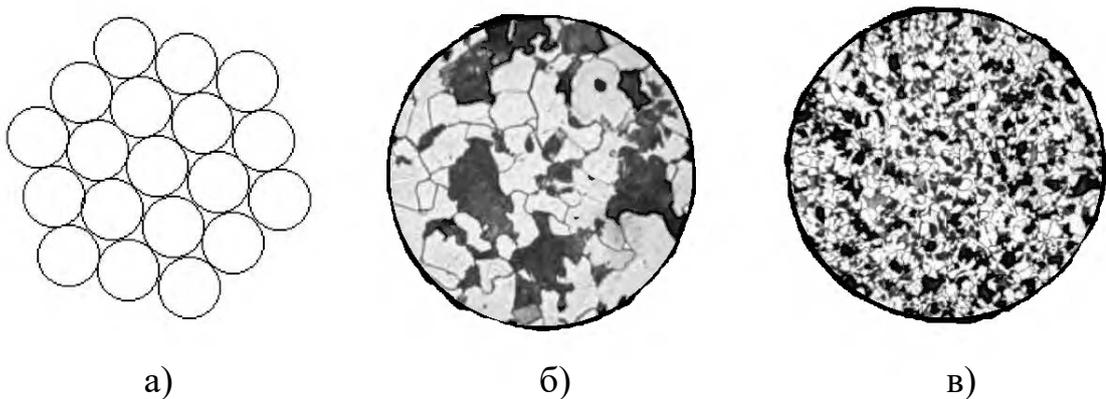
некоторых сталей. Один и тот же материал пребывал последовательно во всех состояниях. Сначала циклически упрочнялся, а потом циклически разупрочнялся. Поэтому, в настоящей главе, для моделирования поврежденности литых сталей выбран метод превентивных разгрузок на стадии закритического деформирования с построением ПДР. Он нагляден и описывает кинетику накопления усталостных повреждений в материале с ростом наработки [97].

Особенностью разрабатываемых моделей материала в настоящей главе, отличающей их от реальных свойств литых сталей марки 20Л, например для изготовления боковых рам и надрессорных балок тележек по ГОСТ 32400-2013 [41], видится снижение всех параметров ПДР с самых первых циклов, и вплоть до разрушения. Как уже объяснялось, у литых сталей, легированных марганцем, временное сопротивление сначала возрастает, а потом снижается с ростом наработки. Построение таких моделей является сложной задачей. Поэтому, деформация разрушения стали выбирается управляющим показателем, описывающим циклическое разупрочнение материала с первых циклов нагружения.

2.1 Структура модели материала. Условия взаимодействия. Ограничения

Математическое моделирование процесса циклической деградации механических свойств литых сталей для производства боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов проводится методом континуальной механики. То есть, разрушение материала, в котором происходят предварительные и сопутствующие структурные превращения, рассматривается как феномен. Такой подход называется *структурно-феноменологическим* [20 – 24, 101, 112, 113, 115, 132], при котором структурные изменения связываются с макро изменениями твердого тела, например деформациями, разрыхлениями структуры, трещинами и разрушением.

Литая сталь представляется моделью материала с различными структурными составляющими (рисунок 2.1), который можно изучать методами континуальной механики (механики рассеянного разрушения) при квазистатическом растяжении.



а) модельного образца из плотно упакованных продольных волокон;
б) литой стали марки 20ГЛ, х500; в) литой стали марки 20ГЛ, х100

Рисунок 2.1 – Микроструктура в состоянии поставки

Основы деформирования и разрушения микронеоднородных материалов, которые получили применение и развитие в работе, заложены создателем известной Уральской научной школы профессором Сергеем Дмитриевичем Волковым. Изучение поведения литых сталей с феррито-перлитной мелкозернистой микроструктурой после нормализации (рисунок 2.1 б, в), позволяет качественно определять изменение механических свойств после воздействия циклической нагрузки.

Классическая теория упругости [1, 106, 215, 250] содержит следующие механические характеристики изотропного материала: модуль упругости E и коэффициент поперечной деформации (КПД) $\nu = \varepsilon'/\varepsilon$, где ε' – поперечная деформация, ε – продольная деформация. Эти параметры являются константами, как при активном нагружении до предела пропорциональности $\sigma_{\text{п}}$, так и при разгрузке. После предела упругости, при деформации $\varepsilon > \varepsilon_{\text{п}}$, разделяют активное нагружение с переменными (касательными, мгновенными) параметрами $E_p = \partial\sigma/\partial\varepsilon$, $\nu_p = -\partial\varepsilon'/\partial\varepsilon$ и упругую разгрузку с параметрами $E_u = E$, $\nu_u = \nu$. Для пластичных сталей принимают $\nu_p = 0,5$, а изменением модуля разгрузки E_u пренебрегают. Между тем, из опытов известно, что $\nu_p = 0,5$ только в области деформации до предела текучести, а затем он снижается. Изменение модуля E_u при появлении внутренних микротрещин (разрыхления) металла достигает десятков процентов [78]. Поэтому, в моделировании необходимо изучить изменение модуля E_u на стадии разупрочнения материала, протекающей на падающей ветви диаграммы растяжения.

Исследования Миронова В.И. [115, 120], Крахмальника Г.Л. [119] на физических моделях материалов в виде ограниченного объема с плотно упакованными параллельными волокнами, имеющими только упругие или пластические механические свойства, дополняются условиями взаимодействия и усталостного разрушения отдельных волокон. Модифицированные модели позволят изучить изменение инкрементальных свойств материалов, похожих на литые стали деталей тележек вагонов, после наработки с заданными параметрами цикла.

Известные модельные ограничения дополняются условиями разрушения волокон при квазистатическом или циклическом нагружениях. В результате принимаются следующие пять ограничений:

- а) продольные волокна, диаметры которых малы по сравнению с их длиной, плотно упакованы в заданном объеме, и в процессе деформирования касаются друг друга без давления [20]. Сохраняя это условие модели, предполагается, что при разделении разрушенного волокна на две части они разгружаются упруго, образуя пору в ограниченном объеме, и раздвигают без давления соседние волокна. Значит, при растяжении модельного образца в нем

протекают два встречных процесса: площадь поперечного сечения образца снижается и увеличивается одновременно, вследствие удлинения цельных и упругой разгрузки разрушенных волокон соответственно. Соотношение продольных ε и поперечных ε' деформаций для пучка в целом изменяется;

- б) продольные деформации пределов текучести и временного сопротивления отдельных волокон ограниченного объема распределяются в интервалах $\{\varepsilon_{T\alpha}, \varepsilon_{T\beta}\}$ и $\{\varepsilon_{B\alpha}, \varepsilon_{B\beta}\}$ соответственно, по равномерному или нормальному закону;
- в) модуль упругости материала волокон $E = const$, поскольку разброс его экспериментальных значений на порядок меньше, чем, например, временного сопротивления;
- г) циклическая долговечность отдельных волокон при стационарном отнулевом нагружении продольной нагрузкой распределена в интервале $\pm 3\sigma \{N_\alpha, N_\beta\}$ по нормальному закону;
- д) периодическое нагружение количеством циклов n волокна с номером k приводит к снижению деформации разрушения ε_B , описываемой степенной функцией (математической моделью поврежденности материала) вида:

$$\varepsilon_{Bk}(\varepsilon_M, n) = \varepsilon_{Bk}^0 - k_\varepsilon n^{\alpha(\varepsilon_M)}, \quad (2.1)$$

где параметр k_ε находится из условия усталостного разрушения волокна при максимальной деформации цикла ε_M :

$$\varepsilon_{Bk}(\varepsilon_M, N_k) = \varepsilon_M, \quad (2.2)$$

α – показатель степени кривой усталости.

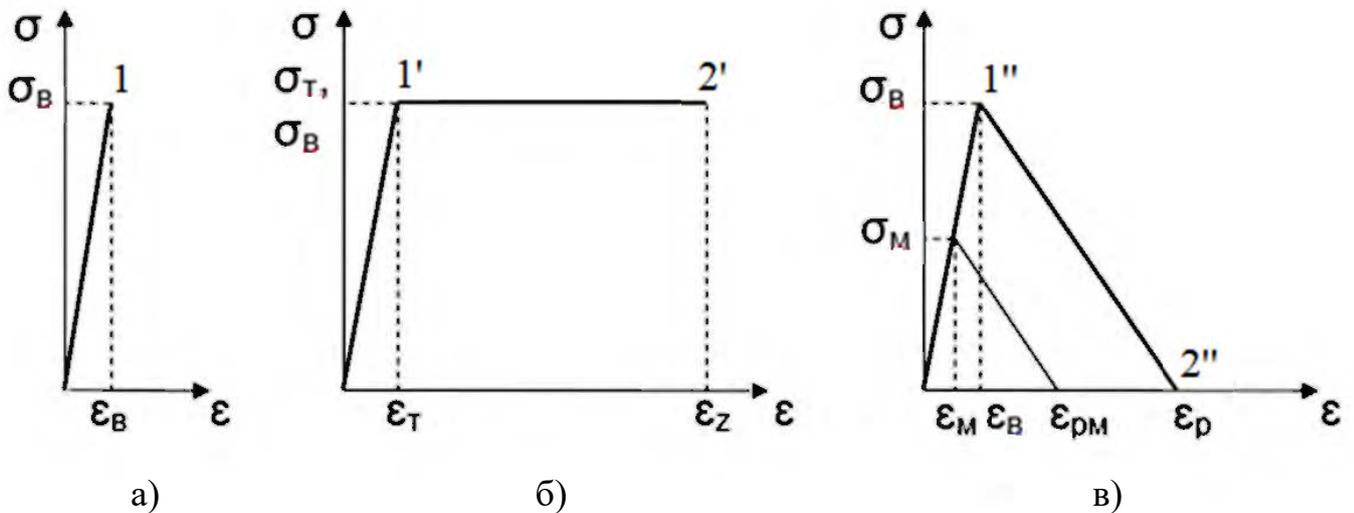
Таким образом, разброс долговечности волокон при гармоническом законе нагружении ($\varepsilon_M = const$) обусловлен различным отношением $\varepsilon_B/\varepsilon_M$ в состоянии поставки.

Принятые условия взаимодействия волокон в ограниченном объеме и ограничения их механических свойств, не искажают физический смысл процесса деформирования твердого тела, но создают серьезные трудности при идентификации моделей с реальными литыми сталями с феррито-перлитной структурой. Поэтому, основной задачей моделирования является качественное исследование деформационных эффектов на стадии разупрочнения. Кроме снижения предела текучести и временного сопротивления изучается изменение инкрементальных модулей, коэффициентов поперечной деформации.

2.2 Структурно-феноменологические модели металлов

Отсутствие неустойчивых состояний образца с переходом на стадию разупрочнения металла достигается кинематическим одноосным растяжением, исключая упруго деформированные участки на рабочей части образца, или жестким нагружением. Кинематическое нагружение применяется для изучения нестандартных свойств металлов с различной микроструктурой при квазистатическом и циклическом растяжении [19, 104, 105, 240, 261, 284].

Рассматриваются три типа феноменологических микроструктур с механическими свойствами отдельных структурных составляющих: упруго-хрупкими (модель Даниэльса), упругопластическими (модель Мазинга) и упруго-разупрочняющимися (модель Миронова-Якушева) (рисунок 2.2). Свойства отдельных микроструктурных составляющих, которые в моделях заменяются волокнами круглого сечения, присваиваются всей модели образца [287].



- а) упруго хрупкого (модель Даниэльса); б) упругопластического (модель Мазинга);
в) упруго разупрочняющегося (модель Миронова-Якушева)

Рисунок 2.2 – Условные диаграммы одноосного растяжения отдельного волокна модельного образца

В модельном образце, состоящем из упруго-хрупких волокон, отдельное волокно упруго деформируется и разделяется на две половинки при достижении временного сопротивления в точке 1' (рисунок 2.2).

Модель упруго-хрупкого металла из m волокон описывается функциями [119, 284]:

– условием равновесия:

$$\sigma = \frac{1}{mf} \sum_{k=1}^m \sigma_k(\varepsilon) f_k = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sigma_k, \quad (2.3)$$

где $f_k = const$ - площадь поперечного сечения волокна;

σ_k – напряжение в нем;

– физическими уравнениями:

$$\begin{cases} \sigma_k = E\varepsilon, & 0 < \varepsilon < \varepsilon_{Bk} \\ 0, & \varepsilon \geq \varepsilon_{Bk} \end{cases}, \quad (2.4)$$

где $E = const$ - модуль упругости металла волокна;

ε_{Bk} - деформация временного сопротивления волокна с номером k ;

—условием совместности деформаций:

$$\varepsilon_k = \varepsilon,$$

устанавливающим однородность поля перемещений волокон.

Коэффициент поперечной деформации (КПД) $\nu = -\Delta\varepsilon'/\Delta\varepsilon$ при дифференцированном подходе становится функцией от уровня деформации, отражающей смысл расчета КПД.

В состоянии поставки волокна с диаметром d_0 и площадью сечения f_0 перемешаны и плотно упакованы в испытуемый объем (образец) квадратного сечения площадью $F_0 = md_0^2$, и стороной $a_0 = \sqrt{F_0} = \sqrt{m}d_0$.

Согласно физическим уравнениям (2.4), отдельное волокно остается упругим до разрушения. При растяжении его диаметр уменьшается по закону $d = d_0(1 - \nu\varepsilon)$, где $\nu = \text{const}$ – коэффициент Пуассона материала элемента.

Вместе с диаметром уменьшается сторона поперечного сечения испытуемого объема и площадь. Появляется поперечная деформация:

$$\varepsilon' = \frac{a_0 - a(\varepsilon)}{a_0}. \quad (2.5)$$

Пока нет разрушенных волокон, то:

$$\begin{aligned} F(\varepsilon) &= md_0^2(1 - \nu\varepsilon)^2, \\ a(\varepsilon) &= \sqrt{m}d_0(1 - \nu\varepsilon), \end{aligned} \quad (2.6)$$

а поперечная деформация испытуемого объема $\varepsilon' = \nu\varepsilon$, согласно (2.5) и (2.6).

Следовательно, КПД образца остается постоянным и равен коэффициенту Пуассона металла волокна. Не меняют своих значений при разгрузке коэффициент поперечной деформации $\nu_u = \nu$, и модуль $E_u = E$. Объемная деформация модельного образца совпадает с таковой для сплошного элемента тех же размеров.

Сохранение упругих свойств в модельном образце на начальном этапе деформирования можно считать качественным подтверждением правомерности принятых допущений, потому что физический смысл деформирования не искажается.

Микроструктурная неоднородность испытуемого объема задается равномерным законом распределения случайных деформаций временного сопротивления $R\{\varepsilon_{B\alpha}, \varepsilon_{B\beta}\}$ структурных составляющих (волокон), например феррита и перлита в литой стали класса 20Л. Поврежденность модельного образца ω при i разрушенных волокнах и деформации $\varepsilon_{B\alpha} < \varepsilon < \varepsilon_{B\beta}$, оценивается относительным числом разрушенных волокон:

$$\omega = \frac{i}{m} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{B\alpha}}{\varepsilon_{B\beta} - \varepsilon_{B\alpha}}. \quad (2.7)$$

Согласно ограничению (а), две половинки разрушенного k -го волокна упруго разгружаются без остаточной деформации. Диаметр скачкообразно увеличивается от конечного значения $d_k = d_0(1 - \nu\varepsilon_{Bk})$ до начального d_0 .

С появлением i разрушенных волокон рассчитывается площадь испытываемого объема с порами по формуле:

$$F = (m - i)d_0^2(1 - \nu\varepsilon)^2 + id_0^2, \quad (2.8)$$

а затем сторона a сечения, поперечная деформация ε' и КПД образца.

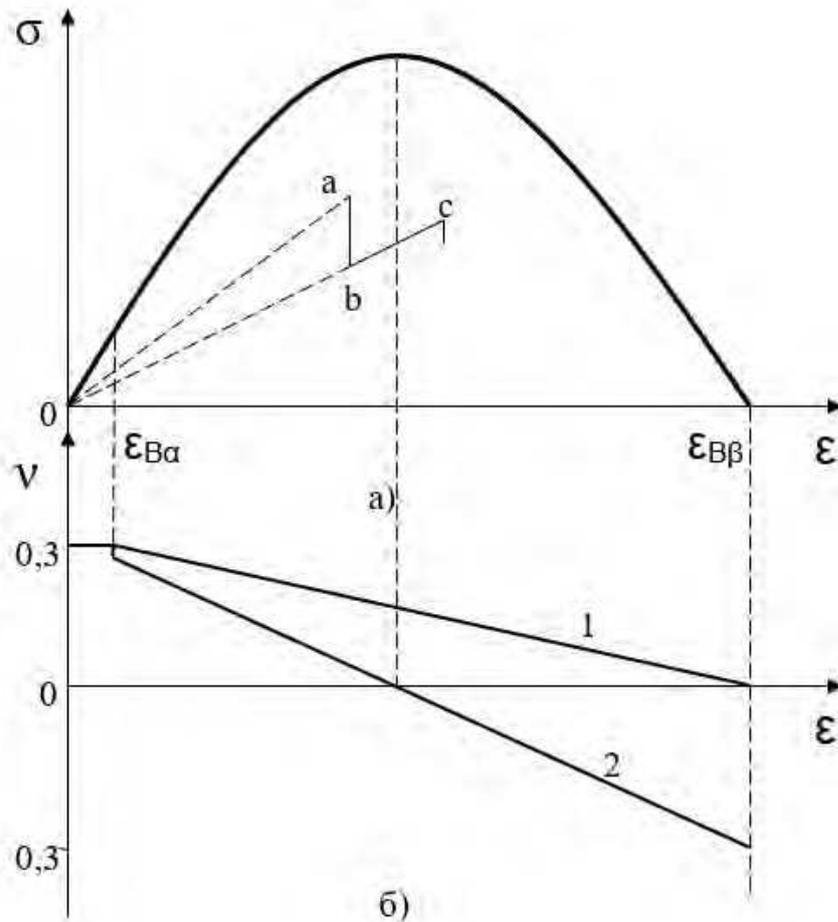
Ниже приводится пример расчета испытываемого объема металла с шагом по деформациям $\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{B\beta} - \varepsilon_{B\alpha})(m - 1)^{-1}$ для конечного числа волокон m .

Дифференцированный подход, согласно формул (2.3) – (2.8), реализован на языке программирования Visual Basic for Applications в программе Microsoft Access [69, 73]. Разработанная авторская программа с пользовательским интерфейсом для расчета параметров ПДР испытываемого объема приведена в приложении А.

Программа позволяет менять количество структурных составляющих в образце, задавать произвольные значения исходных механических свойств. По окончании решения выводятся графики в отдельных формах, а полученные значения для их построения выводятся в таблицы. Программа позволяет повышать количество волокон в образце на порядки и достаточно оперативно получать результаты. Однако, время расчета существенно возрастает.

Полная диаграмма растяжения модельного образца [276] с тысячами волокнами, рассчитанная в автоматизированном режиме по программе с помощью итерационных процедур и формул (2.3), (2.4), выглядит сглаженной кривой (рисунок 2.3а). Увеличение масштаба или сокращение числа волокон приведет к пилообразной зависимости $\sigma(\varepsilon)$ (рисунок 2.3а).

Состояния испытываемого объема перед и после разрушения одного из волокон, с последующим активным деформированием на величину $\Delta\varepsilon$, соответствуют точкам a , b и c . По формулам (2.5), (2.6) и (2.8) рассчитываются значения поперечных деформаций ε'_a , ε'_b , и ε'_c в этих фазах.



а) полная диаграмма деформирования при $m=1000$ шт., $E = 2 \times 10^4$ МПа,
 $\epsilon_{B\alpha} = 0,005$, $\epsilon_{B\beta} = 0,08$;
 б) КПД ν_u (линия 1) и ν_p (линия 2)

Рисунок 2.3 – Кривые для модели Даниэльса при равномерном распределении

Во время скачка на полной диаграмме растяжения от разрыва волокна в испытуемом объеме, при постоянном значении деформации, наблюдается неоднозначность в расчете КПД.

Модуль упругости и КПД поврежденного образца, при условии $\epsilon > \epsilon_\alpha$, рассчитываются при разгрузке с повторным нагружением. Например, модуль разгрузки вычисляется по формуле:

$$E_u = \frac{m-i}{m} E = \frac{\epsilon_{B\beta} - \epsilon}{\epsilon_{B\beta} - \epsilon_{B\alpha}} E,$$

и линейно убывает до нуля с увеличением деформации. КПД разгрузки ν_u , рассчитываемый при $\Delta\varepsilon' = \varepsilon'_c - \varepsilon'_b$, также имеет линейную зависимость от деформации (рисунок 2.3б, линия 1):

$$\nu_u = \frac{\varepsilon_{B\beta} - \varepsilon}{\varepsilon_{B\beta} - \varepsilon_{B\alpha}} \nu.$$

Если сравнить два последних выражения, то получается:

$$\frac{\nu_u(\varepsilon)}{\nu} = \frac{E_u(\varepsilon)}{E}. \quad (2.9)$$

Равенство (2.9) показывает совпадение зависимостей $\nu_u(\varepsilon)$ и $E_u(\varepsilon)$, построенных в относительных координатах. То есть, если известна зависимость $E_u(\varepsilon)$, то КПД $\nu_u(\varepsilon)$ для данной модели металла можно рассчитать по формуле:

$$\nu_u(\varepsilon) = \frac{\nu}{E} E_u(\varepsilon). \quad (2.10)$$

Рассматривая размеры поперечного сечения испытываемого объема металла в точках c и a (рисунок 2.3а), определяются $\Delta\varepsilon' = \varepsilon'_c - \varepsilon'_a$ и текущий (касательный) КПД ν_p (рисунок 2.3б, линия 2). Сопоставление зависимостей для ν_p и $E_p(\varepsilon) = d\sigma/d\varepsilon$ позволяет получить результат, аналогичный выражениям (2.9) и (2.10):

$$\frac{\nu_p(\varepsilon)}{\nu} = \frac{E_p(\varepsilon)}{E},$$

$$\nu_p(\varepsilon) = \frac{\nu}{E} E_p(\varepsilon),$$

а также найти связь введенных параметров ν_u и ν_p :

$$\nu_u(\varepsilon) = \nu_p(\varepsilon) \frac{E_u(\varepsilon)}{E_p(\varepsilon)}.$$

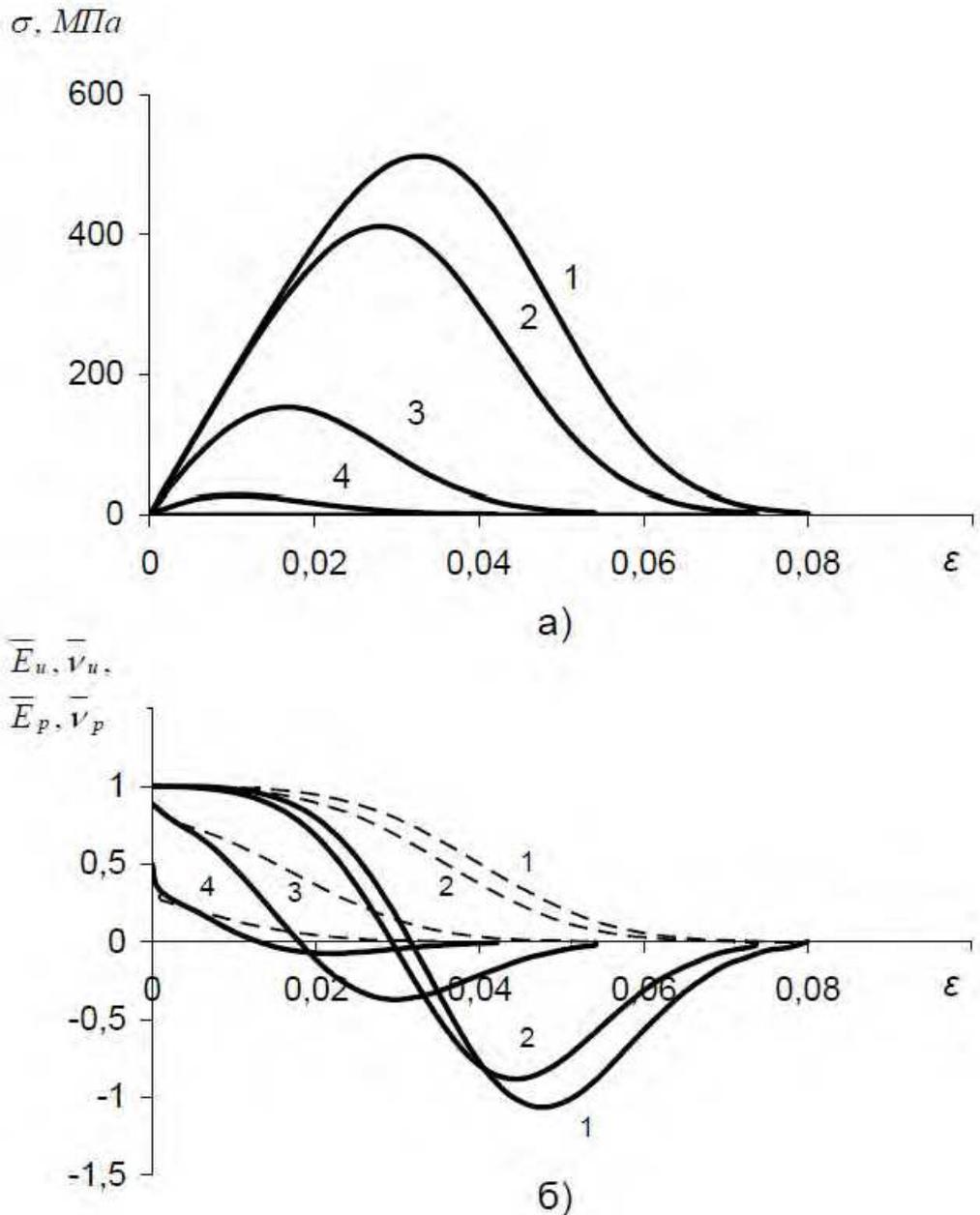
Коэффициент ν_p может быть отрицательным, т.к. при растяжении испытуемого объема с разрушенными волокнами размеры поперечного сечения могут увеличиваться. Приращения поперечной деформации меняют знак на противоположный с преобладанием разрушенных волокон над целыми, в зависимости от неоднородности механических свойств волокон или микроструктурных составляющих реальных металлов.

Таким образом, для исследований изменения механических свойств металла, микроструктура которого описывается моделью Даниэльса при одноосном растяжении, достаточно построить диаграмму $\sigma(\varepsilon)$ и зависимость $E_u(\varepsilon)$. Мгновенные модули $E_p(\varepsilon)$ и коэффициенты $\nu_p(\varepsilon)$, $\nu_u(\varepsilon)$ рассчитываются. Это утверждение также справедливо при нормальном законе распределения деформаций временных сопротивлений отдельных волокон структуры образца, но зависимости заметно меняются.

Функции напряжений $\sigma(\varepsilon)$, модулей $E_u(\varepsilon)$ и $E_p(\varepsilon)$, коэффициентов $\nu_u(\varepsilon)$ и $\nu_p(\varepsilon)$ при нормальном законе распределения случайных деформаций временного сопротивления ε_B отдельных волокон показаны на рисунке 2.4 (кривые 1).

Диаграммы построены в авторской программе (приложение А). Зависимость $\sigma(\varepsilon)$ выглядит сглаженной, с участком перелома на ниспадающей ветви (рисунок 2.4а, кривая 1). Функции изменения свойств становятся нелинейными, скачки в кривых касательных свойств ν_p и E_p отсутствуют (рисунок 2.4б, кривые 1).

Кривые, приведенные на рисунке 2.4, показывают взаимосвязь механических свойств металла $E(\varepsilon)$ и $\nu(\varepsilon)$ с диаграммой растяжения. Значит, такие воздействия на металл как периодическое нагружение, термообработка, упругопластическое деформирование, температура, аномальный поверхностный слой, и др. должны оказывать такое же негативное влияние на $E(\varepsilon)$ и $\nu(\varepsilon)$, что и на диаграмму растяжения. Известны опытные данные о вырождении ПДР некоторых черных металлов после наработки [98, 126]. Негативные изменения функций модуля $E(\varepsilon)$ и коэффициента $\nu(\varepsilon)$ в этих работах не изучались.



а) ПДР образца после наработок в циклах: $n_0 = 0$ (кривая 1), $n_1 = 10^4$ (кривая 2),
 $n_2 = 12,5 \times 10^4$ (кривая 3), $n_3 = 13,5 \times 10^4$ (кривая 4);
 б) функции $E(\epsilon)$ и $\nu(\epsilon)$ при активном деформировании и разгрузке (штриховые линии)
 в относительных координатах

Рисунок 2.4 – Кривые для модели Даниэльса при нормальном распределении

Принимая ограничения (б), (г) и (д), уравнения модели образца Даниэльса из упруго-хрупких волокон (2.3) и (2.4) дополняются свойствами, которые изменяются при переменной деформации цикла с максимальным значением $\epsilon_M = const$. Ограничиваясь областью многоциклового усталости подразумевается, что

кинетические кривые негативного изменения временных сопротивлений всех волокон подобны функции (2.1).

Согласно выражениям (2.1), (2.3) и (2.4) разработан алгоритм расчетов параметров ПДР и механических свойств модели образца Даниэльса из упруго-хрупких волокон, с учетом негативных изменений в зависимости от длительности наработки. Разработанная компьютерная программа на языке программирования VBA приведена в приложение А.

На рисунке 2.4а, кривые 2 – 4 являются полными диаграммами растяжения $\sigma(\varepsilon)$, построенными после $n_2 < n_3 < n_4$ циклов нагружений соответственно. Изменение модулей $E(\varepsilon)$ и коэффициентов $\nu(\varepsilon)$ в относительных координатах после такой же наработки показано на рисунке 2.4б, кривыми 2 – 4. Негативные изменения функций $\bar{E}_p(\varepsilon)$, $\bar{\nu}_p(\varepsilon)$, $\bar{E}_u(\varepsilon)$ и $\bar{\nu}_u(\varepsilon)$ с ростом наработки совпадают.

Результаты расчетов, приведенные на рисунке 2.4, позволяют заключить о существовании взаимосвязи между параметрами ПДР и свойствами $E(\varepsilon)$ и $\nu(\varepsilon)$ при переменной циклической деформации или при жестком нагружении испытываемого объема металла. Увеличение количества циклов нагружений образца приводит к негативным изменениям параметров ПДР, модулей $E(\varepsilon)$ и коэффициентов $\nu(\varepsilon)$. Модуль упругости E и модуль хрупкости D [307] у полной диаграммы растяжения снижаются (рисунок 2.4а).

Выявленные закономерности необходимо изучить на других моделях внутренних структур металлов. Развитием работы [115] служит моделирование свойств сталей при кинематическом продольном растяжении испытываемого объема, микроструктура которого состоит из идеально упругопластических волокон по модели Мазинга, с разрушением в точке 2' (рисунок 2.2б).

Допускается, что деформации пределов текучести ε_T и деформации при разрушении волокон ε_z (рисунок 2.2б) распределены в соответствующих шестисигмовых диапазонах $[\varepsilon_{T\alpha}, \varepsilon_{T\beta}]$ и $[\varepsilon_{z\alpha}, \varepsilon_{z\beta}]$ по нормальному закону. Шестисигмовый диапазон симметричен относительно средних значений деформаций, и задается среднеквадратичным отклонением σ от минус 3σ до плюс 3σ .

Основные уравнения для модели Мазинга, состоящей из m числа волокон приведены ниже [115]:

- уравнение равновесия:

$$\sigma = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sigma_k ; \quad (2.11)$$

- физические уравнения:

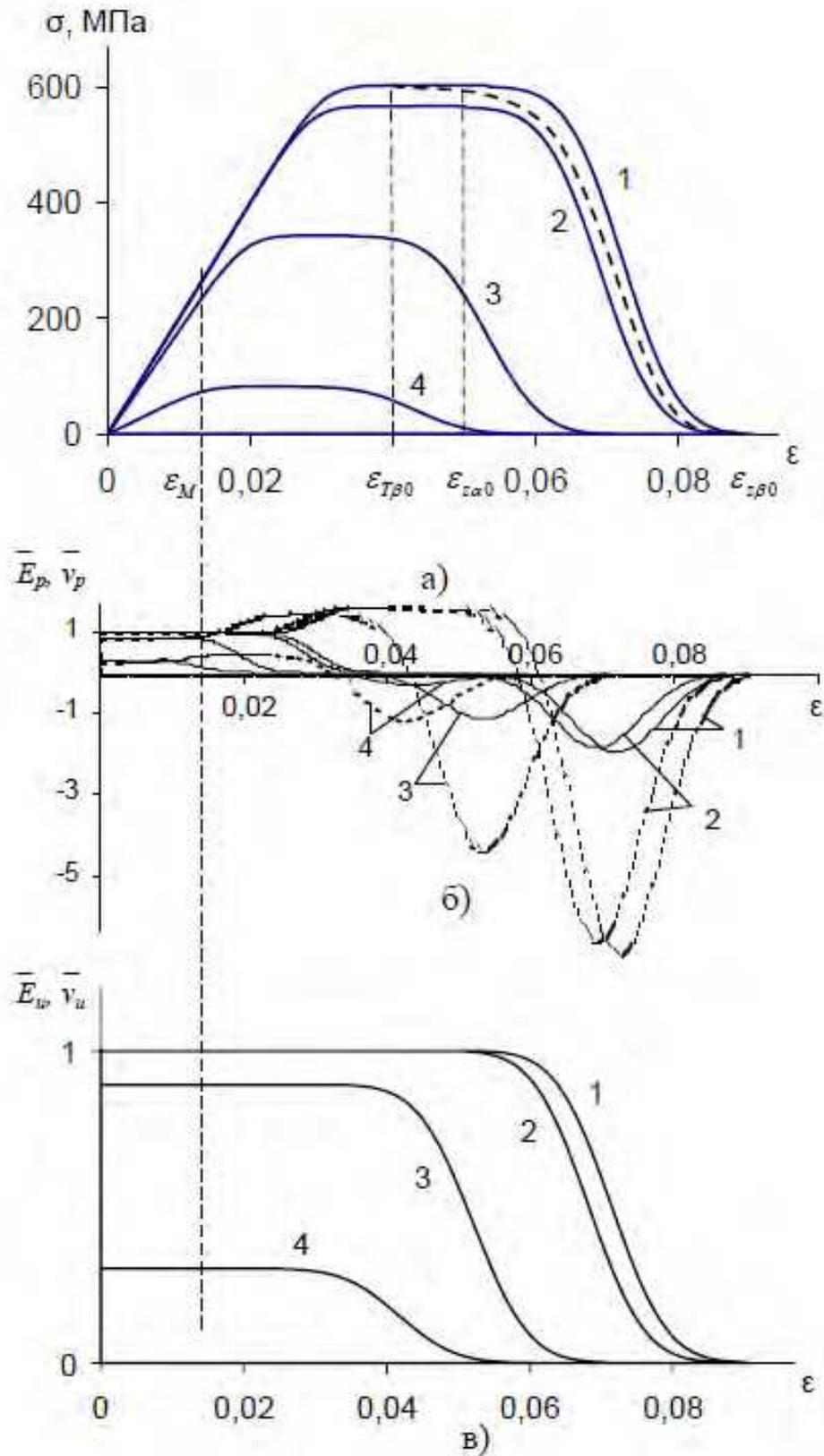
$$\begin{cases} \sigma_k = E\varepsilon, & 0 < \varepsilon < \varepsilon_{Tk}, \\ \sigma_k = \sigma_{Tk}, & \varepsilon_{Tk} < \varepsilon < \varepsilon_{zk}, \\ 0, & \varepsilon \geq \varepsilon_{zk}, \end{cases}$$

где ε_{Tk} , ε_{zk} – деформации предела текучести и разрушения k -го волокна соответственно.

В расчетах кривая нормального распределения деформаций разбивается на интервалы с одинаковым шагом. Кинематическое нагружение испытуемого объема в абсолютно жесткой испытательной машине для построения ПДР выполняется с таким же шагом.

По формуле (2.11), учитывая физические уравнения испытуемого объема по модели Мазинга, состоящего из упругопластических волокон, разработан циклический алгоритм. Он реализован на языке программирования VBA в авторской программе Microsoft Access (приложение Б). Программа имеет пользовательский интерфейс для изменения исходных данных, позволяет рассчитывать параметры ПДР после любой наработки, строить ПДР по результатам расчетов в автоматическом режиме.

На рисунке 2.5, кривые 1 [132], приведены результаты автоматизированного расчета согласно программе в приложении Б. Исходные данные для построения ПДР: $E = 2 \cdot 10^4$ МПа; $m = 1000$ шт.; $\varepsilon_{T\alpha} = 0,02$; $\varepsilon_{T\beta} = 0,04$; $\varepsilon_{z\alpha} = 0,05$; $\varepsilon_{z\beta} = 0,09$.



а) ПДР образца; б) $E_p(\varepsilon)$ и $\nu_p(\varepsilon)$ (штриховые линии) в относительных координатах при нагружении; в) $E_u(\varepsilon)$ и $\nu_u(\varepsilon)$ в относительных координатах при разгрузке

Рисунок 2.5 – Кривые для модели Мазинга при нормальном распределении

после наработок в циклах: $n_0 = 0$ (кривые 1), $n_1 = 10^4$ (кривые 2),

$n_2 = 13,5 \times 10^4$ (кривые 3), $n_3 = 14,5 \times 10^4$ (кривые 4)

Полная диаграмма растяжения выглядит гладкой кривой с ниспадающим до нуля участком $[\varepsilon_{z\alpha}, \varepsilon_{z\beta}]$ (рисунок 2.5а, кривая 1). Как уже упоминалось в первой главе, пологость ниспадающего участка на ПДР свидетельствует о повышенной трещиностойкости стали [89, 266]. Неоднородные по механическим свойствам структурные составляющие, в данном случае волокна, повышают трещиностойкость образца, т.е. делают падающую ветвь более полой. Данное наблюдение сопоставляется с реальными феррито-перлитными микроструктурами литых сталей для деталей тележек грузовых вагонов, микротвердость которых различается на порядок.

Несущая способность испытываемого объема определится делением напряжений (рисунок 2.5а, кривая 1) на площадь квадратного поперечного сечения F . Поперечная деформация образца $\varepsilon' = \Delta a/a$, где $a = F^{0,5}$ – размер поперечного сечения. Площадь отдельного волокна диаметром d в общей площади образца F составит d^2 . Во время разгрузки образца на стадии пластического деформирования модуль упругости $E_u(\varepsilon)$ и коэффициент поперечной деформации $\nu_u(\varepsilon)$ не меняются (рисунок 2.5в, кривая 1). Это качественно сочетается с опытными наблюдениями за разупрочнением пластичных металлов [79, 96].

На рисунке 2.5б, кривая 1, приведены зависимости касательного модуля $E_p = d\sigma/d\varepsilon$, коэффициента поперечной деформации $\nu_p = d\varepsilon'/d\varepsilon$, упругих характеристик разгрузки E_u , ν_u , как функции от деформаций начала разгрузки. Отмечается совпадение графиков E_u и ν_u в относительных координатах: $\bar{E}_u = E_u(\varepsilon)E^{-1}$, $\bar{\nu}_u = \nu_u(\varepsilon)\nu^{-1}$. Мгновенные характеристики E_p и ν_p при сильных внутренних повреждениях в испытываемом объеме становятся отрицательными.

Как уже отмечалось в первой главе, после циклического нагружения образцов из конструкционных сталей, их ПДР становится короче, что указывает на постепенное их охрупчивание по усталости с негативными изменениями механических свойств. Поэтому, на модели металла Мазинга, испытываемый объем которой состоит из упругопластических структурных волокон, выполняется дальнейшее моделирование процессов накопления усталостных повреждений.

Усталость испытываемого объема металла во время циклического нагружения описывается негативными изменениями его механических свойств, которое приводит к вырождению полной диаграммы растяжения. В контексте дальнейшего использования результатов моделирования на циклически упрочняющихся литых сталях деталей тележек, исследуемым показателем, отражающим накопление усталостных повреждений, выбирается предельная деформация разрушения ε_z .

Допустим, долговечность волокон распределена равномерно в некотором интервале. Тогда усталостное разрушение первого волокна произойдет после N_α циклов, а последнего после N_β циклов. Очевидно, что долговечность испытываемого объема определится значением N_β .

Наработка i -го волокна $\chi_i = n/N_i$ зависит от его долговечности:

$$N_i = N_\alpha + \frac{i-1}{m-1}(N_\beta - N_\alpha), \quad i \in \overline{1, m}. \quad (2.12)$$

Используя основное уравнение (2.11) и физические уравнения модели Мазинга, с учетом ограничения д) на свойства волокон, устанавливается латентный период, т.е. при котором параметры восходящей ветви ПДР не меняются:

$$\varepsilon_{z\alpha} = \varepsilon_{T\beta}. \quad (2.13)$$

Согласно выражению (2.13), продолжительность латентного периода по циклам составит:

$$n_L = N_\alpha \left(\frac{\varepsilon_{z\alpha} - \varepsilon_{T\beta}}{\varepsilon_{z\alpha} - \varepsilon_\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2.14)$$

и может возрастать с увеличением разности деформаций $(\varepsilon_{z\alpha} - \varepsilon_{T\beta})$, при условии, что $\varepsilon_\alpha^{max} = \varepsilon_{T\alpha}$ и $N_\alpha \gg (N_\beta - N_\alpha)$ циклов, т. е. периодическое нагружение выполняется в области многоциклового усталости.

Предельная деформация в латентный период снижается от $\varepsilon_{z\beta 0}$ до:

$$\varepsilon_{z\beta}(\varepsilon_\alpha, n_L) = \varepsilon_{z\beta 0} - (\varepsilon_{z\beta 0} - \varepsilon_\alpha) \times \left(\frac{n_L}{N_\beta}\right)^{\alpha(\varepsilon_\alpha)}. \quad (2.15)$$

Деформация перехода на падающую ветвь сокращается от $\varepsilon_{z\alpha}$ до $\varepsilon_{T\beta}$.

По уравнениям (2.1), (2.2), (2.12) – (2.15) для модели металла Мазинга, состоящей из упругопластических волокон, разработан циклический алгоритм расчета параметров ПДР и реализован в компьютерной программе Microsoft Access на языке программирования VBA (приложение Б). Программа позволяет рассчитывать параметры полной диаграммы растяжения, модули и коэффициенты при разгрузке и нагружении после любой наработки (рисунок 2.5, кривые 2 – 4).

Функции $\sigma(\varepsilon)$, или диаграммы деформирования, построенные после тренировок $n_2 < n_3 < n_4$ циклов, в том числе в латентный период (штриховая линия) показаны на рисунке 2.5а, кривые 2 – 4. Свойства при активном нагружении $E_p(\varepsilon)$, $\nu_p(\varepsilon)$ и разгрузке $E_u(\varepsilon)$, $\nu_u(\varepsilon)$ в относительных координатах с тем же усталостным повреждением металла приведены на рисунке 2.5б, кривые 2 – 4, и на рисунке 2.5в, кривые 2 – 4 соответственно. Зависимости $\bar{E}_u(\varepsilon)$ и $\bar{\nu}_u(\varepsilon)$ снова совпадают, как и в модели металла Даниэльса. С вырождением ПДР после тренировок происходят негативные изменения модуля $\bar{E}_p(\varepsilon)$ и коэффициента $\bar{\nu}_p(\varepsilon)$. Значит, циклическое деформирование приводит к снижению параметров ПДР и свойств металла $E(\varepsilon)$ и $\nu(\varepsilon)$, сохраняя взаимосвязь между ними.

Построенные выше модели микроструктур металлов позволяют получить ниспадающий до нуля участок полной диаграммы растяжения с помощью квазистатического жесткого деформирования испытываемого объема, с упруго-хрупкими или упругопластическими волокнами. Разрушение таких волокон происходит сразу после достижения деформации предельного значения, что вызывает неустойчивость нагружения испытываемого объема металла на стадии разупрочнения.

Ниже, рассматривается физическая модель испытываемого объема металла, микроструктура которого состоит из упруго разупрочняющихся волокон количеством

m , со временным сопротивлением в точке 1" и разрушением в точке 2" (рисунок 2.2в). Такая модель включает стадию разупрочнения металла волокна с постепенным его разделением на две части без динамического разрыва. Модель деформирования волокна согласно рисунку 2.2в предложена Мироновым В.И. [121, 240].

Основные уравнения испытываемого объема металла из упруго разупрочняющихся волокон при растяжении разработаны автором. Поэтому, модель металла из упруго разупрочняющихся волокон названа *моделью Миронова – Якушева*, и описывается следующими уравнениями:

- условием равновесия:

$$\sigma = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sigma_k, \quad (2.16)$$

- физическими уравнениями:

$$\begin{cases} \sigma_k = E\varepsilon, & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{Bk} \\ \sigma_k = \sigma_{Bk} - D(\varepsilon - \varepsilon_{Bk}), & \varepsilon_{Bk} < \varepsilon < \varepsilon_{zk}, \\ 0, & \varepsilon \geq \varepsilon_{zk} \end{cases} \quad (2.17)$$

где $E = \text{const}$ – модуль упругости металла волокон;

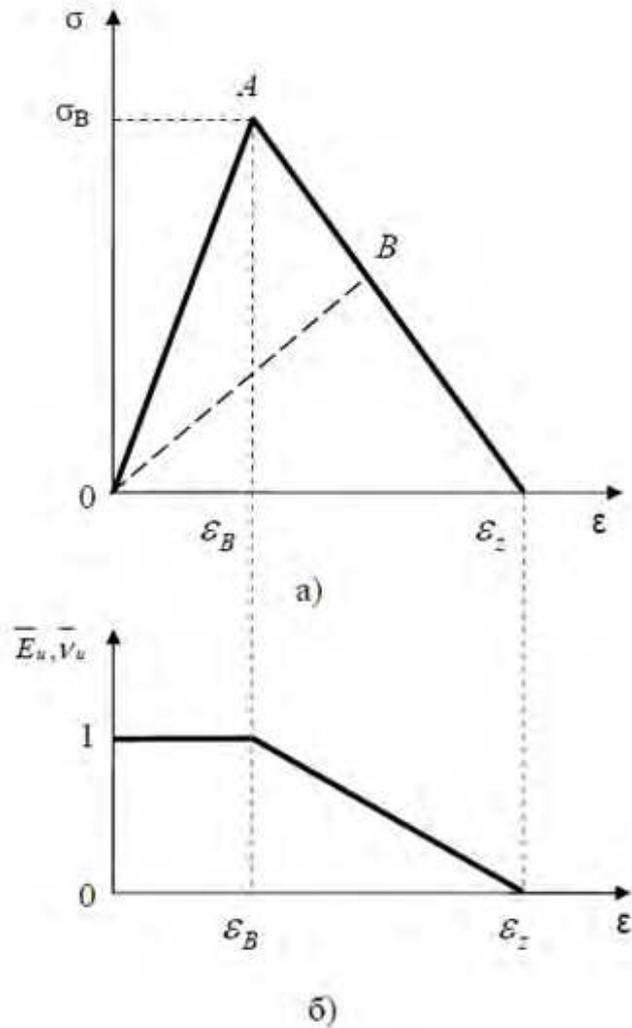
D – модуль разупрочнения;

σ_{Bk} – временное сопротивление волокна с номером k (рисунок 2.6а, точка А);

ε_{Bk} и ε_{zk} – деформации временного сопротивления и разрушения волокна с номером k соответственно (рисунок 2.6а).

Уравнения модели (2.16) и (2.17) показывают, что при любой деформации отдельное волокно разгружается упруго (рисунок 2.6а, линия ОВ). Модуль упругости волокна после временного сопротивления σ_B определяется после разгрузки и повторного деформирования, из уравнений (2.17):

$$E_u(\varepsilon) = \frac{E\varepsilon_B - D(\varepsilon - \varepsilon_B)}{\varepsilon}. \quad (2.18)$$



а) диаграмма растяжения отдельного волокна; б) изменение модуля упругости и коэффициента поперечной деформации при разгрузке отдельного волокна в относительных координатах

Рисунок 2.6 – Диаграммы параметров модели испытываемого объема металла

Миронова – Якушева из упруго разупрочняющихся волокон

Согласно уравнениям (2.9) и (2.18) рассчитывается коэффициент поперечной деформации волокна за деформацией временного сопротивления ϵ_B , по формуле:

$$\nu_u(\epsilon) = \nu \frac{E\epsilon_B - D(\epsilon - \epsilon_B)}{E\epsilon}, \quad (2.19)$$

где ν - коэффициент Пуассона.

На основании уравнений (2.17) – (2.19) модуль $\bar{E}_u = E_u(\epsilon)/E$ и коэффициент $\bar{\nu}_u = \nu_u(\epsilon)/\nu$ волокна при деформировании за пределом прочности снижаются до нуля (рисунок 2.6б).

Диаметр отдельного волокна с номером k на падающей ветви рассчитывается по формуле:

$$d_k(\varepsilon) = d_0[1 - \nu_u(\varepsilon)\varepsilon]. \quad (2.20)$$

Если количество k волокон находится на стадии разупрочнения, то площадь испытываемого объема определится формулой:

$$F = (m - k)d_0^2(1 - \nu\varepsilon)^2 + \sum_{k=1}^m kd_0^2[1 - \nu(\varepsilon)\varepsilon]^2, \quad (2.21)$$

После чего рассчитывается сторона a образца квадратного поперечного сечения, поперечная деформация ε' и ее коэффициент.

Во время равновесного разделения отдельного волокна на две части, они, упруго разгружаясь и увеличиваясь до исходного диаметра, раздвигают соседние волокна образуя пору в микроструктуре испытываемого объема. Площадь образца с порами или n разрушенными волокнами рассчитывается по формуле:

$$F = (m - k - n)d_0^2(1 - \nu\varepsilon)^2 + \sum_{k=1}^m kd_0^2[1 - \nu(\varepsilon)\varepsilon]^2 + \sum_{n=0}^{m-k} nd_0^2. \quad (2.22)$$

Дифференцированный подход в формулах (2.16), (2.17) – (2.24), с учетом ограничения д) заложен в авторской компьютерной программе на языке VBA (приложение В). Программа коммерциализированная, содержит запрограммированный пользовательский интерфейс для ввода исходных данных, позволяет рассчитывать негативные изменения параметров ПДР, модулей упругости и КПД в зависимости от длительности циклического нагружения и модуля разупрочнения D .

Деформации временного сопротивления ε_B и разрушения ε_Z отдельных волокон распределяются в соответствующих диапазонах $[\varepsilon_{B\alpha}, \varepsilon_{B\beta}]$ и $[\varepsilon_{Z\alpha}, \varepsilon_{Z\beta}]$ по нормальному закону, которые симметрично ограничены среднеквадратичным отклонением σ от минус 3σ до плюс 3σ относительно среднего значения диапазона. В расчетах, сглаженная функция нормального распределения деформаций изменяется на

интервалы с одинаковым шагом, с которым выполняется квазистатическое нагружение испытуемого объема металла при условии абсолютной жесткости испытательной машины.

На рисунке 2.7 показаны результаты автоматизированного расчета свойств модели металла Миронова – Якушева в зависимости от модуля разупрочнения D , при следующих исходных данных: $E = 2 \cdot 10^4$ МПа; $m = 1000$ шт. ;

$$\varepsilon_{B\alpha} = 0,02; \quad \varepsilon_{B\beta} = 0,12.$$

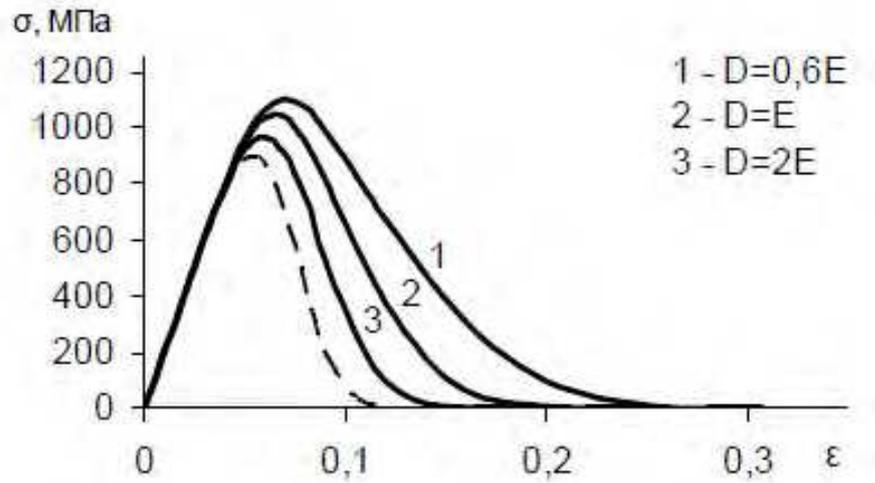
Деформации разрушения групп волокон в первом интервале $[0, \varepsilon_{z\alpha}]$ и в последнем интервале, ограниченным деформацией $\varepsilon_{z\beta}$, определяются как функции от модуля разупрочнения D по формуле:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_B}{D} + \varepsilon_B.$$

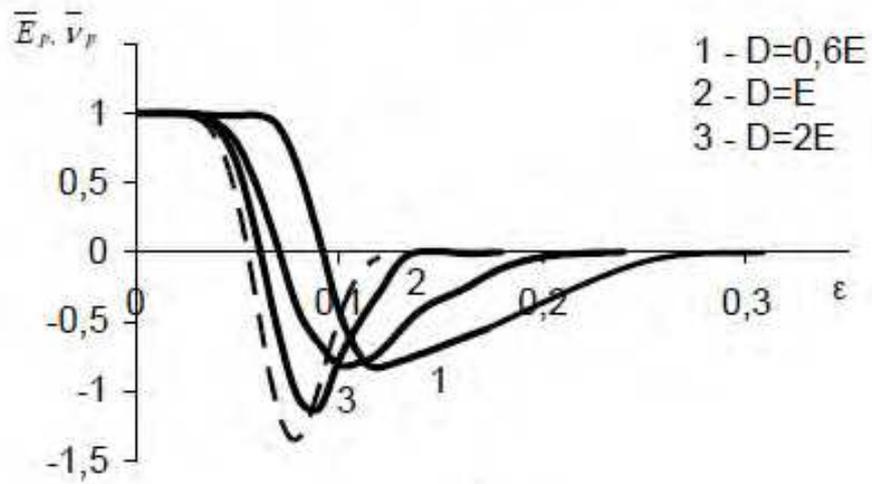
Повышенные значения модуля разупрочнения D при нормальном законе распределения деформаций в диапазонах $[\varepsilon_{B\alpha}, \varepsilon_{B\beta}]$ и $[\varepsilon_{z\alpha}, \varepsilon_{z\beta}]$, приводят к уменьшению полной диаграммы растяжения (рисунок 2.7а), параметров при активном деформировании $E_p(\varepsilon)$, $\nu_p(\varepsilon)$ (рисунок 2.7б) и во время разгрузки $E_u(\varepsilon)$, $\nu_u(\varepsilon)$ (рисунок 2.7в). Функции $\bar{E}_p(\varepsilon)$, $\bar{\nu}_p(\varepsilon)$ и $\bar{E}_u(\varepsilon)$, $\bar{\nu}_u(\varepsilon)$ в относительных координатах совпадают.

На рисунке 2.8а, кривая 2, показаны результаты автоматизированных расчетов по программе (приложение В) негативных изменений параметров ПДР после наработки $n = 13,5 \times 10^4$ циклов, при модуле разупрочнения $D = E$. Функции $\bar{E}_p(\varepsilon)$ и $\bar{\nu}_p(\varepsilon)$ (рисунок 2.8б), а также $\bar{E}_u(\varepsilon)$ и $\bar{\nu}_u(\varepsilon)$ (рисунок 2.8в) после циклического нагружения совпадают, аналогично сделанным выводам для модели испытуемого объема из упруго-хрупких волокон (модель Даниэльса).

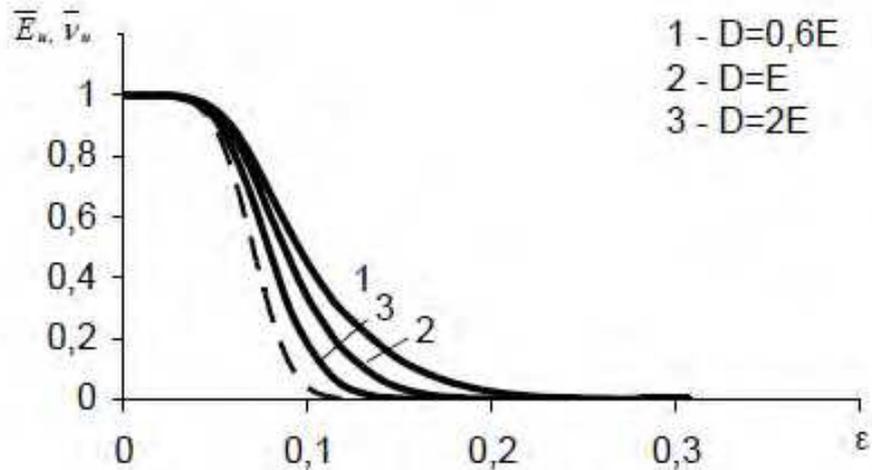
Таким образом, жесткое деформирование образца при $\varepsilon_M = const$ (рисунок 2.2в) приводит к негативным изменениям параметров ПДР, инкрементальных механических свойств металла.



а)



б)



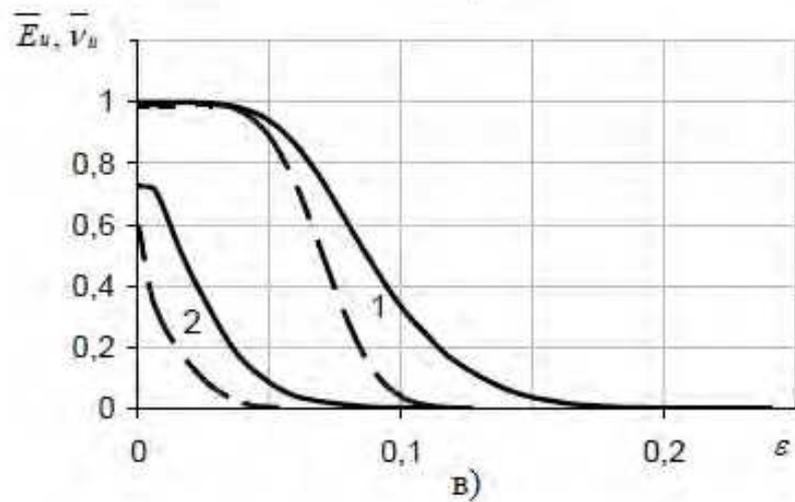
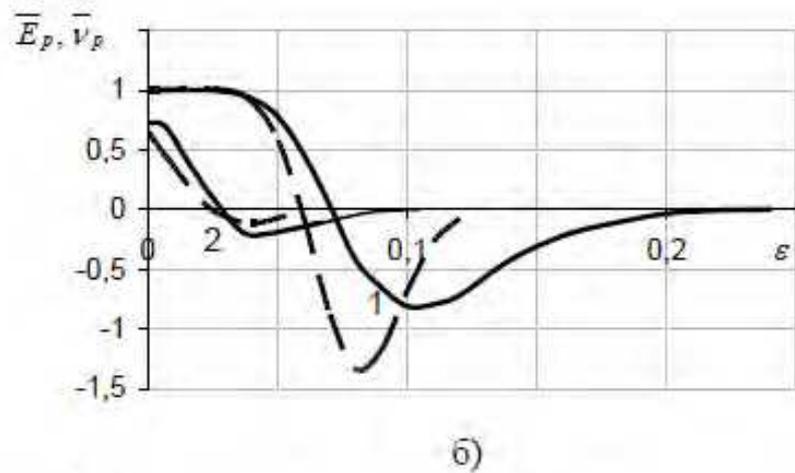
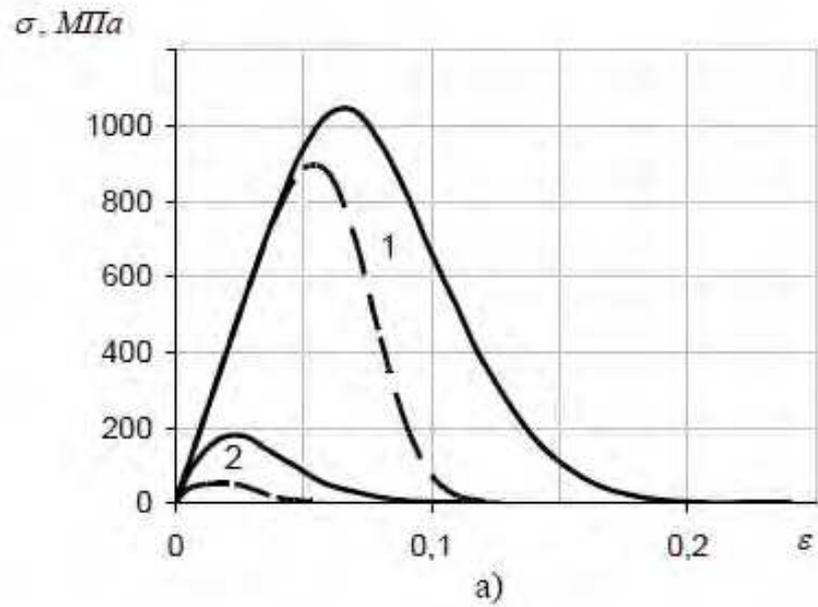
в)

а) ПДР образца; б) $E_p(\varepsilon)$ и $\nu_p(\varepsilon)$ в относительных координатах при активном нагружении;

в) $E_u(\varepsilon)$ и $\nu_u(\varepsilon)$ в относительных координатах при разгрузке

Рисунок 2.7 – Кривые для моделей Миронова – Якушева и Даниэльса

(штриховые линии) при нормальном распределении



а) ПДР образца; б) $E_p(\varepsilon)$ и $v_p(\varepsilon)$ в относительных координатах при активном нагружении;
 в) $E_u(\varepsilon)$ и $v_u(\varepsilon)$ в относительных координатах при разгрузке
 Рисунок 2.8 – Кривые для моделей Миронова – Якушева и Даниэльса
 (штриховые линии) при нормальном распределении и $D = E$, после наработок
 в циклах: $n_1=0$ (кривые 1). $n_2 = 13,5 \times 10^4$ (кривые 2)

На рисунке 2.9, кривая 3, показаны негативные изменения модуля упругости \bar{E} и КПД $\bar{\nu}$ в относительных координатах после наработки $\bar{n} = n/N$ для модели образца Миронова – Якушева, в сравнении с аналогичными изменениями для моделей испытываемых объемов Даниэльса (кривая 2) и Мазинга (кривая 1).

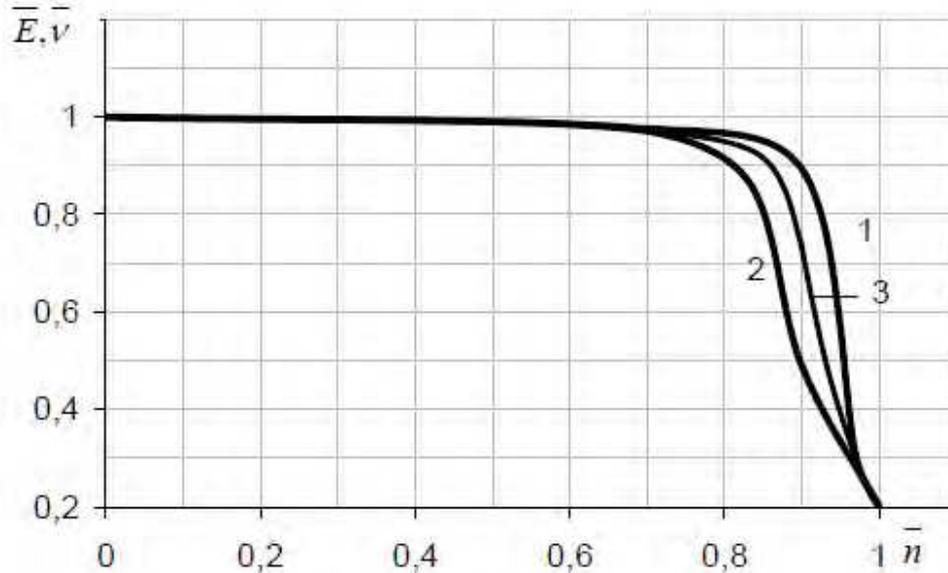


Рисунок 2.9 – Функции $\bar{E}(\bar{n})$ и $\bar{\nu}(\bar{n})$ для моделей Мазинга (кривая 1), Даниэльса (кривая 2), Миронова – Якушева (кривая 3)

Отмечается, что во всех моделях металла негативные изменения свойств \bar{E} и $\bar{\nu}$ в относительных координатах совпадают. Модель Миронова – Якушева отличается большей несущей способностью металла, повышенной трещиностойкостью из-за пологого ниспадающего участка ПДР с уменьшением модуля разупрочнения D .

Негативные изменения механических свойств металла при деформировании происходят плавно, без динамических рывков после разрушения отдельных групп волокон, как в модели Даниэльса. Испытуемый объем металла по Миронову-Якушеву разрушается равномерно.

Стоит отметить, что введение в модель металла стадии реологической неустойчивости отдельных волокон при одноосном деформировании, на примере модели Миронова – Якушева, приводит к изменению абсолютных значений параметров ПДР $\sigma(\varepsilon)$, но подобие диаграммы другим моделям сохраняется.

Проведенное моделирование позволяет сделать вывод о наличии связей параметров полной диаграммы при растяжении с модулями упругости и КПД даже во время негативных изменений после тренировок. Однако, установленные взаимосвязи справедливы только для моделей Даниэльса, Мазинга, Миронова – Якушева. Отыскание аналогичных зависимостей на моделях у литых сталей тележек грузовых вагонов класса 20Л сократит количество проводимых исследований на реальных образцах для изучения негативных изменений свойств после наработки.

Полученные результаты на простых физических моделях сталей, близких по свойствам к литым сталям класса 20Л для изготовления несущих деталей тележек грузовых вагонов, позволяют сделать заключение о неизбежных негативных изменениях основных механических свойств с ростом наработки и существующей их взаимосвязи с параметрами полной диаграммы при квазистатическом растяжении. Установленные закономерности могут применяться в перспективе для создания усталостных моделей литых сталей с целью прогнозирования усталостной долговечности боковых рам и надрессорных балок тележек вагонов.

2.3 Исследование поведения испытываемого объема металла в испытательной машине

Как уже упоминалось в первой главе и в предыдущих разделах второй главы, полная диаграмма растяжения стальных образцов строится при квазистатическом кинематическом деформировании в абсолютно жестких захватах испытательной машины. Характерной особенностью является снижение усилия на образце вплоть до нуля с ростом деформации [240, 243, 251]. Упруго деформированные участки самого образца при деформировании на стадии разупрочнения лишь ускорят разрушение образца. Поэтому, для построения участка разупрочнения на диаграмме, упругие части вне зоны шейки на образце исключают, испытывая однократные образцы с длиной рабочей части равной диаметру поперечного сечения.

Процесс построения падающей ветви на диаграмме для реальных литых сталей тележек вагонов, трещиностойкость которых значительно ниже, чем, например, у чугунов, представляется технически сложной задачей, требующей проведения предварительных изучений процесса деформирования образца в испытательной машине. В данном разделе, методами теории катастроф, разрабатываются основополагающие условия деформирования испытываемого объема в нагружающем устройстве.

Исследуемая механическая система для построения полной диаграммы с ниспадающим до нуля участком, при квазистатическом растяжении испытываемого объема, показана на рисунке 2.10. Испытуемый объем металла с рабочей частью

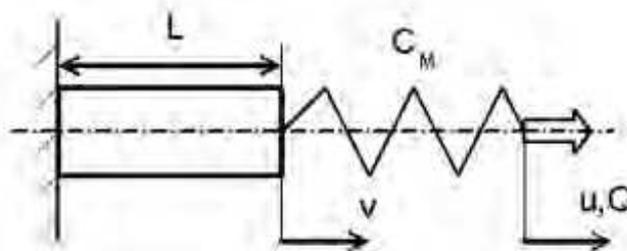


Рисунок 2.10 – Схема растяжения образца в испытательной машине

длиной L растягивается силой Q или перемещением u , прикладываемым к захвату испытательной машины жесткостью C_M . При этом, происходит удлинение образца на величину v силой P .

Деформирование за временным сопротивлением приводит к появлению неустойчивости в испытуемом объеме металла в виду необратимых структурных преобразований. Достижимое равновесие системы «машина – образец» на протяжении всего процесса записи диаграммы позволяет довести ниспадающую ветвь до нуля. Обрыв диаграммы на стадии разупрочнения означает, что равновесие системы нарушено.

Потенциальная энергия механической системы «машина – образец» [243] во время квазистатических испытаний образца на растяжение состоит из: энергии на растяжение образца, потенциальной энергии упругой деформации силопередающих устройств испытательной машины, и работы внешней силы. Тогда, потенциальная энергия механической системы «машина – образец» определится формулой:

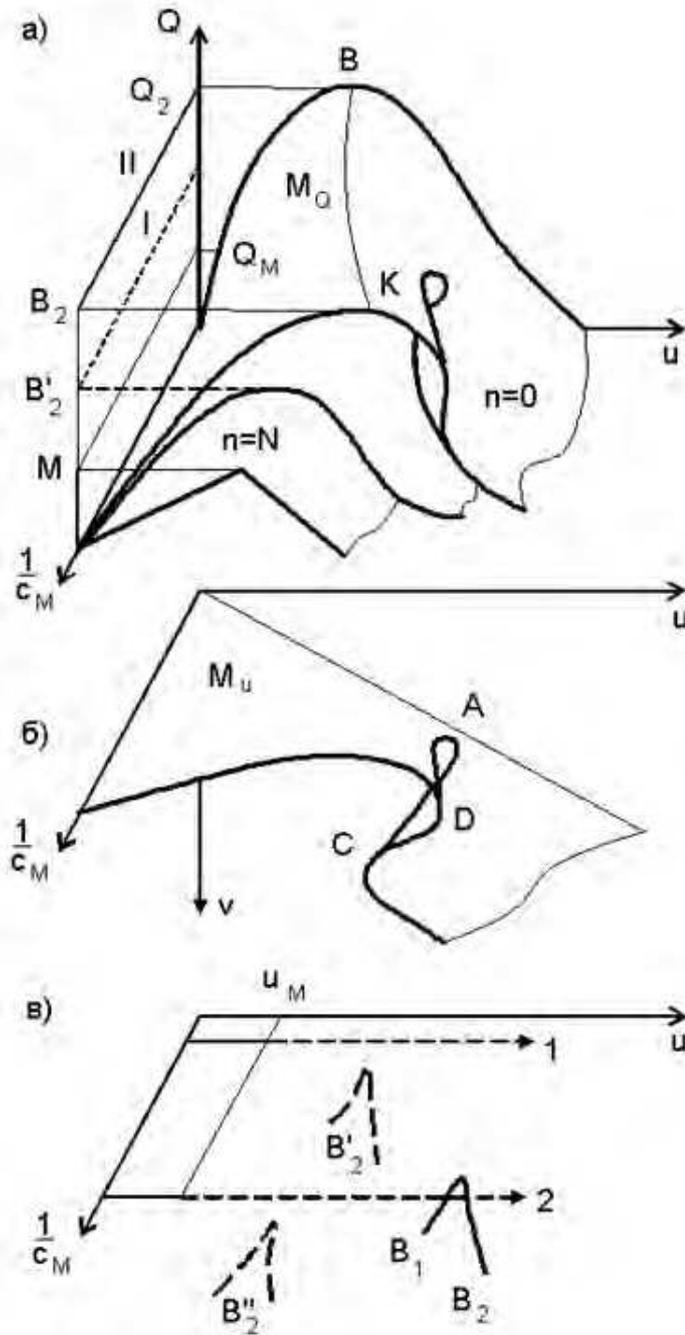
$$\Pi = \int_0^v P dv + \frac{C_M}{2} (u - v)^2 - \int_0^u Q du. \quad (2.23)$$

Согласно принципу стационарности потенциальной энергии, искомые положения равновесия системы «машина – образец» описываются формулами:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial v} = P + c_M (u - v) = 0, \\ \frac{\partial \Pi}{\partial u} = c_M (u - v) - Q = 0. \end{cases} \quad (2.24)$$

По системе уравнений (2.24) разработан алгоритм в авторской компьютерной программе Microsoft Access на языке программирования VBA для расчетов и построения ПДР образца при квазистатическом растяжении в испытательной машине. Программа позволяет находить параметры ПДР меняя жесткость C_M силонагружающего устройства испытательной машины.

Например, прикладывая силу Q к подвижному захвату жесткостью C_M , которая намного больше жесткости испытуемого образца, решением системы уравнений (2.24) находятся параметры P , u и v . По результатам расчетов строится полная диаграмма растяжения образца в испытательной машине в координатах « $Q - u$ » (рисунок 2.11а).



- а) поверхность M_Q катастрофы ПДР: б) поверхность M_u катастрофы перемещения v на образце при переменной жесткости C_M силопередающих устройств машины;
 в) бифуркации Уитни типа «сборка»

Рисунок 2.11 – Фазовые пространства механической системы «машина – образец»

Меняя параметр C_M и повторяя нагружение образца силой Q , записывается новая диаграмма $Q - u$. Множество ПДР образуют поверхность равновесия процесса деформирования образца металла в механической системе «машина – образец» с образующей M_Q (рисунок 2.11а). Задавая перемещение u силонагружающему устройству механической системы с выбранными параметрами C_M , находятся решения системы уравнений (2.24), которые образуют поверхность равновесия системы с образующей M_U (рисунок 2.11б). Отображение полученных поверхностей на плоскость показывает наличие катастрофы Уитни типа «сборка» [67, 251] (рисунок 2.11в).

В испытаниях записываются только устойчивые равновесия механической системы «машина – образец» [92, 95, 100, 102, 135, 166, 240, 267]. Выполняемое моделирование равновесия системы позволяет наблюдать точки бифуркации на поверхностях M_Q и M_U , в которых равновесие отсутствует. По теории катастроф, в случае приложения силы для деформирования образца, система уравнений (2.24) дополняется выражением:

$$\det H(\Pi) = \frac{\partial P}{\partial v} = 0,$$

где H – матрица Гессе функции Π .

Таким образом, деформирование образца приложенной к системе силой, приводит к потере равновесия системы при достижении временного сопротивления испытуемого объема металла, и не зависит от жесткости C_M силонагружающих устройств испытательной машины. Кривая BK на диаграмме $Q - u$ обозначает потерю устойчивости деформирования образца в системе (рисунок 2.11а). Построить ниспадающую до нуля ветвь при таких граничных условиях не удастся.

Нагружение образца в механической системе заданным перемещением u приводит к появлению дополнительного уравнения в системе (2.24):

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial v^2} = \frac{\partial \Pi}{\partial v} + c_M = 0.$$

Совместным решением полученных выражений, находятся точки, которые лежат на бифуркации типа «сборка», обозначенной кривыми АС и АД (рисунок 2.11б).

Равновесие механической системы, при квазистатическом нагружении перемещением u , зависит от жесткости захватов C_M . Увеличенная жесткость нагружающих устройств машины не приведет к потере равновесия деформирования образца, т. к. направление 1 перемещения захвата не пересекает бифуркацию B'_2 на графике (рисунок 2.11в). В этом случае механическая система «машина – образец» позволяет равновесно разделить целый испытуемый объем, и записать полную диаграмму растяжения с ниспадающей до нуля кривой. Согласно системе уравнений (2.24), для равновесного разрушения образца необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\frac{\partial P}{\partial v} \geq -C_M. \quad (2.25)$$

Пониженная жесткость испытательной машины приводит к катастрофе поверхности M_U при квазистатическом растяжении образца задаваемым перемещением u (рисунок 2.11б). Бифуркация B_1B_2 пересекает направление 2 нагружения образца (рисунок 2.11в). Если катастрофа будет значительной, то наступит потеря равновесного деформирования образца на стадии разупрочнения с обрывом ниспадающего участка диаграммы « $Q - u$ ».

В выражении (2.25) левая его часть отвечает за наклон ниспадающего участка полной диаграммы в координатах « $P - v$ », пологость которой указывает на повышенную трещиностойкость испытуемого объема металла и неоднородность по механическим свойствам микроструктурных составляющих [93]. Значит, критерий (2.25) определяет взаимосвязь механических свойств металла с параметрами деформирования, а также их влияние на равновесие механической системы «машина – образец».

Теория пластичности основывается на постулате механики сплошных сред – макроскопической определмости [65, 66], по которому макроскопическое состояние испытуемого объема полностью определяется процессом нагружения в каждой

его материальной частице. Другими словами, неустойчивость испытываемого объема металла в механической системе «машина – образец» на стадии закритического деформирования, и реологическая неустойчивость микроструктурной составляющей в металле, например феррита или перлита в литой стали 20Л, при соблюдении определенных условий, имеют место быть. Данный вывод формулируется известным принципом устойчивости испытываемого объема металла, а выполненный анализ поведения механической системы «машина – образец» устанавливает параметры управления и граничные условия [240].

Разупрочнение металла при квазистатическом деформировании, протекающее на ниспадающей ветви диаграммы растяжения $P(v)$, сопровождается зарождением и прогрессированием микродефектов [96]. Логично, что параметры ниспадающей ветви должны реагировать на зарождение повреждений другого типа. Обнаружено, что в испытаниях на усталость образцов конструкционных металлов, полная диаграмма растяжения тренированных образцов укорачивается. Негативные изменения ПДР также отражаются в изменении пологости ниспадающего участка.

Стационарное случайное нагружение образца количеством циклов n негативно влияет не только на функцию $P(v)$, но и на пространства M_Q или M_U (рисунок 2.11), на критерий устойчивости (2.25) механической системы «машина – образец».

Итак, стационарное случайное нагружение испытываемого объема металла, при мягком нагружении с максимальным усилием $Q_M = const$ на силонагружающем устройстве испытательной машины, негативно влияет на параметры полной диаграммы $P(v)$. Значит, они являются функциями от Q_M и n . Поэтому, граница BK (рисунок 2.11а) равновесного состояния испытываемого объема в механической системе «машина – образец», с увеличением числа циклов нагружений n движется влево. Наибольшее перемещение цикла $u_M = const$ при условии неизменного модуля упругости E металла образца, характерного для многоциклового усталости.

Предельное состояние образца по усталости, или критерий его усталостного разрушения устанавливается выражением:

$$P_B(Q_M, N_Q) = Q_M, \quad (2.26)$$

которое соблюдается в точке M временного сопротивления образца, в момент присоединения ее к точке K , приближающейся с ростом числа циклов периодических нагружений (рисунок 2.11а).

Таким образом, потеря устойчивости деформирования в механической системе «машина – образец» является единственной причиной разрушения испытуемого объема металла, как при квазистатическом, так и при периодическом нагружениях. Если критерий (2.26) соблюдается, то происходит долом образца. Число циклов до усталостного разрушения соответствует кривой усталости Веллера.

В случае стационарного случайного нагружения испытуемого объема металла с максимальным перемещением цикла $u_M = const$, негативные изменения параметров диаграммы $P(v)$ также присутствуют. Результатом таких изменений является смещение бифуркации B_1B_2 влево с увеличением чисел циклов периодических нагружений (рисунок 2.11в). Точка возврата бифуркации типа «сборка» перемещается вверх по плоскости $C_M^{-1}u$ в положение B'_2 (рисунок 2.11в), при условии, что ниспадающий участок ПДР становится менее пологим. Катастрофа приближается к безопасному направлению 1 нагружения (рисунок 2.11в). Если катастрофа достигнет линии нагружения 1, то механическая система «машина – образец» перейдет из равновесного в неустойчивое состояние, и образец разрушится по усталости.

В случае выполаживания наклонного участка полной диаграммы растяжения $P(v)$ [126], точка возврата бифуркации смещается вниз плоскости $C_M^{-1}u$ (рисунок 2.11в). Катастрофа отступает от первоначально опасного направления нагружения 2 (рисунок 2.11в). Что произойдет в этот момент с испытуемым объемом металла при жестком нагружении параметром $u_M = const$ механической системы?

Периодическое нагружение испытуемого объема при жестком нагружении с максимальным перемещением цикла $v_M = u_M - Q_M C_M^{-1}$ остается таким до тех пор, пока временное сопротивление металла $P_B(u_M, n) > Q_M$. Образец останется целым и при:

$$P_B(u_M, n) = Q_M, \quad (2.27)$$

Значит, возможно дальнейшее циклическое нагружение, при котором $Q_M(u_M, n)$ будет снижаться, а $v_M(u_M, n)$ увеличиваться. Если критерий (2.26) выполняться не будет, то в механической системе «машина – образец» произойдет потеря равновесия и образец разрушится. В этом случае, точка возврата бифуркации B_2 (рисунок 2.11а) не пересекается с направлением 2 нагружения (рисунок 2.11в). Негативные изменения полной диаграммы $P(v)$ до выполнения критериев (2.26) и (2.27) могут быть близки, но долговечность N_U всегда будет превышать N_Q , что соответствует результатам лабораторных испытаний.

В испытаниях на усталость с каналом управления от датчика, устанавливаемого на рабочей части испытуемого образца, необходимо ограничить наибольшее перемещение цикла $v_M = const$. Тогда, негативное изменение ПДР после соблюдения критерия $P_B(v_M, n) = Q_M$, будет происходить с уменьшением максимальных значений перемещения u_M и усилия Q_M цикла на захвате машины. Долговечность испытуемого образца N_V определится кривой усталости Веллера в координатах « $v_M - n$ ».

Таким образом, изучение модели негативного изменения полной диаграммы растяжения после периодического нагружения позволяет установить взаимосвязь циклического и квазистатического разрушения образца в испытательной машине. Критерий (2.26), как граница между постепенным накоплением повреждений в металле и неустойчивым их развитием, является основным в изучении сути усталостных процессов, протекающих в литых деталях тележек грузовых вагонов. Необходимо сократить до минимума риск перехода боковой рамы или надрессорной балки тележки из опасного состояния в предельное, или катастрофического разрушения с позиций теории катастроф, путем правильного подбора литой стали и конструктивных решений.

2.4 Основные результаты и выводы по главе 2

а) Рассматривая структурно-феноменологическое описание взаимосвязанных процессов квазистатического и усталостного разрушения на модельных образцах металлов, обнаружены негативные изменения механических свойств (модуля упругости и коэффициентов поперечной деформации) сталей, которые могут проявляться в литых сталях для изготовления несущих деталей тележек грузовых вагонов. Выявленные тенденции позволят по-новому взглянуть на проблему прогнозирования усталостной долговечности боковых рам и надрессорных балок тележек вагонов из литых сталей, благодаря введению в расчетные методики ранее неизвестных свойств, которые открываются с помощью расширенной, или полной диаграммы деформирования.

б) На дискретных моделях сталей с различной микроструктурой установлено, что периодическое нагружение приводит к негативным изменениям сперва пластических, а потом прочностных и упругих свойств. Изменяются не только параметры полной диаграммы растяжения после наработки металла, но и функциональные его характеристики. Построенные математические модели реагируют на циклическое нагружение испытуемого объема металла, и позволяют исследовать негативные изменения свойств металла с высоким коэффициентом наработки.

в) Выявлено, что с увеличением циклической наработки металла модельного образца ниспадающий участок полной диаграммы становится более пологим, модуль хрупкости металла снижается, наряду с модулем упругости.

г) Разработаны алгоритмы и компьютерные программы в приложении Microsoft Access на языке программирования VBA для теоретического изучения негативных изменений механических свойств сталей, с неоднородными по свойствам структурными составляющими, характерными для литых сталей деталей тележек вагонов с феррито-перлитной микроструктурой.

д) Выполнен качественный анализ и установлены критерии устойчивого деформирования образца в механической системе «машина – образец» в зависимости от жесткости силонагружающих устройств испытательной машины. Определены

параметры механической системы для получения равновесного деформирования образца и построения участка разупрочнения на диаграмме после наработки. Полученные критерии необходимы для построения испытательной машины и проведения лабораторных испытаний на образцах из литых сталей тележек вагонов.

Глава 3 Модель внутреннего технологического дефекта в стенке литой детали тележки вагона

Моделирование микроструктур сталей, выполненное в предыдущей главе, отражало процесс постепенного накопления повреждений, приводящий к негативному изменению механических свойств металла, разупрочнению и разрушению испытуемого объема, или усталость [35]. Разброс механических свойств отдельных элементов микроструктуры металла в некотором интервале позволял задавать структурную неоднородность, присущую феррито-перлитным литым сталям типа 20Л для деталей тележек вагонов. Однако, делать прогнозы долговечности боковых рам и надрессорных балок литой конструкции только на основе моделей усталости металла было бы неверным, поскольку отливки содержат большое количество внутренних и наружных технологических дефектов, отрицательное влияние на долговечность которых достаточно велико.

Нормативные требования к виду дефектов, размерам, расположению, способам их контроля и выявления в литых боковых рамах и надрессорных балках приводятся в ГОСТ 32400-2013 [41]. Как правило, границы между допускаемыми и не допускаемыми дефектами во вновь проектируемых несущих деталях тележек проводятся на основе лабораторных испытаний натуральных деталей или образцов из них [218, 219, 220, 223, 224], технических заключений экспертных организаций о причинах разрушения аналогичных деталей в сети железных дорог [9, 109, 147, 163, 179, 196]. Технологии изготовления серийных отливок несущих деталей тележек вагонов (приложения К, Л) [168 – 171] несовершенны и не гарантируют полное отсутствие литейных дефектов [55]. Поэтому, литая боковая рама (приложение Ж) и надрессорная балка (приложение И) не представляется без каких-либо внутренних и наружных технологических дефектов литейного происхождения.

Существующих нормативных методик по оценке влияния внутренних литейных дефектов в стенке боковой рамы или надрессорной балки, например усадочной раковины и рыхлоты, усадочной пористости, газовых и песчаных раковин [3, 26, 34, 41], на их усталостную долговечность не имеется. Однако, у разработчиков

несущих деталей тележек грузовых вагонов существует потребность в таких методиках, чтобы создавать конструкции с учетом вероятного появления литейного дефекта, или их совокупности, в наиболее нагруженных зонах, а также с целью выполнения требования надежности в разделе 4 ГОСТ 32400-2013 [41].

Данная глава посвящена рассмотрению и моделированию внутренних остроугольных технологических дефектов литейного происхождения в стенках наиболее нагруженных сечений боковых рам тележек грузовых вагонов, которые могут послужить причиной крушений вагонов в сети железных дорог.

Модель внутреннего дефекта в стенке отливки должна иметь подобие по размерам реальному дефекту с острыми вершинами. Изучение напряженного состояния в вершине такого дефекта выполняется методом механики разрушений, путем определения коэффициента интенсивности напряжений (КИН), что позволяет получить значение порогового КИН, по которому подбирается допустимый размер внутреннего дефекта.

3.1 Анализ изломов литых боковых рам тележек с внутренними технологическими дефектами литейного происхождения

Изучение размеров реальных внутренних дефектов в отливках боковых рам, как менее надежных в эксплуатации под вагоном [29], начинается с рассмотрения выборки из восьмидесяти шести изломов после сокращенных испытаний на сопротивление усталости в лабораторных условиях по методикам испытаний на усталость [141, 142]. Отливки соответствовали действующим требованиям ОСТ 32.183-2001 [154] по марке стали, геометрии и механическим свойствам. Но, в шестидесяти шести изломах выявлены внутренние литейные дефекты, послужившие началом зарождения и последующего развития усталостных трещин. Наличие дефектов в изломах обусловлено отработкой технологии формовки и заливки отливок боковых рам в период постановки на производство, а в некоторых случаях и нарушениями уже серийной технологии.

Периодические нагружения боковых рам на гидропульсаторных испытательных машинах ZDM-200 и ZDM-400 проводились в период с 2003 по 2013 год в лабораториях: Уралвагонзавода, ПГУПС, НИИ Мостов, УО ВНИИЖТ. Полные сокращенные испытания на сопротивление усталости выполнялись при мягком нагружении с управлением по амплитуде нагрузки. Параметры циклов находились в диапазоне: постоянное среднее значение от 35 (по 2010 г.) до 37 тс, амплитуда цикла от 19 до 27 тс, базовое число циклов 10^7 . Согласно требованиям методик испытаний на усталость [141, 142], после наступления потери несущей способности, боковая рама разрезалась огнем способом в месте излома для отделения его от отливки и последующего металлографического анализа.

По диаграмме Парето (рисунок 3.1) видно, что 80% изломов боковых рам произошли по причине наличия внутренних технологических дефектов литейного происхождения: газовых, песочных и усадочных раковин. От рыхлот и усадочной пористости зародились усталостные трещины в 20% боковых рам (рисунок 3.1).

Распределение внутренних дефектов в исследуемых изломах по площади приведено на рисунке 3.2. Основными причинами преждевременных изломов, почти у

80% боковых рам, служат наличие литейных дефектов площадью от 10 до 40 мм² (рисунок 3.2). Такую площадь имели газовые и песочные раковины.

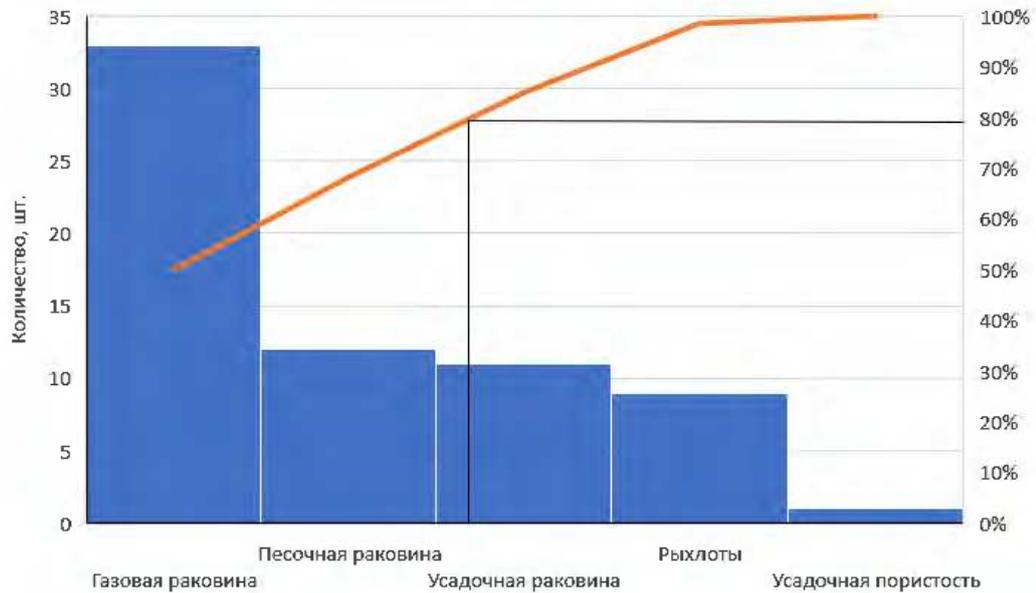


Рисунок 3.1 – Диаграмма Парето по типам внутренних литейных дефектов в изломах, послуживших причиной преждевременных изломов боковых рам

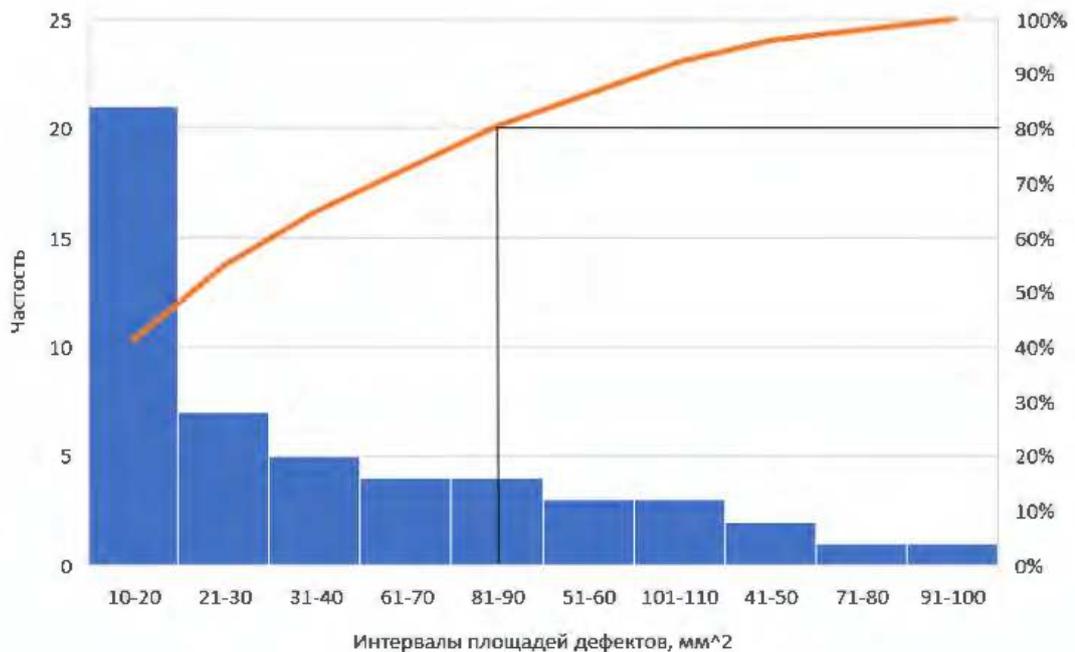


Рисунок 3.2 – Диаграмма Парето по интервалам площадей внутренних литейных дефектов в изломах, послуживших причиной преждевременного излома боковых рам

В толщинах стенок литых боковых рам от 17 до 20 мм встречается 80% технологических дефектов, а 20% дефектов обнаружены в изломах с толщиной стенки боковой рамы от 15 до 16 мм (рисунок 3.3).

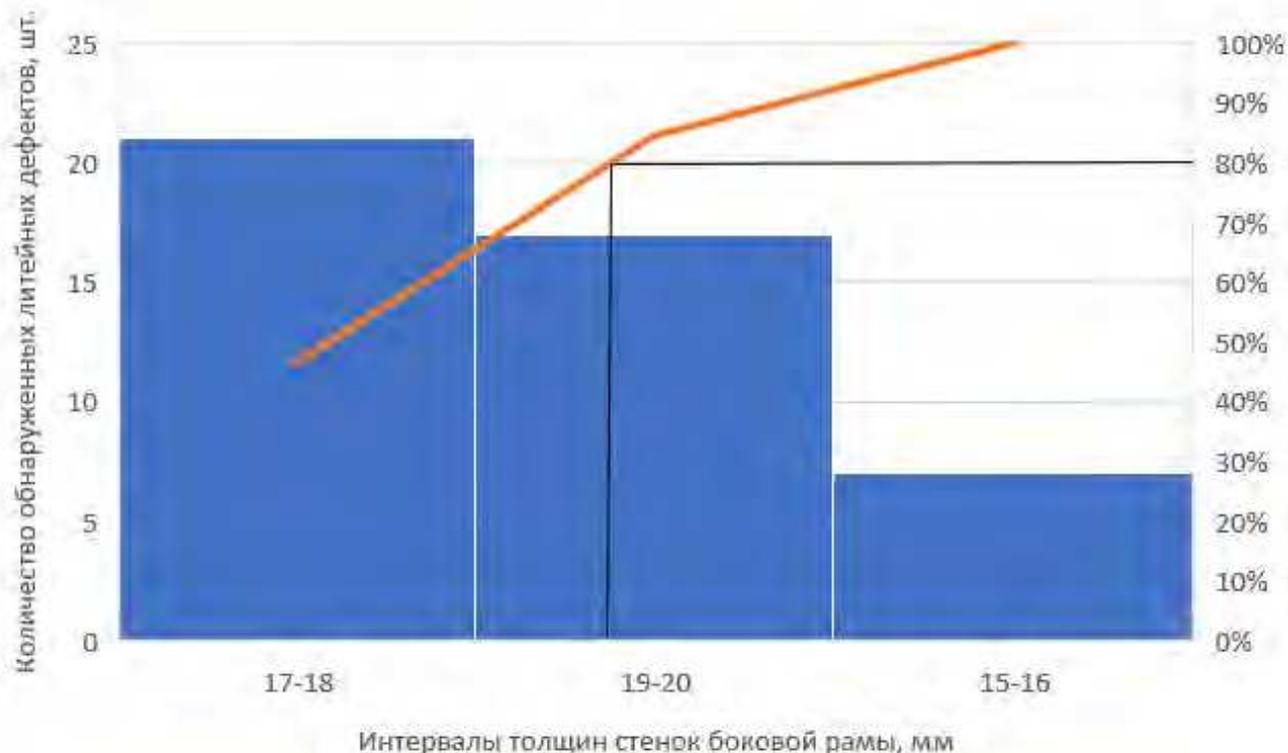


Рисунок 3.3 – Диаграмма Парето по интервалам толщин стенок боковых рам с внутренними литыми дефектами, от которых зародились усталостные трещины

Конечно, попадание дефекта в стенку большей толщины зависит еще от места расположения по сечению боковой рамы, технологии формовки, расположения в печи для термообработки, и т.д. Но, представленный на рисунке 3.3 результат совпадает с общими представлениями о масштабном эффекте, согласно которому, с увеличением толщины стенки отливки доля различного рода дефектов также повышается.

В результате проведенного анализа шестидесяти шести изломов литых боковых рам после стендовых испытаний на усталость в лабораторных условиях установлено, что внутренний дефект литейного происхождения в виде газовой или песочной раковины площадью описанного прямоугольника 10 мм² уже является

концентратором напряжений и приводит к преждевременному разрушению отливки (рисунок 3.2). Средняя толщина стенки боковой рамы тележки грузового вагона, в которой наиболее часто появляются внутренние литейные дефекты, составляет 18 мм.

Полученные результаты необходимо использовать в разработке плоского прямоугольного образца с центральным остроугольным концентратором в форме литейного дефекта для испытаний на осевое растяжение и установления пороговых значений КИН.

3.2 Разработка плоского прямоугольного образца с центральным остроугольным концентратором в форме литейного дефекта для испытаний на осевое растяжение

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 надрессорных балок и боковых рам 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, 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. 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.

Типы прямоугольных образцов для определения параметров трещиностойкости металлов при квазистатическом нагружении указаны в разделе 2 ГОСТ 25.506-85 [38]. Стандартные методики по установлению показателей кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР), таких как пороговое значение КИН K_{th} ,

при котором срагивается исходная трещина, и циклическая вязкость разрушения образца K_{fc} (рисунок 3.4), отсутствуют.

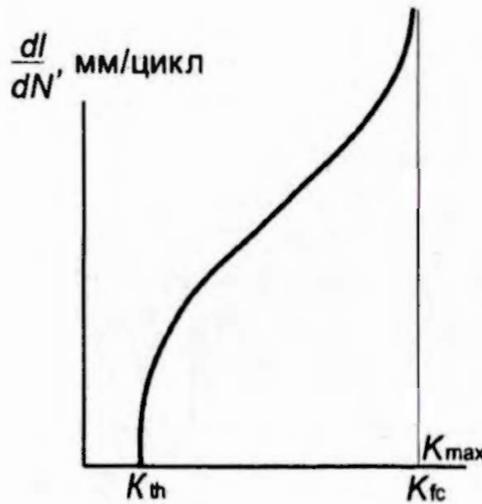


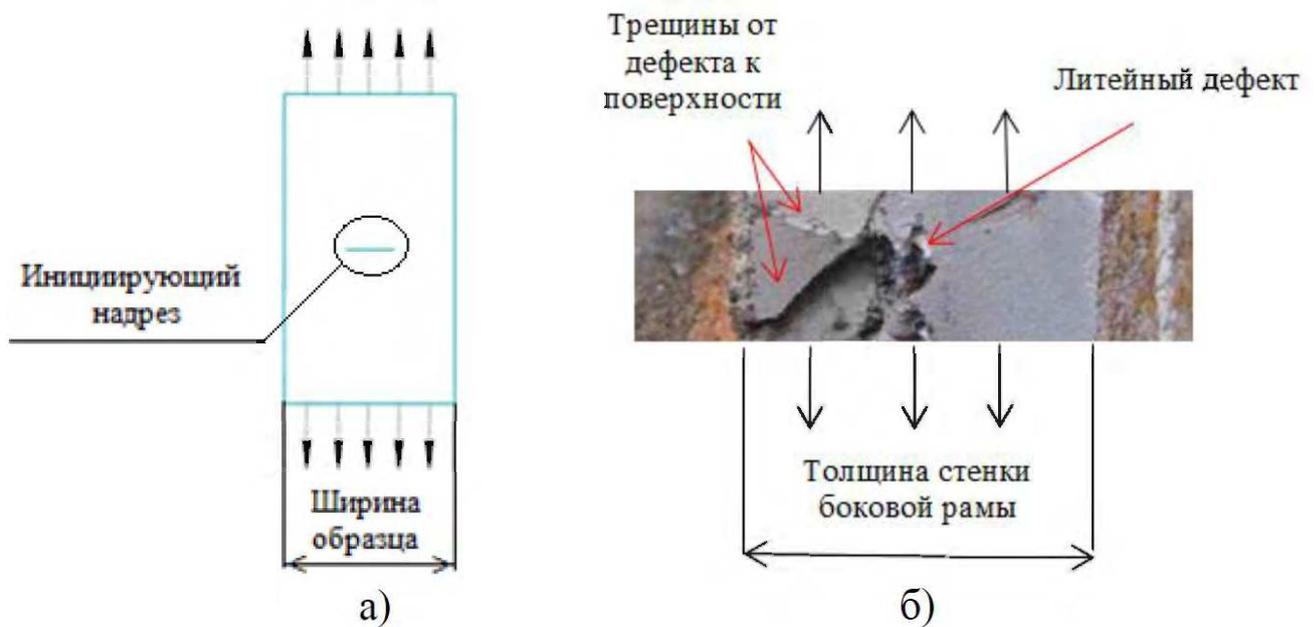
Рисунок 3.4 – Общий вид кинетической диаграммы усталостного разрушения

В известных трудах [62, 216, 217], КДУР вагонных сталей для боковых рам и наддресорных балок тележек строятся при внецентренном циклическом растяжении прямоугольных образцов с краевой трещиной по методикам испытаний ВНИИЖТ, геометрические размеры и схемы нагружения которых подобны требованиям ГОСТ 25.506-85 [38]. Полученные значения K_{th} и K_{fc} для сталей типа 20Л характеризуют скорость развития поверхностных усталостных трещин в отливках несущих деталей тележек вагонов, и необходимы для прогнозирования надежности их эксплуатации. Поверхностные усталостные трещины во внутренних радиусах проемов для колесных пар и в радиусах нижних углов рессорного проема литых боковых рам тележек отслеживаются на пунктах технического обслуживания (ПТО) грузовых вагонов согласно [2, 11, 265]. Поэтому, труды ученых направлены на исследование статической трещиностойкости и параметров КДУР литых сталей тележек вагонов на плоских образцах с краевой трещиной при внецентренном нагружении.

В работе [218] установлено, что внутренние литейные дефекты, в боковых рамах и наддресорных балках тележек, округлых форм без острых кромок на глубине 5 мм и более, не являются резкими концентраторами напряжений. Поэтому,

необходимо изучать влияние остроугольных внутренних литейных дефектов на усталостную долговечность литых деталей. Кроме того, возможна разница значений показателей K_{th} и K_{fc} при внецентренном и осевом растяжении.

Предлагается исследовать поведение внутреннего дефекта на плоском прямоугольном образце с центральным трещиноподобным надрезом при осевом растяжении (рисунок 3.5а) [210].



а) образец с центральным трещиноподобным надрезом;
б) стенки боковой рамы с литейным дефектом

Рисунок 3.5 – Схемы нагружения

Основные соотношения габаритных размеров рабочей части образца изменены относительно требований в ГОСТ 25.506-85 [38]. Например, ширина рабочей части образца 18 мм снижена до толщины стенки боковой рамы тележки, в которой наиболее часто появлялись дефекты (рисунок 3.3). Толщина рабочей части образца 2 мм и конфигурация иницирующего надреза (рисунок 3.6) согласно ГОСТ 25.506-85 [38]. Площадь 14,29 мм² описываемого центральный надрез прямоугольника в образце соответствует средней площади самых массовых внутренних литейных дефектов (рисунок 3.2), способствующих преждевременным изломам боковых рам в лабораторных испытаниях. Образец имеет жесткие

относительно рабочей части образца захватные части для адаптации к испытательной машине (рисунок 3.6) [210].

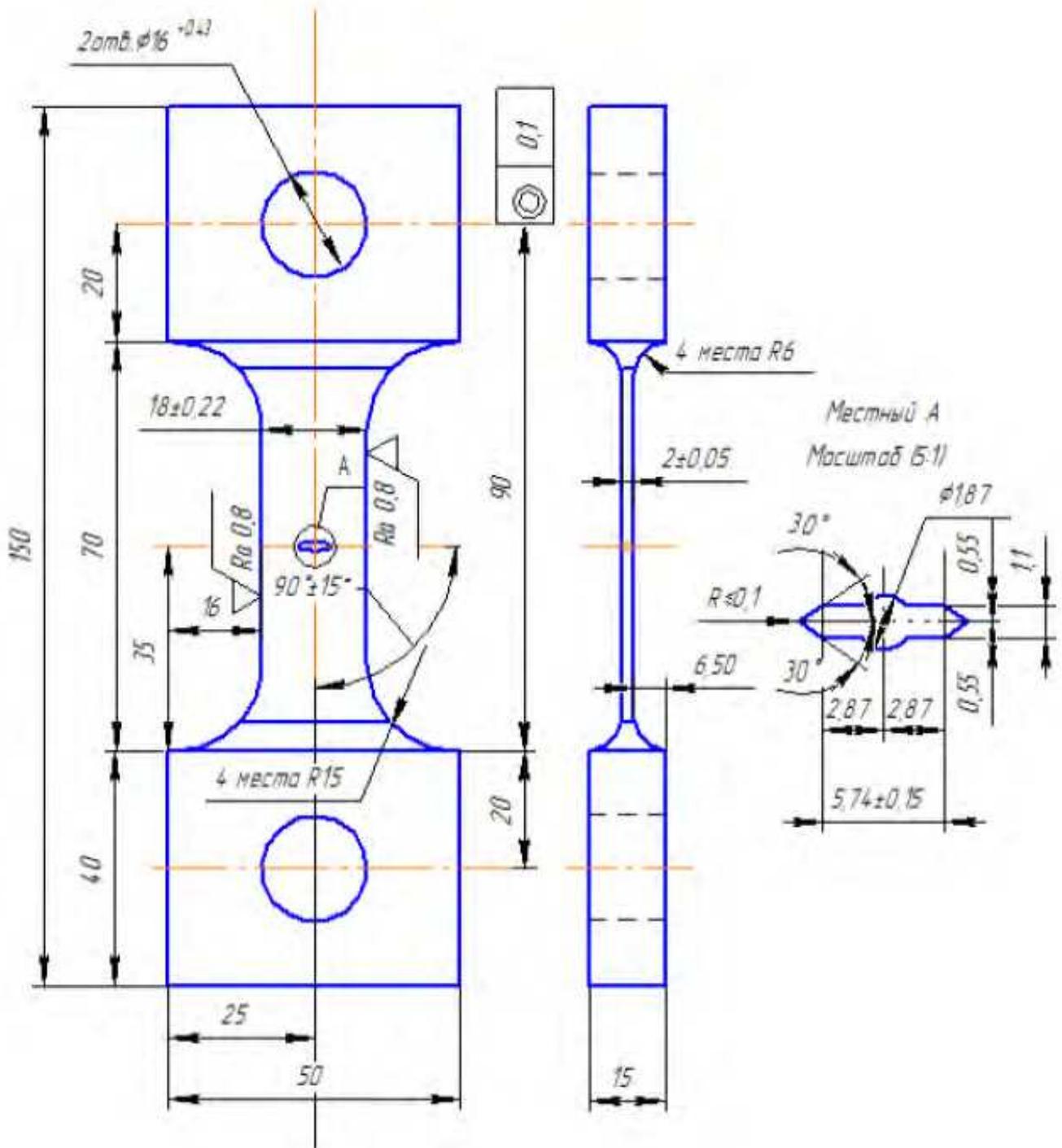


Рисунок 3.6 – Образец с центральным трещиноподобным надрезом для испытаний на осевое растяжение

Схемы нагружения испытываемого образца и залегающего на глубине внутреннего дефекта, в стенке боковой рамы тележки, схожи (рисунок 3.5).

Эквивалентность схем нагружения приведет к одинаковым направлениям продвижения усталостных трещин от дефектов в образце и детали. Например, усталостная трещина в стенке боковой рамы с литейным дефектом зарождается возле острой его вершины, и движется к внутренней или наружной поверхностям боковой рамы (рисунок 3.5б). Об этом свидетельствуют усталостные рубцы в усталостном изломе (рисунок 3.5б). Аналогично, усталостная трещина будет проявляться в образце, двигаясь от острой вершины трещиноподобного дефекта к краям его рабочей части. Таким образом, рабочая часть образца с центральным трещиноподобным надрезом для испытаний на осевое растяжение соответствует поперечному сечению стенки боковой рамы тележки единичной толщины с залегающим на глубине остроугольным литейным дефектом, испытывающего деформации растяжения.

Определение КИН на разработанном образце позволит устанавливать допустимые размеры внутренних литейных дефектов в отливках боковых рам и надрессорных балок. Предложенная математическая модель дефекта в лабораторном образце (рисунок 3.7) способствует уточнению известных пороговых значений КИН, полученных при внецентренном нагружении плоских образцов с краевой трещиной, определению напряженного состояния вблизи острой вершины литейного дефекта внутри стенки отливки, назначению допустимых размеров технологических дефектов в натуральных деталях.

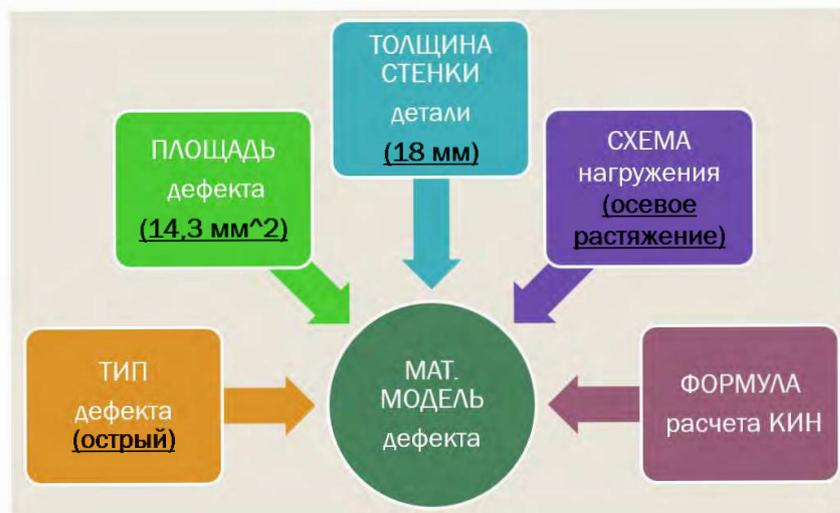


Рисунок 3.7 – Структурная схема математической модели внутреннего технологического дефекта в стенке литой детали тележки вагона

3.3 Определение коэффициента интенсивности напряжений в вершине центрального концентратора на плоском образце при осевом растяжении

В работах [62, 216, 217, 219, 220, 223] проведено большое количество испытаний образцов с краевой трещиной при внецентренном нагружении размером 125x120x9 мм из литых сталей типа 20Л, о результатах которых сообщалось в первой главе. Значения КИН рассчитывались по выражению Ирвина [80, 298] для плоского напряженного состояния:

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma_y \sqrt{2\pi r}, \\ \sigma_y &= E(1-\nu^2)^{-1}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где r – расстояние от вершины трещины или острого дефекта до точки, в которой определяется компонента напряжения σ_y , исключая зону пластических течений металла.

Формула (3.1) исключает малое пространство вблизи вершины трещины или острого дефекта, в котором возникают пластические деформации, имеет широкое применение в опытах с построением КДУР на образцах и натуральных деталях [62, 216, 217, 219, 220, 223]. Полученные в данных работах экспериментальные результаты по определению пороговых значений КИН K_{th} для литых сталей класса 20Л сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Пороговые значения K_{th} сталей класса 20Л для боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов

Марка стали	Пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{th} , МПа $\sqrt{м}$	
	в состоянии поставки	после 25 лет эксплуатации
20Л	-	5,3 [216]
20ГФЛ	7,1 [217]	5,3 [216]
20ГЛ	8,0 [62]	-
20ФТЛ	10,0 [62]	-

С целью расчета КИН вблизи вершины трещиноподобного надреза в разработанном образце конечных размеров, вместо формулы (3.1) используется формула из [38, 210], как для плоского прямоугольного образца с центральной трещиной при осевом растяжении:

$$K_I = \frac{F}{t\sqrt{b}} \cdot 0,38 \left[1 + 2,308 \cdot \frac{2l}{b} + 2,439 \left(\frac{2l}{b} \right)^2 \right], \quad (3.2)$$

где b – ширина образца;

t – толщина образца;

$2l$ – длина иницирующего надреза в образце,

F – осевая нагрузка растяжения образца (рисунок 3.5а).

Осевая нагрузка растяжения образца определяется по формуле:

$$F = k\sigma_p t(b - 2l), \quad (3.3)$$

где k – понижающий коэффициент условного предела текучести металла σ_p , выбирается так, чтобы напряжения соответствовали уровням максимальных нормальных напряжений в плоскости сечения нижнего угла рессорного проема, внутреннего радиуса проема для колесных пар, и в зоне радиуса перехода поддомкратной подушки в наклонный пояс боковой рамы тележки вагона, установленных по расчетам в условиях сокращенных испытаний на сопротивление усталости [43, 141, 142].

Результаты расчетов по формулам (3.2), (3.3), с учетом размеров образца (рисунок 3.6), от осевых напряжений в характерных сечениях боковой рамы при сокращенных испытаниях на усталость, приведены в таблице 3.2. Из таблицы 3.2 видно, что вблизи вершины трещиноподобного дефекта в образце, максимальное значение КИН составляет $16,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Если данный дефект, площадью описанного прямоугольника $14,29 \text{ мм}^2$, окажется в поперечном сечении боковой рамы, например по нижнему углу рессорного проема или внутреннему радиусу проема для колесных

пар, то это приведет к преждевременному ее разрушению в ходе сокращенных испытаний на сопротивление усталости.

Таблица 3.2 – Расчетные параметры осевого растяжения образца с центральным трещиноподобным дефектом площадью 14,29 мм²

Сила растяжения образца F , Н	Напряжение в поперечном сечении образца по линии симметрии дефекта, σ , МПа	Коэффициент интенсивности напряжений K_I , МПа $\sqrt{м}$	Зона расположения внутреннего литейного дефекта в боковой раме тележки, эквивалентного по площади дефекту в образце
4869	235	16,7	нижний угол рессорного проема
4455	215	15,3	нижний угол рессорного проема
4144	200	14,2	внутренний радиус проема для колесных пар
2072	100	7,1	радиус перехода поддомкратной подушки в наклонный пояс
1857	89,6	6,4	все зоны в эксплуатационных режимах движения вагона

Сделанный вывод совпадает с результатами опытных наблюдений (рисунок 3.2), согласно которым, в изломах боковых рам тележек обнаружены литейные дефекты площадью от 10 до 20 мм², послужившие зарождению усталостной трещины.

Минимальное значение порогового КИН $K_{th} = 7,1$ МПа $\sqrt{м}$ на образцах с краевой трещиной при внецентренном растяжении (таблица 3.1) меньше, чем $K_I = 16,7$ МПа $\sqrt{м}$ на образце с центральным трещиноподобным надрезом при осевом растяжении (таблица 3.2), рассчитанным по режиму сокращенных испытаний на сопротивление усталости. Если коэффициент форсирования прикладываемых к боковой раме нагрузок в таких испытаниях 1,85, то КИН вблизи центрального надреза на образце составит $K_I = 9,0$ МПа $\sqrt{м}$. Это также подтверждает недопустимость наличия внутренних дефектов площадью описанного прямоугольника больше 14,29 мм² в сечениях боковых рам для безопасной эксплуатации.

Если при полных испытаниях на сопротивление усталости боковых рам предел выносливости определится на уровне амплитуды 19 тс по [43, 142], то КИН будет

$K_I = 15,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ (таблица 3.2). Применяя коэффициент форсирования 1,85 в полных испытаниях на сопротивление усталости получается, что $K_I = 8,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ превышает минимальное пороговое значение $K_{th} = 7,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ (таблица 3.1). Когда внутренний литейный дефект площадью описанного прямоугольника $14,29 \text{ мм}^2$ окажется в сечении нижнего угла рессорного проема боковой рамы, то он станет причиной образования усталостной трещины как в эксплуатации, так и при проведении сокращенных испытаний.

В разделе 4 ГОСТ 32400-2013 [41] указано, что допускаются без исправления газовые и усадочные раковины вне зон повышенного риска отказов боковых рам площадью не более $7,1 \text{ мм}^2$. Сравнивая решение по формуле (3.2) для внутреннего дефекта в образце (рисунок 3.6) площадью описанного прямоугольника $7,1 \text{ мм}^2$ с минимальным пороговым значением по Ирвину (таблица 3.1) для одного уровня напряжений $89,6 \text{ МПа}$ вблизи вершины трещины, получаются КИН:

$K_I = 6,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ и $K_{th} = 7,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ соответственно (таблица 3.3). Расхождение составляет $4,2\%$. Причем, оценка согласно выражению (3.2) и разработанному образцу (рисунок 3.6) более консервативна, чем по формуле Ирвина (3.1).

Таблица 3.3 – Расчетные коэффициенты интенсивности напряжений вблизи острой вершины внутреннего дефекта в образце с центральным трещиноподобным дефектом различной площади

Сила растяжения образца F , Н	Площадь описанного прямоугольника центрального трещиноподобного дефекта в образце S , мм^2	Напряжение вблизи острой вершины дефекта, σ , МПа	Коэффициент интенсивности напряжений K_I , $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$		Отклонение K_I от значения по формуле Ирвина, %
			по формуле (3.2)	по формуле Ирвина (3.1)	
1857	16,38	100,5	7,1	8,0	минус 11,3
	14,29	89,6	6,4	7,1	минус 9,9
	7,1	69,8	5,3	5,5	минус 3,6
2383	7,1	89,6	6,8	7,1	минус 4,2

Сравнительные данные расчетов КИН по формуле (3.2) и выражению Ирвина (3.1), с учетом изменения площади внутреннего остроугольного дефекта в образце с центральным трещиноподобным дефектом и постоянных граничных условий, показывают отклонения более 11% (таблица 3.3) в сторону занижения относительно формулы Ирвина (3.1). Это значит, что, согласно формуле (3.2), можно увеличивать площадь дефекта в образце пока КИН не достигнет порогового значения по Ирвину $7,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ (таблица 3.1), например, с 14,29 до 16,38 мм^2 (таблица 3.3), или увеличить протяженность дефекта в образце с 7,64 до 8,76 мм при постоянной его ширине.

Проведенные вычисления КИН K_I вблизи вершины трещиноподобного дефекта в образце при осевом растяжении, и сопоставление полученных данных с имеющимися пороговыми значениями K_{th} , установленными на основе выражения Ирвина в работах [62, 155, 217], показали близкие значения. Выявленные расхождения в 11%, по сравнению с отклонениями опытных значений пороговых КИН литых сталей (таблица 3.1) класса 20Л на 29%, являются не существенными.

В настоящей работе не ставится задача по экспериментальной проверке теоретического значения K_I в качестве нового порогового значения для образцов с центральным трещиноподобным надрезом при циклических испытаниях на осевое растяжение. Но, опытным путем в статических испытаниях по ГОСТ 25.506-85 [38] требуется определить значение K_I вблизи трещиноподобного надреза на разработанном образце (рисунок 3.6), и сравнить с известными значениями по Ирвину (таблица 3.1). Сделанные выводы на основе обоснованной математической модели (рисунок 3.8) послужат основой для уточнения площади допускаемых внутренних литых дефектов в нагруженных сечениях боковых рам и надрессорных балок с помощью пороговых значений K_{th} .

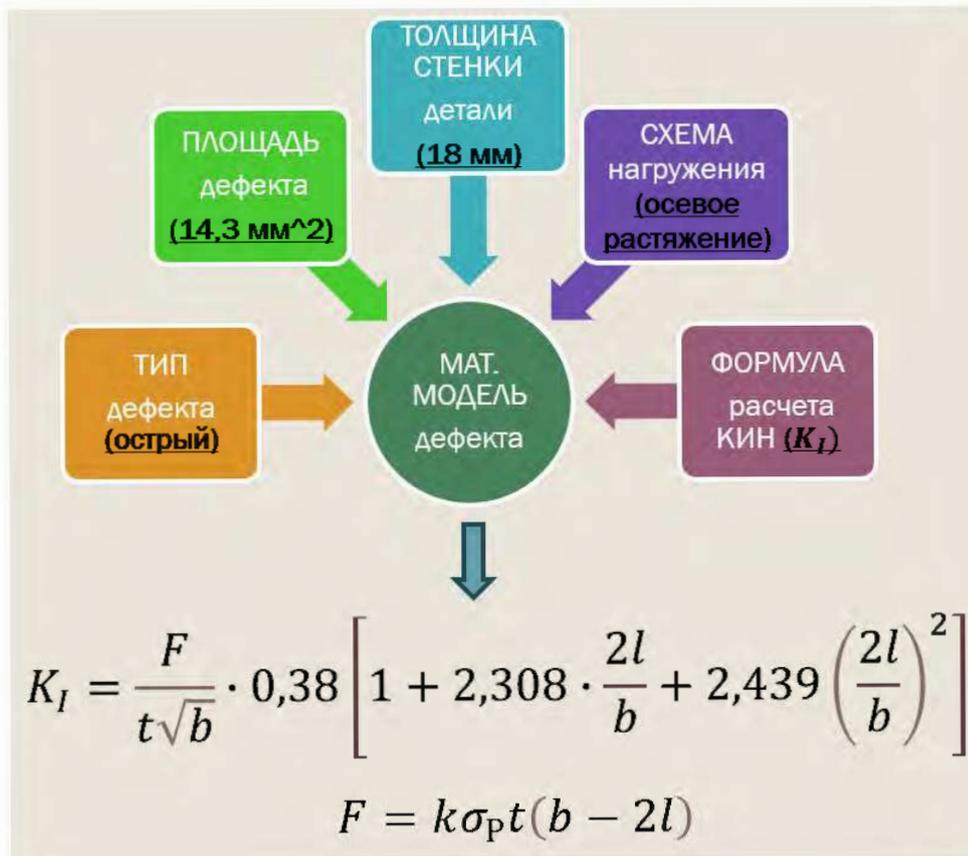


Рисунок 3.8 – Математическая модель внутреннего технологического дефекта в стенке литой детали тележки вагона

3.4 Основные результаты и выводы по главе 3

а) Проведенный анализ восьмидесяти шести изломов литых боковых рам тележек грузовых вагонов во время проведения сокращенных испытаний на сопротивление усталости показал, что в 80% изломов с внутренними дефектами литейного происхождения имелись газовые, песочные и усадочные раковины. Установленные дефекты послужили причиной раннего усталостного разрушения боковых рам, от них зарождались усталостные трещины. Чаще всего встречались дефекты площадью описанного прямоугольника от 10 до 20 мм².

б) Средняя толщина стенки боковой рамы тележки грузового вагона, в которой наиболее часто появляются внутренние литейные дефекты, составляет 18 мм.

в) Изучение поведения модели остроугольного литейного дефекта площадью описанного прямоугольника 14,29 мм² в разработанном плоском образце для испытаний на центральное растяжение, показало, что в эксплуатационных режимах нагружений коэффициент интенсивности напряжений вблизи острой вершины дефекта превышает известные пороговые значения K_{th} . Теоретические результаты и выводы о недопустимости внутреннего дефекта площадью 14,29 мм² в сечениях боковой рамы, сходятся с результатами сокращенных испытаний на сопротивление усталости.

г) В ходе сравнения полученных значений коэффициентов интенсивности напряжений вблизи вершины остроугольного внутреннего дефекта различной площади в симметричном плоском образце, установлено расхождение до 11% с критерием Ирвина в сторону снижения. Это позволяет увеличивать площадь внутренних литейных дефектов в сечениях боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов на 15% относительно установленной в действующем стандарте.

д) Анализ известных пороговых значений коэффициентов интенсивности напряжений, определенных для сталей марок 20ГЛ, 20ГФЛ, 20ФТЛ на образцах с краевой трещиной при внецентренном растяжении, показал их расхождение на 29%.

Глава 4 Математическое моделирование продвижения усталостной трещины в литой боковой раме тележки грузового вагона

Наряду с пороговым значением коэффициента интенсивности напряжений K_{th} , определенным на образце в третьей главе, превышение которого приводит к устойчивому развитию трещины в боковой раме, добавляется коэффициент циклической вязкости разрушения K_{fc} – ограничивающий этот процесс. Количество циклов нагружений несущей детали тележки, необходимое для преодоления усталостной трещиной пути от K_{th} до K_{fc} , характеризует длительность нахождения в предотказном состоянии [40], выраженную в километрах пробега грузового вагона.

Работоспособность литой детали в предотказном состоянии сохраняется, несмотря на появление видимой усталостной трещины и ее развитие [43, 265]. Но, существует риск перехода детали в предельное состояние (излом) после достижения усталостной трещины критической длины. Согласно разделу 4 ГОСТ 32400-2013 [41] длительность пребывания боковой рамы и надрессорной балки в предотказном состоянии подлежит определению. Поэтому, настоящая глава посвящена моделированию стадии продвижения усталостной трещины в детали до критических размеров, зародившейся на условиях, установленных в третьей главе. На рисунке 4.1 показана структурная схема математической модели развития усталостной трещины в литой детали тележки грузового вагона, отдельные составляющие которой рассматриваются и устанавливаются в настоящей главе.

Изучение стадии роста усталостной трещины по предложенной математической модели позволит в дальнейшем прогнозировать живучесть литой детали, или длительность перехода детали с развивающейся усталостной трещиной в опасное состояние – излом, выраженную в километрах пробега вагона.



Рисунок 4.1 – Структурная схема математической модели развития усталостной трещины в литой детали тележки вагона

4.1 Изучение предельных состояний литых боковых рам тележек грузовых вагонов в эксплуатации

Предельное состояние (излом) литых боковых рам и надрессорных балок тележек в эксплуатации наступает не сразу. Ему предшествует достаточно длительный период развития усталостной трещины. Некоторые ученые в работах [147, 220] предсказывают длительность данного периода от трех месяцев до шести лет, или от 21 тыс. до 500 тыс. км пробега грузового вагона. В действительности, грузовой вагон с пропущенной осмотрщиком на ПТО усталостной трещиной в радиусе проема боковой рамы тележки для колесной пары, проезжает от 156 до 872 км пути до места схода по причине излома [2, 3, 4]. Средняя длина гарантийного плеча безопасного проследования грузовых поездов в 2014 году составляла 1211 км [4]. Вагон не доезжает до следующей станции технического обслуживания вагонов с пролазкой, если в боковой раме пропущена развивающаяся усталостная трещина. Более того, наблюдается тенденция увеличения протяженности гарантийных участков. В перспективе, расстояние между станциями технического обслуживания грузовых поездов с пролазкой, на которых осматриваются вероятные места возникновения усталостных трещин в боковых рамах и надрессорных балках, превысит 4 тыс. км, или около семнадцати суток движения.

Требование надежности в разделе 4 ГОСТ 32400-2013 [41] к литым боковым рамам и надрессорным балкам вообще не допускает появления видимых осмотрщику усталостных трещин (опасного состояния) до очередного планового (деповского) ремонта вагона на протяжении назначенного срока службы. Минимальный период между деповскими ремонтами грузовых вагонов составляет один год по единичному критерию, и два года или 110 тыс. км по комбинированному критерию [178].

Фактические длины усталостных трещин в литых боковых рамах (рисунок 4.2) [204], также не совпадают с прогнозами в работах [147, 220], протяженность которых от 4 до 70 мм. Анализ обнаруженных усталостных трещин в боковых рамах на ПТО показал, что 80% трещин имеют длину от 10 до 130 мм

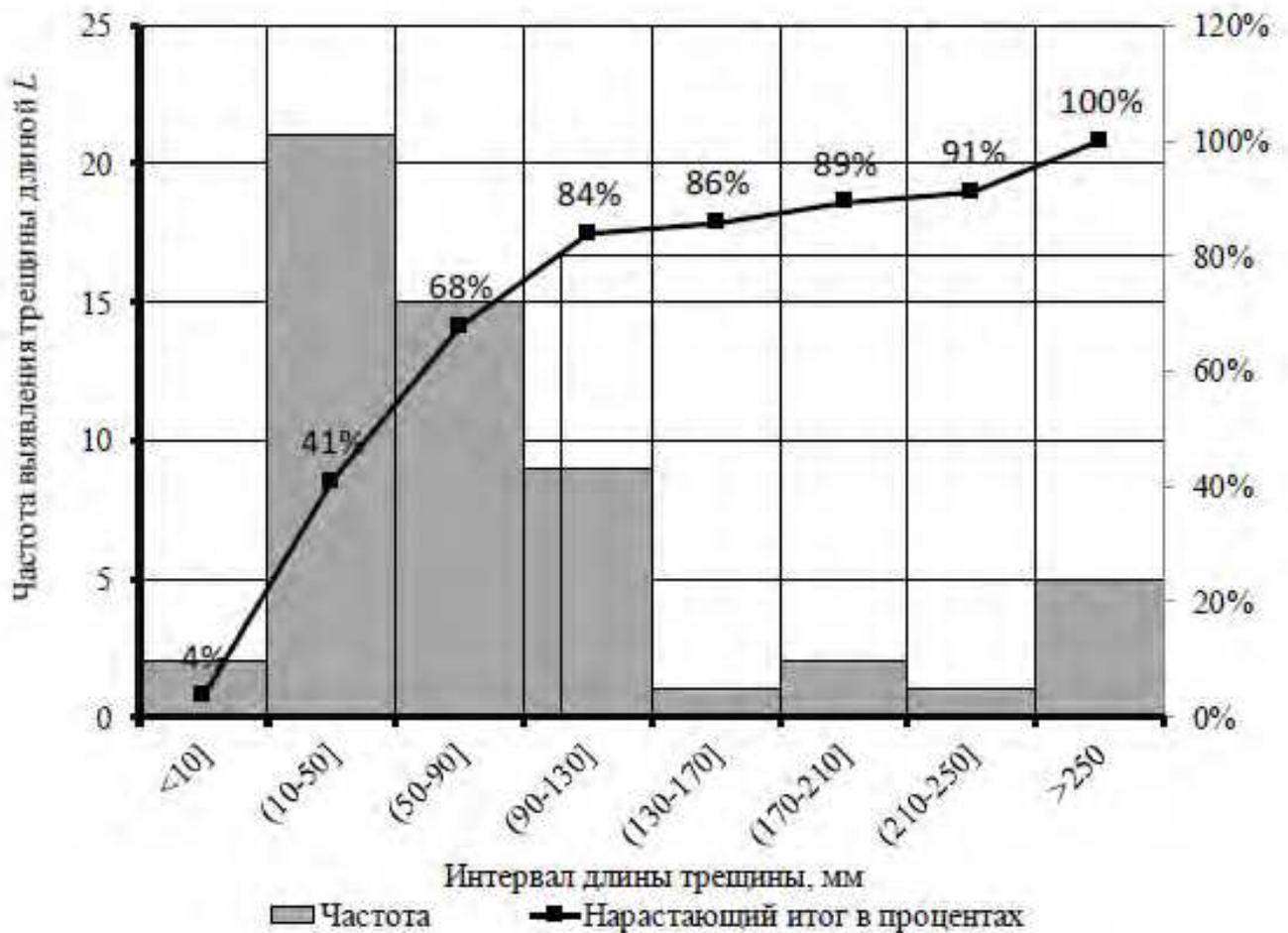
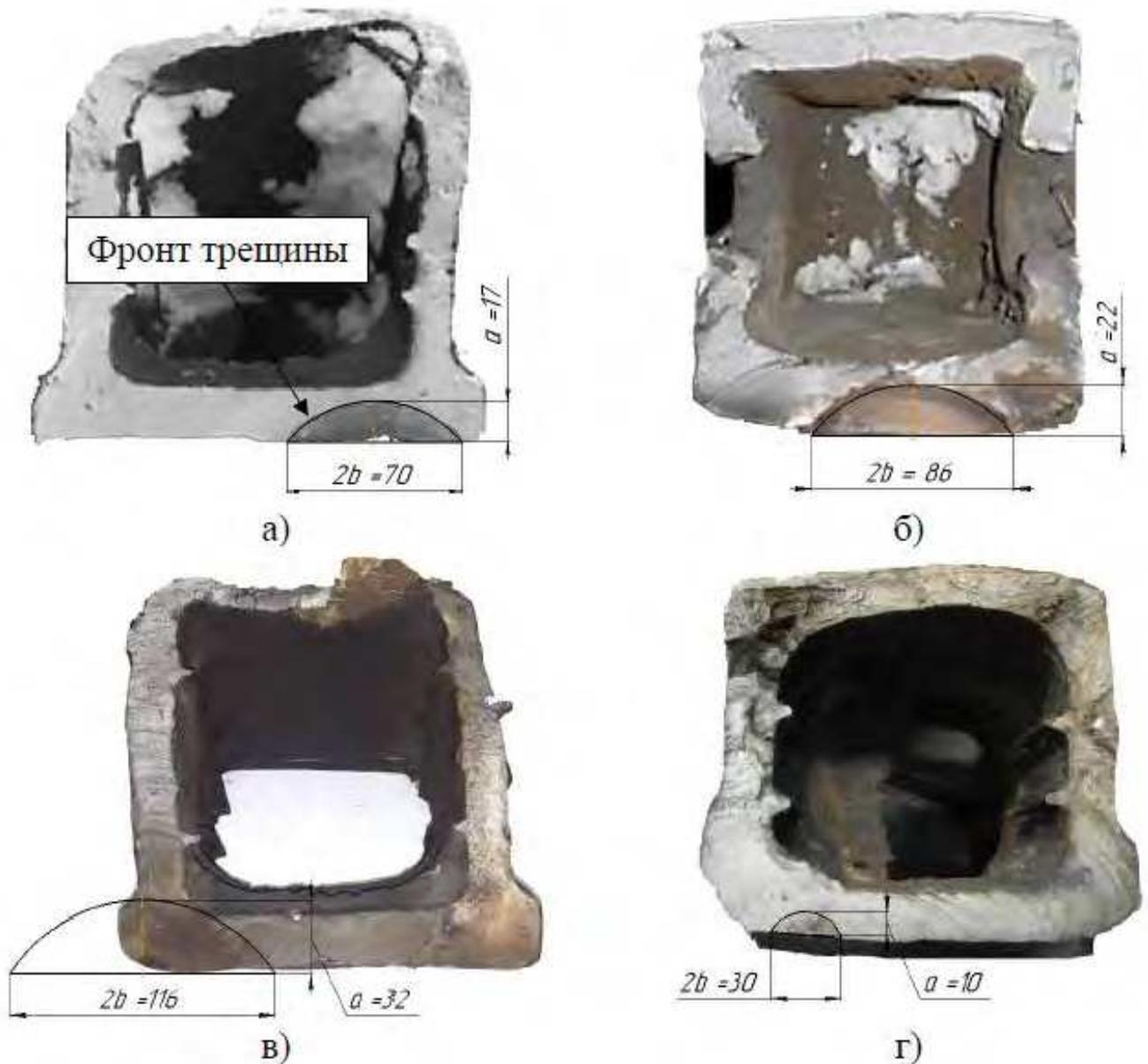


Рисунок 4.2 – Диаграмма Парето по длинам усталостных трещин в боковых рамах, обнаруженных на ПТО за пять лет наблюдений

(рисунок 4.2). В 25% случаев выявляются усталостные трещины длиной более 250 мм (рисунок 4.2). Осмотрщики вагонов могут наблюдать на ПТО около 3,5 тыс. боковых рам и надрессорных балок с усталостными трещинами только за 3 месяца [4]. Пропускают, или не находят, еще порядка 1,3 тыс. деталей с трещинами в тот же период [4], которые продолжают свое движение под вагоном после отправки с ПТО.

Характерные изломы литых боковых рам тележек, послужившие причиной крушений грузовых вагонов приведены на рисунке 4.3 [3, 260]. Изучение изломов показало, что усталостная трещина развивается от очага зарождения на поверхности радиуса боковой рамы, с дальнейшим развитием вдоль поверхности и вглубь стенки. Причем, фронт ее развития, ограниченный поверхностью радиуса боковой

рамы, образует полуэллипс с малой полуосью a и большой осью $2b$ (рисунок 4.3) [204], соотношением $a = kb$, где k – эмпирический коэффициент в интервале $[0,4 \dots 0,7]$. Большая ось полуэллипса является длиной $L = 2b$ поверхностной усталостной трещины. Отображение параметров усталостной трещины показано на рисунке 4.4 [204].



а) Германовский-Семиозерный Забайкальской ж.д (02.2013 г.), б) Жанна-Малоковали Забайкальской ж.д (02.2014 г.), в) Двойная-Ельмут Северо-Кавказская ж.д. (02.2019 г.), г) Гудачи-Гонжа Забайкальской ж.д (12.2009 г.)

Рисунок 4.3 – Внешний вид изломов литых боковых рам тележек по сечению радиусов, образующих проем для колесной пары, произошедших на перегонах

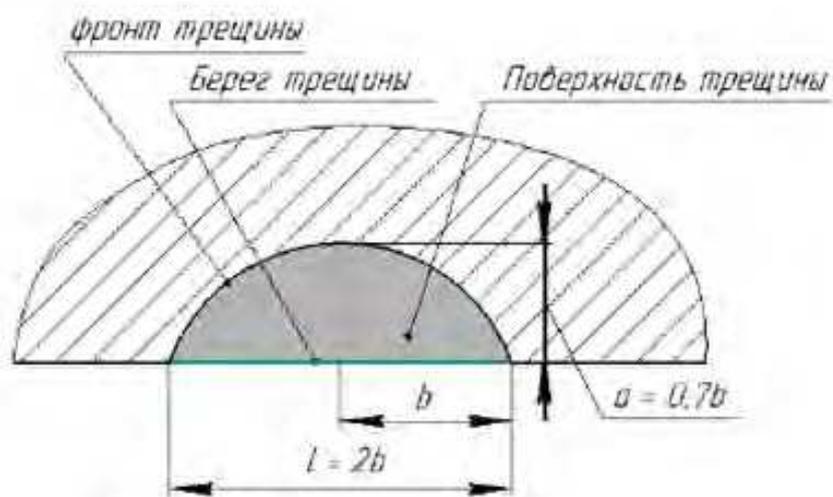


Рисунок 4.4 – Параметры поверхностной усталостной трещины в поперечном сечении радиуса боковой рамы, образующего проем для колесной пары

В исследованиях шестидесяти двух изломов литых боковых рам по сети железных дорог с 2006 по 2019 годы установлено распределение площадей усталостных трещин в процентах от поперечного сечения в местах изломов боковых рам (рисунок 4.5) [204]. Из полученной гистограммы на рисунке 4.5 следует, что в 71% случаях усталостная трещина занимала от 5 до 33% поперечного сечения боковой рамы по месту излома в интервале среднеквадратичного отклонения от минус σ до плюс σ (рисунок 4.5). Площадь усталостной трещины с наибольшей вероятностью появления в изломе боковой рамы занимает 19% площади поперечного сечения.

Установленные параметры усталостных трещин в изломах натуральных боковых рам после крушения грузовых вагонов необходимо использовать в моделировании для оценки длительности пребывания детали в опасном состоянии выраженную в километрах пробега вагона.

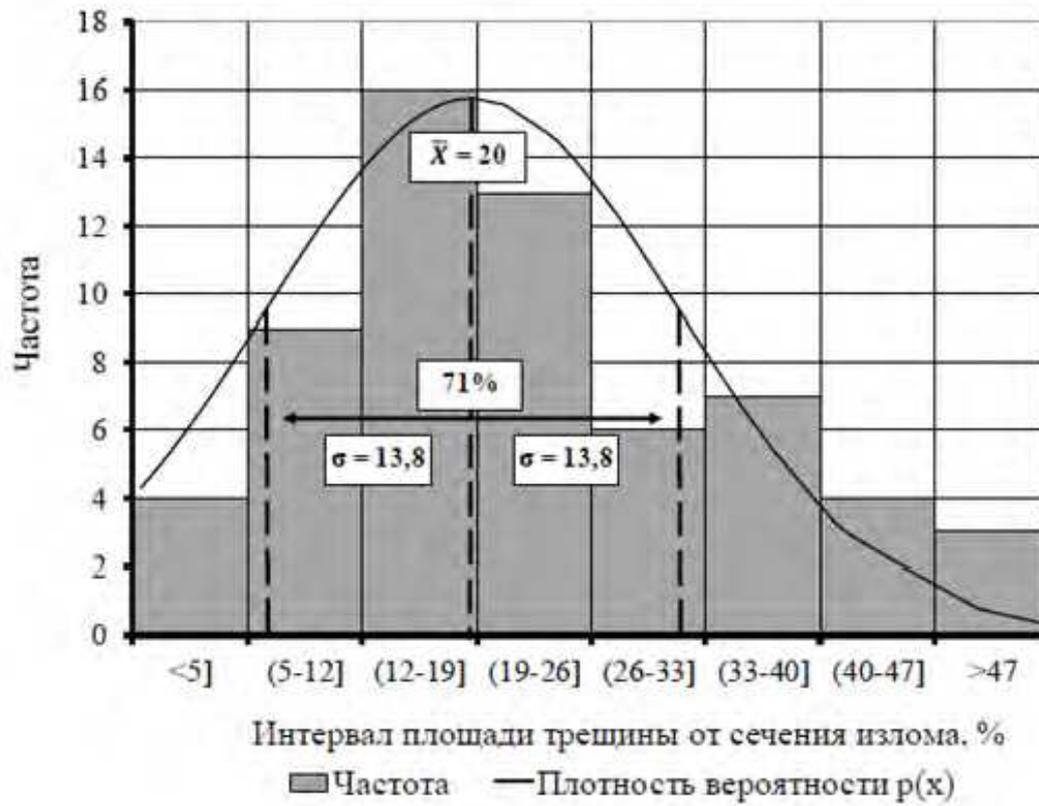


Рисунок 4.5 – Нормальное распределение площади усталостной трещины в поперечном сечении по месту излома боковых рам

4.2 Исходные данные и граничные условия для моделирования нагруженности боковой рамы с поверхностной усталостной трещиной

Изучение напряженного состояния в окрестностях вершины растущей усталостной трещины, выходящей на поверхность, например от залегающего на глубине дефекта литейного происхождения, осуществляется численным методом конечных элементов (МКЭ).

В поперечное сечение 3D модели боковой рамы с максимальными нормальными напряжениями по Мизесу от воздействия эксплуатационных нагрузок по ГОСТ 33211-2014 [42] вводится дефект, выходящий на поверхность, соотношения геометрических размеров которого получены после анализа изломов шестидесяти двух боковых рам за девять лет эксплуатации. Начальные размеры полуэллипса дефекта в виде трещины составляют: длина $l_0 = 10$ мм на поверхности детали, глубина $a_0 = 3,5$ мм [203], площадь $78,5$ мм², что значительно выше минимальных размеров внутреннего технологического дефекта, установленного в третьей главе. Заданная длина исходной трещины l_0 соответствует требованию ГОСТ 33788-2016 [43], согласно которому критерием отказа надрессорной балки или боковой рамы считается наличие видимой поверхностной трещины длиной 10 – 50 мм.

Определение КИН K_I при отрыве на границах трещины первоначальной длины выполняется в модуле Fracture программы ANSYS [204]. Не соблюдение критерия:

$$K_I \geq K_{fc}^a, \quad (4.1)$$

позволяет увеличивать длину трещины до $l_i = l_0 + \Delta l_i$, где i – номер шага. Если условие (4.1) выполняется, то фиксируется предельная длина усталостной трещины. В качестве циклической вязкости разрушения K_{fc}^a в критерии (4.1) могут использоваться значения после тринадцати или двадцати пяти лет эксплуатации надрессорных балок тележек грузовых вагонов (таблица 4.1) [216].

Таблица 4.1 – Негативные изменения циклической вязкости разрушения литых сталей класса 20Л с ростом наработки

Марка стали	Наработка, лет	Циклическая вязкость разрушения K_{fc}^{Δ} , МПа $\sqrt{м}$
20ГФЛ	в состоянии поставки	155
20Л	13	78
20ГФЛ	25	57

Объемная твердотельная компьютерная модель боковой рамы разрабатывалась в программе SolidWorks, с учетом особенностей:

- механические свойства стали в каждом конечном элементе одинаковые;
- модель идеализирована с точки зрения отсутствия любых литейных дефектов;
- толщины стенок модели во всех сечениях номинальные, без учета отклонений на величину допусков;
- процесс торможения усталостной трещины в виду притупления ее вершины при локальной пластической деформации не моделировался, из-за отсутствия данного инструментария в модуле Fracture программы ANSYS;
- низкотемпературное охрупчивание стали не учитывалось.

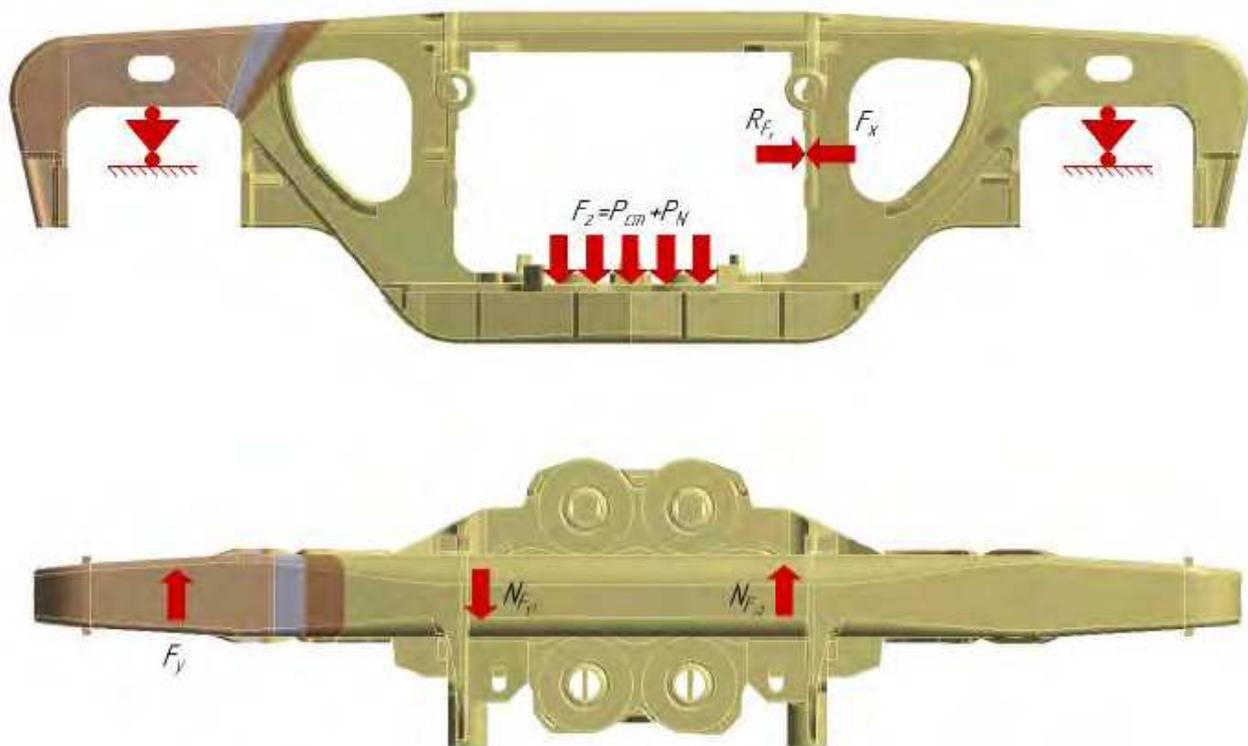
Граничные условия для модели боковой рамы четырехосного вагона по III расчетному режиму, согласно приложению Д ГОСТ 33211-2014 [42], показаны на рисунке 4.6 [204].

Вертикальная сила рассчитывается по формуле [42]:

$$F_z = P_{ст} + P_N, \quad (4.2)$$

где $P_{ст}$ – сила тяжести, действующая на боковую раму:

$$P_{ст} = P_0 - 0,5(P_T - P_H - P_{II}), \quad (4.3)$$



F_z – вертикальная сила, F_x – продольная сила инерции, F_y , – боковая сила, N_{Fy} и R_{Fx} - реакции

Рисунок 4.6 – Нагрузки и граничные условия для расчета сопротивления усталости боковой рамы

P_N – вертикальная составляющая силы тяжести:

$$P_N = K_d P_{ст}, \quad (4.4)$$

где K_d – коэффициент вертикальной динамики [42]:

$$K_d = \frac{\bar{K}_d}{\beta} \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{1-\psi}}, \quad (4.5)$$

где \bar{K}_d – среднее вероятное значение коэффициента динамической добавки:

$$\bar{K}_d = A + \frac{B(V-V_0)b}{f_1}. \quad (4.6)$$

В формулах (4.2) – (4.6) приняты следующие обозначения [42]:

$A = 0,05$ и $B = 3,6 \cdot 10^{-4}$ м/(м/с) – коэффициенты;

$V_0 = 15$ м/с – скорость;

$V = 33,3$ м/с – конструкционная скорость движения вагона;

$b = (n + 2)/(2n)$ – коэффициент, учитывающий влияние числа осей $n = 2$ в тележке или группе тележек под одним концом вагона;

$f_1 = 0,0483$ м – расчетный статический прогиб рессорного подвешивания вагона с максимальной расчетной массой;

$\beta = 1,13$ – параметр распределения;

$\psi = 0,97$ – расчетная односторонняя вероятность;

P_0 – максимальная статическая осевая нагрузка;

P_T – сила тяжести тележки;

P_H – сила тяжести надрессорной балки;

P_{Π} – сила тяжести рессорного подвешивания тележки.

Продольная сила F_x определяется по формуле [42]:

$$F_x = N_y \frac{m_T}{m_{\text{ваг}}}, \quad (4.7)$$

где N_y – продольная сила;

m_T – масса тележки;

$m_{\text{ваг}}$ – масса вагона.

Боковая сила F_y находится по формуле [42]:

$$F_y = \bar{H}_p \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{1-\psi}}, \quad (4.8)$$

где \bar{H}_p – среднее вероятное значение рамной силы при конструкционной скорости вагона:

$$\bar{H}_p = \theta P_0 (V - V_1), \quad (4.9)$$

где $\theta = 0,003$ с/м – коэффициент,

$V_1 = 5$ м/с – начальная скорость движения.

В таблице 4.2 приведены значения масс, необходимых в расчетах продольных сил по формуле (4.7), действующих на характерные конструкции боковых рам тележек. Силы, рассчитанные по формулам (4.2) – (4.9) с учетом коэффициента $K_d = 0,54$, сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.2 – Исходные данные для расчета продольных сил

Условное обозначение массы	Масса, т		
	базовая тележка модели 18-100	улучшенная тележка модели 18-578	улучшенная тележка модели 18-9889
m_T	4,77	4,8	5,0
$m_{\text{ваг}}$	94	94	100

Таблица 4.3 – Силы, действующие на боковые рамы в режиме III, для оценки предельной длины трещины

Условное обозначение силы	Сила, кН		
	базовая тележка модели 18-100	улучшенная тележка модели 18-578	улучшенная тележка модели 18-9889
P	211,3	211,0	225,2
P_0	230,5	230,5	245
P_T	46,8	47,5	48,2
P_H	5,4	5,4	6,14
P_N	113,1	112,6	120,6
N_y	1000	1000	1000
\bar{H}_p	26,48	26,48	28,15
F_z	324,5	323,0	345,7
F_x	50,7	51,1	51,5
F_y	56,0	56,0	59,5

Исследование напряженного состояния и определение усталостной трещины предельной длины предполагается провести на трех боковых рамах литой конструкции с размерами (рисунок 4.7) [204] и параметрами поперечных сечений в зоне внутреннего радиуса для проема колесных пар, указанными в таблице 4.4.

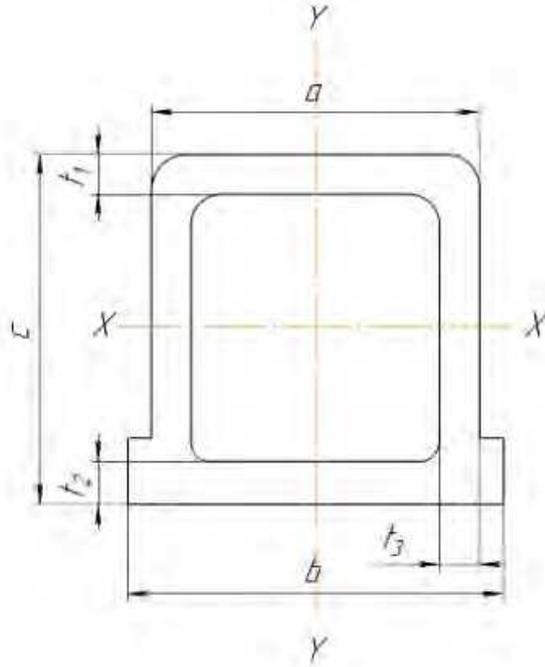


Рисунок 4.7 – Размеры поперечного сечения литой боковой рамы в зоне внутреннего радиуса для проема колесных пар

Таблица 4.4 – Геометрические размеры и характеристики поперечных сечений боковых рам

Модель тележки	Геометрические размеры, мм						Площадь сечения F , см^2	Осевые моменты инерции, 10^2 , см^4	
	a	b	c	t_1	t_2	t_3		I_x	I_y
18-100	165	189	176	20	20	20	135,5	59,9	51,8
18-578	165	165	193	20	26	20	139,4	71,4	49,8
18-9889	150	147	199	20	44	14	118,6	66,1	32,2

4.3 Результаты моделирования продвижения усталостной трещины в литых боковых рамах

Результаты численных экспериментов, полученные на твердотельных моделях литых боковых рам из стали 20ГЛ, по вычислениям предельных длин усталостных трещин, развивающихся по внутреннему радиусу проема для колесных пар показаны на рисунке 4.8 [204].

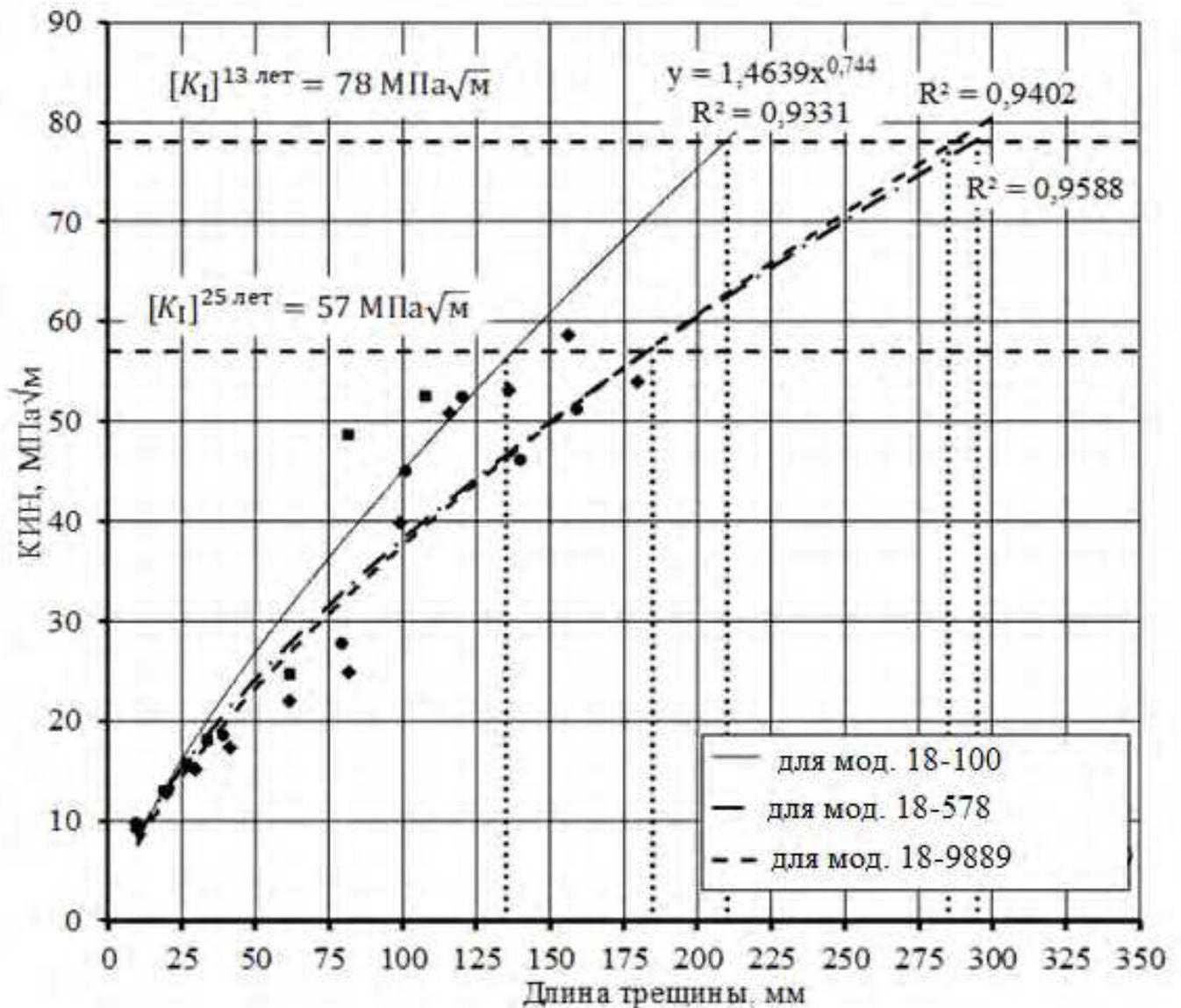


Рисунок 4.8 – Зависимость K_I от длины усталостной трещины l_i в боковых рамах трех исследуемых конструкций

С увеличением срока эксплуатации боковой рамы под вагоном длина предельно допустимой усталостной трещины снижается (рисунок 4.8). Выявленная зависимость чувствительна к негативному изменению механических свойств стали с увеличением наработки в километрах пробега вагона, что подтверждается опытными данными.

Расчитанные предельные длины усталостных трещин позволят сравнивать различные конструкции литых деталей тележек на стадии проектирования и делать прогнозы по живучести. Например, в боковой раме базовой конструкции тележки модели 18-100, предельная длина трещины 210 мм на внутреннем радиусе проема для колесных пар, а в аналогичной по осевой нагрузке боковой раме улучшенной прочности – 295 мм, при тринадцати годах службы. Следовательно, улучшенная боковая рама тележки модели 18-578 будет дольше пребывать в опасном состоянии, в случае вероятности его возникновения, чем базовая.

Грузовой вагон с улучшенными боковыми рамами в тележках, но с растущей усталостной трещиной в проеме для колесных пар в одной из них, проедет расстояние больше на 28%. Если средняя длина гарантийного плеча безопасного проследования грузовых поездов в 2014 году составила 1211 км, а вагон проезжает максимум 872 км с пропущенной трещиной в боковой раме, как указывалось в разделе 4.1 настоящей главы, то достигнутый эффект позволил бы избежать крушения вагона.

Расчетные значения предельных длин усталостных трещин в различных конструкциях боковых рам (таблица 4.5), сопоставимы с размерами выявленных трещин на боковых рамах после крушений вагонов (рисунок 4.2).

Однако, в расчетах не учитывались возможные отклонения геометрии поперечных сечений боковых рам, ликвация, внутренние литейные дефекты, пониженные механические свойства стали – присущие натурным деталям, которые могут приводить к уменьшению длин усталостных трещин по местам изломов.

На рисунке 4.8 проведены горизонтальные линии, соответствующие значениям циклической вязкости разрушения сталей класса 20Л после тринадцати и двадцати пяти лет эксплуатации надрессорных балок под вагоном (таблица 4.1).

Таблица 4.5 – Расчетные значения предельных размеров усталостных трещин для литых боковых рам по внутреннему радиусу проема колесных пар

Тип боковой рамы	Предельная длина усталостной трещины, зародившейся после наработки, мм	
	13 лет	25 лет
1 Базовая, тележки 18-100	210	135
2 Улучшенная, тележки 18-578	295	185
3 Улучшенная, тележки 18-9889	285	185

Пересечение кривых с критериальными значениями означает достижение усталостной трещиной предельной длины, согласно условию (4.1).

Подсчитанные значения площадей зон усталостного развития трещины (таблица 4.6), и сопоставление их с площадями поперечных сечений по внутреннему радиусу проемов для колесных пар, показаны на рисунке 4.9 [204]. Расчетные данные в таблице 4.6 соотносятся с результатами опытных наблюдений (рисунок 4.5).

Таблица 4.6 – Расчетные площади усталостных изломов литых боковых рам по внутреннему радиусу проема для колесных пар

Модель тележки	Площадь усталостного излома относительно площади поперечного сечения боковой рамы после наработки, %	
	13 лет	25 лет
18-100	25	17
18-578	34	23
18-9889	45	31

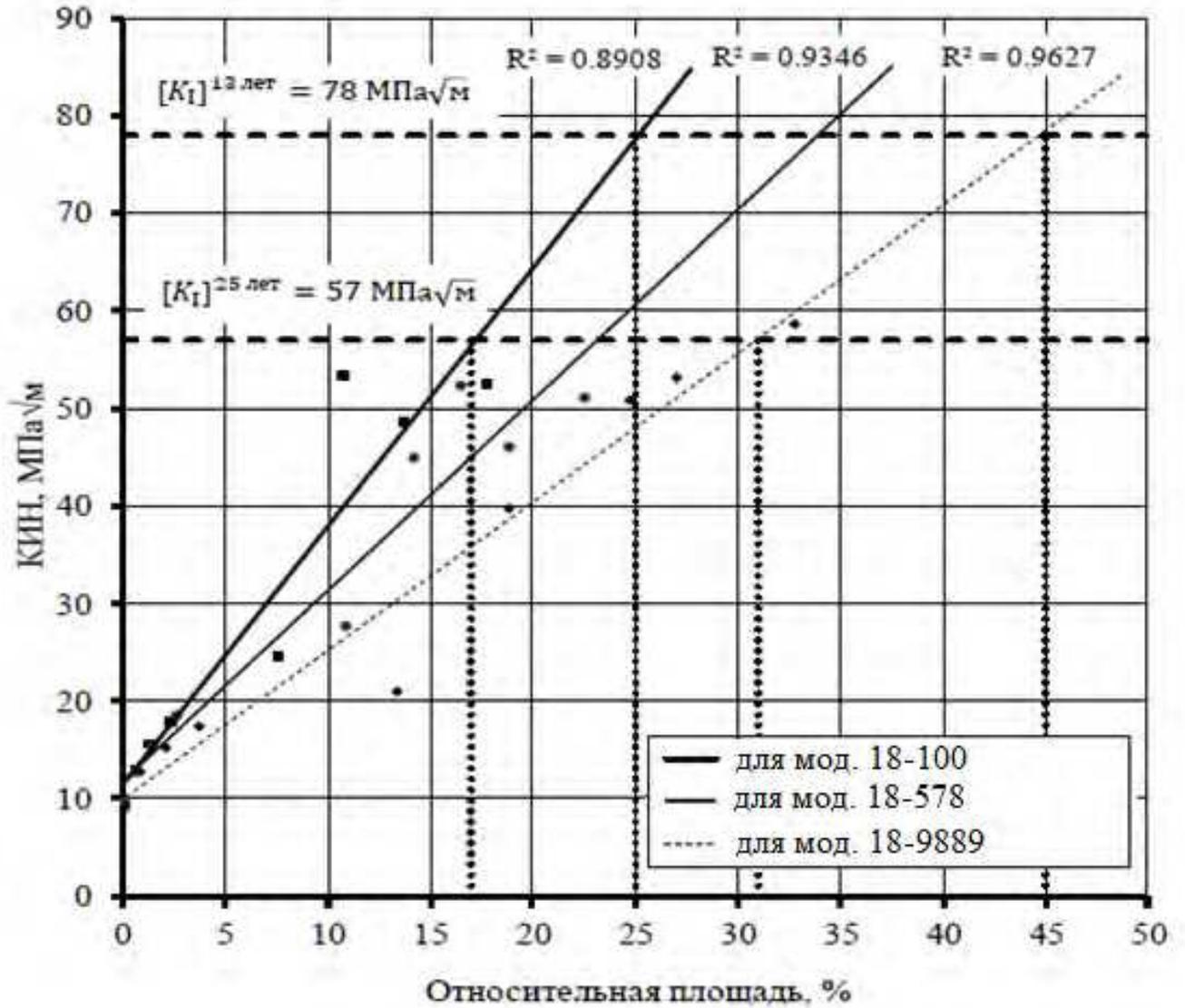


Рисунок 4.9 – Относительная площадь усталостных изломов боковых рам трех исследуемых конструкций в зависимости от K_I

Учитывая полученные расчетные результаты, математическая модель развития усталостной трещины в литой детали тележки грузового вагона имеет вид, приведенный на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Математическая модель развития усталостной трещины в литой детали тележки грузового вагона

4.4 Основные результаты и выводы по главе 4

а) Изучение длин усталостных трещин в литых боковых рамах, послуживших причиной отказов тележек грузовых вагонов, показало, что их протяженность находится в диапазоне от 10 до 250 мм, и более. Среднее расстояние, которое не доехали вагоны с трещинами в боковых рамах тележек до станций технического обслуживания, находится в интервале от 340 до 1055 км.

б) Осмотрщики ежегодно выявляют большое количество усталостных трещин в литых боковых рамах тележек грузовых вагонов на пунктах технического обслуживания.

в) Средний размер площади поперечного сечения боковой рамы в месте излома, занимаемый усталостной трещиной, составляет 19%.

г) Полученные расчетным путем зависимости предельных длин усталостных трещин для литых боковых рам тележек моделей 18-100, 18-578 и 18-9889 от срока эксплуатации, позволяющие прогнозировать их размеры на уровне 75 и 100 мм соответственно при наработке 32 года. Рассчитанные предельные размеры и площади усталостных трещин в различных конструкциях боковых рам, сопоставимы с размерами выявленных трещин на боковых рамах после крушений вагонов.

д) Установлено, что с увеличением наработки боковой рамы предельная длина усталостной трещины в зоне повышенного риска отказа сокращается.

е) На основе полученных результатов можно сделать вывод о взаимосвязи процессов негативных изменений механических свойств сталей класса 20Л и коэффициентов интенсивности напряжений с ростом наработки литых деталей тележек грузовых вагонов.

Глава 5 Верификация математических моделей

Установленные негативные изменения модуля упругости и коэффициентов поперечной деформации сталей на модельном образце с характерными хрупкими, пластическими и разупрочняющимися структурными составляющими, подлежат идентификации в экспериментах литых сталей типа 20Л. Экспериментальное наблюдение за изменениями параметров полной диаграммы растяжения литых сталей марки 20, а именно пластических и прочностных свойств, позволят выявить резерв сталей по сопротивлению усталости, и сопоставить полученные зависимости с известными данными других ученых, полученными на стандартных образцах популярными методами.

Отдельному осмыслению в ходе проведения экспериментов с образцами необходимо подвергнуть зависимость модуля хрупкости от вязкости разрушения. Согласно модельным полным диаграммам, понижение модуля хрупкости указывает на повышенную сопротивляемость металла росту усталостной трещины. В случае экспериментального подтверждения полученный эффект можно будет использовать при проведении приемо-сдаточных статических испытаний каждой плавки стали на сталеплавильных предприятиях для улучшения показателей трещиностойкости сталей после выплавки, наряду со стандартными методами контроля качества.

Выведенные критерии устойчивого деформирования образца в механической системе «машина – образец» в зависимости от жесткости силонагружающих устройств, найдут применение при разработке специальной испытательной оснастки для обеспечения построения полных диаграмм деформирования на нестандартных образцах из литых сталей тележек вагонов.

Подтверждение эффектов негативных изменений указанных свойств в экспериментах с образцами из литых сталей, позволит описать и внедрить их в методики расчета боковых рам и надрессорных балок тележек вагонов на сопротивление усталости, которые будут учитывать процесс охрупчивания сталей по усталости.

Задачей верификации результатов, полученных в ходе моделирования внутреннего литейного дефекта в образце при центральном растяжении, видится проверка полученных пороговых значений коэффициентов интенсивности напряжений на натурном образце. Эмпирическое пороговое значение будет использоваться в дальнейшем для оценки допускаемых размеров внутренних остроугольных дефектов литейного происхождения в боковых рамах и надрессорных балках тележек грузовых вагонов.

Расчеты предельных длин усталостных трещин в литых боковых рамах некоторых конструкций позволили сравнить их по данному критерию. Однако, выводы сделаны на основе значений циклической вязкости для сталей класса 20Л, полученных другими учеными на образцах с краевой трещиной при внецентренном растяжении, вырезанных из натуральных надрессорных балок, которые необходимо проверить другим способом.

Уточняются уже известные значения циклической вязкости путем проведения испытаний надрессорной балки с инициирующим надрезом по нижнему поясу на усталость. Определенное таким способом значение циклической вязкости можно использовать в дальнейшем вместе с пороговым значением для прогнозирования методами механики разрушений длительности пребывания литой детали тележки в опасном состоянии, как с внутренним дефектом в стенке, так и без дефекта. В экспериментах с надрессорной балкой сопоставляются также фактические и расчетные значения предельных длин усталостных трещин.

В главе приводятся методики и результаты лабораторных испытаний образцов, натуральных литых деталей тележек грузовых вагонов из литых сталей класса 20Л, а также освещается специализированное для таких испытаний оборудование и средства измерений.

5.1 Верификация математической модели поврежденности стали, учитывающей негативные изменения механических свойств сталей с увеличением наработки

Поврежденность литой стали для изготовления боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов оценивается в квазистатических испытаниях мини образцов при одноосном растяжении методом полных диаграмм в состоянии поставки, и после наработки в циклах. Параметрами, характеризующих уровень поврежденности стали в таких испытаниях, являются характерные точки на полной диаграмме растяжения (ПДР) [126]. Методика испытаний образцов с построением ниспадающей до нуля ветви диаграммы приведена в работах [95, 100, 103, 121, 128, 135, 166, 267]. Программа испытаний, испытательное оборудование существенно отличаются от стандартных испытаний по ГОСТ 1497-84 [33]. Поэтому, ниже приводятся сведения об использованном оригинальном оборудовании, системе регистрации и сбора экспериментальных данных, основные положения методики построения полной диаграммы на круглых нестандартных образцах.

Изучение поврежденности металлов физическими методами проводятся с помощью сложных средств измерений и аппаратуры, а также высококвалифицированным персоналом [257]. Механические испытания мини образцов при осевом квазистатическом растяжении с записью ниспадающей до нуля ветви диаграммы тоже требуют специальных средств измерений и испытательной оснастки повышенной жесткости [114, 166]. Как уже упоминалось в главе 2, главным условием доведения падающей ветви на диаграмме до нуля является использование механической системы «машина-образец» высокой жесткости по отношению к испытываемому образцу. Коэффициент данного соотношения зависит от уровня механических свойств образца и неоднородности его микроструктуры. С увеличением однородности микроструктуры стали ниспадающая ветвь на диаграмме становится более крутой в состоянии поставки, значение коэффициента соотношения жесткостей испытательной машины и образца должно быть больше.

В литых сталях класса 20Л с феррито-перлитной микроструктурой, неоднородность в состоянии поставки выражается в твердости феррита и перлита, которая различается на порядок. Соответственно, если термообработка отливки по режиму нормализации произведена с нарушением технологии, и выравнивание микроструктурных составляющих произошло не равномерно по объему отливки, то в ней будут участки с относительно однородной микроструктурой, например, с преобладанием феррита. Нарботка образца при стационарном нагружении вызывает накопление повреждений [17] в металле изменяя его макроструктуру, которое выражается в уменьшении угла наклона ниспадающей ветви к горизонтальной оси на диаграмме, построенной при квазистатическом растяжении.

Квазистатическое осевое растяжение мини образцов с построением ниспадающих до нуля участков выполняется несколькими способами: в универсальных испытательных машинах с функцией превентивной разгрузки [24], в испытательных машинах с управляющим контроллером обратной связи [261], и в стендах высокой жесткости системы нагружения (рисунок 5.1).

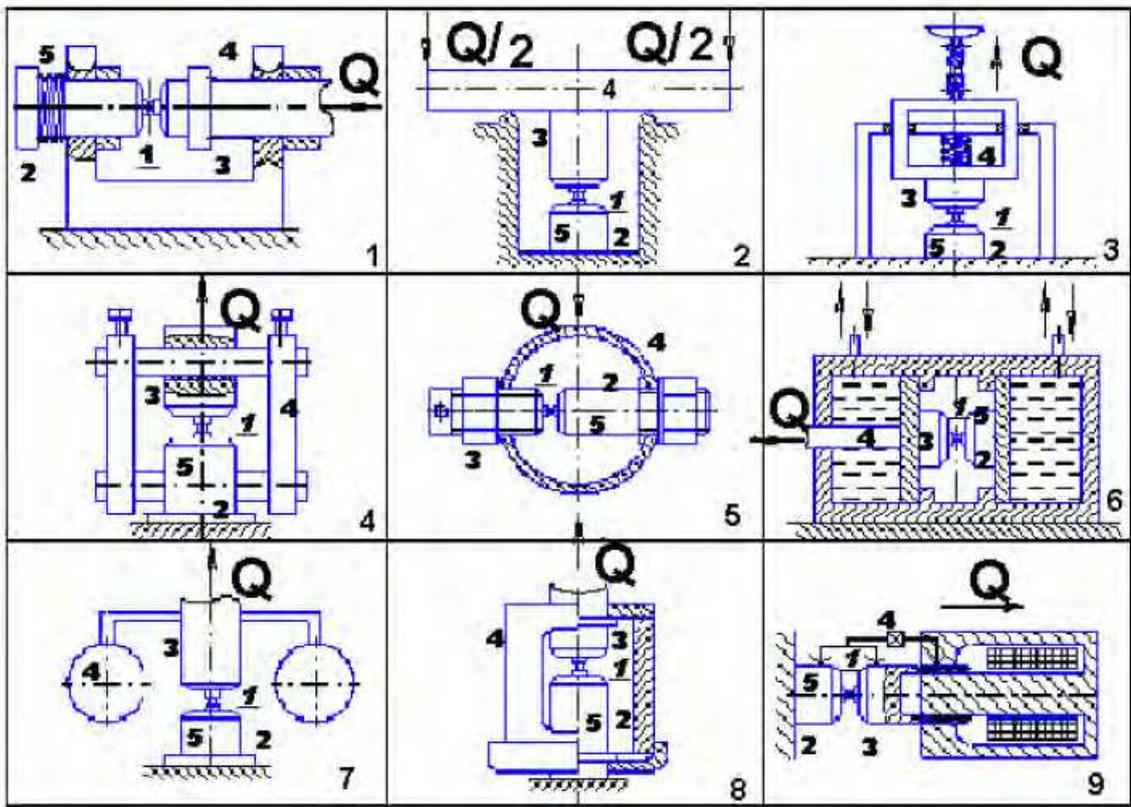


Рисунок 5.1 – Схемы систем нагружения образцов высокой жесткости

Встраивание в систему нагружения образца дополнительных жестких элементов (рисунок 5.1, схемы 1 – 5, 8) существенно увеличивает жесткость деформирования, необходимую для равновесного растяжения образца на стадии разупрочнения металла. Эффект не сжимаемости жидкости также повышает жесткость системы нагружения (схема 6). Сила инерции подвешенных масс, противоположная нагружающей образец силе, показана на схеме 7. На схеме 9 изображена система с управляющим контроллером обратной связи, с помощью которой нивелируется даже отрицательная жесткость системы нагружения.

Из всех известных типов механических систем нагружения образцов повышенной жесткости, наиболее эффективным и удобным в использовании оказалась испытательная оснастка в форме кольца (рисунок 5.1, схема 6), связывающая захваты с установленным образцом. Реализация такой жесткой системы нагружения представлена на рисунке 5.2.

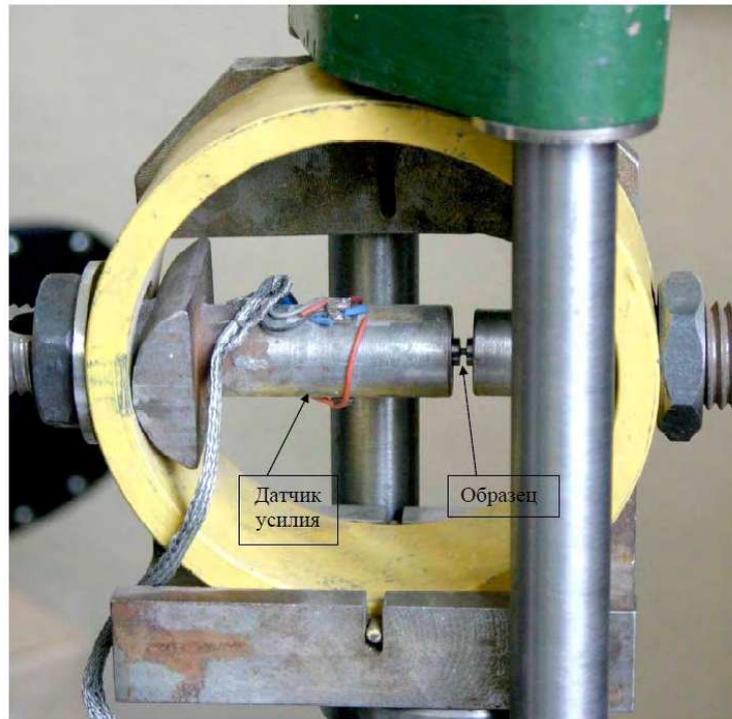


Рисунок 5.2 – Кольцо повышенной жесткости, закрепленное на захватах с установленным мини образцом

Кольцо изготовлено из рессорно-пружинной легированной стали марки 65Г, толщиной 10 мм, наружным диаметром 160 мм, предварительно упруго

деформируется под действием силы Q от 3 до 4 тс нагружающего пресса (рисунок 5.2). Продолжение сжатия кольца с уже включенными в процесс захватами и образцом повышало жесткость кольца. Перемещение захватов в поперечном направлении относительно усилия пресса на величину от 1,5 до 2 мм приводило к равносному разрушению однократного мини образца с диаметром рабочей части 2 мм (рисунок 5.2). Разработанное и реализованное в металле кольцевое устройство, а также способ испытания мини образцов при осевом растяжении защищены патентом на изобретение (Приложение Е) [166].

Измерение абсолютного удлинения рабочей части мини образца длиной 2 мм осуществлялось специально разработанным и произведенным экстензометром (рисунок 5.3), фиксируемом на свободном захвате.



Рисунок 5.3 – Специальный экстензометр для измерения перемещений на рабочей части мини образцов

Наружные поверхности консолей равного сопротивления, изготовленных из пружинной стали, обклеивались тензорезисторами (рисунок 5.3), которые соединялись в электросхему полного моста. Экстензометр тарировался с помощью поверенной скобы микрометрической в диапазоне перемещений рабочей части мини образца.

Сила растяжения рабочей части мини образца контролировалась по показаниям тензорезисторов, наклеенных на один из захватов (рисунок 5.2) и собранных в электросхему полного моста. После чего, захваты с технологическим образцом, у

которого отсутствовала рабочая часть, устанавливались в универсальную испытательную машину для тарировки при растяжении.

Электросхемы от измерительного захвата и экстензометра подключались к специально разработанной восьмиканальной тензометрической станции (рисунок 5.4) в виде печатной платы [114, 135] с разъемом для подключения к слоту расширения материнской платы персонального компьютера.

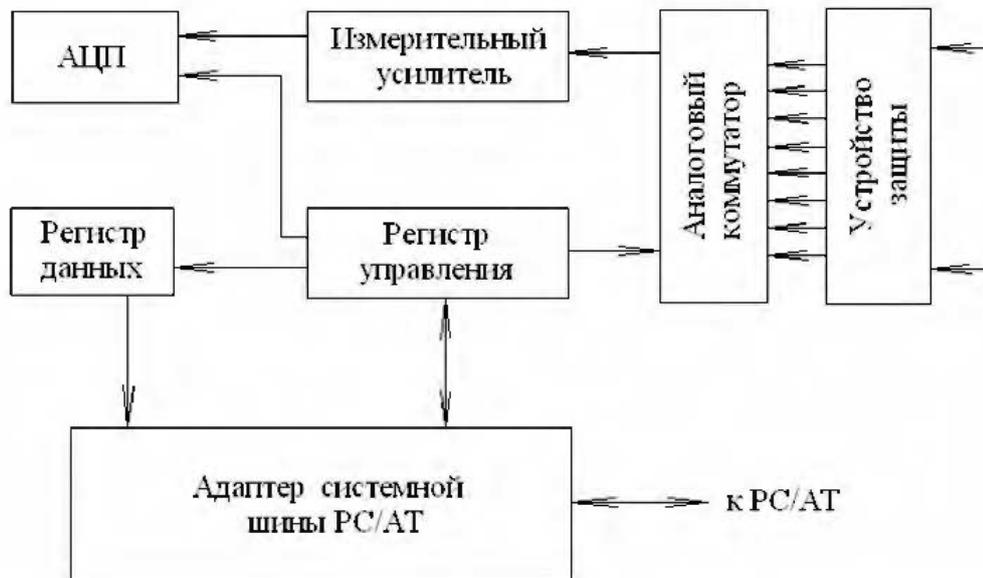


Рисунок 5.4 – Структурная схема оригинальной тензометрической станции для сбора, обработки и отображения экспериментальных сигналов

Главным преимуществом созданной станции перед существующими аналогами является мощная схема усиления, необходимая для фиксации структурных изменений в мини образце на стадии разупрочнения. Оригинальное программное обеспечение [135] позволяло в режиме реального времени обрабатывать сигналы с тензометрических мостов на измерительном захвате и экстензометре, и выводить их на экран монитора компьютера. Основные параметры тензометрической станции сведены в таблицу 5.1.

Станция оснащена диодной защитой входов дифференциального аналогового коммутатора (рисунок 5.4) от случайных пиков напряжений в каналах связи с тензорезисторами, и активным фильтром третьего порядка для подавления помех.

Таблица 5.1 – Основные параметры разработанной тензометрической станции для сбора, обработки и отображения экспериментальных сигналов

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение параметра
1 Количество каналов	шт.	8
2 Программируемые коэффициенты усиления	шт.	8
3 Разряды цифрового двоичного кода	ед.	10
4 Время преобразования одного канала	мкс	30, не более
5 Диапазон биполярного входного напряжения	В	± 5
6 Абсолютная погрешность преобразования	%	2
7 Максимальная частота преобразования	кГц	10
8 Объем буфера для регистрации цифровых значений сигналов	кб	60
9 Диапазон временной развертки сигналов	сек/дел	от 0,01 до 320
10 Коэффициент ослабления синфазного сигнала помехи	дБ	100, не менее

Сигналы из регистра управления поступают в аналоговый коммутатор (рисунок 5.4). Он поочередно подключает восемь аналоговых входов с первого по восьмой к измерительному усилителю (рисунок 5.4), который преобразует биполярные сигналы от тензодатчиков, полученные в милливольтках, в униполярные сигналы, усиливает их с программируемым коэффициентом усиления и подавляет синфазные помехи. Пользовательский интерфейс программного обеспечения позволяет задавать коэффициент усиления по каналам дифференцированно, в интервале от 1 до 100 тыс. Блок АЦП (рисунок 5.4) преобразует получаемые униполярные сигналы от измерительного усилителя в двоичный цифровой код, помещаемый в регистр данных (рисунок 5.4). Ввод сигналов управления в персональный компьютер, сформированных в регистре управления, осуществляется через адаптер системной шины (рисунок 5.4). В составе АЦП имеется блок балансировки сигналов от тензорезисторов, работающий по принципу многооборотных потенциометров.

Разработанное программное обеспечение на языке «Турбопаскаль» обеспечивало управление работой тензометрической станции, позволяло задавать исходные данные, калибровать развертку сигналов по времени, выводить полученные и

обработанные сигналы от тензорезисторов на экран компьютера в реальном времени, записывать данные в программу Excel.

Созданная и отлаженная в соавторстве с Микушиным В.И. и Мироновым В.И. тензометрическая станция применялась в квазистатических испытаниях мини образцов при растяжении, а также в испытаниях на усталость этих образцов. Она показала свою стабильность работы, простоту и удобство применения, достаточную широту усилителя и быстродействие, низкие затраты на элементную базу.

Специально разработанное испытательное оборудование и средства электронного оснащения испытаний мини образцов при осевом квазистатическом растяжении с построением полной диаграммы, приведенные на рисунках (5.2) – (5.4), собраны в единый испытательный комплекс (рисунок 5.5). В качестве испытательной машины, создающей приложение силы к кольцу, которое в данном случае выполняет роль испытательной оснастки, является специально модернизированный под выполняемую задачу настольный гидравлический пресс с ручным насосом (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5 – Испытательный комплекс для квазистатических испытаний мини образцов при растяжении с построением полных диаграмм

Жесткие по отношению к кольцу вертикальные стойки прессы обеспечивают дополнительную устойчивость деформирования мини образца, которые в

совокупности дополняют известные системы нагружающих устройств такого типа (рисунок 5.1).

Наработка в циклах при стационарном осевом нагружении мини образцов производилась на специально спроектированной электромеханической динамической испытательной машине (рисунок 5.6) [136, 285].

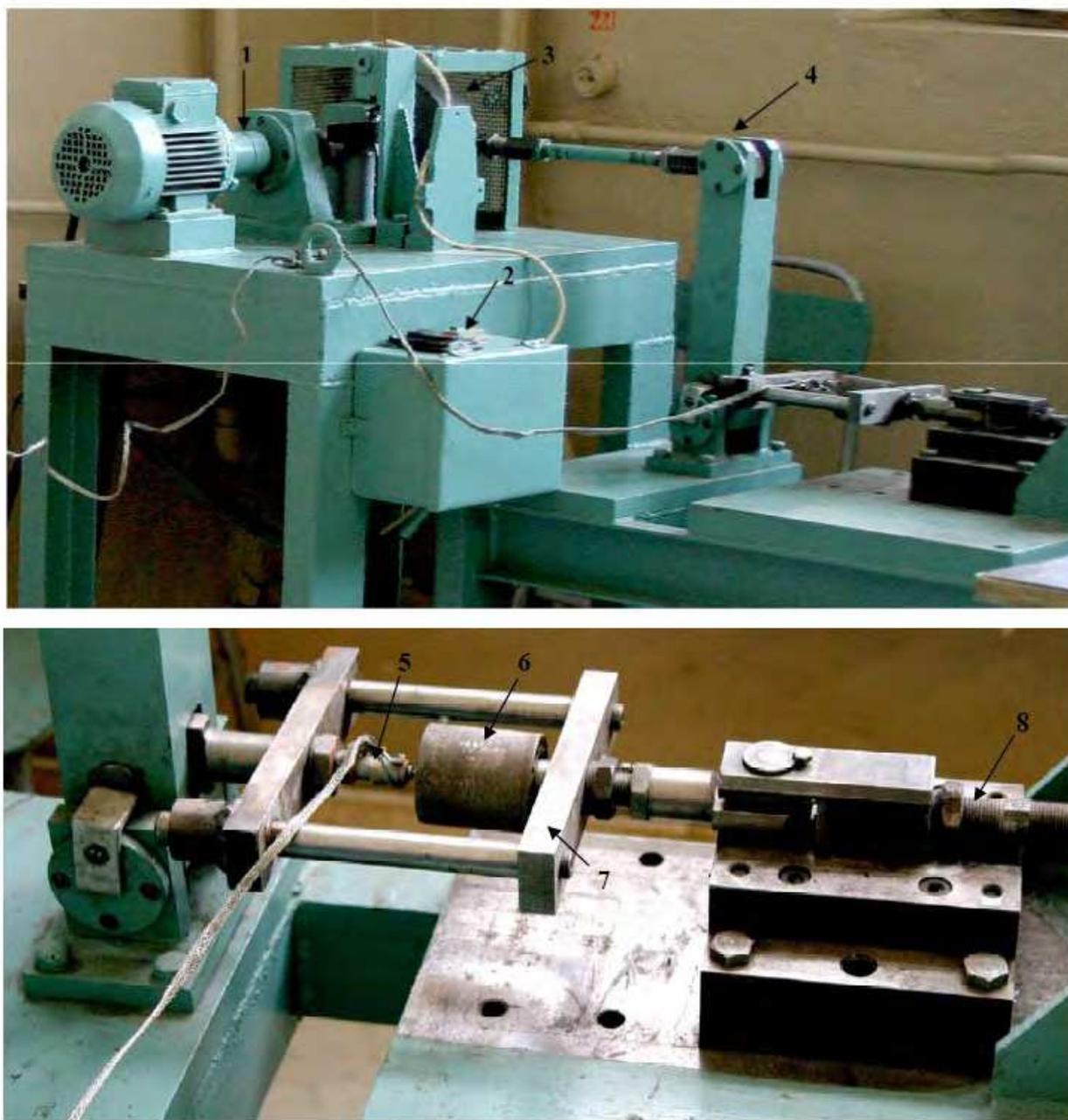


Рисунок 5.6 – Электромеханическая динамическая испытательная машина для циклической наработки мини образцов

Частота нагружений составляет 50 Гц. При включении кнопки 2 (рисунок 5.6) приводной вал 1 от асинхронного электродвигателя начинает раскручиваться, передавая вращающий момент на специальную эксцентриковую муфту 3, которой задается амплитуда перемещения цикла на мини образце. Крутящий момент от муфты 3 через рычажно-шарнирную систему 4 преобразуется в возвратно-поступательное движение измерительного захвата 5, куда вкручен по резьбе испытуемый мини образец.

Резьбовая эксцентриковая муфта 3 позволяет задавать амплитуду осевого растяжения на мини образце от 0 до 7 мм. Неподвижный захват 6 имеет сферический шарнир для снятия возможных перекосов в осевом нагружении мини образца. Кроме того, его развесовка сбалансирована таким образом, чтобы не вызывать изгиб рабочей части мини образца от действия собственного веса неподвижного захвата 6. С такой же целью сделана жесткая рамка 7 с подшипниками скольжения, исключая возможное провисание и несоосность захватов с мини образцом относительно прикладываемой нагрузки.

Устранение люфтов и предварительное растяжение мини образца задается винтом 8 со стопорной гайкой и контргайкой. Измерительный захват обклеивался тензорезисторами, собранными в электросхему полного моста. Захват тарировался по нагрузке в универсальной испытательной машине растяжения, с помощью разработанной тензометрической станции (рисунок 5.4) и специального технологического мини образца без рабочей части. Средняя нагрузка цикла, амплитуда цикла, количество циклов нагружений мини образца контролировалась на экране компьютера в реальном времени посредством программного обеспечения тензометрической станции, описанным выше.

Таким образом, созданная автором динамическая испытательная машина в соавторстве с Мироновым В.И., являющаяся улучшенным прототипом динамической испытательной машины профессора Соколкина Ю.В. (г. Пермь) [19], наряду с построенным оборудованием для квазистатических испытаний мини образцов, образует лабораторный комплекс для проведения исследовательских испытаний с

целью изучения негативных изменений механических свойств литых сталей несущих деталей тележек грузовых вагонов.

Выбор размеров рабочей части испытываемого мини образца обусловлен двумя принципами, которыми нужно руководствоваться во время проведения испытаний с построением полной диаграммы: исключением из зоны локализации запредельных деформаций упруго растянутых участков образца, и приближение испытываемого объема к размеру зерна микроструктуры металла. Известно, что с уменьшением длины рабочей части испытываемых образцов предельная деформация на ПДД увеличивалась.

Рост предельной деформации останавливался в испытаниях однократных образцов, у которых диаметр рабочей части соответствовал ее длине. В металлографических исследованиях микроструктуры литой стали марки 20ГТЛ после термообработки по режиму нормализации, из которой отливались боковые рамы тележек грузовых вагонов на ООО «ВКМ-СТАЛЬ», установлен средний размер зерен феррита и перлита на уровне 0,02 мм. Поэтому, минимально возможный диаметр образца 2 мм (рисунок 5.7), который удалось достичь при точении на токарном

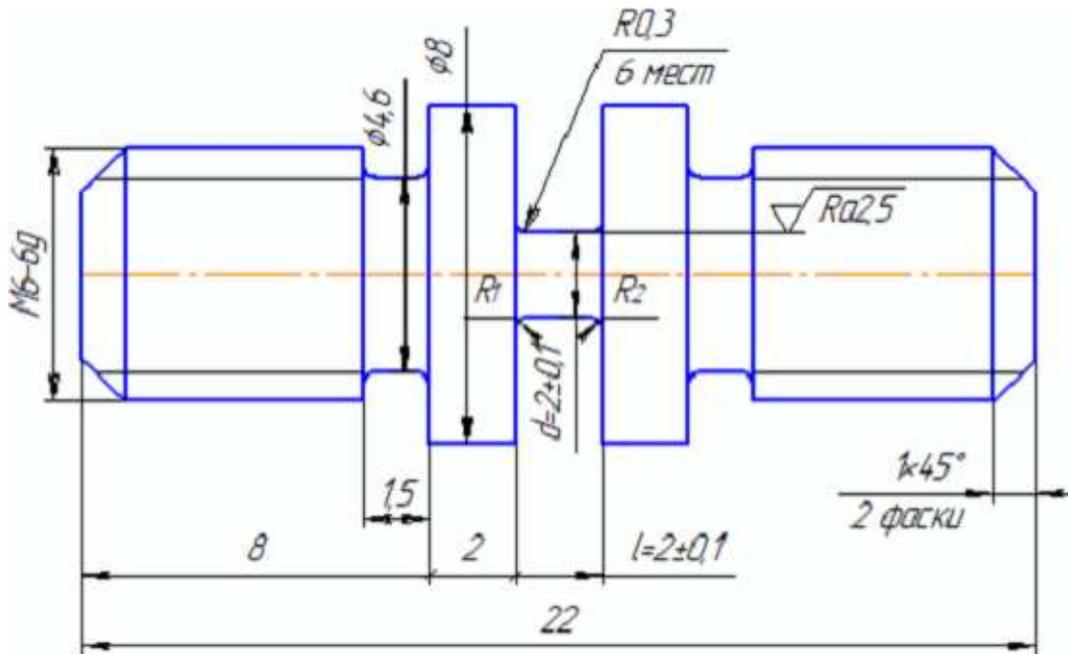


Рисунок 5.7 – Мини образец для квазистатических испытаний при осевом растяжении с построением полной диаграммы

станке профильным резцом, приравнен к среднему размеру ста зерен микроструктуры литой стали класса 20Л для изготовления несущих деталей тележек грузовых вагонов. Представление о размерах рабочей части оптимального образца для испытаний с построением ПДД освещается в работе [115].

Методика квазистатических испытаний мини образцов при осевом растяжении для построения полной диаграммы с помощью разработанного оборудования и устройств, содержит следующие рекомендации:

а) во время установки мини образца в захваты, монтажа экстензометра, закрепления кольца – не допускать наличия зазоров, люфтов, изгиба или растяжения мини образца, обеспечить повторяемость всех операций. Все действия должны быть плавными, аккуратными.

б) Управлять нагружением в испытаниях по удлинению мини образца. Программный опрос датчика силы на измерительном захвате устанавливается через два пикселя на экране компьютера. Необходимо учитывать, что диаграмма на экране содержит тысячи точек, образующих кривую, что приводит к избыточному объему файла для сохранения на компьютер.

в) Диаграммы модуля упругости $E_u(\varepsilon)$ и коэффициента поперечной деформации $\nu_u(\varepsilon)$ строятся после выполнения разгрузок мини образца на характерных участках диаграммы. Количество разгрузок от 8 до 10.

г) Скорость нагружения мини образца должна быть ниже скорости релаксации испытуемого металла. На стадии разупрочнения образца возможно делать выдержки по управляющему параметру для завершения протекания релаксационных процессов в деформируемом металле. Растяжением мини образца управлять вручную. Скорость нагружения не постоянна. Ориентировочное время непосредственного построения полной диаграммы может составлять от 10 до 12 мин.

д) После равновесного деления мини образца на 2 половины, посредством функционала программного обеспечения, сохранить результаты на компьютер в формате «.xls» для дальнейшего использования.

е) Негативные изменения ПДР исследуются на мини образцах после наработки в циклах.

Порядок действий при квазистатических испытаниях:

- а) измерить диаметр и длину рабочей части испытуемого мини образца специальным штангенциркулем с тонкими губками и ценой деления 0,01 мм;
- б) установить кольцо с закрепленным на нем измерительным захватом в рабочую зону пресса, сжать кольцо предварительной нагрузкой 5000 Н;
- в) установить второй захват внутри кольца, закрутить мини образец в захваты, зафиксировать второй захват на кольце путем подкручивания гайки до касания наружной поверхности кольца, законтрить второй гайкой;
- г) при закрепленных на кольце захватах с мини образцом смонтировать экстензометр на свободный захват, подключить его разъем к первому измерительному каналу тензостанции;
- д) подключить разъем датчика силы измерительного захвата ко второму измерительному каналу;
- е) запустить на компьютере управляющую программу для квазистатических испытаний с построением ПДД, выбрать в меню программы два рабочих канала, масштаб отображения сигналов на экране компьютера;
- ж) отбалансировать тензометрические мостовые схемы у датчика силы и экстензометра потенциометрами блока балансировки тензостанции;
- и) после нажатия кнопки «ПУСК» в меню программы и появления осей координат на экране, приступить к испытаниям мини образца;
- к) плавно увеличивать сжатие кольца с помощью ручного насоса испытательного пресса, наблюдать на экране ход кривой диаграммы в режиме реального времени соблюдая рекомендации выше;
- л) после обрыва диаграммы на стадии разупрочнения мини образца, следующий образец испытать при большем предварительном сжатии кольца и меньшей скорости нагружения;
- м) после завершения испытаний и разрушения мини образца, сохранить полученные результаты на жестком диске компьютера в формате «.xls» нажатием соответствующей кнопки на экране;

н) открыть сохраненный файл в программе Microsoft Excel, умножить опытные табличные данные в милливольтгах на переводные коэффициенты для силы растяжения Q и абсолютного удлинения Δl мини образца, полученные в ходе тарировки измерительного захвата и экстензометра соответственно, построить точечную диаграмму с линиями в координатах « $Q - \Delta l$ »;

п) перевести значения Q и Δl в напряжения σ и деформацию ε соответственно, построить точечную диаграмму с линиями в координатах « $\sigma - \varepsilon$ ».

Программа испытаний мини образцов на усталость:

а) испытать две партии мини образцов по 10 шт. до разрушения при отнулевых циклах максимальных напряжений $\sigma_{M1} = 0,6\sigma_p$ и $\sigma_{M2} = 0,8\sigma_p$ соответственно, где σ_p – условный предел текучести стали;

б) рассчитать средние значения долговечности \bar{N}_1 и \bar{N}_2 мини образцов для соответствующих уровней максимальных напряжений цикла;

с) испытать по шесть мини образцов на каждом уровне σ_{M1} и σ_{M2} до наработок $n_1 = 0,3\bar{N}_i$ и $n_2 = 0,7\bar{N}_i$ циклов, где i – порядковый номер уровня максимальных напряжений цикла;

д) построить полные диаграммы при квазистатическом растяжении мини образцов, которые наработали n_1 и n_2 циклов на уровнях σ_{M1} и σ_{M2} , определить параметры ПДР;

е) испытать шесть мини образцов на уровне σ_{M1} до наработки $n_1 = 0,3\bar{N}_1$ циклов, и непрерывно перевести нагружение на уровень σ_{M2} , довести образец до разрушения на уровне σ_{M2} ;

ф) испытать шесть мини образцов на уровне σ_{M2} до наработки $n_1 = 0,3\bar{N}_2$ циклов, и непрерывно перевести нагружение на уровень σ_{M2} , довести образец до разрушения на уровне σ_{M2} .

Изобретенное и модернизированное испытательное оборудование, средства измерений, тензометрическая станция, разработанные методики испытаний мини образцов с построением ниспадающей ветви и тарировки средств измерений, использованы в исследованиях негативных изменений механических свойств литых сталей для деталей тележек грузовых вагонов.

Мини образцы (рисунок 5.7) вырезались из пробных брусков для входного контроля качества стали по требованиям ГОСТ 32400-2013 [41] и ГОСТ 977-88 [48], залитых вместе с боковыми рамами и надрессорными балками из сталеплавильного ковша. Пробные бруски проходили термообработку по режиму нормализации вместе с деталями по технологическому процессу на АО «НПК «Уралвагонзавод». Таким образом, изготовлено по три пробных бруска из марок сталей: серийных 20ГЛ и 20ФЛ по ГОСТ 32400-2013 [41], экспериментальной 20ГЛ (20ГЛА) с пониженным содержанием вредных примесей серы и фосфора.

Пробные бруски прямоугольного сечения обтачивались на токарном станке до цилиндрической формы диаметром 16 мм. Затем передавались на высокоточный токарный станок для изготовления мини образцов специальным профильным резцом, размеры которого соответствовали размерам рабочей части. Профильный резец калибровался по аттестованному шаблону. Размеры всех изготовленных образцов проверялись на соответствие требованиям чертежа с помощью поверенных средств измерений при оптическом увеличении в измерительной лаборатории АО «НПК «Уралвагонзавод», которая выдавала соответствующее заключение. Непосредственно перед и после испытаний, диаметр и длина рабочей части мини образцов контролировались откалиброванным штангенциркулем, измерительные губки которого специально шлифовались для уменьшения их толщины с 2 до 1 мм.

На рисунке 5.8 приводятся полные диаграммы растяжения (ПДР) в координатах « $Q - \Delta l$ », построенные на изобретенном комплексе испытательного оборудования, осредненные по десяти мини образцам из литых сталей для изготовления несущих деталей тележек вагонов марок 20ГЛ, 20ГЛА и 20ФЛ, в состоянии поставки.

Диаграммы имеют законченный вид, падающая ветвь доходит до нуля (рисунок 5.8). Ниспадающая ветвь начинается от точки временного сопротивления Q_V и заканчивается возле нуля, с точкой перегиба.

Как известно, после временного сопротивления в образце появляется локальная пластическая поперечная деформация, а после точки перегиба на падающей ветви появляется трещина. Поэтому, предполагается, что расстояние от точки Q_V до точки перегиба падающей ветви коррелирует с количеством циклов до появления

трещины при проведении испытаний литых деталей тележек вагонов на сопротивление усталости.

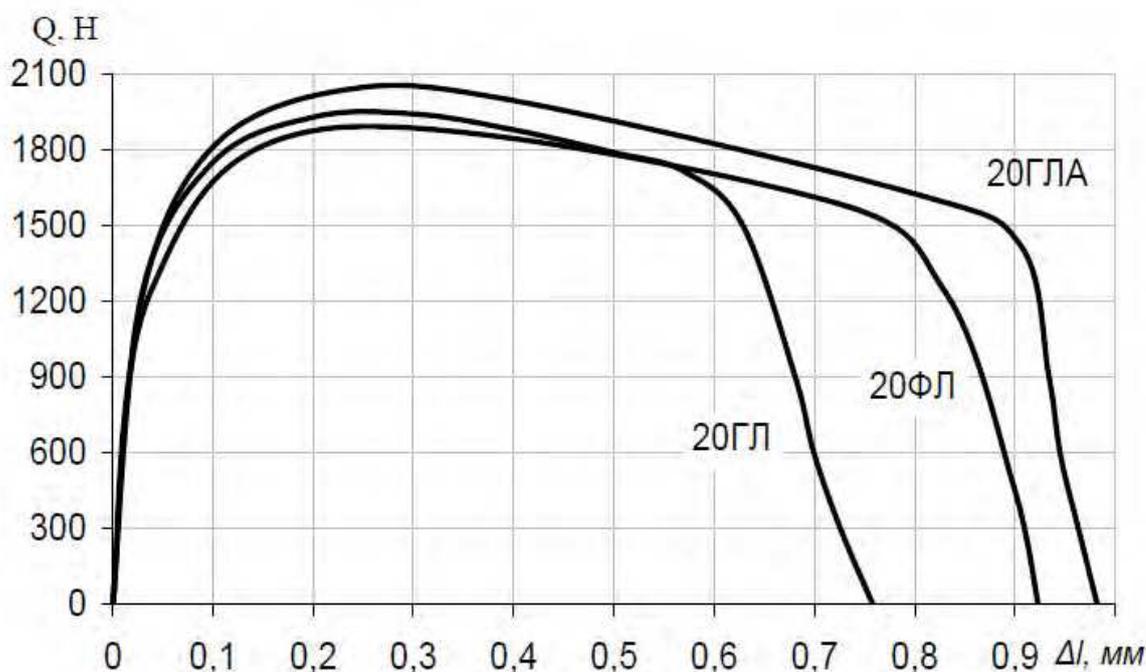


Рисунок 5.8 – Осредненные полные диаграммы растяжения по десяти мини образцам из литых сталей в состоянии поставки

Тогда, сравнивая полученные ПДР можно сделать вывод о том, что в отливке из высококачественной стали 20ГЛА усталостная трещина появится позже, чем в деталях из сталей 20ГЛ и 20ФЛ [274] (рисунок 5.8).

Второй участок диаграммы, протяженностью вдоль оси Δl от точки перегиба до нуля (рисунок 5.8), характеризует скорость развития микро- и макроповрежденности образца вплоть до разрушения. Как уже упоминалось во второй главе, модуль хрупкости D металла коррелирует с его трещиностойкостью [89, 133, 134]. У стали 20ГЛ он самый низкий. Поэтому прогнозируется, что отливки из стали 20ГЛ будут обладать большей трещиностойкостью, чем детали из более прочной и пластичной стали 20ГЛА.

Качественное сравнение полученных полных диаграмм по нагрузкам условного предела текучести Q_p , временного сопротивления Q_B , ударной вязкости KCU при

температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ [47], показало сопоставимость с результатами испытаний стандартных образцов по [33, 47], вырезанных из тех же пробных брусков.

Выдвинутые предположения о сопротивлении усталости сталей 20ГЛ и 20ГЛА по результатам квазистатических испытаний мини образцов проверены в опытах при стационарном нагружении на изобретенной электромеханической динамической испытательной машине (рисунок 5.6). Мини образцы из сталей 20ГЛ и 20ГЛА испытывались при отнулевом цикле с постоянной амплитудой нагрузки цикла (мягкое нагружение), контролируемой в режиме реального времени на экране компьютера с помощью разработанной тензометрической станции (рисунок 5.4). Причем, максимальное напряжение цикла на образце не превышало условный предел текучести стали, и было одинаковым для всех образцов.

Условный предел текучести σ_p определялся по результатам квазистатических испытаний мини образцов при растяжении (рисунок 5.8), который составил $\sigma_p = 350$ МПа для стали 20ГЛ, и $\sigma_p = 414$ МПа для стали 20ГЛА. Средние значения по результатам испытаний шести стандартных образцов разных плавков по ГОСТ 1497-84 [33]: $\sigma_p = 359$ МПа для стали 20ГЛ, и $\sigma_p = 377$ МПа для 20ГЛА. На момент проведения испытаний, минимальное значение σ_p согласно ОСТ 32.183-2001 [154] должно быть не менее 294 МПа.

Оказалось, что средняя долговечность мини образцов из высококачественной стали 20ГЛА превышала соответствующую для стали 20ГЛ. Усталостная трещина в мини образцах из стали 20ГЛА прорастала в несколько раз стремительнее, чем в стали 20ГЛ. Таким образом, предположения о сопротивлении усталости литых сталей для изготовления деталей тележек грузовых вагонов, классификация их по трещиностойкости и долговечности, сделанные по ПДР (рисунок 5.8) в состоянии поставки имеют эмпирическое подтверждение. Установленная взаимосвязь статических параметров ПДР с трещиностойкостью и долговечностью в испытаниях на усталость мини образцов из сталей 20ГЛ, 20ГЛА и 20ФЛ отражена в технологической инструкции [111], внедренной для сравнительных оценок марок сталей [51, 130] при входном контроле на АО «НПК «Уралвагонзавод» (приложения П, Р).

Сравнительные натурные испытания на усталость надрессорных балок из сталей 20ГЛ и 20ГЛА на динамической испытательной машине пульсаторного типа ZDM-200 (рисунок 5.9) также подтвердили прогнозы по долговечности и трещиностойкости [280 – 284], сделанные по ПДР на мини образцах (рисунок 5.8). Две партии по пять надрессорных балок, отлитых из разных сталей 20ГЛ и 20ГЛА, подвергались мягкому нагружению при ассиметричном знакопостоянном цикле по режиму сокращенных ускоренных испытаний на усталость согласно [142], действующих во время их проведения. В ходе испытаний фиксировалось



Рисунок 5.9 – Испытания на усталость литой надрессорной балки тележки грузового вагона на динамической испытательной машине ZDM-200

количество циклов до появления усталостной трещины, место ее появления, направление развития, и число циклов до потери несущей способности, которая наступала при невозможности поддержания заданного режима нагружения (таблица 5.2). Усталостной трещиной считалась трещина длиной от 10 до 15 мм [142], обнаруживаемая в основном органолептическим методом. Если деталь выдерживала назначенное контрольное число циклов нагружений без потери несущей

способности, то технология их изготовления одобрялась отделом качества завода-изготовителя.

Очевидно, что такой подход к оценке качества литых боковых рам и надрессорных балок имел погрешность 28% (таблица 5.2) и более, т.к. в эксплуатации вагон с трещиной в детали тележки отцепляется и направляется в деповской ремонт согласно инструкции по техническому обслуживанию [265].

Таблица 5.2 – Результаты испытаний на усталость надрессорных балок

Марка стали	Среднее количество циклов по результатам испытаний пяти надрессорных балок, тыс.		Трещиностойкость, тыс. циклов	Место появления трещин
	до появления усталостной трещины	до потери несущей способности		
20ГЛ	1560,0	2163,0	603,0	Малый радиус перехода среднего ограничителя пружин в нижний пояс
20ГЛА	2754,74	3066,30	311,56	

Критерием положительного результата в таких испытаниях по современным нормативам [43, 44, 45] является достижение некоторого контрольного числа циклов без видимой трещины, либо появление усталостной трещины длиной не менее 10 мм, что отвечает требованиям эксплуатации ходовых частей по ЦВ-ЦЛ-408 [265].

Переход заводом-изготовителем на улучшенную по содержанию вредных примесей сталь 20ГЛА предполагал высокие значения ударной вязкости с острым надрезом KCV^{60} при температуре минус 60°C [47], необходимые для замедления скорости перехода литых боковых рам тележек грузовых вагонов от опасного до предельного состояния (излом) после появления незамеченной осмотрщиками усталостной трещины по внутреннему углу проема колесных пар.

Однако, по результатам натурных стендовых испытаний средняя наработка до наступления опасного состояния (трещины) выросла на 77%, усталостная долговечность выросла на 42%, а трещиностойкость по циклам сократилась почти вдвое (таблица 5.2). Значения ударной вязкости KCV^{60} , определенные по ГОСТ 9454-78

[47], существенно не изменились. Стремления металлургов к очистке сталей деталей вагонов с целью улучшения их трещиностойкости в эксплуатационном диапазоне температур от минус 60 до плюс 60°С привели к обратному эффекту. Отдельно стоит отметить, что сравнительные испытания стандартных образцов по [33, 47] из сталей 20ГЛ и 20ГЛА не убедили сталеплавильщиков завода – изготовителя в отказе от испытаний натуральных деталей на усталость. Альтернативная качественная оценка механических свойств сталей методом ПДР на мини образцах по технологической инструкции [111] поможет выносить правильные решения до проведения дорогостоящих испытаний деталей и образцов на усталость.

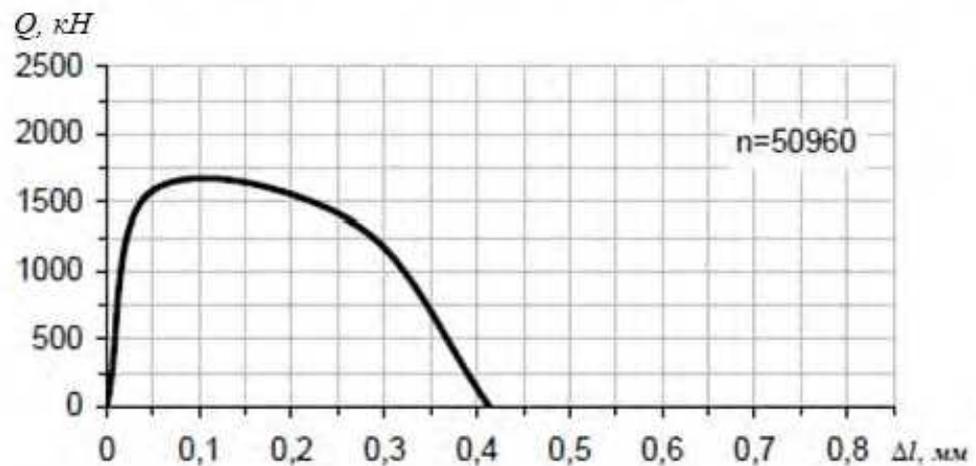
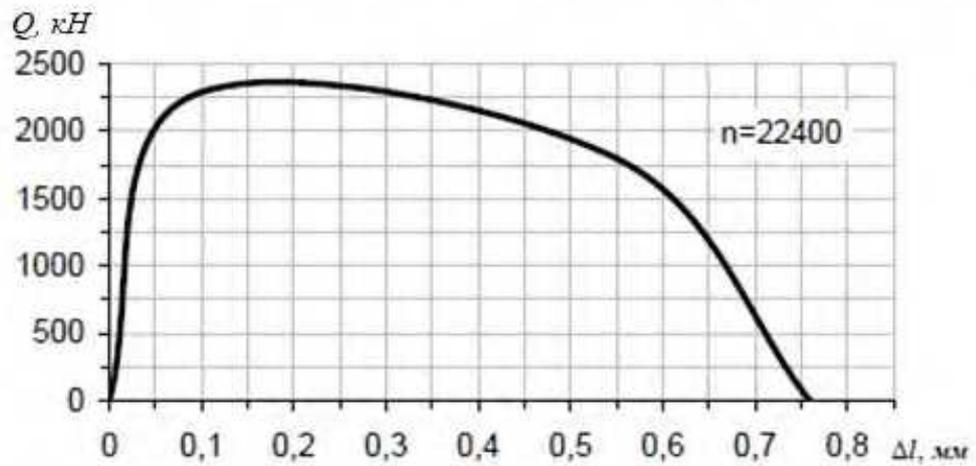
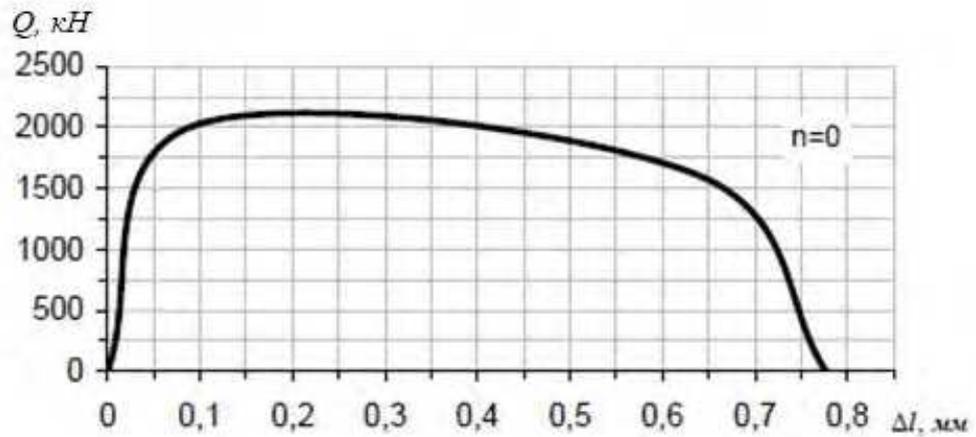
Проведенные тесты показали качественную зависимость параметров полной диаграммы растяжения мини образцов от показателей усталостной долговечности литых сталей в состоянии поставки. Необходимо продолжить исследования в направлении изучения кинетики негативных изменений параметров ПДР с ростом наработки. Полученные закономерности позволяют верифицировать математические модели поврежденности литых сталей, построенные во второй главе, которые могут использоваться в дальнейшем при проведении расчетов боковых рам и надрессорных балок на сопротивление усталости.

По приведенной выше программе испытаний мини образцов на усталость, на уровнях отнулевых циклов напряжений $\sigma_{M1} = 260$ МПа и $\sigma_{M2} = 345$ МПа определены соответствующие средние значения долговечностей в циклах: $\bar{N}_1 = 72800$ и $\bar{N}_2 = 46200$. Усредненные полные диаграммы при квазистатическом растяжении по шести мини образцам в состоянии поставки и после наработок $n_1 = 0,3\bar{N}_i$ и $n_2 = 0,7\bar{N}_i$ циклов на i -ом уровне отнулевого цикла, показаны на рисунках 5.10 и 5.11. Общий вид ПДР для стали 20ГЛ изменяется с увеличением циклической наработки (рисунок 5.10 и 5.11).

Абсолютное удлинение, модуль хрупкости, временное сопротивление, площадь ПДР a_p мини образца неминуемо снижаются (рисунок 5.10 и 5.11).

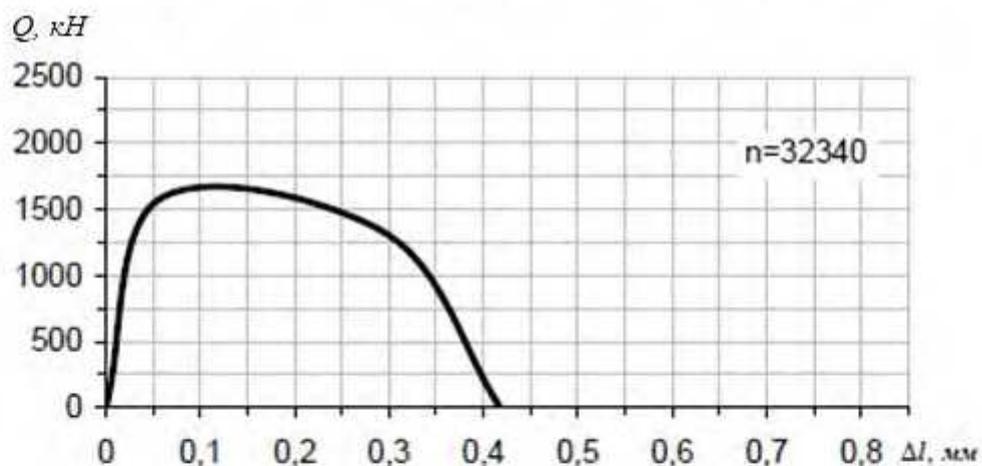
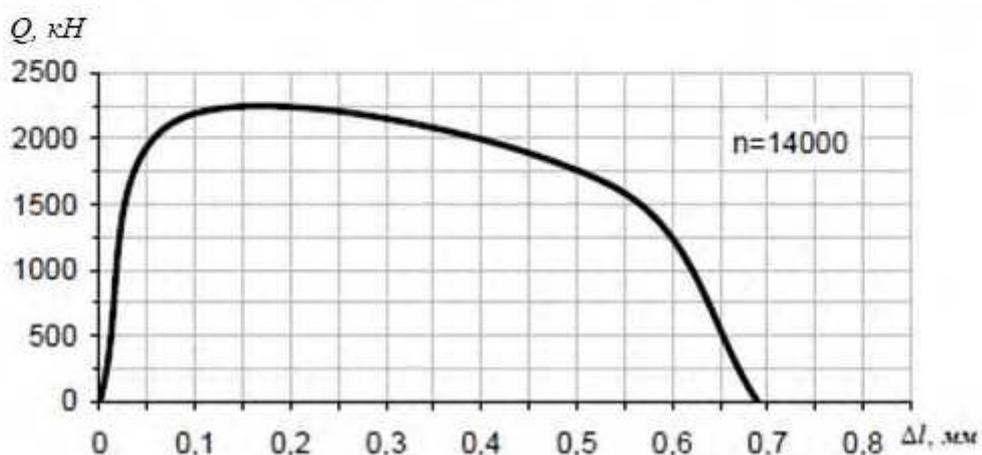
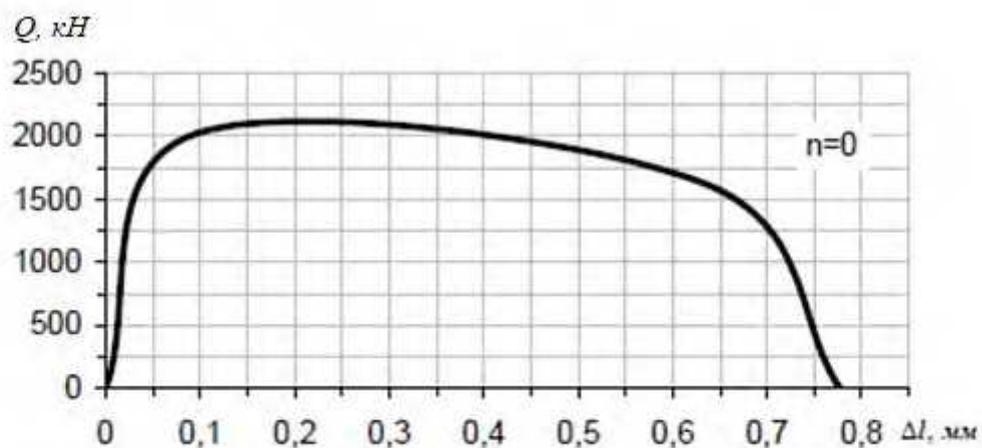
На рисунке 5.12 изображены совмещенные усредненные ПДР, построенные для двух уровней отнулевых циклов и наработок мини образцов. Диаграммы,

построенные после одинаковой наработки мини образцов на двух уровнях отнулевых циклов напряжений, почти совпадают.



Q – максимальная нагрузка цикла для рабочей части мини образца;
 Δl – абсолютное удлинение рабочей части мини образца

Рисунок 5.10 – Негативные изменения полной диаграммы при растяжении мини образцов из стали 20ГЛ после наработки n циклов на отнулевом цикле напряжений σ_{M1}



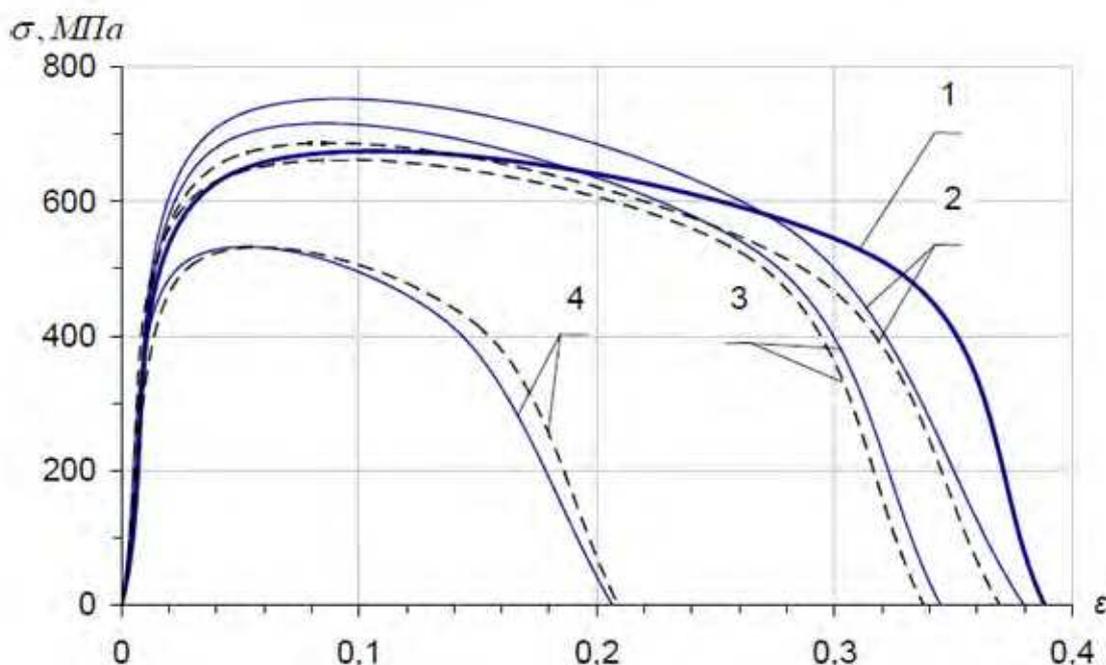
Q – максимальная нагрузка цикла для рабочей части мини образца;

Δl – абсолютное удлинение рабочей части мини образца

Рисунок 5.11 – Негативные изменения полной диаграммы при растяжении мини образцов из стали 20ГЛ после наработки n циклов на отнулевом цикле напряжений σ_{M2}

Поэтому, можно сделать вывод, что кинетика негативных изменений механических свойств с увеличением наработки литой стали типа 20Л для производства несущих деталей тележек грузовых вагонов не зависит от уровня напряжений циклов.

Отмечается увеличение временного сопротивления стали 20ГЛ после наработки до $\bar{n}=0,3...0,35$ с последующим снижением относительно состояния поставки (рисунок 5.12).



кривая 1 – в состоянии поставки; кривые 2 – $n=2000$ циклов на уровнях σ_{M1} и σ_{M2} (штриховые линии); кривые 3 – $n=22400$ циклов на уровне σ_{M1} , $n=14000$ циклов на уровне σ_{M2} (штриховые линии); кривые 4 – $n=50960$ циклов на уровне σ_{M1} , $n=32340$ циклов на уровне σ_{M2} (штриховые линии)

Рисунок 5.12 - Негативные изменения полной диаграммы при растяжении мини образцов из стали 20ГЛ после наработки n циклов

Таким образом, сталь 20ГЛ является циклически упрочняющейся по [63], о чем предполагалось во второй главе. Одновременно, предельная деформация ε_R снижается с самых первых циклов наработки (рисунок 5.13).

Абсолютное удлинение, модуль хрупкости, временное сопротивление, площадь ПДР a_p мини образца неминуемо снижаются (рисунок 5.10 и 5.11).

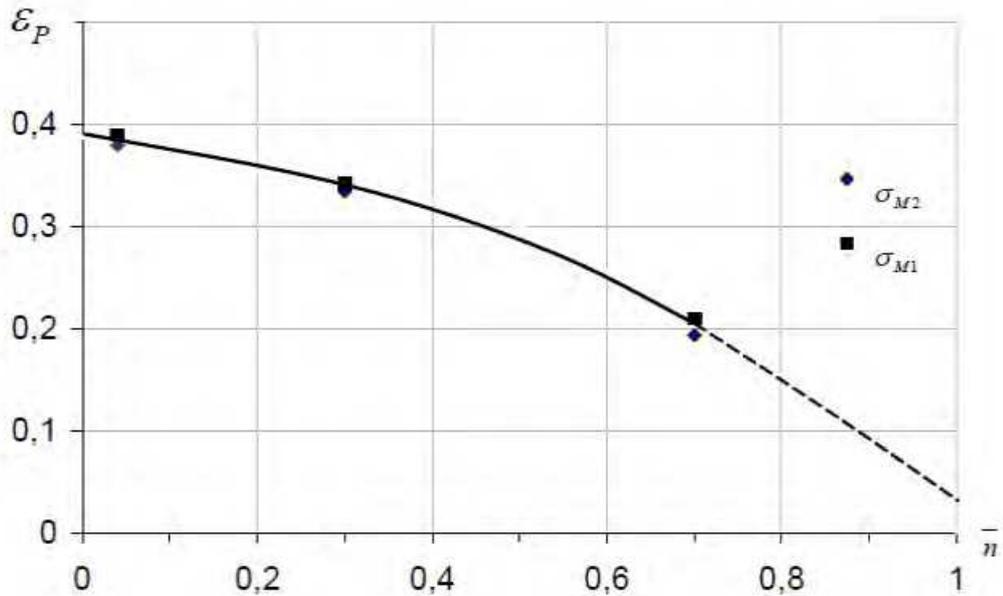


Рисунок 5.13 – Негативное изменение предельной деформации ε_p стали 20ГЛ с увеличением относительной наработки \bar{n} на уровнях отнулевого цикла σ_{M1} и σ_{M2}

Опытные значения предельной деформации ε_p , полученные после относительной наработки $\bar{n} = n/N$ мини образцов на уровнях напряжений циклов σ_{M1} и σ_{M2} , близки (рисунок 5.13). Получить опытные данные после наработки, близкой к среднему значению усталостной долговечности \bar{N}_i , не удалось в виду высокой поврежденности мини образцов, которая не позволяла вкручивать/ выкручивать их в/из захватов испытательного оборудования, не нанося дополнительных повреждений и пластических деформаций рабочей части. Поэтому, штриховой линией указан прогнозируемый путь снижения деформации ε_p для стадий поврежденности стали, вблизи предельных ее значений.

Вырождение модуля упругости E в относительных координатах с ростом числа циклов n нагружений мини образцов показано на рисунке 5.14. Негативные изменения близки после разных наработок на двух уровнях отнулевого цикла напряжений, и не зависят от уровней максимальных напряжений при стационарном нагружении. По-прежнему, штриховая линия соответствует ожидаемому тренду.

Повышение наработки стали 20ГЛ приводит также к негативным изменениям соотношения модулей хрупкости D и упругости E стали 20ГЛ (рисунок 5.15).

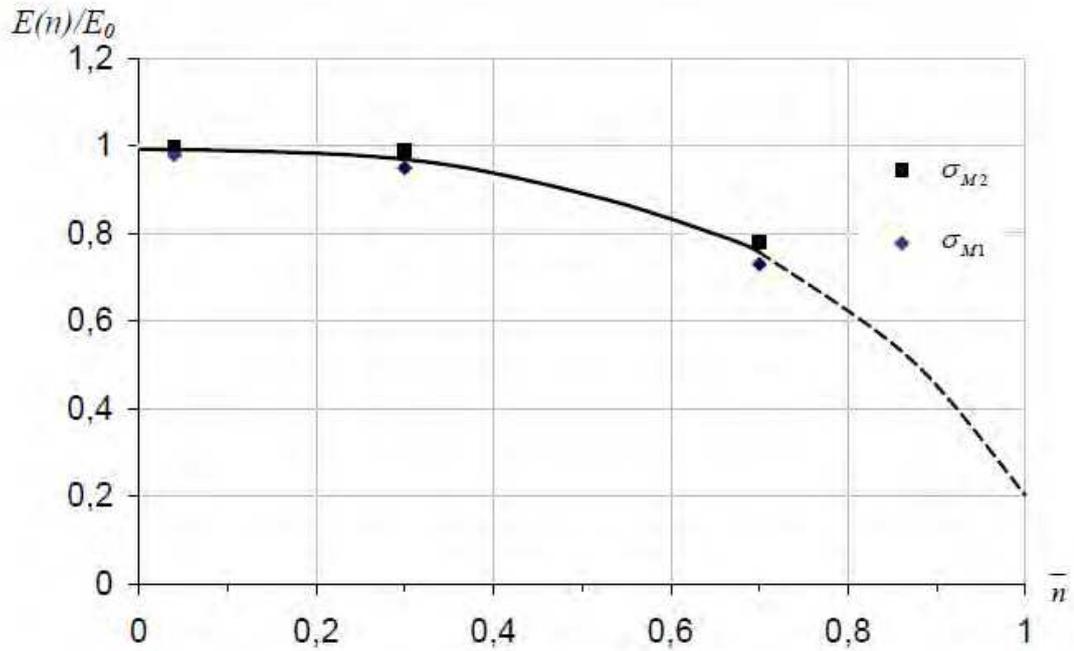


Рисунок 5.14 – Негативное изменение модуля упругости E стали 20ГЛ с увеличением относительной наработки \bar{n} на уровнях отнулевого цикла σ_{M1} и σ_{M2}

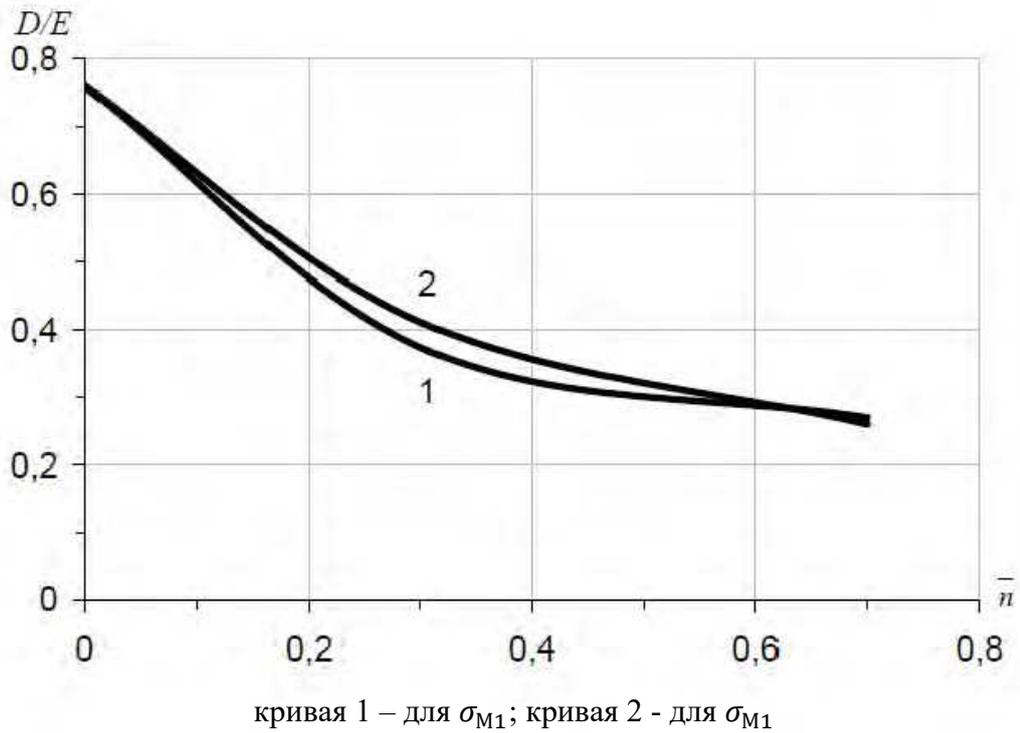
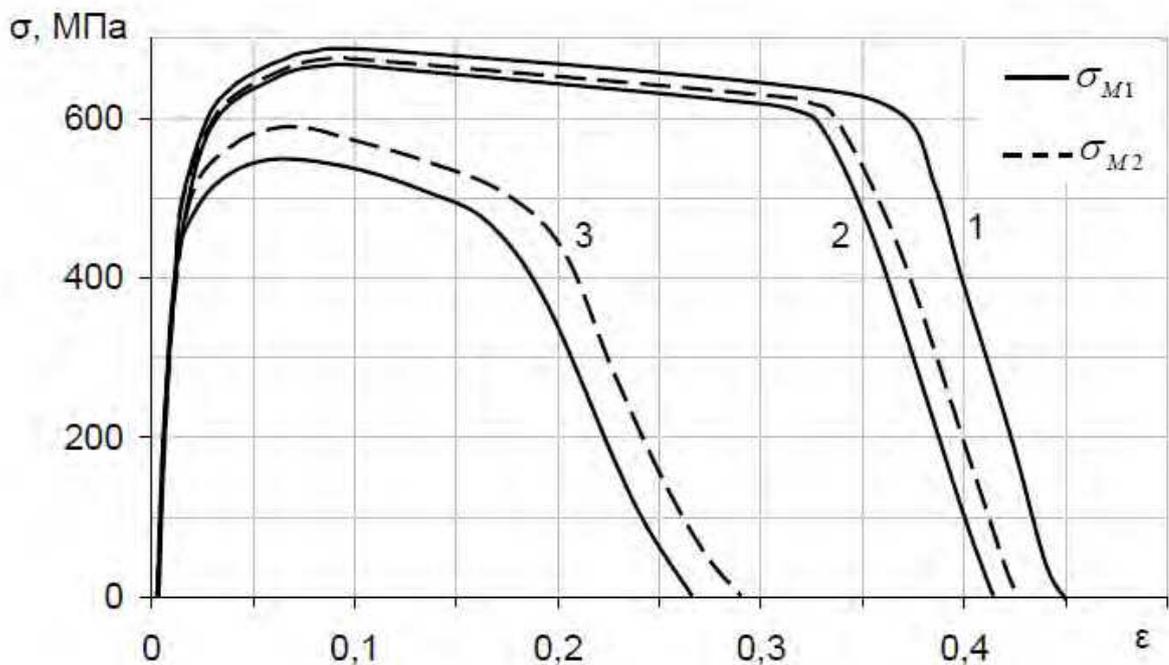


Рисунок 5.15 – Негативное изменение соотношения модулей хрупкости D и упругости E стали 20ГЛ с увеличением относительной наработки \bar{n} на уровнях отнулевого цикла σ_{M1} и σ_{M2}

Кривые, построенные при разных уровнях отнулевого цикла напряжений, практически совпадают, и не зависят от них.

Схожие зависимости получены в испытаниях мини образцов на усталость из стали 20ФЛ, основным легирующим химическим элементом в которой являлся ванадий (рисунок 5.16). Исследуемая сталь 20ФЛ применялась для отливки опытных боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов, в период поиска альтернативы стали 20ГЛ на АО «НПК «Уралвагонзавод». У данных марок сталей выявлено характерное различие в накоплении усталостных повреждений: сталь 20ФЛ с нарастанием поврежденности относится к циклически разупрочняющимся сталям (рисунок 5.16), а 20ГЛ, легированная марганцем – к циклически упрочняющимся (рисунок 5.12).



кривая 1 – в состоянии поставки; кривые 2 – $\bar{n}=0,3$ циклов; кривые 3 – $\bar{n}=0,6$

Рисунок 5.16 - Негативные изменения полной диаграммы при растяжении мини образцов из стали 20ФЛ после относительной наработки \bar{n} циклов

Исследования зависимости усталостной долговечности стали 20ГЛ от смены уровня отнулевого цикла напряжений продолжены при ступенчатом нагружении мини образцов. Сравнение полученных значений усталостной долговечности мини

образцов с расчетами по выражению (1.8) для линейной гипотезы суммирования повреждений, позволит установить ее погрешность.

Шесть мини образцов из одной плавки стали 20ГЛ в состоянии поставки подвергались наработке $n_1 = 0,3\bar{N}_1 = 21840$ циклов при отнулевом цикле напряжений $\sigma_{M2} = 345$ МПа, и после непрерывного перехода на более низкий уровень $\sigma_{M1} = 260$ МПа доводились до разрушения. Средняя усталостная долговечность мини образцов при переходе с высокого на низкий уровень напряжений цикла составила 64600 циклов. Нарботка следующих шести мини образцов из той же стали на уровне напряжений цикла σ_{M1} МПа составила $n_1 = 0,3\bar{N}_2 = 13860$ циклов, после чего образцы разрушались на более высоком уровне напряжений цикла σ_{M2} . Среднее значение долговечности при переходе с низкого на высокий уровень напряжений цикла стало ниже, и составило 54666 циклов.

Усталостная долговечность мини образцов по линейной гипотезе суммирования повреждений (1.8) с учетом наработок n_1 составила 60424 циклов для перехода с высокого на низкий уровень напряжений цикла, и 51282 цикла для перехода с низкого на высокий уровень. В данном случае, линейная гипотеза занижает на 6% прогноз по усталостной долговечности мини образцов при ступенчатом нагружении относительно эмпирических значений.

Проведенные эксперименты по изучению негативных изменений механических свойств литых сталей 20ГЛ и 20ФЛ с ростом наработки, позволяют сформулировать три различных подхода для использования в расчетах деталей тележек грузовых вагонов на сопротивление усталости, в которых процесс накопления повреждений аппроксимируется полиномиальными функциями:

$$\text{– силовой} \quad S_B(\sigma_M; n) = S_{B0} - k_\sigma n^m, \quad (5.1)$$

$$\text{– деформационный} \quad \varepsilon_p(\sigma_M; n) = \varepsilon_{p0} - k_\varepsilon n^m, \quad (5.2)$$

$$\text{– энергетический} \quad a_p(\sigma_M; n) = a_{p0} - k_a n^m, \quad (5.3)$$

где параметрами стали в состоянии поставки являются:

S_{B0} – временное сопротивление стали,

ε_{p0} – предельная деформация стали,

a_{p0} – площадь полной диаграммы растяжения мини образца.

Коэффициенты k_σ , k_ε и k_a выводятся из соответствующих условий усталостного разрушения мини образца при мягком стационарном нагружении:

$$S_B(\sigma_M; N) = \sigma_M, \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_p(\sigma_M, N) = \varepsilon_{pM}, \quad (5.5)$$

$$a_p(\sigma_M; N) = a_{pM}, \quad (5.6)$$

где σ_M , ε_{pM} , a_{pM} – максимальные параметры цикла нагружений мини образца.

Функции полиномиального вида (5.1) – (5.3) подобраны по критерию наибольшего коэффициента корреляции расчетных и эмпирических данных на основе работы [8].

Условия (5.4) – (5.6) обобщают критерии статической прочности при квазистатическом растяжении на циклическое нагружение. Например, в статических испытаниях напряжение постепенно возрастает до временного сопротивления S_{B0} , а в циклических по критерию (5.4) наоборот, S_{B0} падает до максимального напряжения цикла σ_M . То же самое происходит с параметрами ε_{p0} и a_{p0} по условиям (5.5), (5.6). Критерии (5.4) – (5.6) указывают на единую причину разрушения стали при квазистатическом и циклическом нагружениях.

Выбор показателя S_B , ε_p или a_p в качестве меры поврежденности литых сталей класса 20Л для деталей тележек грузовых вагонов, делается на основе экспериментов методом ПДР. Например, в ходе испытаний мини образцов из литых сталей марок 20ГЛ и 20ФЛ методом ПДР установлено, что наработка приводит к снижению предельной деформации ε_p с первых циклов нагружений. Поэтому, после

обработки опытных данных по стали 20ГЛ, получены аппроксимирующие функции в деформационной постановке:

$$\begin{aligned}\varepsilon_p(\sigma_{M1}; n) &= 0,3884 - 0,3832 \left(\frac{n}{72800} \right)^{1,4}, \\ \varepsilon_p(\sigma_{M2}; n) &= 0,3884 - 0,3815 \left(\frac{n}{46200} \right)^{1,4},\end{aligned}\quad (5.7)$$

и при силовом подходе, не учитывая стадию циклического упрочнения (рисунок 5.12):

$$\begin{aligned}S(\sigma_{M1}; n) &= 610 - 350 \left(\frac{n}{72800} \right)^{1,9}, \\ S(\sigma_{M2}; n) &= 610 - 265 \left(\frac{n}{46200} \right)^{1,9}.\end{aligned}\quad (5.8)$$

В условиях (5.8) для циклически упрочняющейся стали 20ГЛ использовано значение временного сопротивления, полученное на мини образцах в состоянии поставки. Функции (5.7), (5.8) описывают процесс вырождения предельной деформации и временного сопротивления стали 20ГЛ соответственно, и верифицируют условия (2.1) и (2.2), принятые во второй главе (рисунок 5.17).

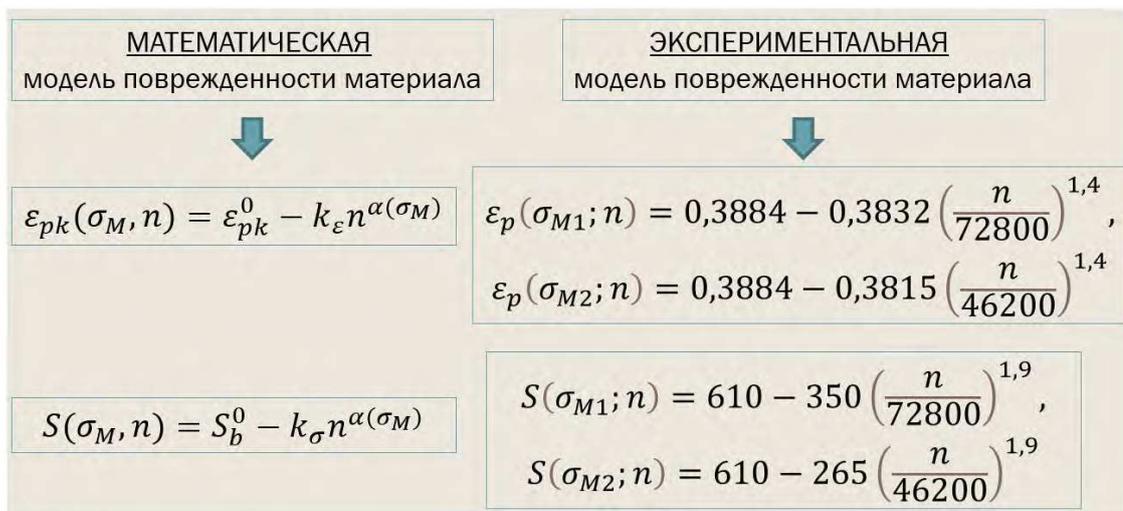


Рисунок 5.17 – Верифицированная математическая модель поврежденности стали, учитывающей негативные изменения механических свойств сталей с увеличением циклической наработки

5.2 Экспериментальная проверка порогового коэффициента интенсивности напряжений вблизи вершины остроугольного технологического дефекта

В третьей главе, с помощью разработанного симметричного плоского образца с центральным надрезом, инициирующим трещину, при растяжении, установлена закономерность получения сниженных на 11% значений коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) относительно порогового значения по известному выражению Ирвина, полученного на образцах с краевой трещиной при внецентренном растяжении. На основе порогового значения K_{th} по Ирвину устанавливаются размеры допустимых внутренних литейных дефектов в боковых рамах и надрессорных балках по действующему стандарту [41].

Выдвинутое в настоящей работе предположение о некорректности оценки влияния внутренних дефектов на снижение усталостной долговечности литых деталей тележек грузовых вагонов с применением K_{th} , определенного для поверхностных трещин, показало его консервативность. Размеры допускаемых по ГОСТ 32400-2013 [41] дефектов, залегающих на глубине стенки детали тележки вагона, можно увеличить на 15%, по данным расчетов КИН на модельном симметричном образце.

Сделанные выводы необходимо проверить в испытаниях при растяжении разработанных плоских образцов с центральным трещиноподобным надрезом, сопоставив значения КИН, рассчитанные по стандартному выражению (3.2) от действующей на образец растягивающей силы, и по формуле Ирвина (3.1) от возникшего напряжения вблизи вершины трещины. В случае, если КИН по формуле (3.2) будет ниже, чем по выражению (3.1) на одном и том же образце, то ограничиваясь известным пороговым значением K_{th} можно увеличивать размеры внутреннего литейного дефекта в детали тележки вагона, и наоборот.

Теоретическое и экспериментальное обоснование размеров и площади допускаемых внутренних литейных дефектов в боковых рамах и надрессорных балках позволит сократить количество отбракованных деталей на производстве без ущерба безопасности движения поездов [84].

Верификация модели с залегающим на глубине технологическим дефектом, разработанной в третьей главе, выполнялась на плоских образцах (рисунок 3.6) из стали 20ГФЛ при осевом растяжении, вырезанных из вертикальных стенок наддрессорной балки (рисунок 5.18) тележки BARBER грузового вагона в состоянии поставки.



Рисунок 5.18 – Места вырезки темплетов из наддрессорной балки для изготовления прямоугольных образцов с центральным инициирующим надрезом

Надрессорная балка произведена Тихвинским вагоностроительным заводом в октябре 2013 г., прошла все операции технологического процесса, в т.ч. термообработку по режиму нормализации, принята отделом технического контроля на соответствие требованиям ОСТ 32.183-2001 [154]. Химический состав стали 20ГФЛ приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Химический состав стали 20ГФЛ наддрессорной балки тележки BARBER

Химические элементы в процентах

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	V
0,17	0,30	0,90	0,04	0,04	0,30	0,30	0,60	0,07

Механические свойства стали 20ГФЛ, определенные по результатам испытаний образцов, вырезанных из наддрессорной балки, сведены в таблицу 5.4.

Микроструктура стали 20ГФЛ мелкозернистая, феррито-перлитная, балл зерна 9.
Вид излома – вязкий.

Таблица 5.4 – Механические свойства стали 20ГФЛ надрессорной балки тележки BARBER

Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость, кДж/м ²		
				KCU	KCU ⁻⁶⁰	KCV ⁻⁶⁰
320	525	26	44	1230,0	440,0	250,0
				1410,0	620,0	180,0

Темплеты вырезались из надрессорной балки огневым способом с последующей отрезкой зон термического влияния шириной 100 мм на ленточнопильном станке, и механической обработкой на фрезерном станке. Полученные прямоугольные заготовки имели толщину захватных частей плоского образца (рисунок 3.6). Поверхность заготовок проверялась визуально на наличие литейных дефектов, зазоров от фрезы, в случае наличия которых заготовка отбраковывалась. Из восьми заготовок отобрано шесть – для изготовления образцов, а две отложены в резерв.

Прямоугольные образцы (рисунок 5.19) изготавливались из заготовок в

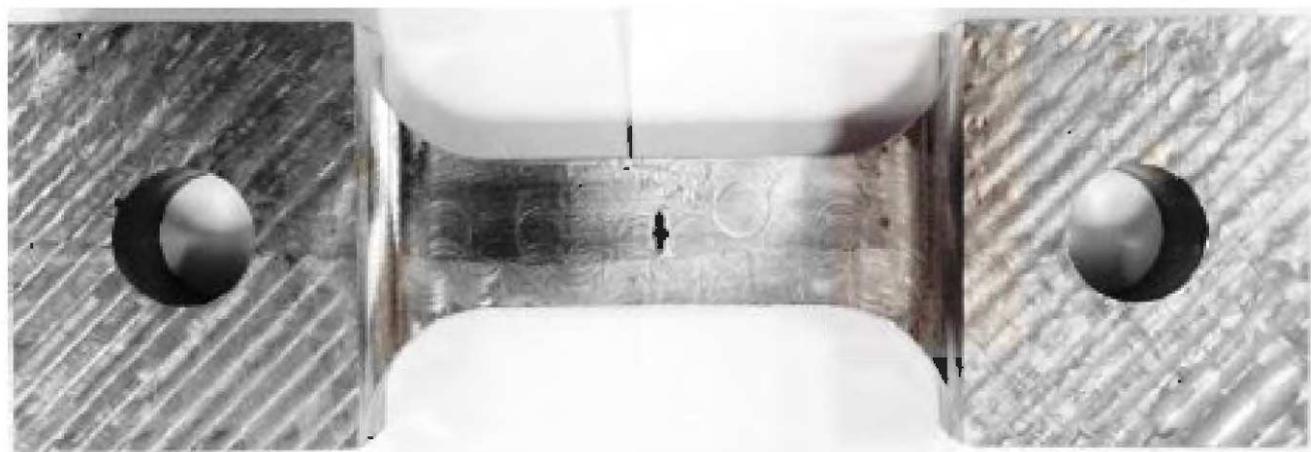


Рисунок 5.19 – Прямоугольный образец с инициирующим центральным надрезом после черновой механической обработки

пятикоординатном обрабатывающем центре FANUC ROBODRILL с ЧПУ по единой программе механической обработки, разработанной на основе твердотельной модели образца в программе Solid Works.

На первых двух образцах отрабатывали технологический процесс изготовления, исправляли ошибки управляющей программы обрабатывающего центра, особенностью которой является перемещение режущего инструмента в пространстве по координатным осям. Поэтому, галтельные поверхности образца после черновой обработки имели ступенчатые переходы от движения пальчиковой фрезы, которые сглаживались наждачной бумагой вручную.

Иницирующий центральный надрез изготавливался в два этапа. Сначала, в обрабатывающем центре FANUC ROBODRILL по программе просверливалось центральное отверстие с припуском для дальнейшей обработки. Затем, в отверстие вставлялась специально изготовленная профильная протяжка, ориентировалась перпендикулярно поверхности образца с помощью оснастки, и легкими постукиваниями слесарного молотка протягивалась через отверстие в образце. Такой способ изготовления центрального надреза соответствует разделу 2 ГОСТ 25.506-85 [38]. Заусенцы в местах выхода протяжки удалялись наждачной бумагой. Геометрические размеры образца контролировались поверенным штангенциркулем на соответствие требованиям чертежа (рисунок 3.6). Большой инструментальный микроскоп БМИ-1Ц использовался для измерения размеров центрального надреза образца.

По разработанной технологии механической обработки с применением специального режущего инструмента изготовлено четыре годных прямоугольных образца, два из которых предназначались для настройки испытательной машины УРС-20/6000 и отладки измерительной аппаратуры, один образец подвергался испытаниям, и один оставался в резерве.

Квазистатическое и циклическое нагружение прямоугольных образцов выполнялось на универсальной сервогидравлической испытательной машине УРС-20/6000 с нижним расположением гидроцилиндра, модернизированной путем установки современной системы управления «eXpert» и программного обеспечения

«eXpert УРС-М». Данная сервогидравлическая машина создана, в том числе, для проведения испытаний образцов на соответствие требованиям ГОСТ 25.506-85 [38], имеет комплект адаптеров с гайками (рисунок 5.20), контактирующими со специально спроектированными захватами образца через сферические поверхности.

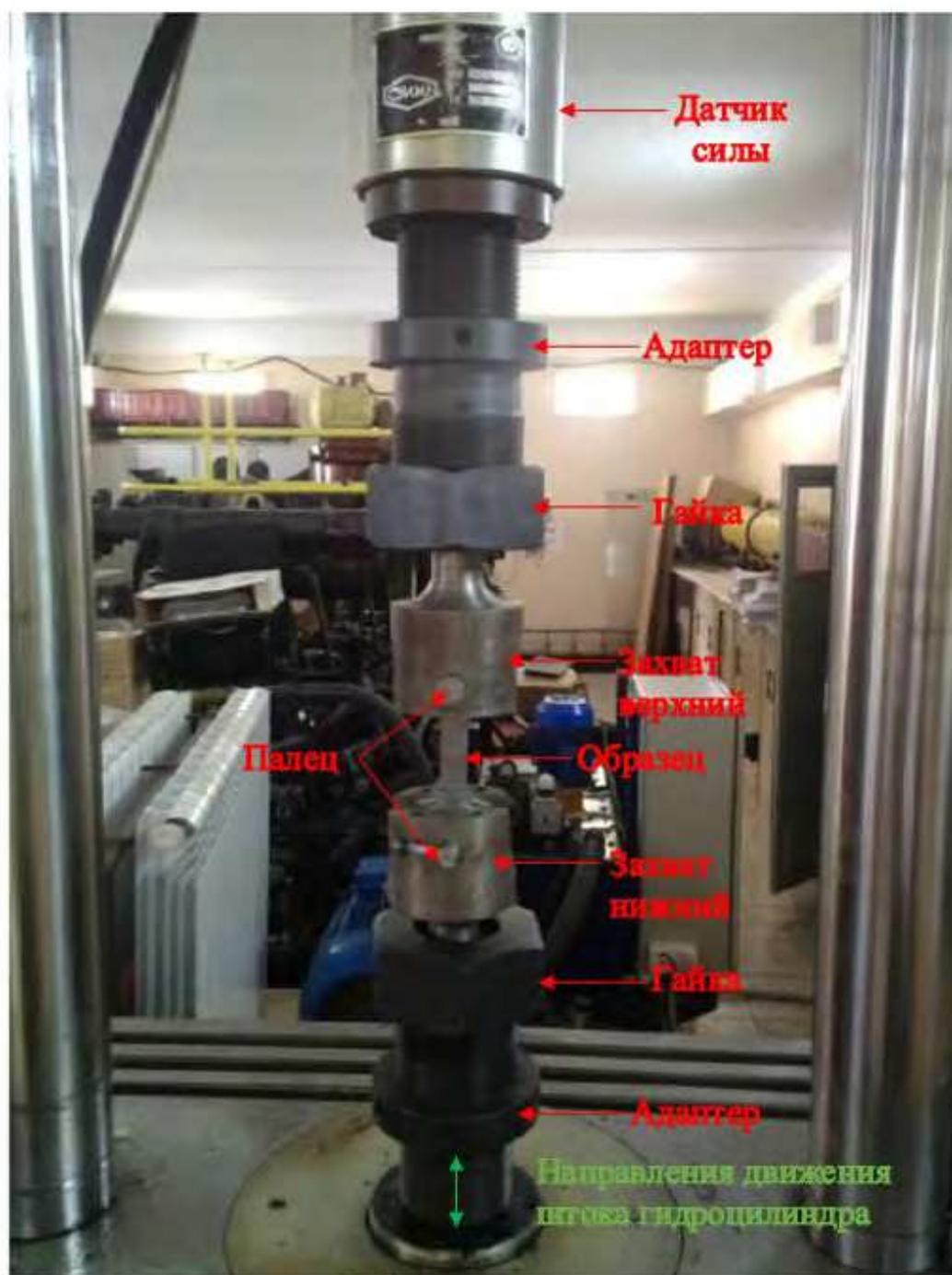


Рисунок 5.20 – Рабочая зона испытательной машины УРС-20/6000 с установленным прямоугольным образцом в захватах

Верхний и нижний захваты имеют пазы, в которые утапливается образец своими захватными частями, и крепится пальцами (рисунок 5.20) из высокопрочной стали, образуя самоцентрирование образца вдоль линии действия силы. Пазы в захватах позволяют свободно размещать в них захватные части образца. Образующиеся зазоры между захватными частями образца и внутренними поверхностями паза устранялись компенсационными металлическими прокладками для предотвращения перемещений образца вдоль пальцев во время испытаний. Масса нижнего захвата учитывалась в прикладываемой к образцу нагрузке, т.к. он свободно подвешивался к образцу и передавал растягивающее усилие только после движения штока силонагружающего гидроцилиндра вниз и контакта с гайкой.

Таким образом, доработанная система нагружения имеет достаточную жесткость по отношению к рабочей части прямоугольного образца с центральным иницирующим надрезом, не передает на него изгибающие моменты от возможных перекосов, обеспечивает доступ к его рабочей части во время проведения испытаний для контроля за продвижением трещины. Нагрузка, прикладываемая к образцу, без учета собственной массы элементов системы нагружения закрепленных на датчике силы, кроме нижнего захвата, контролировалась датчиком силы с помощью интерфейса программного обеспечения на экране компьютера в реальном времени (рисунок 5.20).

Методика испытаний прямоугольных образцов для определения значений критических коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) не отличается от изложенной в ГОСТ 25.506-85 [38]. Однако, необходимо измерять наибольшие деформации $\varepsilon_1 = \varepsilon_y$, перпендикулярные плоскости трещины вблизи ее вершины, чтобы рассчитывать КИН по первой формуле Ирвина (3.1) и сравнивать полученные значения с критическими КИН по формуле (3.2) из ГОСТ 25.506-85 [38]. Измерением деформаций $\varepsilon_2 = \varepsilon_x$ пренебрегается, т.к. они меньше деформаций ε_y на порядок [219], что видимо приводит к незначительной погрешности расчетов КИН по формуле (3.1), но удовлетворяет по точности решения поставленной задачи.

Ограничиваться измерением наибольшей главной деформации $\varepsilon_1 = \varepsilon_y$ также допускается в ГОСТ 33788-2016 [43] для расчетов местных напряжений в сварных

швах несущих конструкций грузовых вагонов. Поэтому, вторая формула в группе уравнений (3.1) заменяется на выражение для закона Гука $\sigma_y = E\varepsilon_y$ при одноосном напряженном состоянии [207].

Ниже, в дополнение к ГОСТ 25.506-85 [38], приводится порядок действий при подготовке испытаний, ходе их проведения, и обработке полученных результатов.

а) Доработать один прямоугольный образец с центральным иницирующим надрезом, изготовленный по программе механической обработки в обрабатывающем центре FANUC ROBODRILL, путем полировки рабочей части наждачной бумагой с размером зерна от 80 до 125 мкм с целью удаления следов от режущего инструмента.

б) Выполнить измерения всех геометрических размеров образца штангенциркулем с ценой деления 0,01 мм на соответствие требованиям чертежа. Иницирующий надрез измерить на микроскопе БМИ-1Ц. Записать полученные значения в журнал.

в) Отобрать четыре тензорезистора ТКБО1-1-200-12 на бумажной подложке из бумаги, пропитанной фенолформальдегидной смолой, длиной базы 1 мм, шириной тензочувствительной решетки 1 мм, сопротивлением 200 Ом, с коэффициентом линейного расширения материала 12, материалом тензочувствительного микропровода – константаном. Тензорезисторы должны быть из одной партии, иметь одинаковое сопротивление и коэффициент тензочувствительности k_T , определенный градуировкой при деформировании консоли равного сопротивления по формуле:

$$k_T = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_y}, \quad (5.9)$$

где $\Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления тензорезистора,

$\varepsilon_y = \Delta l/l$ – относительная деформация тензорезистора вдоль оси y .

Коэффициент k_T указывается на упаковке с тензорезисторами, в которой они поставляются от изготовителя, и может принимать значения от 2,0 до 2,10.

г) Обезжирить рабочую часть прямоугольного образца со стороны наклейки тензодатчиков тканевой ветошью, смоченной в растворителе №646, или аналогичном по свойствам. Высушить на воздухе не менее 30 мин. Контактные провода тензорезисторов выдержать в паяльной кислоте не менее 1 мин., после чего смочить припоем используя паяльник.

д) Разметочным штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм отмерить расстояние от 1,5 до 1,8 мм от вершины надреза по ширине образца. Использовать угольник с прямым углом для обеспечения перпендикулярности отложенного расстояния относительно боковой поверхности образца. Наклеить тензорезистор на образец по выполненной разметке так, чтобы расстояние между краем тензочувствительной решетки и вершиной надреза образца было от 1,5 до 1,8 мм, и микропровода решетки располагались перпендикулярно линии надреза, которая должна делить решетку пополам. В этом случае тензорезистор будет измерять деформации на линии иницирующего надреза, протекающие вдоль линии действия растягивающей силы в испытаниях образца, усредненные по ширине тензочувствительной решетки. Применять клей «Супер Момент». Сушить не менее 24 ч при комнатной температуре.

Соблюдая приведенный порядок действий наклеить остальные три тензорезистора с обеих сторон образца вблизи вершин надреза. Таким образом, образец оборудуется четырьмя датчиками. Допускается наклеить всего два тензорезистора, по одному с каждой стороны образца вблизи обеих вершин иницирующего надреза, на основании симметрии образца. После сушки проверить все тензорезисторы на отсутствие коротких замыканий путем измерения их сопротивления. Неисправные тензорезисторы заменить новыми.

е) Установить и закрепить прямоугольный образец с наклеенными тензорезисторами, контактными проводами вниз, в захватах испытательной машины УРС-20/6000, выбирая зазоры компенсационными прокладками.

ж) Закрепить провода измерительно-вычислительного комплекса МІС-036 со встроенным модулем МС-212 на захватах испытательной машины для снятия натяжения в местах контакта с контактными проводами тензорезисторов. Надежно

изолировать провода в местах соприкосновений с металлическими поверхностями захватов и элементами испытательной машины от короткого замыкания. Присоединить провода модуля МС-212 и контактные провода тензорезисторов методом пайки, изолировать оголенные участки.

Высокотехнологичный отечественный комплекс МІС-036 имеет встроенные схемы термокомпенсации и источники питания четверти моста, полумоста и моста стандартного ряда сопротивлений, что избавляет испытателей от наклейки дополнительных тензорезисторов на образец. В данном случае, МІС-036 включается в режим работы по четверть мостовой схеме с режимом термокомпенсации. После заземления комплекса МІС-036 выполнить его прогрев во включенном режиме, а также прогрев проводов не менее 40 мин для устранения шумов.

и) Произвести пробное квазистатическое нагружение прямоугольного образца растягивающей нагрузкой так, чтобы наибольшие главные напряжения от тензорезисторов не превышали 100 МПа. Поскольку комплекс МІС-036 выводит сигналы от тензорезисторов на экран компьютера в милливольтгах, то для расчета компоненты главного напряжения в упругости используется формула [207]:

$$\sigma_y = \frac{E\Delta U/U}{k_T}, \quad (5.10)$$

где E – модуль упругости стали испытуемого прямоугольного образца;

$\Delta U/U$ – относительное изменение напряжения тензорезистора;

k_T – коэффициент тензочувствительности по формуле (5.9), выраженный через напряжения U .

В пробном нагружении проверить работоспособность всех тензорезисторов, датчика силы испытательной машины, отсутствие шумов на экране компьютера, испытательной оснастки. Записать значение растягивающей нагрузки, измеренной датчиком силы испытательной машины. Разгрузить.

к) Прорастить усталостную трещину длиной от 0,5 до 0,8 мм в вершине надреза при циклическом нагружении образца в испытательной машине с параметрами цикла: максимальная нагрузка цикла 1472 Н, коэффициент асимметрии 0,1. Таким

образом, расстояние от вершины выращенной трещины до микропровода тензоизмерительной решетки резистора составит 1 мм. Выявлять трещину капиллярным методом неразрушающего контроля. Длину трещины контролировать штангенциркулем с ценой деления 0,01 мм.

л) Нагрузить образец с выращенной усталостной трещиной в любой из вершин надреза квазистатической растягивающей силой до достижения напряжений σ_y 100, 200 и 235 МПа вблизи вершины трещины, рассчитанных в реальном времени по формуле (5.10). Записать соответствующие значения приложенной нагрузки к образцу от датчика силы испытательной машины. Необходимо напомнить, что установленные уровни напряжений σ_y идентичны главным напряжениям в плоскости сечения по наклонному поясу, внутреннему радиусу проема для колесных пар, и по нижнему радиусу рессорного проема боковой рамы тележки модели 18-100 от действия вертикальной силы в сокращенных испытаниях на усталость, соответственно.

м) Рассчитать значения КИН по формулам (3.1) и (3.2), используя полученные экспериментальные значения напряжений σ_y и растягивающих нагрузок, соответственно. Определить средние значения и расхождение в процентах.

В таблице 5.5 приведены значения КИН по результатам испытаний прямоугольного образца с инициирующим надрезом и выращенной трещиной, площадью описанного прямоугольника 16,16 мм², при квазистатическом растяжении по разработанной методике, с учетом положений ГОСТ 25.506-85 [38].

Выражение Ирвина (3.1) несколько завышает значения КИН относительно формулы (3.2), что и требовалось доказать. Если управление нагружением прямоугольного образца ведется по напряжению σ_y , то формула (3.2) показывает значения КИН, сниженные в среднем на 32% относительно значений по формуле Ирвина (таблица 5.5).

Теоретические расчеты в третьей главе устанавливали данное расхождение на уровне 11%. Опытные данные (таблица 5.5) ниже на 19% расчетных значений для площади дефекта 16,38 мм² (таблица 3.3).

Таблица 5.5 – Результаты испытаний прямоугольного образца

Сила растяжения образца F , Н	Напряжение σ_y на расстоянии 1 мм от вершины трещины, МПа	Коэффициент интенсивности напряжений K_I , МПа $\sqrt{м}$	
		по формуле (3.2)	по формуле Ирвина(3.1)
1295	89,6	4,9	7,1
1511	100	5,7	7,9
2714	200	10,3	15,9
3145	235	11,9	18,6

В результате проведенной экспериментальной проверки порогового коэффициента интенсивности напряжений вблизи вершины остроугольного технологического дефекта на прямоугольном образце, и сопоставления с расчетными данными в третьей главе, можно сделать вывод о том, что формула Ирвина существенно завышает значения КИН.

На практике, выражение Ирвина необходимо дополнить поправочным коэффициентом $M = 0,68$, для определения допустимых размеров внутренних остроугольных литейных дефектов в стенках боковых рам и надрессорных балок (рисунок 5.21). При этом, минимальным пороговым значением является $K_{th} = 7,1$ МПа $\sqrt{м}$ (таблица 3.1) для сталей класса 20Л. Такое решение позволит увеличить предельный размер допустимого по ГОСТ 32400-2013 [41] внутреннего литейного дефекта с 7,1 до 9,5 мм² в боковых рамах тележек грузовых вагонов, что не противоречит эмпирическим данным (рисунок 3.2).



Рисунок 5.21 – Верификация математической модели залегающего на глубине технологического дефекта

5.3 Экспериментальная проверка критериев циклической вязкости разрушения для литых деталей тележек грузовых вагонов

Модель распространения усталостной трещины в стенке литой детали и установленные критерии в четвертой главе (таблица 4.1) [216] идентифицировались в натуральных испытаниях на усталость надрессорной балки из стали 20ГФЛ с поперечным надрезом по центру нижнего пояса. Стоит напомнить, что значения циклической вязкости разрушения (таблица 4.1) получены другими учеными путем проведения испытаний образцов с краевой трещиной при внецентренном растяжении, т.е. не на детали. Подобные эксперименты с надрессорной балкой уже проводились ранее Т.П. Севериновой в работе [219], но с целью расчета скорости роста трещины в пределах длины от 25 до 90 мм. Фактически полученные значения КИН обрываются на значении $90 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ при длине трещины 90 мм по нижнему поясу надрессорной балки (чертеж 100.00.001-0) [219], снятой с тележки грузового вагона после пяти лет службы.

Главной задачей повторных испытаний надрессорной балки с надрезом в зоне максимальных растягивающих главных напряжений ставится получение значений циклической вязкости разрушения и критической длины усталостной трещины, которые необходимо сравнить с соответствующими данными в таблицах 4.1 и 4.5. Проведенные исследования позволят уточнить известные значения циклической вязкости разрушения [219] для литых сталей класса 20Л, и убедиться в наличии достаточно протяженных усталостных трещин у надрессорных балок при этих значениях КИН.

Поскольку, испытательное оборудование, методика испытаний надрессорной балки с иницирующим надрезом, обработка опытных результатов испытаний в целом похожи с приведенными в работе [219], то ниже приводятся только краткие отличительные особенности, которые соблюдались в проведении экспериментов.

По аналогии с работой [219], методом случайного отбора в качестве объекта испытаний выбрана надрессорная балка литейный номер 64032 тележки модели 18-100, которая произведена ПАО «Кременчугский сталелитейный завод» в 1991 г. из

стали 20ГФЛ. Срок эксплуатации не известен, т.к. данная надрессорная балка снята с длительного хранения. Испытания проводились в 2016 г. Химическим анализом подтверждена марка стали 20ГФЛ. Механические свойства стали 20ГФЛ, определенные на образцах по ГОСТ 1497-84 [33] и ГОСТ 9454-78 [47] из нижнего пояса надрессорной балки, сведены в таблицу 5.6. Ориентация всех образцов – продольная относительно надрессорной балки.

Таблица 5.6 – Механические свойства стали 20ГФЛ для надрессорной балки 1991 года выпуска

Модуль упругости E , 10^5 МПа	Предел текучести условный $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU^{60} , кДж/м ²
1,9	360	536	20	36	469,7 658,2
-	343*	510*	18*	25*	245*
*Требования по [153] в состоянии поставки, не менее					

В этом случае, направления развития трещин в испытаниях образцов и в надрессорной балке при изгибе совпадают. По результатам стандартных испытаний образцов можно предположить, что сталь 20ГФЛ надрессорной балки либо имеет механические свойства нового металла (таблица 5.6), либо уже испытывает циклическое упрочнение, о чем сообщалось во второй главе.

Решение поставленной задачи потребовало сделать иницирующий надрез (рисунок 5.22) по середине нижнего пояса надрессорной балки, в месте возникновения наибольших растягивающих напряжений от вертикальной нагрузки, выявленного в расчетах напряженно-деформированного состояния (НДС) по программе ANSYS. Граничные условия при определении НДС задавались по [43, 140 – 142] для режима испытаний на сопротивление усталости, с максимальной нагрузкой цикла 82 тс и коэффициентом асимметрии 0,1.

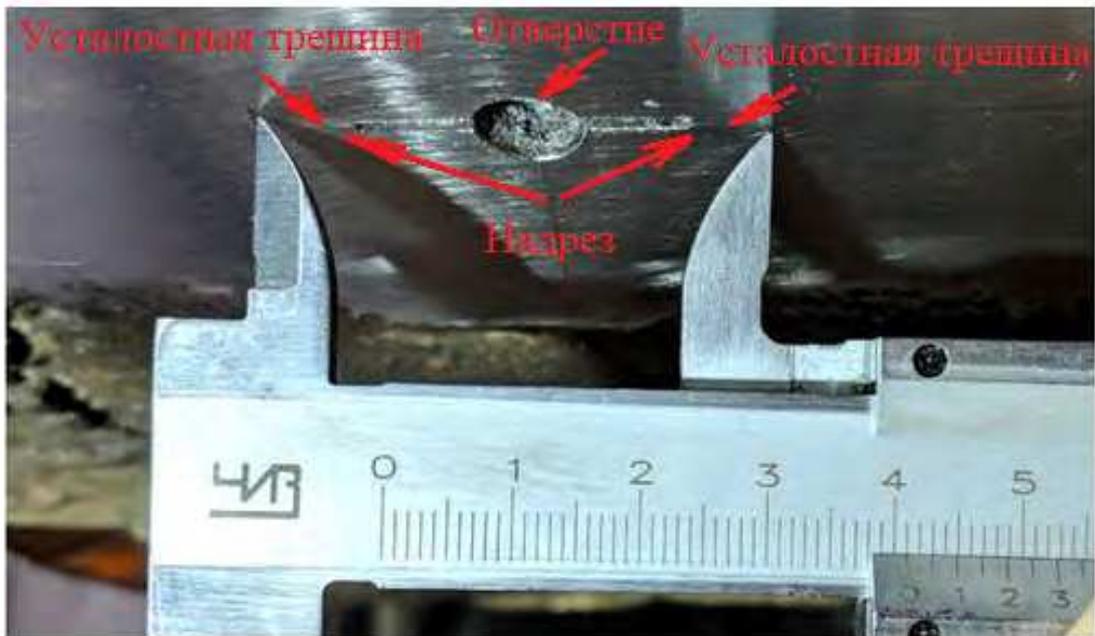


Рисунок 5.22 – Иницирующий надрез с выращенной усталостной трещиной в нижнем поясе надрессорной балки

Поверхностная литейная корка, в месте нанесения надреза и предполагаемого развития усталостной трещины, снималась наждачной бумагой с размером зерна от 80 до 100 мкм до гладкого металла, для последующего наклеивания тензорезисторов. Иницирующий надрез длиной $L = 27$ мм прорезался ножовочным полотном толщиной 1,2 мм, от отверстия диаметром 8,5 мм в обе стороны (рисунок 5.22). Длина надреза $L = 27$ мм выбрана исходя из требования ГОСТ 33788-2016 [43] по минимальному размеру выявляемой усталостной трещины от 10 до 50 мм в сокращенных и полных испытаниях боковых рам и надрессорных балок тележек на сопротивление усталости, что является критерием в испытаниях по ГОСТ 33788-2016 [43]. В последствии, длина выращенной начальной усталостной трещины L_0 от надреза не должна превышать 50 мм.

Статические и циклические испытания надрессорной балки с надрезом выполнялись на высокоточной испытательной машине МДИ-2000 (рисунок 5.23) сервогидравлического типа, которая разработана в рамках субсидии Минобрнауки Российской Федерации (тема №2010-218-01-228) по техническому заданию автора, и защищена патентом [172]. Испытательная машина (рисунок 5.23) позволяет

проводить испытания по [43, 141, 142] при стационарном нагружении детали заданными параметрами цикла с управлением от датчика силы (приложение М).



Рисунок 5.23 – Сервогидравлическая испытательная машина МДИ-2000 с установленной надрессорной балкой в рабочей зоне

Погрешность поддержания нагрузки в циклических испытаниях деталей на МДИ-2000 не превышает $\pm 1\%$, чего не достигают устаревшие гидравлические

машины ZDM-200/400 пульсаторного типа, используемые в работе [219]. Обеспечение стабильности параметров циклов на протяжении всего опыта является важным качеством динамических испытательных машин, от которого зависит точность результатов, потому что развитие усталостной трещины в детали протекает за меньшее на порядок число циклов относительно усталостной долговечности.

Машина МДИ-2000 имеет самоустанавливающуюся опору в двух пересекающихся плоскостях для устранения неплоскостности опор надрессорной балки. Опоры содержат цилиндры диаметром 170 мм, что удовлетворяет требованиям методика испытаний на усталость [141].

Испытательная нагрузка от шарнирной опоры штока гидроцилиндра к надрессорной балке передается через вкладыш, выполненный по диаметру подпятника. Частота приложения циклической нагрузки не превышает 7 Гц.

Методика испытаний по определению критической длины трещины в надрессорной балке и циклической вязкости разрушения K_{fc} схожа с изложенной в [219]. Предыдущий опыт, полученный в испытаниях прямоугольного образца с инициирующим надрезом, выращивания усталостной трещины от надреза, подготовки и наклейки малобазных тензорезисторов вблизи вершины трещины, также учитывался.

Существенным дополнением к методике [219] является увеличение расстояния r при расчетах K_{fc} по формуле Ирвина (3.1), с ростом длины L_i усталостной трещины от инициирующего надреза в нижнем поясе надрессорной балки, которое вычислялось в программе ANSYS в ходе эксперимента. Расстояние r от вершины усталостной трещины до тензочувствительной решетки тензорезистора исключает зону пластической деформации вблизи нее, которая естественным образом увеличивается при больших длинах L_i усталостной трещины и мягком нагружении надрессорной балки.

Ниже приводятся основные положения методики проведения экспериментов с учетом требований по установке подготовленной надрессорной балки в испытательную машину МДИ-2000 и режиму нагружения во время сокращенных испытаний на сопротивление усталости при трехточечном изгибе по [43].

а) Вырастить усталостную трещину от надреза в нижнем поясе надрессорной балки начальной длиной $L_0 \leq 50$ мм. Вершины трещины выявлять капиллярным методом неразрушающего контроля. Длину трещины измерять штангенциркулем с ценой деления не ниже 0,1 мм. Амплитуда цикла при мягком нагружении $P_a = 35$ тс, средняя нагрузка цикла $P_m = 47$ тс, частота нагружений $f = 5,5$ Гц, количество циклов $n_{тр}$.

б) Снять надрессорную балку с МДИ-2000. Перевернуть нижним поясом вверх.

в) Определить размер пластической зоны r вблизи каждой вершины начальной усталостной трещины длиной L_0 , на твердотельной модели испытываемой надрессорной балки в программе ANSYS, используя корректные исходные данные (таблица 5.6) и граничные условия, при которых выращена трещина.

г) Подготовить четыре тензорезистора ТКБО1-1-200-12 на бумажной подложке из бумаги, пропитанной фенолформальдегидной смолой, базой 1 мм, шириной тензочувствительной решетки 2,5 мм, шириной подложки 5 мм, сопротивлением 200 Ом, с коэффициентом линейного расширения материала 12, материалом тензочувствительного микропровода – константаном. Отмерить штангенциркулем расстояния r от вершин трещины, полученные расчетом в программе ANSYS. Наклеить тензорезисторы вплотную, перпендикулярно берегам трещин, выдерживая расстояния r от вершины трещины до тензочувствительной решетки тензорезистора (рисунок 5.24). Порядок подготовки и наклейки тензорезисторов приведен в разделе 5.2, пункты в – д. Тензорезисторы в данном расположении будут регистрировать деформации отрыва ε_y , которые пересчитываются в осевые напряжения по закону Гука $\sigma_y = E\varepsilon_y$, необходимые для расчета КИН по первому выражению Ирвина в формуле (3.1). Стоит отметить, что в работе [219] наклеивались цепочки тензорезисторов с базой 0,5 мм в продольно-поперечном направлении относительно берегов трещины, содержащие от 8 до 10 шт.

Измеренные деформации ε_x и ε_y в [219] пересчитывались в соответствующие напряжения по второй формуле (3.1) для двухосного напряженного состояния. Однако, деформации ε_x оказались на порядок ниже [219].



Рисунок 5.24 – Расположение тензорезисторов вблизи вершин выращенной исходной усталостной трещины длиной L_0 по нижнему поясу надрессорной балки

Кроме того, в аналогичных испытаниях сварных швов несущих конструкций грузовых вагонов измеряются только деформации, перпендикулярные предполагаемому направлению развития трещины [43]. Поэтому, как в испытаниях прямоугольных образцов, описанных выше, в настоящей работе вторая формула (3.1) заменяется на формулу закона Гука $\sigma_y = E\varepsilon_y$ для одноосного напряженного состояния, что видимо вносит некоторую погрешность в расчеты напряжения σ_y , но удовлетворяет по точности решения поставленной задаче.

д) Подключить контактные провода наклеенных тензорезисторов к проводам тензостанции МІС-036 с измерительным модулем МС-212 по четверть мостовой схеме методом пайки на терминалах, наклеенных на надрессорную балку (рисунок 5.24). Закрепить провода тензостанции на надрессорной балке через изолятор. О возможностях измерительно-вычислительного комплекса МІС-036 сообщалось в разделе 5.2.

е) Установить испытуемую надрессорную балку с наклеенными тензорезисторами и закрепленными проводами от тензостанции обратно в машину МДИ-2000. Подключить провода к измерительному модулю МС-212 тензостанции МІС-036, и включить ее в режим измерения. МІС-036 должен быть заземлен. Прогреть измерительную аппаратуру в течение не менее 40 мин. Сигнал должен быть от всех

четырёх тензорезисторов. В случае обрыва контактного провода тензорезистор заменить новым.

ж) Произвести квазистатическое нагружение надрессорной балки нагрузкой 82 тс не менее трех раз для проверки устойчивости работы аппаратуры и системы нагружения испытательной машины МДИ-2000. Сохранить полученные значения деформаций ε_y от ближних к вершинам трещины тензорезисторов в милливольтгах (мВ), рассчитать напряжение σ_y по формуле (5.10), с учетом фактического модуля упругости E (таблица 5.6) и коэффициента тензочувствительности k_T , указанного производителем тензорезисторов на упаковке. Рассчитать КИН по первой формуле Ирвина в выражении (3.1).

и) Прорастить первоначальную усталостную трещину в надрессорной балке на величину ΔL_i с неизменными параметрами цикла, приведенными в пункте а), за Δn_i циклов нагружений. Наклеенные тензорезисторы при этом можно отключить от аппаратуры, они все равно повреждаются растущей трещиной.

к) Снять надрессорную балку с испытательной машины, перевернуть нижним поясом вверх, удалить поврежденные и наклеить новые тензорезисторы, соблюдая порядок, описанный в пунктах в-ж настоящего раздела, для усталостной трещины длиной $L_{тр} = L_0 + \sum_{i=0}^m \Delta L_i$, где m – номер эксперимента по выращиванию трещины.

л) Повторять переходы, указанные в пунктах и, к, до потери несущей способности надрессорной балки за количество циклов $N = n_{тр} + \sum_{i=0}^m \Delta n_i$.

м) Измерить штангенциркулем длину усталостной трещины $L_{тр}$. Рассчитать значение циклической вязкости разрушения K_{fc} по первой формуле Ирвина в выражении (3.1). Сравнить полученное значение K_{fc} с известными значениями (таблица 4.1).

Результаты экспериментального определения КИН по вышеизложенной методике приведены на рисунке 5.25. Полученное значение циклической вязкости составило $K_{fc} = 79 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ при критической длине усталостной трещины $L_{тр} = 220 \text{ мм}$ (рисунок 5.23), что соответствует величине $[K_I]^{13 \text{ лет}} = 78 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ (таблица 4.1).

Фактическая длина усталостной трещины $L_{тр} = 220$ мм в надрессорной балке близка к расчетной длине 210 мм для литой детали тележки модели 18-100 после 13 лет эксплуатации (таблица 4.5). Площадь усталостного развития трещины составила 18% от поперечного сечения надрессорной балки по оси отверстия под шкворень.

Длина начальной трещины $L_0 = 41$ мм от инициирующего надреза (рисунок 5.22) нанесена за $n_{тр} = 2,21 \cdot 10^5$ циклов. Циклическая долговечность надрессорной балки до потери несущей способности составила $N = 3,6 \cdot 10^5$ циклов. Границы зоны пластической деформации вблизи вершины трещины изменялись в пределах от $r_1 = 2$ мм до $r_{10} = 8$ мм, где индекс обозначает порядковый номер замера деформаций после выращивания усталостной трещины на величину ΔL_i . Всего проведено десять стадий замеров деформаций и расчетов КИН (рисунок 5.25).

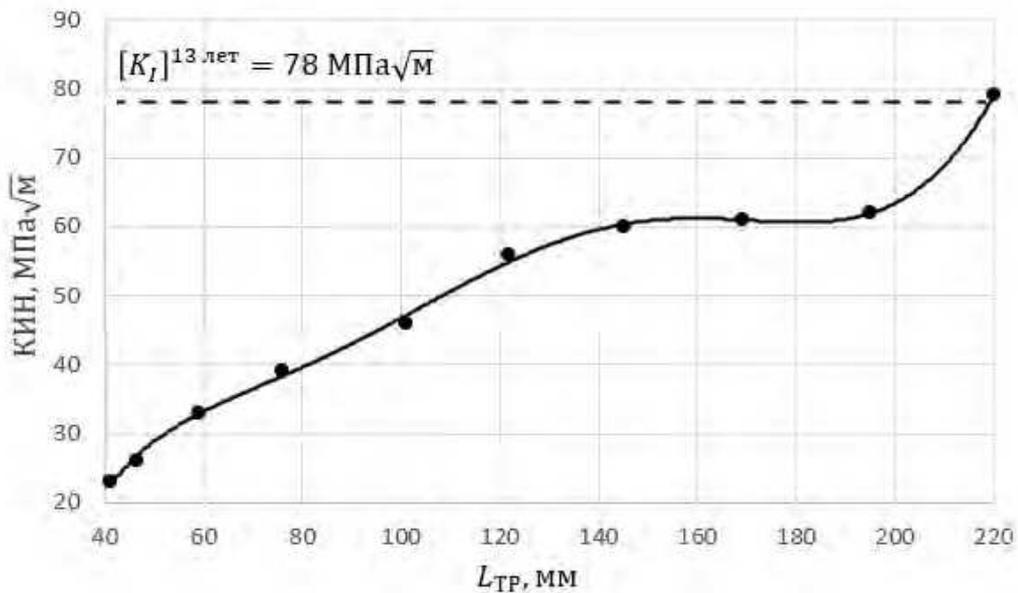


Рисунок 5.25 – Зависимость КИН от длины трещины в нижнем поясе надрессорной балки

Наибольшие главные напряжения σ_y , пересчитанные по закону Гука от измеренных на соответствующем расстоянии r деформаций ε_y , находились в пределах от 155 до 324 МПа, что не превышало предела текучести (таблица 5.6).

На основе эмпирического значения циклической вязкости можно предположить, что надрессорная балка находилась в эксплуатации тринадцать лет (рисунок 5.25), т.к. ее разрушение наступило при достаточно большой длине усталостной трещины $L_{тр}$ и соответствующих главных деформациях ε_y вблизи ее вершин. Значит металл имел достаточный запас сопротивления усталости. В случае значительных негативных изменений, выраженных в понижении механических свойств стали, например от интенсивного воздействия максимальных эксплуатационных нагрузок на надрессорную балку, главные деформации ε_y и КИН около вершин трещины были бы меньше из-за меньшей длины усталостной трещины. Стоит напомнить, что в дату проведения экспериментов прошло двадцать пять лет со дня изготовления надрессорной балки. Это почти в два раза превышает текущее состояние стали 20ГФЛ надрессорной балки, определенное в опытах. Поскольку испытываемая надрессорная балка взята с длительного хранения, а не снята с тележки вагона, то вероятно она находилась в эксплуатации тринадцать лет.

Негативные изменения значений циклической вязкости (таблица 4.1), указанные в работе [216] считаются подтвержденными в натурных испытаниях надрессорной балки и пригодными для использования в расчетах сопротивления усталости надрессорных балок и боковых рам тележек грузовых вагонов.

Математическая модель продвижения усталостной трещины в литой детали тележки признается верифицированной (рисунок 5.26).



Рисунок 5.26 – Верифицированная математическая модель развития усталостной трещины в литой детали тележки вагона

5.4 Основные результаты и выводы по главе 5

а) В испытаниях на растяжение мини образцов из литых сталей 20ГЛ и 20ФЛ методом полных диаграмм установлено, что циклическая наработка приводит к снижению предельной деформации с первых циклов нагружений.

б) Опытным путем получены коэффициенты в функциях, описывающих процесс вырождения предельной деформации и временного сопротивления стали 20ГЛ.

в) В ходе экспериментов по определению коэффициента интенсивности напряжений на прямоугольных образцах с центральным надрезом выявлено, что полученные значения меньше, чем на образцах с краевой трещиной. Выражение по Ирвину требует введения поправочного коэффициента $M = 0,68$ для оценки влияния внутренних литейных дефектов на снижение прочности литых деталей тележек грузовых вагонов.

г) Поправка к формуле Ирвина для расчета коэффициентов интенсивности напряжений в виде коэффициента $M = 0,68$ обосновывает увеличение размеров внутренних литейных дефектов в отливках, допускаемых по действующим нормативам, с 7,1 до 9,5 мм², что соответствует эмпирическим наблюдениям.

д) Исследование напряженного состояния вблизи вершин усталостной трещины по нижнему поясу надрессорной балки позволило получить значение циклической вязкости разрушения на уровне известных значений, полученных другими учеными на образцах с краевой трещиной при внецентренном растяжении.

е) Установленные коэффициенты в силовых и деформационных кинетических кривых, аппроксимирующих негативные изменения механических свойств, поправочный коэффициент к выражению Ирвина для оценки допускаемых размеров литейных дефектов, и подтвержденное значение циклической вязкости разрушения, позволяют верифицировать и уточнить предложенные модели во второй, третьей, и четвертой главах.

Глава 6 Формулирование единой теории о негативных изменениях механических свойств литых сталей и решение прикладных задач

Протекание деградации, или негативных изменений механических свойств и циклической вязкости разрушения в литых сталях несущих деталей вагонов зависит от их нагруженности, соотношения порожнего и груженого пробега вагонов, химического состава стали, качества термообработки. Анализ литературы, о котором упоминалось в предыдущих главах, показывает интерес ученых к проблеме потери механических свойств и циклической вязкости разрушения сталей на финальных сроках эксплуатации конкретных деталей вагонов.

В случаях изменения марок сталей, нагруженности деталей, получение новых значений пониженных механических свойств стали откладывается на несколько десятков лет. Известные данные по снижению механических свойств в литых сталях, о которых сообщалось выше, ограничиваются двадцатью пятью годами. Известно, что уже разрабатываются тележки грузовых вагонов с назначенным сроком службы сорок лет. Сведения об уровне механических свойств сталей после таких сроков эксплуатации несущей детали в тележке грузового вагона могут быть получены путем оценки склонности к старению термическим способом [90, 91], либо по химическому составу стали, что не имеет ничего общего с процессом накопления повреждений в течение сорока лет эксплуатации.

Проведение испытаний на усталость литых боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов по американским методикам (приложение Н), которые легли в основу современных нормативных документов [44, 45] и призваны определять гамма-процентный ресурс в годах, мало информативны в виду отсутствия разрушений деталей. Более того, испытания литых боковых рам и надрессорных балок по [44, 45, 173] требуют результатов предварительных статических, типовых, ходовых и поездных испытаний деталей, что в случаях получения отрицательных результатов на любом из этапов тестов растягивает разработку новых технических решений на длительный срок. Оснащение разработчиков литых деталей тележек и технологов-литейщиков современными прикладными компьютерными

программами может обеспечить положительные результаты испытаний на всех стадиях с первого раза.

Учитывая отсутствие методов прогнозирования усталостной долговечности литых деталей тележек с учетом деградации механических свойств сталей, а также опираясь на известные и собственные данные по снижению механических свойств литых сталей в эксплуатации вагонов, в настоящей главе формулируется единая теория о негативных изменениях механических свойств сталей для производства литых деталей тележек грузовых вагонов [288]. Ведущим замыслом разрабатываемой теории является описание явлений перехода изначально пластичной стали в хрупкое состояние с ростом циклической наработки, методами континуальной механики и механики разрушений.

Методы континуальной механики в формулируемой теории опираются на постепенное снижение модуля упругости, коэффициента поперечной деформации, предельной деформации стали при циклической наработке, что приводит к охрупчиванию стали и разрушению конструкции. Накопление усталостных повреждений зависит от последовательности циклов в спектре и происходит с самых первых циклов нагружений детали до ее разрушения по усталостной трещине.

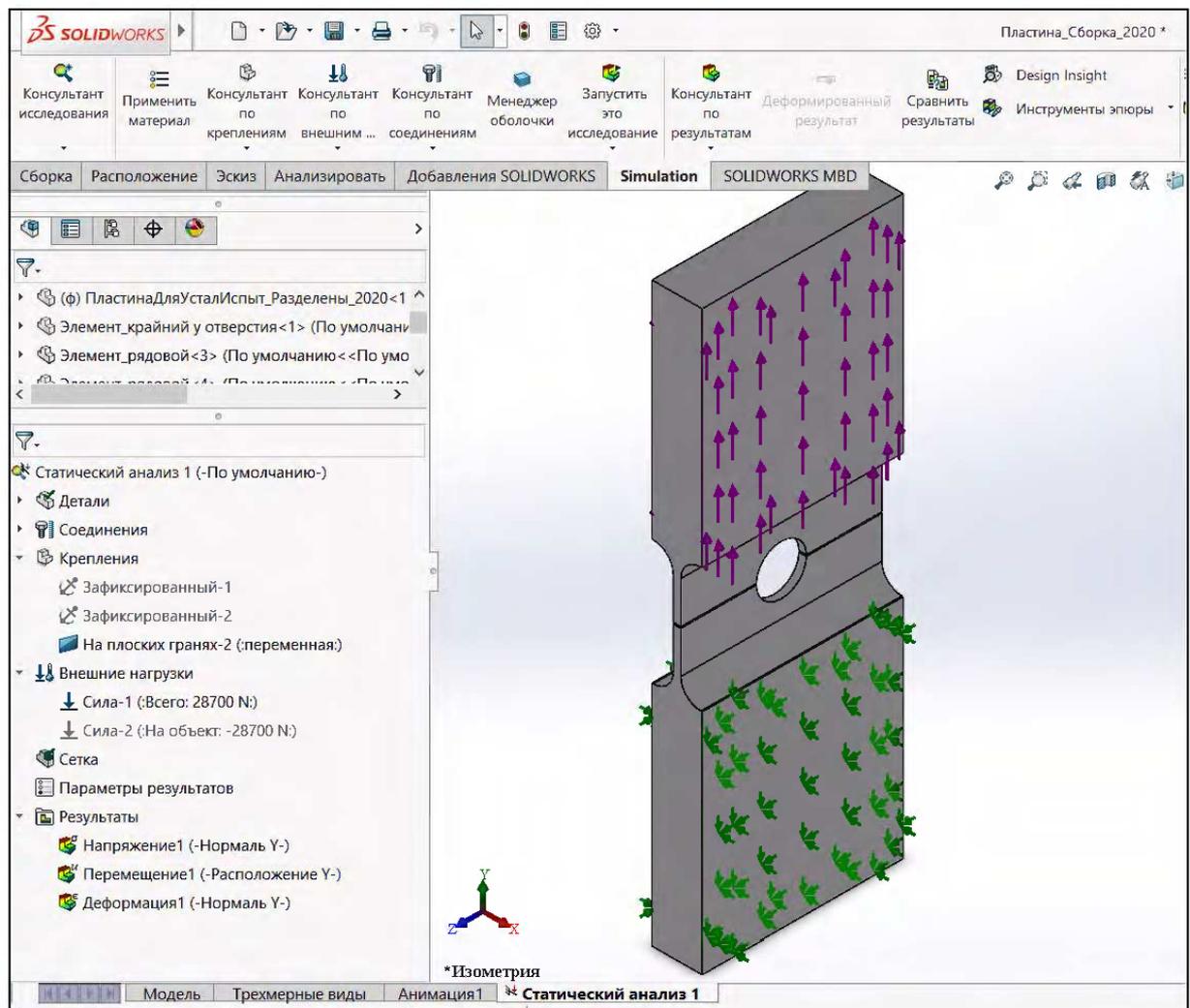
Параметром, определяющим предельное состояние конструкции в механике разрушений выбрана циклическая вязкость разрушения, вместо стандартных механических свойств. Ее деградация начинается тоже с первых циклов нагружений детали, и продолжается вплоть до достижения предельного значения [291], что и объединяет оба подхода к прогнозированию усталостной долговечности литых деталей в единую теорию.

Следует отметить, что классическая механика разрушений не рассматривает стадию зарождения усталостной трещины или несплошности, а считает ее исходной. В настоящей же работе, циклическую вязкость разрушения предложено рассматривать как функцию от напряжений и циклической наработки, которые способствуют ее снижению от состояния поставки до минимального значения, установленного опытным путем. Так, усталостная трещина зарождается и развивается, если текущие значения циклической вязкости разрушения в нагруженной зоне

детали достигают предельного значения. Рассмотрение циклической вязкости разрушения как функции от напряжений и наработки не противоречит опытным данным, указанным в четвертой главе, дает представление об образовании усталостной трещины в теле детали, как о результате процесса накопления повреждений, а не ином происхождении.

Демонстрация кинетики накопления усталостных повреждений в области литой боковой рамы, имеющей хотя бы один технологический дефект, отражает все итерационные процедуры разработанной единой теории.

Область стенки литой боковой рамы с литейным дефектом моделируется пластиной с отверстием (рисунок 6.1) в виде 3D – модели CAD (computer-aided



$X=0, Y=0, Z=0$ – перемещения на гранях (стрелки вниз); $P=33100$ Н – сила (стрелки вверх)

Рисунок 6.1 – Граничные условия для пластины с захватными частями

design) программы нагружается наибольшим значением от пульсирующей внешней нагрузки P , создавая напряжения в окрестности концентратора напряжений не выше предела текучести стали.

Исучаемая область разбивается на конечные элементы с помощью любой FEM (finite element method) программы. Всем конечным элементам (КЭ) задаются механические свойства E_0 , ν_0 , S_{B0} стали в состоянии поставки. Устанавливаются граничные условия (рисунок 6.1) и определяется напряженно-деформированное состояние (НДС) в области расположения дефекта (отверстия) [146].

Пошаговые алгоритмы расчета усталостной долговечности ограниченной области боковой рамы тележки с остроконечным технологическим дефектом, по единой теории о негативных изменениях механических свойств литых сталей, приведены на рисунке 6.2 и подробно расшифрованы ниже, в соответствующих разделах настоящей главы.



Рисунок 6.2 – Методика оценки усталостной долговечности на основе разработанных математических моделей

Результаты расчетов сравниваются с данными после испытаний на усталость пластины (рисунок 6.1) с размером рабочей зоны 80 – 34 – 3 (длина – высота –

толщина) мм, диаметром отверстия 20 мм, площадью отверстия 314 мм², вырезанной из малонагруженной зоны литой надрессорной балки тележки грузового вагона.

Модель поврежденности литой стали по Пальмгрену-Майнеру (линейной гипотезе суммирования повреждений), которая заложена в нормативных документах для оценки сопротивления усталости литых деталей тележек, противопоставляется разрабатываемой единой теории.

Разработанные алгоритмы решения задач с помощью уравнений единой теории, и по модели Пальмгрена – Майнера, используются для предсказаний срока службы боковой рамы тележки грузового вагона модели 18-100 в буксовом проеме.

6.1 Описание негативных изменений механических свойств литых сталей методом континуальной механики

Определяющие уравнения теории о вырождении механических свойств сталей, справедливые в механике деформируемого твердого тела, сведены в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Уравнения вырождения механических свойств стали в механике деформируемого твердого тела

Номер выражения	Название выражения, формула	Расшифровка условного обозначения формулы
1	2	3
1	Аналитическое выражение усталостной кривой: $\sigma^\alpha N = \sigma_r^\alpha N_0$	σ – текущее напряжение, σ_r – предел выносливости, N_0 – базовое число циклов, α – коэффициент угла наклона кривой усталости
2	Расчетный предел выносливости: $\sigma_r = \frac{\sigma_{-1} + (1 - \psi)\sigma_m}{k/\varepsilon\beta}$	σ_{-1} – предел выносливости стали при симметричном цикле нагружений, σ_m – среднее напряжение цикла, ψ – коэффициент чувствительности детали к асимметрии цикла, k – эффективный коэффициент концентрации напряжений, ε – коэффициент масштабного фактора, β – коэффициент состояния поверхности
3	Кинетические кривые сопротивления усталости: $S_B(\sigma_M, n) = S_{B0} - k_\sigma n^\beta$ $\varepsilon_P(\sigma_M, n) = \varepsilon_{P0} - k_\varepsilon n^m$, $E(\sigma_M, n) = E_0 - k_E n^\beta$, $\nu(\sigma_M, n) = \nu_0 - k_\nu n^\beta$	S_{B0} – временное сопротивление при разрыве для стали в состоянии поставки; ε_{P0} – деформация разрушения стального образца в состоянии поставки; E_0 – модуль упругости стали в состоянии поставки; ν_0 – коэффициент поперечной деформации стали в состоянии поставки; m, β – эмпирические коэффициенты, $k_\sigma, k_\varepsilon, k_E, k_\nu$ – коэффициенты, определяемые из условий усталостного разрушения при стационарном нагружении, σ_M – максимальное напряжение цикла, n – наработка в циклах
4	Условия усталостного разрушения: $S_B(\sigma_M, N) \leq \sigma_M$ $\varepsilon_P(\sigma_M, N) \leq \varepsilon_{PM}$, $E(\sigma_M, N) \leq kE_0$, $\nu(\sigma_M, N) \leq k\nu_0$	$N = N_B$ – долговечность по диаграмме Веллера с учетом коэффициента асимметрии цикла, k – понижающий коэффициент при условии $n = N$, ε_{PM} – деформация разрушения цикла с напряжением σ_M ; $S_B, \varepsilon_P, E, \nu$ – текущие значения после наработки $n = N$

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3
5	Условия эквивалентности двух состояний стали при смене уровня напряжений: $S_B(\sigma_{M1}, n_1) = S_B(\sigma_{M2}, n_2)$, $\varepsilon_p(\sigma_{M1}, n_1) = \varepsilon_p(\sigma_{M1}, n_2)$, $E_1(\sigma_{M1}, n_1) = E_2(\sigma_{M2}, n_2)$, $\nu_1(\sigma_{M1}, n_1) = \nu_2(\sigma_{M2}, n_2)$	σ_{M1} – максимальное напряжение цикла на первом уровне нагружений, σ_{M2} – максимальное напряжение на втором уровне нагружений, n_1 – наработка в циклах при уровне напряжений σ_{M1} , n_2 – наработка в циклах при уровне напряжений σ_{M2} ; E_1, E_2, ν_1, ν_2 – текущие значения модулей на первом и втором уровнях нагружений
6	Эквивалентное число циклов нагружений на втором уровне максимальных напряжений цикла: $n_3 = n_2 = N_2 \left(\frac{S_{B0} - S_3}{S_{B0} - \sigma_{M2}} \right)^{1/\beta},$ $n_3 = n_2 = N_2 \left(\frac{\varepsilon_{p0} - \varepsilon_{p3}}{\varepsilon_{p0} - \varepsilon_{PM2}} \right)^{1/m},$ $n_3 = n_2 = N_2 \left(\frac{E_0 - E_3}{E_0(1 - \kappa)} \right)^{1/\beta},$ $n_3 = n_2 = N_2 \left(\frac{\nu_0 - \nu_3}{\nu_0(1 - \kappa)} \right)^{1/\beta}$	$S_3, \varepsilon_{p3}, E_3, \nu_3$ – эквивалентные значения до перехода на следующий (второй) уровень, ε_{PM2} – деформация разрушения цикла с напряжением σ_{M2} , N_2 – долговечность по диаграмме Веллера с учетом коэффициента асимметрии цикла и напряжения σ_{M2} , m, β – эмпирические коэффициенты

По формуле (2) рассчитывается предел выносливости в каждом КЭ, а по формуле (1) таблицы 6.1 – число циклов до разрушения N при напряжении σ . По формулам (3) вычисляются текущие механические свойства S_B или ε_p , E , ν при $n = 1$ цикле нагружения. Проверяются условия (4) таблицы 6.1, не соблюдение которых позволяет продолжить циклическое нагружение на $n = 1 + \Delta n$ циклов, предварительно присвоив измененные значения E и ν всем КЭ 3D – модели исследуемой области пластины (рисунок 6.1). С изменением НДС в КЭ определяется эквивалентное число циклов на втором уровне напряжений по формулам (6). Находятся новые значения S_B или ε_p , E , ν при $n = n_3 + \Delta n$ по формулам (3).

Итерации [56] продолжаются до соблюдения критериев (4) в наиболее нагруженном КЭ, которому в последствии назначаются «нулевые» свойства E , ν , 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 пластины с отверстием (рисунок 6.1) происходит путем последовательного «обнуления» механических свойств E , ν в тех КЭ, в которых соблюдаются критерии (4) таблицы 6.1, с ростом наработки n циклов. Начало перехода в неустойчивый рост трещины, т.е. если статического равновесия в КЭ не наступает, означает предел сопротивления усталости $N_p = n_{тр} + n$ пластины, которая ослаблена технологическим дефектом в виде отверстия.

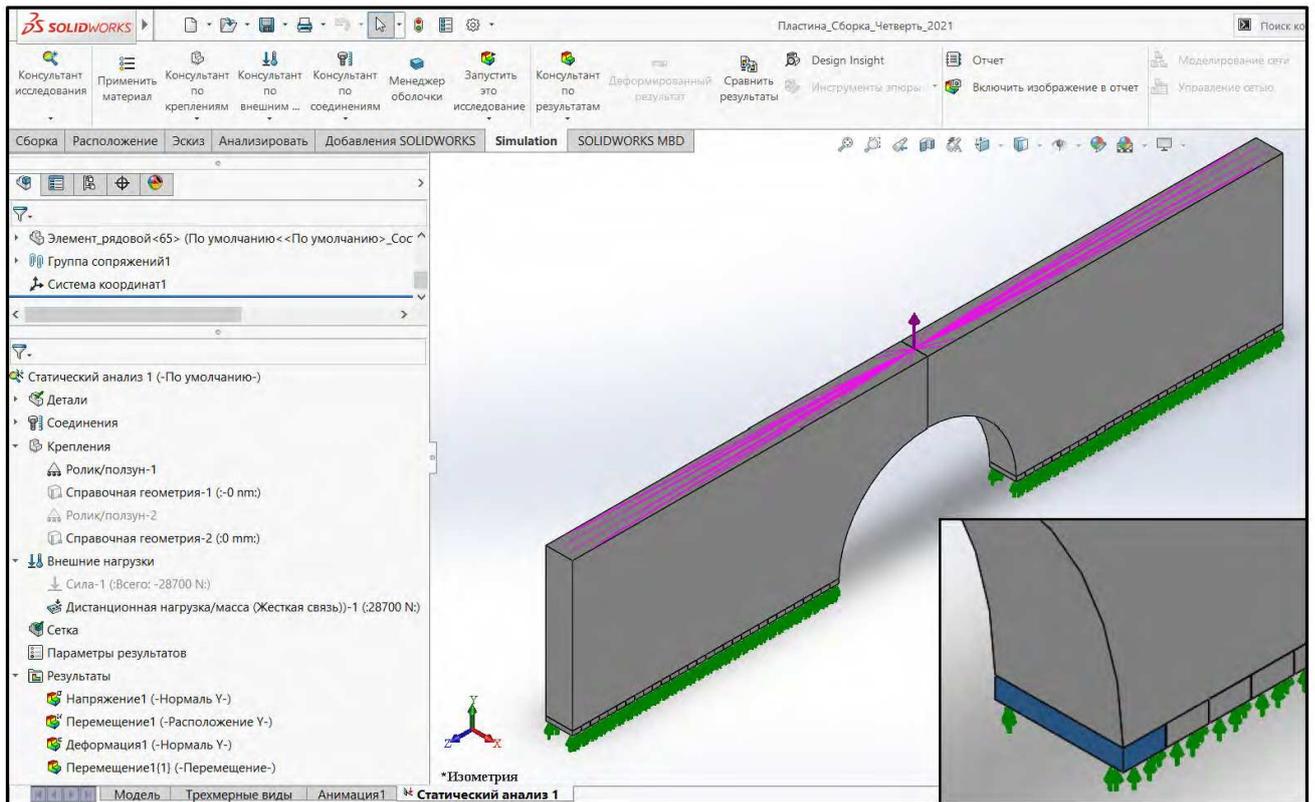
Стоит отметить, что после назначения «нулевых» механических свойств разрушенным КЭ по усталости, конечно-элементная сетка $3D$ – модели области с дефектом не перестраивается, взаимное расположение и размеры КЭ не меняются, сохраняется история нагружения каждого КЭ.

По разработанному алгоритму написана специальная авторская программа на языке VBA (Visual Basic for Application) в программе MS Access (приложение Г), для поциклового расчета негативных изменений механических свойств одновременно в тридцати шести КЭ любой детали.

Расчетные данные из авторской программы передаются в программу конечно-элементного анализа SolidWorks, или в любую другую аналогичную программу, позволяющую изменять модуль упругости E и коэффициент поперечной деформации ν в отдельных элементах сборки, которыми заблаговременно выкладывается предполагаемый фронт продвижения усталостной трещины.

Например, в рассматриваемой рабочей зоне пластины с концентратором напряжений в виде отверстия, длина элемента вдоль направления продвижения трещины составляет 1 мм, высота 0,5 мм, толщины элемента и пластины совпадают – 3 мм (вставка на рисунке 6.3). Количество элементов в модели 30 шт. с каждой стороны отверстия, всего – 60 шт.

Исходными данными в расчетах усталостной долговечности рабочей зоны пластины, ослабленной технологическим дефектом в виде отверстия являются: литая сталь 20ГЛ по [154], $E_0 = 2,1 \times 10^5$ МПа, $\nu_0 = 0,3$, $S_{B0} = 684$ МПа, $\sigma_{T0} = 0,5S_{B0} = 342$ МПа, $\sigma_r = 0,5\sigma_{T0} = 171$ МПа, $N_0 = 10^7$ циклов, максимальная нагрузка цикла



$Y = 0$ – перемещения на гранях (стрелки вниз);
 $P = 33100$ Н – сила на грани, которая является твердым телом (стрелка вверх).
 Рисунок 6.3 – Граничные условия для половины рабочей зоны пластины
 без захватных частей

$P_{\max} = 33100$ Н, максимальное напряжение цикла вдоль оси Y в наиболее нагруженном КЭ $\sigma_{y1} = 301$ МПа (рисунок 6.4). Деформация $\varepsilon_{p0} = 0,3884$ и показатель $m = 1,4$ принимаются по результатам испытаний образцов из стали 20ГЛ, и указаны в формуле (5.7).

Показатель $\beta = 1,9$ в выражениях (3) таблицы 6.1 отражает интенсивность деградации модуля упругости и коэффициента поперечной деформации стали 20ГЛ, подбирается по рисунку 5.14. Соотношение $\varepsilon_{pM} = 5\varepsilon_M$ и понижающий коэффициент $k = 0,2$ в выражении (4) таблицы 6.1, также устанавливаются из опытов со сталью 20ГЛ при относительной наработке $\bar{n} = 1$ (рисунок 5.12 и 5.13 соответственно). Коэффициент угла наклона кривой усталости $\alpha = 4$, выбирается согласно разделу 3 Норм [144] для стальных отливок после термообработки по режиму нормализации, к которым относится боковая рама тележки грузового вагона [144].

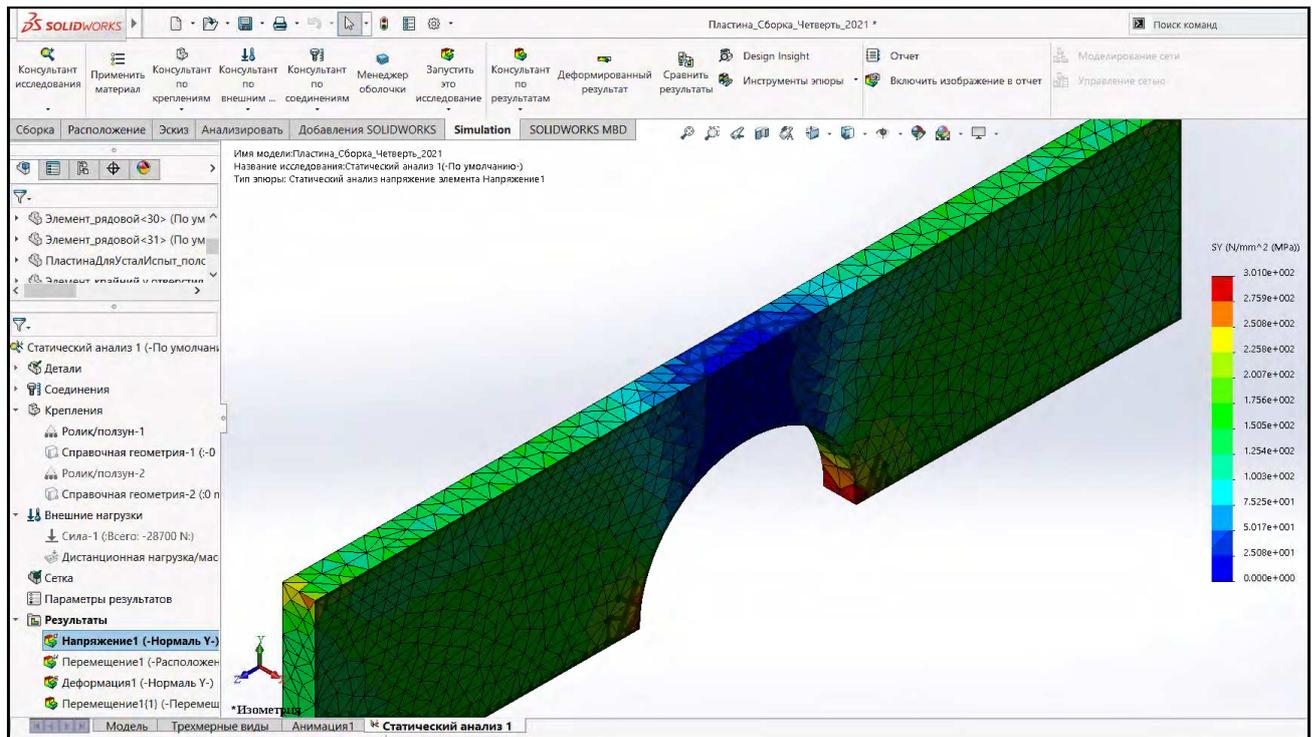


Рисунок 6.4 – Распределение нормальных напряжений σ_y вдоль оси Y по конечным элементам в состоянии поставки, (МПа)

После автоматического построения конечно-элементной сетки для половины рабочей зоны пластины с отверстием получено 13200 шт. тетраэдральных конечных элементов с минимальным размером 1 мм, и 21512 шт. узлов.

В расчетах рабочей зоны пластины, ослабленной технологическим дефектом, используется деформационный подход [108], который описывается вторыми уравнениями в выражениях (3) – (6) таблицы 6.1. Стоит напомнить, что применение силового подхода для стали 20ГЛ не корректно, в виду ее циклического упрочнения на начальных стадиях наработки, о чем сообщалось в предыдущих главах.

Ниже приведен численный пример расчета рабочей области пластины с отверстием, вырожденные кривые механических свойств E , ν , полученные методом взаимного обмена результатами программирования на языке VBA (Visual Basic for Application) в программе MS Access и модуля Simulation программы SolidWorks.

Например, после $n_1 = 404$ тыс. циклов нагружений значения механических свойств во всех элементах сборки по фронту продвижения трещины изменяются негативно, и составят в наиболее нагруженном элементе сборки: $E_1 = 1,82348 \times 10^5$

МПа, $\nu_1 = 0,2603$, $\varepsilon_{p1} = 0,2872$, $S_{B1} = 621$ МПа. В остальных элементах текущие механические свойства рассчитываются по формулам (3) и (4) таблицы 6.1.

Новые значения модулей упругости и коэффициентов поперечной деформации после $n_1 = 404$ тыс. циклов назначаются в программе Solid Works / Simulation рассматриваемым элементам сборки по предполагаемому фронту прорастания усталостной трещины. При неизменных граничных условиях и конечно-элементной сетке находятся средние нормальные напряжения по нормали Y с измененными механическими свойствами, проверяются условия усталостного разрушения (4) в таблице 6.1 по ε_{pi} , E_i и ν_i в каждом i -ом элементе сборки. Так, в первом наиболее нагруженном элементе сборки напряжение вдоль оси Y после $n_1 = 404$ тыс. циклов упадет с $\sigma_{y1} = 301$ МПа до $\sigma_{y2} = 264$ МПа. После перехода на второй уровень напряжений σ_{y2} , количество циклов до разрушения по диаграмме Веллера (1) таблицы 6.1 увеличится с $N_1 = 1041642$ до $N_2 = 1760227$.

Эквивалентное число циклов нагружений на втором уровне, за которое достигается та же поврежденность элемента, что и после $n_1 = 404$ тыс. циклов нагружений на первом уровне напряжений, рассчитывается по формулам (6) таблицы 6.1 для каждого параметра отдельно. Например, по модулю упругости оно составит:

$$n_3 = 1760227 \left(\frac{210000 - 182348}{210000(1-0,2)} \right)^{1/1,9} = 681,015 \text{ тыс. циклов.}$$

Далее, по формулам (3) и (4) таблицы 6.1 определяется текущий модуль упругости после догружения на $n = n_3 + \Delta n$ циклов, где $\Delta n = 196$ тыс. циклов:

$$E_2 = 210000 - \frac{(1-0,2)210000}{1760227^{1,9}} \times (681015 + 196000)^{1,9} = 1,65286 \times 10^5 \text{ МПа.}$$

Эквивалентные числа циклов, вычисленные по КПД, деформации разрушения и сопротивлению, в выражении (6) таблицы 6.1, составят: 682,802 тыс., 681,423 тыс., и 648,534 тыс. соответственно. После $n = n_3 + \Delta n$ циклов, параметры в уравнении (3) таблицы 6.1 имеют значения: $\nu_2 = 0,2359$, $\varepsilon_{p2} = 0,2442$, $S_{B2} = 580$ МПа.

Вновь проверяются условия усталостного разрушения (4) в таблице 6.1, соблюдение, одного из которых означает продвижение усталостной трещины в пластине на размер КЭ – 1 мм.

На рисунках 6.5 – 6.7 показана интенсивность негативных изменений текущих значений модуля упругости, КПД и деформации разрушения соответственно, в первом наиболее нагруженном КЭ.

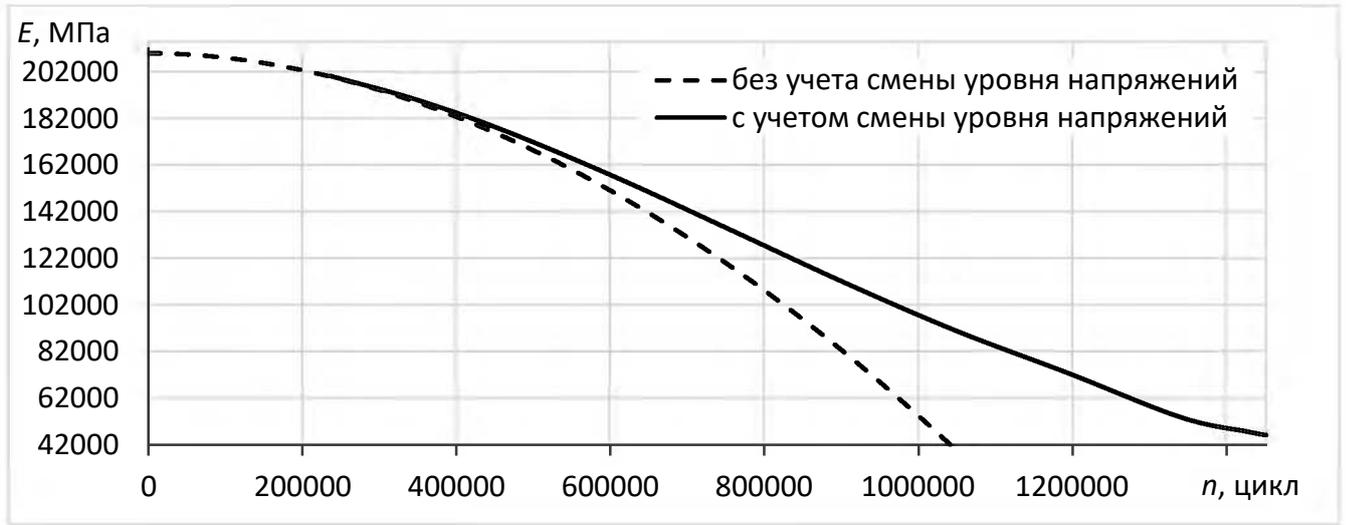


Рисунок 6.5 – Негативные изменения модуля упругости E в первом наиболее нагруженном конечном элементе пластины

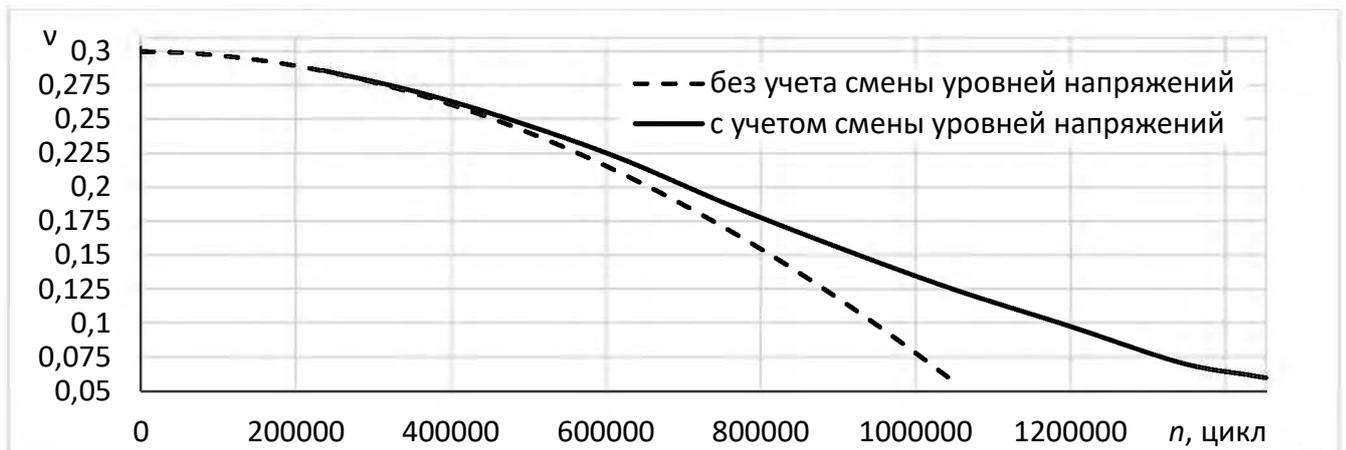


Рисунок 6.6 – Негативные изменения коэффициента поперечной деформации ν в первом наиболее нагруженном конечном элементе пластины

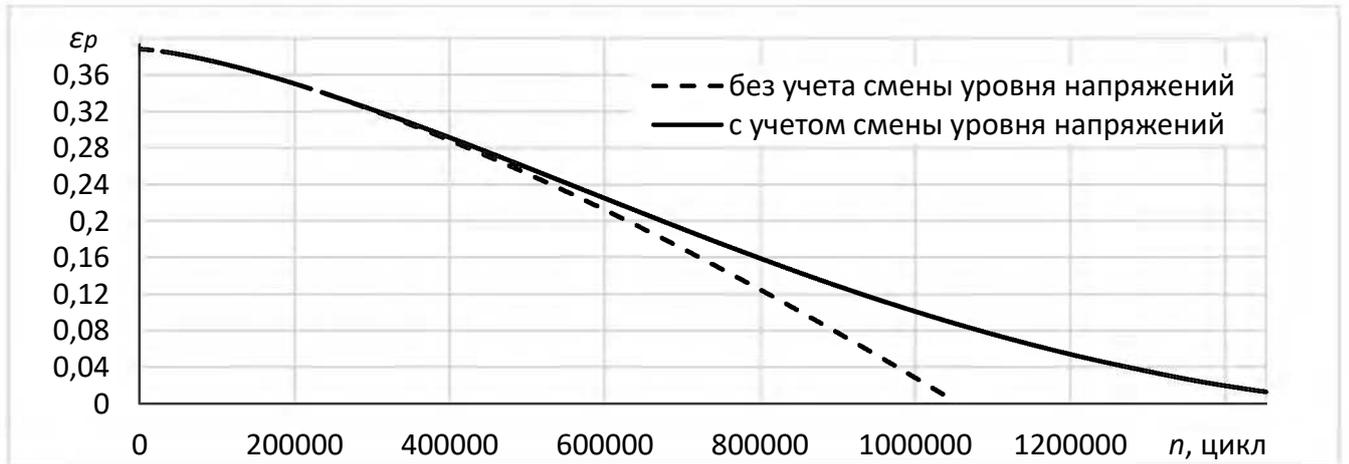


Рисунок 6.7 – Негативные изменения деформации разрушения ε_p в первом наиболее нагруженном конечном элементе пластины

Учет смены уровня напряжений в КЭ после произвольно заданных десяти шагов в интервале « $n_0 - n_{TR}$ » на величину Δn увеличивает на 28% количество циклов до появления усталостной трещины в пластине (рисунки 6.5 – 6.7).

Таким образом, негативные изменения механических свойств в ходе расчетов усталостной долговечности приводят к замедлению роста трещины.

Первым соблюдается критерий (4) в таблице 6.1 у КПД. Циклическое нагружение пластины останавливается, а конечному элементу, в котором выполнен критерий усталостного разрушения, задаются «нулевые» значения модуля упругости и КПД для его исключения из дальнейших расчетов.

Число циклов до появления усталостной трещины в области боковой рамы с технологическим дефектом при деформационном подходе составило: $n_{TR} = 1041$ тыс. циклов, до разрушения $N_p = 1151$ тыс. циклов – без учета негативных изменений механических свойств; $n_{TR} = 1452$ тыс. циклов и $N_p = 2087$ тыс. циклов – с учетом деградации механических свойств. Общая длина усталостной трещины в обе стороны от концентратора напряжений – 15 мм.

Применение модели поврежденности Пальмгрена – Майнера (1.8) в расчете нагруженной области литой боковой рамы, ослабленной технологическим дефектом, в виде пластины с отверстием (рисунок 6.3), включая стадию развития усталостной трещины, показано в числовом примере ниже.

Поврежденность $\omega_k = \sum n_i / N_i = 1$ в k -ом КЭ по фронту продвижения усталостной трещины находилась в специально разработанной программе на языке VBA, в зависимости от уровня напряжений в нем. Если $\omega_k = 1$, то конечному элементу задаются «нулевые» значения модуля упругости и КПД. После перераспределения напряжений проверяется условие прочности $\sigma_k \leq S_{B0}$ в оставшихся КЭ. Если условие прочности не выполняется, то конечному элементу задаются «нулевые» механические свойства, и т.д. до наступления равновесного деформирования.

Циклическое деформирование продолжается при неизменном максимальном напряжении цикла пока поврежденность ω_k не достигнет единицы в наиболее нагруженном и поврежденном k -ом КЭ. Необходимо отметить, что деградация модуля упругости, КПД [148], изменение уровней максимальных напряжений цикла после наработки n циклов в расчетах по Пальмгрену-Майнеру не учитывается. Итерации продолжаются если условие прочности $\sigma_k \leq S_{B0}$ выполняется для следующих конечных элементов по фронту продвижения усталостной трещины. Не соблюдение условия прочности означает разрушение пластины.

Например, при неизменных исходных данных и граничных условиях, как в примере выше, первый конечный элемент с максимальным напряжением $\sigma_{y1} = 301$ МПа разрушится после $n_1 = n_{TP} = 1041642$ циклов, а его поврежденность $\omega_1 = 1$. Второй по уровню максимальных напряжений цикла $\sigma_{y2} = 298$ МПа конечный элемент, получит поврежденность:

$$\omega_2 = \frac{1041642}{1085044} = 0,96.$$

После продвижения усталостной трещины от отверстия вглубь пластины на 1 мм ее поперечное сечение по линии отверстия уменьшится. Произойдет перераспределение напряжений по фронту движения трещины при постоянной внешней нагрузке. Максимальное напряжение цикла во втором КЭ, с противоположной стороны отверстия пластины, увеличится с 298 МПа до 299 МПа, а поврежденность по выражению (1.8) достигнет единицы после $n_2 = 42791$ циклов нагружений:

$$\omega_2 = \frac{1041642}{1085044} + \frac{42791}{1069775} = 1.$$

Суммарное число циклов нагружений на втором шаге $n = n_{\text{ТР}} + n_2 = 1084433$ циклов. Продвижение усталостной трещины на 2 мм, т.к. длина одного КЭ по фронту трещины – 1 мм. Подсчитывая поврежденность ω_k в каждом КЭ после смены уровня максимальных напряжений цикла в результате продвижения усталостной трещины, последовательно обнуляя их механические свойства, получено число циклов до разрушения пластины с отверстием – $N_p = 1795845$. Суммарная длина усталостной трещины в обе стороны от отверстия составила 23 мм.

Сравнение результатов расчетов усталостной долговечности конструктивного элемента с концентратором напряжений в виде отверстия, по уравнениям таблицы 6.1 разрабатываемой теории о негативных изменениях механических свойств литых сталей методом континуальной механики, и по модели поврежденности Пальмгрена – Майнера (1.8), показано на рисунке 6.8.

Усталостная трещина появляется позже на 39%, а циклическая долговечность выше на 16%, если в расчетах учитываются негативные изменения модуля упругости E , коэффициента поперечной деформации ν , деформации разрушения ε_p (рисунок 6.8).

Эксперименты с натурными пластинами из стали 20ГЛ в идентичных граничных условиях, на испытательной машине ZWICK/ROELL AMSLER HB250 лаборатории имени профессора Н.А. Белелюбского ФГБОУ ВО ПГУПС показали, что усталостная трещина длиной $l = 1$ мм зародилась после $n_{\text{ТР}} = 1480160$ циклов. Это выше значения 1452000 циклов, полученного по разработанной теории (таблица 6.1). Однако, уменьшение шага по циклам в расчетах усталостной долговечности пластины по предлагаемым моделям в таблице 6.1 приблизит прогноз к опытным данным по числу циклов до появления трещины.

Прогноз по модели Пальмгрена – Майнера (1.8) занижает на 40% экспериментальные данные до появления усталостной трещины, а следовательно, и прогнозы по разработанной теории о негативных изменениях механических свойств.

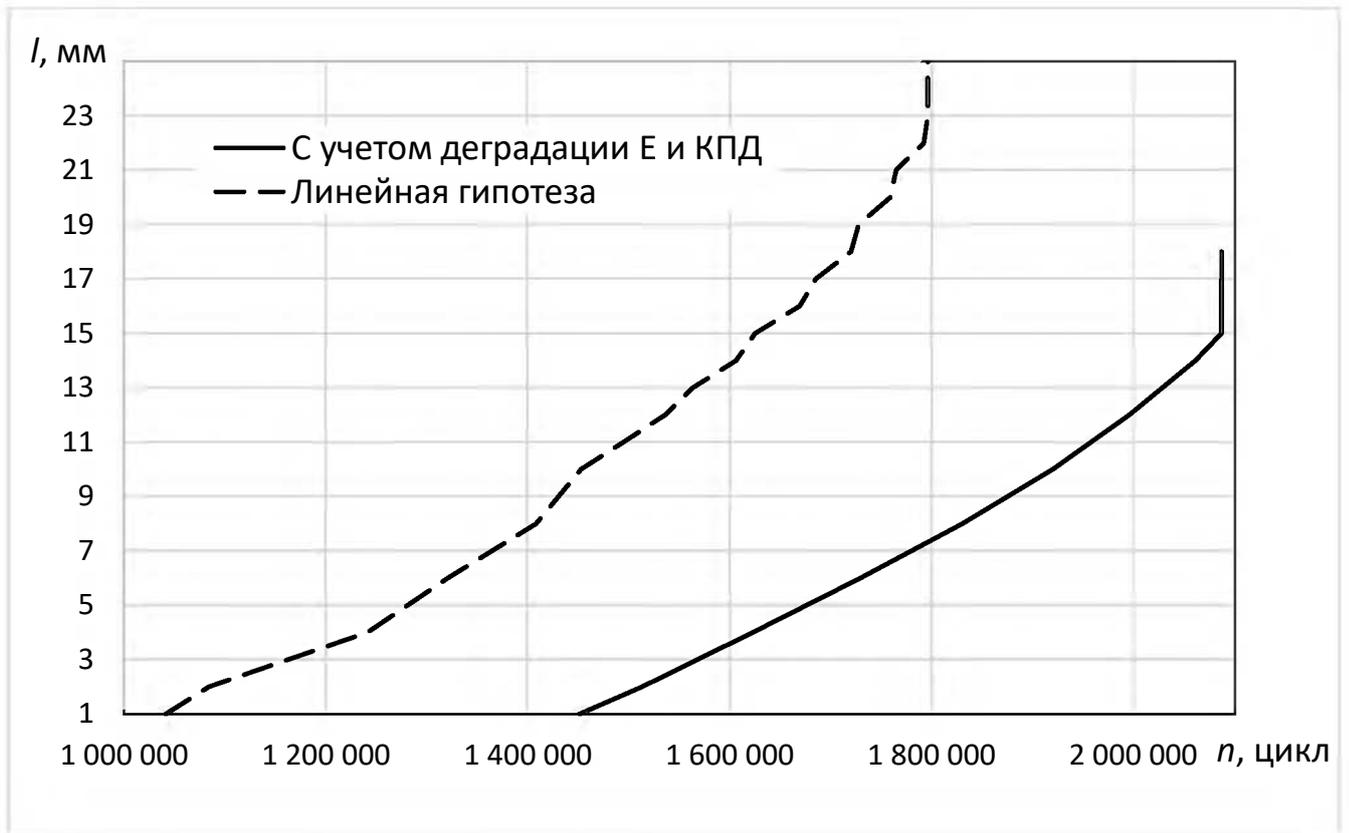
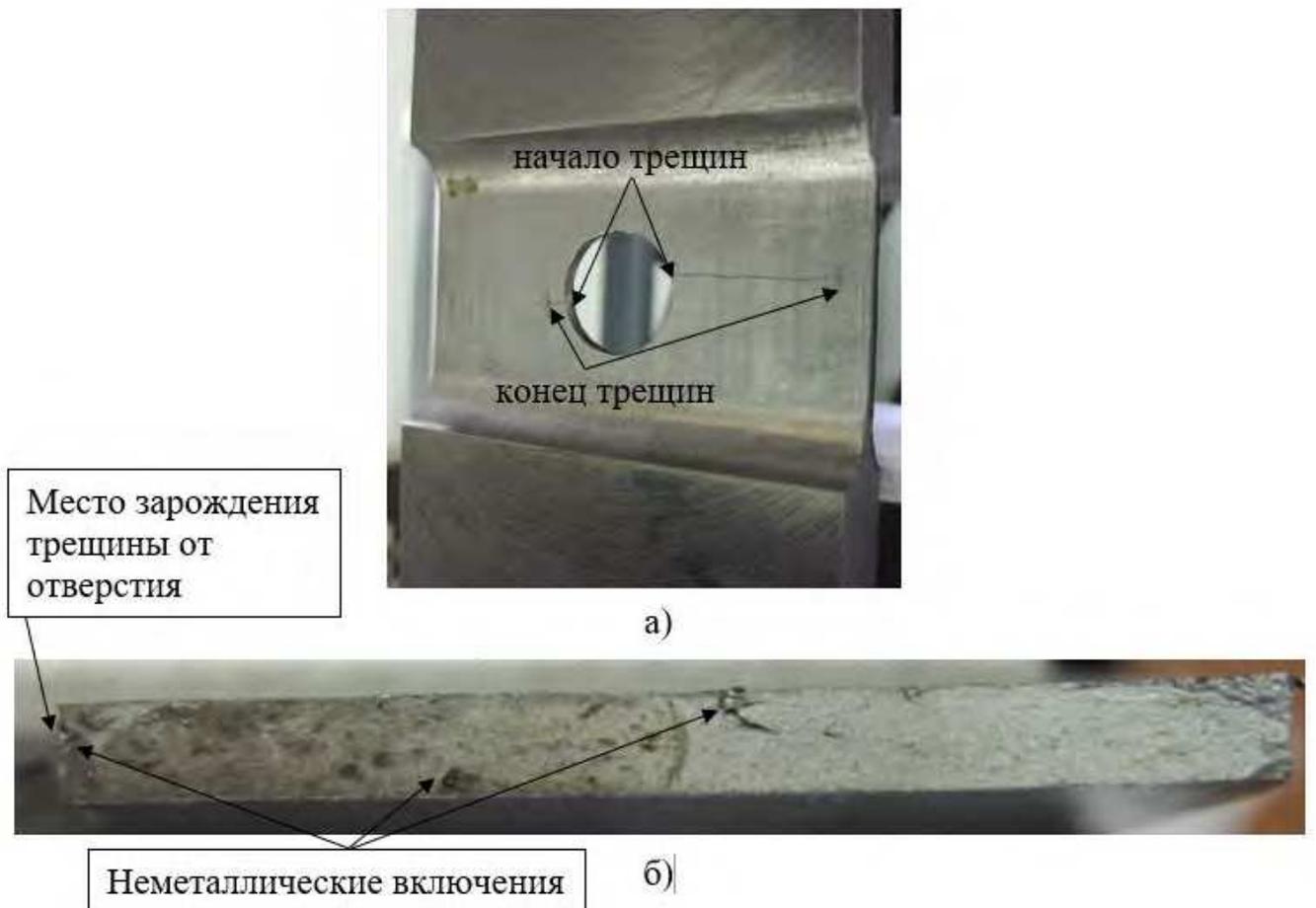


Рисунок 6.8 – Развитие усталостной трещины в пластине с отверстием при стационарном нагружении

Корректные данные по усталостной долговечности двух пластин с отверстием в испытаниях получить не удалось, в виду наличия неметаллических включений диаметром 0,5 мм в изломе (рисунок 6.9), которые ускорили рост трещины. Поэтому результаты по числу циклов до разрушения пластины с отверстием в настоящей работе не приводятся.



а) усталостные трещины от отверстия; б) излом

Рисунок 6.9 – Повреждения пластины с отверстием после испытаний на усталость

6.2 Описание негативных изменений циклической вязкости разрушения литых сталей

В таблице 6.2 приводятся соотношения для установления поврежденности детали методами линейной механики разрушения по Гриффитсу, имеющей область с остроконечной трещиной, длина которой связывается с поврежденностью. Уравнения таблицы 6.2 обобщаются в концептуальный подход и включают эффект вырождения циклической вязкости разрушения K_{fc} с первых циклов нагружений.

Таблица 6.2 – Уравнения вырождения циклической вязкости разрушения

Номер выражения	Название выражения, формула	Расшифровка условного обозначения формулы
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: $K_{fc}(\sigma_M, N) \leq dK_{fc}^0$ $S_B(\sigma_M, N) \leq \sigma_M$ $E(\sigma_M, N) \leq kE_0$, $\nu(\sigma_M, N) \leq k\nu_0$	где K_{fc} – текущее значение циклической вязкости разрушения стали после N циклов; d – понижающий коэффициент, при условии $n=N$
3	Условия 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: $n_3 = n_2 = N_2 \left(\frac{K_{fc}^0 - K_{fc}^1}{K_{fc}^0(1-d)} \right)^{1/m}$	-

Алгоритм и правила использования всех выражений таблицы 6.2 идентичны применению формул для континуальной механики (таблица 6.1). Негативные изменения модуля упругости E и коэффициента поперечной деформации ν с ростом циклической наработки n также учитываются в определении напряженно-деформированного состояния конечных элементов, расположенных по фронту продвижения усталостной трещины. В результате, коэффициенты интенсивности

напряжений в конечных элементах детали перед кончиком трещины падают. Если КИН в КЭ достигает вырождающегося значения циклической вязкости разрушения в этом КЭ по формуле (1) таблицы 6.2, то КЭ разрушается.

Ниже приведен численный пример расчета усталостной долговечности пластины с отверстием (рисунок 6.3) при исходных данных раздела 6.1, который проводится по специально разработанной программе на языке VBA в приложении MS Access (Приложение Д). Циклическая вязкость разрушения стали класса 20Л в состоянии поставки $K_{fc}^0 = 151 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ является усредненной по результатам исследований в таблице 1.2. Понижающий коэффициент $d = 0,272$ в формуле (2) таблицы 6.2 получен с помощью данных на рисунке 1.12 после 50 лет эксплуатации детали тележки вагона. Показатель степени $m = 0,6$ в выражениях (1) и (4) таблицы 6.2 подбирается так, чтобы кинетическая кривая (1) в таблице 6.2 приближалась к опытной кривой на рисунке 1.12.

Например, после $n_1 = 404$ тыс. циклов нагружений во всех элементах сборки по фронту продвижения трещины снижается уровень механических свойств E , ν , и K_{fc} в наиболее нагруженном элементе сборки с $K_{fc}^0 = 151 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ до $K_{fc}^1 = 88,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Первый критерий в условии (2) таблицы 6.2 не соблюдается, т.к. $88,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ больше $41 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Новые значения E_1 и ν_1 , приведенные в разделе 6.1 после наработки n_1 , понижают напряжение в первом наиболее нагруженном элементе сборки с $\sigma_{y1} = 301 \text{ МПа}$ до $\sigma_{y2} = 264 \text{ МПа}$. После перехода на второй уровень напряжений σ_{y2} , количество циклов до разрушения по диаграмме Веллера увеличится с $N_1 = 1041642$ до $N_2 = 1760227$.

Эквивалентное число циклов нагружений на втором уровне напряжений $\sigma_{y2} = 264 \text{ МПа}$, рассчитанное по формуле (4) таблицы 6.2, за которое достигается та же поврежденность конечного элемента, что и за $n_1 = 404$ тыс. циклов нагружений с напряжением $\sigma_{y1} = 301 \text{ МПа}$, составит:

$$n_3 = n_2 = 1760227 \left(\frac{151 - 88,7}{151(1 - 0,272)} \right)^{1/0,6} = 683,18 \text{ тыс. циклов.}$$

Дальнейшее протекание расчета усталостной прочности аналогично приведенному в разделе 6.1, только с применением критериев (2) таблицы 6.2.

Число циклов до появления усталостной трещины в области боковой рамы с технологическим дефектом по уравнениям таблицы 6.2 составило: $n_{\text{ТР}} = 1452$ тыс. циклов и тыс. циклов – с учетом деградации механических свойств. Общая длина усталостной трещины в обе стороны от концентратора напряжений составила 15 мм.

Сравнение результатов расчета усталостной долговечности области литой боковой рамы, ослабленной технологическим дефектом, полученных по разработанной единой теории методами механики деформируемого твердого тела (таблица 6.1) и линейной механики разрушений (таблица 6.2) показало близкие значения. Однако, уравнения механики разрушений приводят к более консервативному прогнозу долговечности.

6.3 Прогнозирование срока службы литой боковой рамы тележки грузового вагона

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

Объектом расчета выбрана литая боковая рама 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 боковой рамы, полученных с учетом амплитуд динамических напряжений [36], установленных по результатам ходовых прочностных испытаний ВНИИЖТ, приведено во втором столбце таблицы 6.3.

Таблица 6.3 – Распределение максимальных напряжений циклов в буксовом проеме боковой рамы тележки 18-100

Максимальное напряжение цикла σ , МПа	Количество циклов за год, шт.	Количество циклов в блоке, шт.
65	5 722 669	10 330
70	1 899 341	3 428
75	742 628	1 340
80	203 946	368
85	83 130	150
90	27 710	50
95	11 638	21
100	6 690	12
105	3 325	6
110	1 108	2
115	1 108	2
120	554	1
Всего:	8 703 847	15 711

Стоит отметить, что максимальные напряжения в таблице 6.3 ниже предела выносливости стали $\sigma_r = 139$ МПа [284].

Можно выделить блок максимальных напряжений из 15711 циклов [129], включающий двенадцать уровней и переходов (третий столбец таблицы 6.3). Всего блоков нагружений боковой рамы за год – 554 шт. Произвольной перестановкой и делением циклов внутри блока формируется новый блок из тридцати переходов с наибольшей разницей напряжений (рисунок 6.10), который ускоряет процесс накопления повреждений в металле боковой рамы.

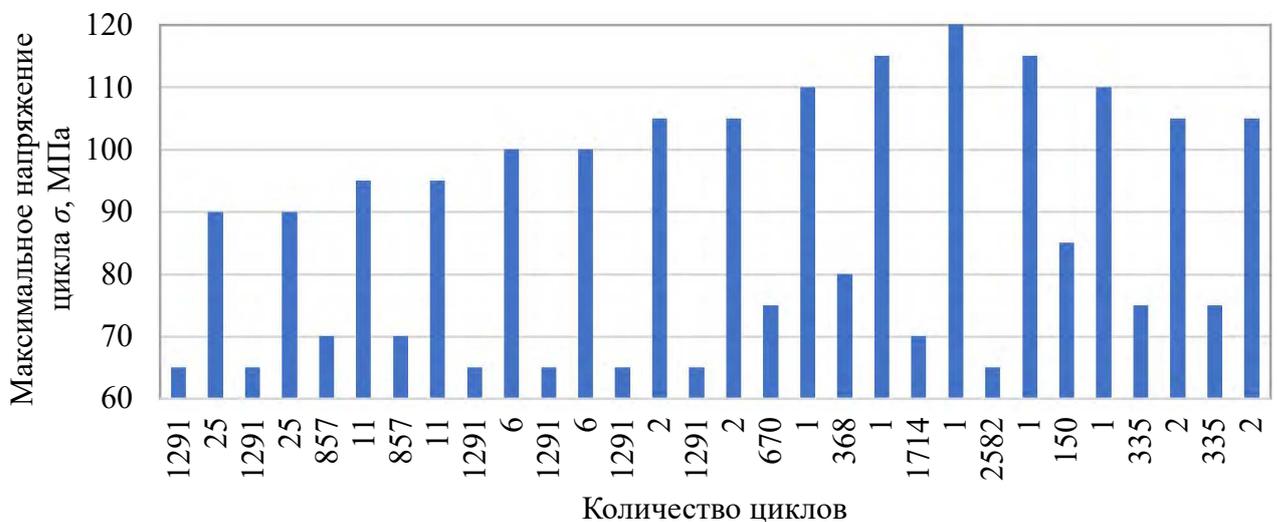


Рисунок 6.10 – Блок максимальных напряжений циклов в буксовом проеме боковой рамы тележки 18-100 из тридцати переходов

В специально разработанных авторских программах на языке VBA выполнялся поцикловый расчет поврежденности металла в буксовом проеме боковой рамы тележки модели 18-100 при нестационарном нагружении по закону на рисунке 6.10. Результатами расчетов являются количества циклов до соблюдения соответствующих критериев разрушения (таблица 6.1, 6.2, формула 1.8) в исследуемой точке боковой рамы. 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. не известно напряженное состояние в окрестностях трещины в условиях ходовых прочностных испытаний. Доля порожнего пробега вагона 40% [204].

Учет негативных изменений механических свойств в процессе нестационарного нагружения буксового проема боковой рамы предложено выполнить путем умножения полученных циклов на коэффициент 1,395, установленный по результатам расчетов в разделе 6.1 данной главы.

Применяя исходные данные шестой главы, значение предела выносливости $\sigma_r = 139$ МПа [284] для литой детали тележки, и расчетные программы, получены прогнозы срока службы боковой рамы тележки 18-100 в циклах и в блоках (рисунок 6.9). Зная число блоков нагружений за 1 год, подсчитывался срок службы в годах. Умножением предельного числа циклов нагружений боковой рамы на длину неровности рельсов 20 м [42, 208] рассчитывается пробег в км.

Срок службы в буксовом проеме боковой рамы 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 боковой рамы 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 боковой рамы тележки модели 18-100 имеет двадцатипроцентный запас сопротивления усталости и соответствует требованиям [42, 144].

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

6.4 Основные результаты и выводы по главе 6

а) Сформулирована единая теория о негативных изменениях механических свойств литых сталей, объединяющая два направления механики: континуальную механику и механику разрушений. Уравнения теории описывают явления охрупчивания изначально пластичных сталей класса 20Л с первых циклов наработки до разрушения конструкции детали.

б) Учет негативных изменений модуля упругости и коэффициента поперечной деформации материала в результате циклической наработки, при расчетах напряженного состояния элемента конструкции, увеличивает значения усталостной долговечности на 81%.

в) Расчетные значения циклической наработки детали до появления усталостной трещины по выдвинутой теории оказались ниже на 2%, чем в испытаниях натуральных образцов. Уменьшение шага по циклам в расчетах сблизит прогнозные и опытные значения.

г) Прогноз усталостной долговечности по гипотезе Пальмгрена-Майнера приводит к занижению на 26% числа циклов до появления трещины относительно опытных данных. Расхождение прогнозов с выдвинутой теорией о негативных изменениях механических свойств в 39% и 16% до появления усталостной трещины и до разрушения детали соответственно, в меньшую сторону, не противоречит известным оценкам усталостной долговечности литых деталей тележек грузовых вагонов, сделанным известными учеными на основе гипотезы Пальмгрена-Майнера.

д) Оценка срока службы боковой рамы тележки модели 18-100 по выдвинутой теории выявила двадцатипроцентный запас в буксовом проеме относительно назначенного срока службы в 32 года.

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 боковых рам тележек грузовых вагонов на основе методов механики разрушений. Данные прогнозы сопоставлены с результатами эксплуатации литых боковых рам тележек. Установлено, что прогнозируемый срок службы более чем в два раза ниже реальных сроков эксплуатации литых боковых рам 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. 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 надрессорной балки или боковой рамы 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 боковой рамы 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 Пальмгрелю - Майнеру. Расчетный срок службы боковой рамы тележки модели 18-100 по теории о негативных изменениях механических свойств составил 46,1 лет, что выше на 20% назначенного срока службы с учетом продления – 37 лет.

Список литературы

1. Александров, А. В. Соппротивление материалов. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров // Учеб. для строит. спец. вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. школа, 2002. – 400 с.
2. Альбом гарантийных участков безопасного проследования грузовых поездов на железных дорогах России. – М.: ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», 2018 – 329 с.
3. Альбом-справочник изломов и дефектов боковых рам тележек грузовых вагонов на железных дорогах России за 2006-2017 годы. – М.: ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», 2017 – 239 с.
4. Анализ работы ПТО железных дорог России по выявлению трещин и дефектов в несущих деталях ходовых частей грузовых вагонов за 3 месяца 2014 года. Центральная дирекция инфраструктуры управления вагонного хозяйства. – М.: ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», 2014 – 58 с.
5. Бакиев, А.В. Физические основы деградации механических свойств металла газопроводов / А.В. Бакиев // Вестник Академии наук РБ. – 2010. - №4. – Том 15. – С. 16-20.
6. Балка наддресорная тележки двухосной грузовых вагонов с осевой нагрузкой 23,5 тс. Расчет коэффициентов пересчета расчетных напряжений от испытательных нагрузок. ПГУПС.667112.001 РР1: секреты производства (ноу-хау), уч. №8, утв. протоколом №2 от 11.02.2014 г. / Якушев А.В., Комиченко С.О. – Санкт-Петербург: Петербургский университет путей сообщения, 2014. – 7 с.
7. Баранов, А.Н. Усталостные испытания литых несущих деталей трехосной тележки модели 18-522А / А.Н. Баранов, В.П. Ефимов // Известия ПГУПС. – 2018. - №1. – С.5-16.
8. Батищева, О.М. Метод определения параметров моделей деградационных процессов / О.М. Батищева/ Сб. трудов междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин». – М.: Машиностроение, 2003. – Т.1. – 451 с.

9. Бачурин, Н.С. Анализ статистических данных по количеству изломов трещин и дефектов боковых рам тележек грузовых вагонов / Н.С. Бачурин, С.Е. Ляшенко // Транспорт Урала. – 2012. – №2(33). – С. 55-57.
10. Белл, Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Конечные деформации. Часть 2 / Дж.Ф. Белл.; пер. с англ.; под ред. А. П. Филина. – М.: Наука, 1984. – 432 с.
11. Бехер, С.А. Анализ результатов неразрушающего контроля при деповском ремонте деталей тележек грузовых вагонов / С.А. Бехер, А.Л. Боборов, А.А. Большанов // Вестник РГУПС. – 2011. – №2(42). – С. 20-26.
12. Биргер, И.А. Детерминирование и статистические модели суммирования повреждений / И.А. Биргер // Проблемы прочности. – 1978. - №11. – С.3-11.
13. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М., 1984. – 312 с.
14. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
15. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
16. Бэкофен В. Процессы деформации / В. Бэкофен.; пер с англ. В.С. Берковского и Ф.И. Рузанова; под ред. С.Е. Рокотяна. – М.: Металлургия, 1977. – 288 с.
17. Вагапов, Р.Д. Статистическая теория рассеивания случайной координаты повреждения тела / Р.Д. Вагапов // Машиноведение. – 1970. - №4. – С.63-74.
18. Вершинский, С.В. Расчет вагонов на прочность / С.В. Вершинский. – М.: Машиностроение, 1971. – 432 с.
19. Вильдеман, В.Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В.Э. Вильдеман, Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 288 с.
20. Волков, С.Д. Метод функций сопротивления в расчетах конструкций на долговечность / С.Д. Волков, В.И. Миронов. – Свердловск, 1978. – 713 с. – Деп. в ВИНТИ 15.05.78, №1883-7.

21. Волков, С.Д. О кинетике разрушения и масштабном эффекте / С.Д. Волков // Заводская лаборатория. – 1960. – №3. – С. 323–329.
22. Волков, С.Д. Проблема прочности и механика разрушения / С.Д. Волков // Проблемы прочности. – 1978. - №7. – С. 3-10.
23. Волков, С.Д. Функция сопротивления материалов и постановка краевых задач механики разрушения / С.Д. Волков. – Свердловск: УНЦ АН СССР, Ин-т металлургии, 1986. – 65 с.
24. Волков, С.Д. Экспериментальные функции сопротивления легированной стали при растяжении и кручении / С.Д. Волков, Ю.П. Гуськов, В.И. Кривоспицкая и др. // Проблемы прочности. – 1979. – №1. – С.3–5.
25. Воробьев, А.З. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебнев, и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
26. Воронин, Ю.Ф. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы / В.Ф. Воронин, В.А. Камаев. – М.: Машиностроение, 2005. – 329 с.
27. Встовский, Г.В. Учет охрупчивания металла и наличия нерегистрируемых дефектов в расчетах остаточного ресурса технологического оборудования / Г.В. Встовский, В.Ф. Терентьев // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 1999. - №9. – С.47-52.
28. 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.
29. Гордеева, Т.А Анализ изломов при оценке надежности материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
30. Горицкий, В.М. Влияние параметров структуры на характеристики сопротивления хрупкому разрушению низкоуглеродистой стали / В.М. Горицкий // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 2003. - №8. – С.39-43.
31. Горицкий, В.М. Оценка сопротивления распространению трещины по результатам испытания на ударную вязкость / В.М. Горицкий, Д.П. Хромов // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 1984. - №7. – С.70-72.

32. ГОСТ 1050-2013Metalлопродукция из низколегированных конструкционных качественных и специальных сталей. - М.: Стандартиформ, 2014. – 32 с.
33. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение (с Изменениями N 1, 2, 3). – М.: Стандартиформ, 2008. – 22 с.
34. ГОСТ 19200-80 Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1980. – 11 с.
35. ГОСТ 23207-78 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1973. – 48 с.
36. ГОСТ 25.101-83 Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. - М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1983. – 20 с.
37. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость (с Изменением N1). – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. – 25 с.
38. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. - – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 2008. – 38 с.
39. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2015. – 23 с.
40. ГОСТ 32192-2013 Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения (с изменением N 1). – М.: Стандартиформ, 2016. – 28 с.
41. ГОСТ 32400-2013 Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия (с Поправкой, с Изменением N 1). – М.: Стандартиформ, 2014. – 57 с.
42. ГОСТ 33211-2014 Вагоны грузовые Требования к прочности и динамическим качествам. – М.: Стандартиформ, 2016. – 54 с.

43. ГОСТ 33788-2016 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – М.: Стандартиформ, 2016. – 41 с.
44. ГОСТ 33939-2016 Детали литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Методы ресурсных испытаний. Часть 1. Рама боковая. – М.: Стандартиформ, 2017. – 24 с.
45. ГОСТ 34502-2018 Детали литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Методы ресурсных испытаний. Часть 2. Балка надрессорная. – М.: Стандартиформ, 2019. – 16 с.
46. ГОСТ 9246-2013 Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия (с Изменением №1, с Поправками). – М.: Стандартиформ, 2014. – 23 с.
47. ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенной температурах. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1979. – 9 с.
48. ГОСТ 977-88 Отливки стальные. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1990. – 34 с.
49. Гусев, А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках / А.С. Гусев. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.
50. Демина, Ю.А. Влияние длительной эксплуатации и хранения на механические свойства и механизмы разрушения конструкционных материалов: автореф. дис. на сиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.16.01 / Демина Юлия Андреевна. – М., 2014. – 26 с.
51. Емельянов, И.Г. Разработка экспресс-метода для контроля свойств вагонных сталей / И.Г. Емельянов, В.И. Миронов, А.В. Якушев // Транспорт Урала. – 2012. – N 2 (33). – С.13-17.
52. Ефимов, В.П. Исследование влияния упругой вставки адаптера на усталостную прочность боковой рамы тележки модели 18-194-1 / В.П. Ефимов, А.Н. Баранов, С.М. Буторин // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – №3(58). - С.75-77.
53. Ефимов, В.П. Надежность литых несущих деталей тележек по критерию усталостного разрушения / В.П. Ефимов, С.И. Попов, Е.И. Ченцов // Подвижной

- состав XXI века: Идеи, требования, проекты. Сб. науч. статей Междунар. науч.-тех. конф. – СПб., 2003. – С.194-204.
54. Ефимов, В.П. Расчетно-экспериментальные исследования литых несущих деталей грузовых тележек с повышенными параметрами прочности и ресурса / В.П. Ефимов, Д.В. Даниленко // Подвижной состав XXI века: Идеи, требования, проекты. Сб. науч. статей Междунар. науч.-тех. конф. – СПб., 2009. – С.28-36.
55. Жаворонков, Ю. В. Совершенствование технологии изготовления литых деталей тележки грузовых вагонов / Ю. В. Жаворонков, А.В. Додонов, С.Л. Самошкин, и др. // «Повышение эффективности грузовых вагонов и их узлов»: сб. научн. тр. Инженерный центр вагоностроения. – СПб.: ОМ-Пресс. – 2013. - вып. 12. - с. 94-106.
56. Жижерин, С.В. Итерационные методы расчета напряжений при чистом изгибе балки из повреждающегося материала / С.В. Жижерин, В.В. Стружанов, В.И. Миронов // Вычислительные технологии. – 2001. – №5. – Т.6. – С. 24–33.
57. Закирпичная, М.М. Анализ изменений структуры и свойств стали 20 в условиях длительной эксплуатации / М.М. Закирпичная, И.Р. Кузеев, В.К. Бердин, и др. // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2006. - №4. - С.75-82.
58. Закирпичная, М.М. Охрупчивание стали 20 в процессе длительной эксплуатации / М.М. Закирпичная, И.Р. Кузеев, В.К. Бердин, и др. // Нефтегазовое дело. – 2006. – Том 4, №1. – С.207-214.
59. Зимакова, М.В. Оценка остаточного ресурса вагонов – цистерн на основе учета деградации физико-механических свойств металлов / М.В. Зимакова, А.В. Третьяков, А.С. Сараев // Сб. науч. тр. XIII Міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту (безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу та енергозбереження)». – Днепропетровск, 2012. – С.74-79.
60. Злочевский, А.Б. Определение коэффициента интенсивности напряжений тензометрическим методом / А.Б. Злочевский, Л.А. Бондарович, А.Н. Шувалов // Проблемы прочности. – 1979. №6 (120). – С.44-47.
61. Змеева, В.Н. Вероятностное прогнозирование длительности развития усталостных трещин в литых сталях деталей грузовых вагонов / В.Н. Змеева, С.Г.

- Лебединский // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 2000. – №2. - С.44-47.
62. Змеева, В.Н. Статистические закономерности развития усталостных трещин в литых сталях деталей грузовых вагонов / В.Н. Змеева, С.Г. Лебединский // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 1999. – №3. - С.26-31.
63. Золоторевский, В.С. Механические свойства металлов / В.С. Золоторевский. – М.: МИСИС, 1998. – 400 с.
64. Иванова, В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Metallurgia, 1975. – 456 с.
65. Ильюшин, А.А. Пластичность. Основы общей математической теории / А.А. Ильюшин. – М.: АН СССР, 1963. – 271 с.
66. Ильюшин, А.А. Труды. Пластичность (1946-1966) / А.А. Ильюшин. – М.: Физматлит, 2004. – Т.2. – 479 с.
67. Казекин, Е.Е. Катастрофа складки системы «машина-образец» / Е.Е. Казекин, В.И. Миронов, А.В. Якушев // Конкурентоспособность территорий и предприятий во взаимозависимом мире: Материалы IX Всерос. фор. мол. уч. и студ. – Екатеринбург, 2006. - Ч I. - С. 272-273.
68. Камаев, О.Б. Исследование надежности и вероятностное обоснование запасов усталостной прочности деталей тележек грузовых вагонов: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : 05.05.01 / Камаев Олег Борисович. – М., 1978. – 26 с.
69. Камминг, С. VBA / С. Камминг: пер. с англ., 3-е издание. – М.: Вильямс, 2001. – 448 с.
70. Качанов, Л.М. Время разрушения в условиях ползучести / Л.М. Качанов // Проблемы механики сплошной среды. – М., 1961. – С.186-201.
71. Качанов, Л.М. Основы механики разрушения / Л.М. Качанов. – М., 1974. – 311 с.
72. Кеглин, Б.Г. Сопротивление усталости отслуживших 30 лет надрессорных балок и боковых рам тележек ЦНИИ ХЗ-0 грузовых вагонов / Б.Г. Кеглин, А.П.

- Шлюшенков, Т.П. Прилепо // Сб. трудов. – Брянск: Брянский гос. техн. ун-т, 2003. – С. 110-117.
73. Киммел, П. Освой самостоятельно программирование для Microsoft Access 2002 за 24 часа / П. Киммел: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 480 с.
74. Кириллова, Н.Ю. Оценка остаточного ресурса длительно эксплуатируемого реакционного оборудования из углеродистой стали с учетом охрупчивания: дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: 05.02.13; 05.02.01 / Кириллова Наталья Юрьевна. – Уфа, 2006. – 150 с.
75. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник / В.П. Когаев, И.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 225 с.
76. Когаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1993 – 364 с.
77. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение / Дж. Коллинз: пер. с англ.; под ред. Э.И. Грилюка. – М., 1984. – 624 с.
78. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
79. Колмогоров, В.Л. Феноменологическая модель накопления повреждений и разрушения при различных условиях нагружения / В.Л. Колмогоров, Б.А. Мигачев, В.Г. Бурдуковский. – Екатеринбург: УрО РАН, 1994. – 104 с.
80. Колоколов, Е.И. Динамический критерий трещиностойкости конструкционных сталей при квазихрупком разрушении / Е.И. Колоколов // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. - №3(12). – С. 31-43.
81. Комиссаров, А.Ф. Анализ отказов боковых рам грузовых вагонов / А.Ф. Комиссаров // Вестник института проблем естественных монополий: техника железных дорог. – 2012. – №1(17). – С. 65-68.
82. Конькова, Т.Е. О путях повышения эксплуатационной надежности стальных литых деталей тележек грузовых вагонов / Т.Е. Конькова, В.Б. Беловодский,

- А.В. Великанов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 2009. – №1. - С.22-26.
83. Косарев, Л.Н. Анализ надежности литых деталей тележек грузовых вагонов по данным эксплуатации / Л.Н. Косарев, Т.П. Северинова, Н.И. Корнев, Н.Ф. Забелина // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 1985. – №4. - С.32-37.
84. Коссов, В.С. Оценка условий безопасной эксплуатации литых деталей тележки грузового вагона / В.С. Коссов, Э.С. Оганьян, Н.Ф. Красюков, и др. // Тяжелое машиностроение. – 2016. - №5. – С. 20-24.
85. Коссов, В.С. Причины изломов литых деталей тележек грузовых вагонов / В.С. Коссов, Э.С. Оганьян, В.Н. Огуенко, и др. // Железнодорожный транспорт. – 2013. – №12. – С. 20-26.
86. Костенко, Н.А. Влияние дефектов на надежность литых деталей при случайных режимах нагружения / Н.А. Костенко, Л.Н. Никольский, В.Д. Цветков // Проблемы прочности. – 1984. - №2. – С.113-117.
87. Костенко, Н.А. Особенности разрушения и расчет надежности литых деталей грузовых вагонов, работающих в режиме случайных нагрузок, с учетом влияния низких температур и циклического повреждения (На прим. корпуса автоцепки): автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук: 05.05.01 / Костенко Нина Алексеевна – Москва, 1979. – 463 с.
88. Лагерев, И.А. Оценка усталостной прочности и живучести боковой рамы литой тележки грузового вагона / И.А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – №4. – С. 374-379.
89. Лебедев, А. А. Феноменологические основы оценки трещиностойкости материалов по параметрам падающих участков диаграмм деформаций / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов // Проблемы прочности. – 1983. – №2. – С. 6–10.
90. Лебедев, А.А. Влияние вида напряженного состояния на кинетику разрушения и трещиностойкость мартенситностареющей стали. Сообщение 1. Исследование стадийности процесса разрушения / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов, С.А. Недосека, и др. // Проблемы прочности. – 1991. - №8. – С.3-13.

91. Лебедев, А.А. Влияние вида напряженного состояния на кинетику разрушения и трещиностойкость мартенситностареющей стали. Сообщение 2. Оценка трещиностойкости стали / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов, С.А. Недосека, и др. // Проблемы прочности. – 1991. - №8. – С.14-18.
92. Лебедев, А.А. Исследование влияния жесткости испытательных машин на закономерности деформирования и разрушения структурно неоднородных материалов / А.А. Лебедев, В.П. Ламашевский, П.Т. Алфимов // Проблемы прочности. – 1982. - №7. – С.64-67.
93. Лебедев, А.А. К оценке трещиностойкости пластичных материалов / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов // Проблемы прочности. – 1982. – №2. – С.11–13.
94. Лебедев, А.А. Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов, И.О. Богинич, и др. // Проблемы прочности. – 1996. - №5. – С.23-30.
95. Лебедев, А.А. Методика построения полных диаграмм деформирования листовых материалов / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов, Ю.Л. Евецкий // Проблемы прочности. – 1986. - №9. – С.29-32.
96. Лебедев, А.А. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов, С.А. Недосека, и др. // Проблемы прочности. – 1995. - №7. – С.31-40.
97. Лебедев, А.А. Модель накопления повреждений в металлических материалах при сложном напряженном состоянии / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов, Н.А. Недосека, и др. // Проблемы прочности. – 1997. - №3. – С.55-63.
98. Лебедев, А.А. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов. – Киев: ИПП НАНУ, 2004. – 148 с.
99. Лебедев, А.А. Прогнозирование трещиностойкости сталей в зависимости от условий эксплуатации конструкций на малогабаритных образцах / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов // Проблемы прочности. – 1992. - №11. – С.29-33.

100. Лебедев, А.А. Установка для испытания материалов с построением полностью равновесных диаграмм деформирования / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов // Проблемы прочности. – 1981. - №12. – С.104-106.
101. Лисина, С.А. Континуальные и структурно-феноменологические модели в механике сред с микроструктурой: автореф. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 01.02.04 / Лисина Светлана Александровна. – Нижний Новгород, 2009. – 23 с.
102. Лукашук, О.А. Влияние наработки на бифуркационную картину разрушения образца в испытательной машине / О.А. Лукашук, А.В. Якушев, В.И. Миронов // Вестник УГТУ – УПИ. – 2004. – Специальный выпуск. – Ч. 1. – С.435–439.
103. Лукашук, О.А. К расчету установки повышенной жесткости / О.А. Лукашук, В.И. Миронов // Науч. труды IV науч. конф. мол. уч. ГОУ УГТУ-УПИ. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – С.447-449.
104. Лукашук, О.А. О разупрочнении материала в балке при изгибе / О.А. Лукашук, В.И. Миронов, А.В. Якушев // Науч. труды V отчетной конф. мол. уч. ГОУ ВПО УГТУ–УПИ. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ. – 2003. - Ч. 1. - С. 48-50.
105. Лукашук, О.А. Прогнозирование ресурса деталей горных машин с учетом деградации свойств материала: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: 05.05.06 / Лукашук Ольга Анатольевна. – Екатеринбург, 2009. – 16 с.
106. Лурье, А.И. Теория упругости / А.И. Лурье. – М.: Наука, 1970. – 939 с.
107. Матвиенко, Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения / Ю.Г. Матвиенко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
108. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение. – 1981. – 272 с.
109. Махутов, Н.А. К вопросу оценки ресурса и безопасной эксплуатации конструкций подвижного состава / Н.А. Махутов, В.С. Коссов, Э.С. Оганьян, и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. - №11. Том 73. – С.43-47.

110. Мерсон, Д.Л. Сопротивление стали 20ГЛ боковых рам тележек грузовых вагонов усталости при низких температурах / Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов, М.Л. Линдеров, и др. // Вестник института естественных монополий: Техника железных дорог. – 2015. – №1(29). – С. 34-39.
111. Методика сравнительной оценки усталостной прочности, несущей способности и трещиностойкости сталей. – Нижний Тагил: ФГУП «ПО УВЗ», ЦНИИМ (АДК25003.300212000). – 19 с.
112. Миронов, В. И. К определению инкрементальных свойств материала / В.И. Миронов, А.В. Якушев.: науч. тр. III Всерос. сем. им. С.Д. Волкова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. – С. 42–46.
113. Миронов, В. И. Нестандартные свойства конструкционного материала / В.И. Миронов, А.В. Якушев, О.А. Лукашук // Физическая мезомеханика. Специальный выпуск. – 2004. – Т. 7. – Ч.1. – С. 110–113.
114. Миронов, В. И. Применение системы сбора и обработки информации на базе ПЭВМ в экспериментальных исследованиях / В.И. Миронов, О.А. Лукашук, А.В. Якушев, и др.: науч. тр. науч. тех. конф. – Саратов: СГТУ, 2002. – С. 71–76.
115. Миронов, В. И. Свойства материала в реологически неустойчивом состоянии / В.И. Миронов // Заводская лаборатория. – 2002. - №10. – Т.68. – С.41-47.
116. Миронов, В.И. Влияние структурной неоднородности материала на сопротивление разрушению элементов конструкций / В.И. Миронов, В.Б. Трухин // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении : матер. междуна. молодежной науч.-практ. конф. «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», посвященной памяти чл.-корр. РАН, почетного доктора УрФУ В. Л. Колмогорова. — Екатеринбург: Уральский университет, 2014. — С. 89-93.
117. Миронов, В.И. Долговечность литых деталей тележки грузового вагона / В.И. Миронов, А.В. Якушев // Прочность матер. и элемент. констр. Труды междунар. науч.-технич. конф. // Отв. ред. В.Т. Трощенко. – Киев: Ин-т проблем проч. им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. - С.883-890.

118. 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.
119. Миронов, В.И. Моделирование свойств материала на стадии разупрочнения / В.И. Миронов, Г.Л. Крахмальник // Меж. вуз. сб. тр. – Пермь: ПГТУ, 1999. - №7. – С. 34-39.
120. Миронов, В.И. Моделирование циклических свойств материала по изменению его статической диаграммы / В.И. Миронов // Динамика, прочность и износостойкость машин. – Е-журнал. – 1997. - №3. – С. 33-38.
121. Миронов, В.И. Моделирование циклического деформирования и разрушения элементов конструкций после перехода материала на стадию предразрушения: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: 01.02.04 / Миронов Владимир Иванович. – Пермь, 1995. – 19 с.
122. Миронов, В.И. Модель циклической деградации конструкционного материала / В.И. Миронов, А.В. Якушев, А.В. Журавлева // Интеграция науки, образования и производства – стратегия развития инновационной экономики: Труды I междунауч. науч. практич. конф. – Екатеринбург, УрГЭУ, 2011. – С.203-208.
123. Миронов, В.И. Модель циклической деградации свойств материала в расчетах ресурса элементов конструкций / В.И. Миронов, А.В. Якушев // Аннот. докл. IX Всерос. съезда по теор. и прикл. механике. - Нижний Новгород: НГУ, 2006. - Т.III. - С. 148-149.
124. Миронов, В.И. О предельном состоянии разрушения материала / В.И. Миронов, А.В. Якушев, О.А. Лукашук: сб. тр. междунар. науч. техн. конф. – М.; Машиностроение, 2003. – Т2. – С. 42–46.
125. Миронов, В.И. Обобщение метода функций сопротивления на неодноосное напряженное состояние / В.И. Миронов // Первая науч. технич. конф. – Петропавловск: НТО Машпром, 1985. – С. 14-16.
126. Миронов, В.И. Особенности усталостного процесса стали 35 / В.И. Миронов, В.В. Стружанов, А.В. Якушев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2004. - Т.70. - №6. - С. 51–54.

127. 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.
128. Миронов, В.И. Оценка циклических свойств новых материалов / В.И. Миронов // Тез. докл. науч. технич. конф. – Свердловск: НТО Машпром, 1987. – С.26.
129. Миронов, В.И. Прогнозирование ресурса элементов подвижного состава / В.И. Миронов, А.В. Якушев // Тяжелое машиностроение. – 2010. – N 4. – С.26-29.
130. 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. - №2 (33). - С. 13-17.
131. Миронов, В.И. Способ экспериментального исследования деградиационных процессов в материале / В.И. Миронов, И.Г. Емельянов, Д.И. Вичужанин, и др. // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2019. – Iss.2. – С. 19-27.
132. Миронов, В.И. Стадия деформационного разупрочнения структурно-неоднородного материала / В.И. Миронов, А.В. Якушев, О.А. Лукашук и др. // Вестник УГТУ–УПИ. – 2005. – №18 (70). – Часть 2. – С. 172–181.
133. 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.
134. Миронов, В.И. Усталостный ресурс элементов подвижного состава / В.И. Миронов, А.В. Якушев, Н.С. Бачурин // Безопасность движ., совершенствование констр. вагонов и ресурсосберегающие технологии в ваг. хоз.: Сб. науч. тр.// Под науч. ред. А.В. Смольянинова, д.т.н. – Екатеринбург: УрГУПС. - 2008. – Вып.61 (144). – С.19-25.
135. Миронов, В.И. Установка для определения механических свойств материала на стадии разупрочнения / В.И. Миронов, В.И. Микушин, А.П. Владимиров, и др. // Заводская лаборатория. – 2001. - №3. – С. 48-51.

136. Миронов, В.И. Установка для проведения усталостных испытаний нестандартных образцов / В.И. Миронов, А.В. Якушев, С.В. Аксенов // Интеграция науки, образования и производства – стратегия развития инновационной экономики: Труды I междун. науч. практич. конф. – Екатеринбург, УрГЭУ, 2011. – С.200-203.
137. Миронов, В.И. Эксплуатационная живучесть тележки грузового вагона / В.И. Миронов, А.В. Якушев, О.А. Лукашук // Будущее машиностроения России: Электронный сб. тр. Всерос. конф. мол. уч. и спец. №032802311 – М.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2008. – 11 с.
138. Москвитин, Г.В. Влияние перегрузок на развитие усталостных трещин в литых деталях железнодорожных конструкций / Г.В. Москвитин, С.Г. Лебединский // Проблемы машиностроения и надежности. – 2010. – №5 – С. 112-11.
139. Москвитин, Г.В. Оценка живучести низколегированной стали литых деталей железнодорожной конструкции / Г.В. Москвитин, С.Г. Лебединский, А.Н. Поляков // Сб. докл. межд. конф. Живучесть и конструкционное материаловедение. – Москва – 2016. – С. 251-254.
140. Надрессорные балки и боковые рамы литые двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методика статических испытаний на прочность. – М.: ОАО «ВНИИЖТ» - ОАО «НИИ вагоностроения», 2010. – 16 с.
141. Надрессорные балки и боковые рамы литые двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методика испытаний на усталость. – М.: ОАО «ВНИИЖТ» - ОАО «НИИ вагоностроения», 2010. – 14 с.
142. Надрессорные балки и боковые рамы литые двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методика испытаний на усталость. – М.: ГУП «ГосНИИВ» - ГУП «ВНИИЖТ», 2000. – 14 с.
143. Николаева, Е.А. Основы механики разрушения / Е.А. Николаева. – Пермь: Изд-во Пермского государ-го технич-го унив-та, 2010. – 103 с.
144. Нормы для расчета на прочность и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996 – 315 с.

145. Обследование технического состояния литых деталей тележек модели 18-100 по повышению эксплуатационной надежности.: отчет ПКБ ЦВ МПС и ДВС МПС России. – М.: ПКБ ЦВ МПС, 2001. – 145 с.
146. Оганьян, Э.С. Математические модели продольного нагружения буксовой направляющей боковой рамы тележки грузового вагона / Э.С. Оганьян // Подвижной состав XXI века: Идеи, требования, проекты. Сб. науч. статей Междунар. науч.-тех. конф. – СПб., 2009. – С.39-45.
147. Оганьян, Э.С. Обоснование показателей сопротивления усталости несущих литых деталей тележек грузовых вагонов / Э.С. Оганьян, Н.Ф. Красюков, А.Л. Протопопов // Железнодорожный транспорт. – 2011. - №10. – С.49-53.
148. Одесский, П.Д. О деградации свойств сталей для металлических конструкций. Заводская лаборатория. Диагностика металлов. - 2003. - № 10. - С. 41-49.
149. Орлова, А.М. Апробация режимов ресурсных испытаний боковых рам тележки модели 18-9855 на стенде пространственного нагружения / А.М. Орлова // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2014. – №4(40). – С. 36-37.
150. Орлова, А.М. Выбор пространственной схемы нагружения надрессорной балки для испытаний на ресурс / А.М. Орлова, Д.В. Шевченко, Т.С. Куклин, и др. // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2015. – №3(43). – С. 36-37.
151. Орлова, А.М. Особенности конструкции и испытаний надрессорных балок и боковых рам грузовой тележки модели 18-9810 Тихвинского вагоностроительного завода / А.М. Орлова, И.В. Сухих, Е.А. Щербаков // Сб. науч. тр. XIII Міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту (безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу та енергозбереження)». – Днепропетровск, 2012. – С.45-52.
152. Орлова, А.М. Стенд для проведения статических испытаний тележек вагонов и их несущих элементов / А.М. Орлова, В.Б. Коровкевич, И.В. Сухих // Подвижной состав XXI века: Идеи, требования, проекты. Сб. науч. статей Междунар. науч.-тех. конф. – СПб., 2011. – С.36-40.
153. ОСТ 24.153.08-78 Тележки двухосные грузовых вагонов колеи 1520 (1524) мм. Детали литые стальные. Технические требования. – М.: ВНИИВ, 1979. – 23 с.

154. ОСТ 32.183-2001 Тележки двухосные грузовых вагонов колеи 1520 мм. Детали литые. Рама боковая и балка надрессорная. – М.: ГУП ВНИИЖТ, ГУП ГосНИИВ, 2002. – 22 с.
155. Остсемин, А.А. Определение коэффициентов интенсивности напряжений для образца методом конечных элементов / А.А. Остсемин, А.Д. Платонов, П.Я. Кравец // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 1998. - №2. – С.46-50.
156. Павлов, П.А. Механические состояния и прочность материалов. – Л.: Ленинградский университет, 1980. – 175 с.
157. Павлюков, А. Э. Прогнозирование нагруженности ходовых частей грузовых вагонов повышенной грузоподъемности методами имитационного моделирования: автореф. дис. на соиск. учен. степени докт. техн. наук: 05.22.07 / Павлюков Александр Эдуардович. – Екатеринбург, 2002. – 47 с.
158. Павлюков, А.Э. Виртуальное моделирование нагруженности деталей тележек грузовых вагонов на этапах проектирования / А.Э. Павлюков // Транспорт Урала. – 2004. - №1. – С.27-30.
159. Павлюков, А.Э. Имитационная модель прогнозирования ресурса деталей тележек грузовых вагонов / А.Э. Павлюков // Новые материалы и технологии в машиностроении: Сб. науч. трудов. – Брянск. – 2002. – Вып. 1. – С.75-79.
160. Павлюков, А.Э. Оценка ресурса деталей ходовых частей вагонов на стадии технического проекта / А.Э. Павлюков, А.В. Сирин // Исследования и разработки ресурсосберегающих технологий на жел. дор. трансп.: межвуз. сб. тр. с междунар. уч. под ред. д.т.н. В.Н. Яковлева. – Самара: СамИИТ. – 2002. – Вып. 23. – С.171-174.
161. Панин, В.Е. Анализ полей векторов смещений и диагностики усталостного разрушения на мезоуровне / В.Е. Панин, В.С. Плешанов, В.В. Кибиткин, и др. // Дефектоскопия. – 1998. №2. – С. 80-87.
162. Партон, В.З. Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. – М.: Наука, 1974. – 257 с.

163. Пастухов, И.Ф. О влиянии литейных дефектов на сопротивление усталости литых деталей / И.Ф. Пастухов, М.И. Пастухов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2012. - №3. – С.11-18.
164. Пастухов, М.И. Исследование характеристик усталостной прочности материала литых деталей тележек грузовых вагонов после длительной эксплуатации / М.И. Пастухов // Безопасность движения поездов: тр. V науч.-практ. конф. – Москва, 2004. – С.23-24.
165. Пастухов, М.И. Оценка технического ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов по коэффициенту запаса сопротивления усталости / М.И. Пастухов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2017. - №2. – С.11-16.
166. Пат. на изобр. 2251676 Российская Федерация, МПК⁷ G01N3/08. Устройство и способ для испытания образцов материалов на растяжение / Миронов В.И., Андронов В.А., Якушев А.В., и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное 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.
167. Пат. на изобр. 2412073 Российская Федерация, МПК B61F 5/00, МПК C21D 7/00. Способ повышения живучести литых деталей тележек грузовых вагонов / Плоткин В.С., и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИЖТ» и ОАО «НПК «Уралвагонзавод». – N 2009126786/11; заявл. 14.07.2009; опубл. 20.02.2011, Бюл. N 5. – 5 с.
168. Пат. на пол. модель 128528 Российская Федерация, МПК B22C 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 образ-ое учрежд. высшего проф-го образ-ия «Петерб-ий государ-ый универ-т 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.
169. Пат. на пол. модель 132364 Российская Федерация, МПК B22C 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 образ-ое учрежд. высшего проф-го образ-ия «Петерб-ий государ-ый универ-т путей сообщения»; ОАО «Рузаевский завод хим-го машин-ия». – N 2012158225/02; заявл. 24.12.2012; опубл. 20.09.2012, Бюл. N 26. – 5 с.
170. 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.
171. 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.
172. Пат. на пол. модель 161341 Российская Федерация, МПК G01M 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.
173. Пат. на пол. модель 165307 Российская Федерация, МПК G01M 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.
174. Петриков, В.М. Оценка долговечности вязко-хрупких материалов и изменяющимися свойствами методами механики разрушения / В.М. Петриков // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 1999. - №12. – С. 34-39.
175. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наукова Думка, 1976. – 416 с.
176. Писаренко, Г.С. Определение трещиностойкости материалов на основе энергетического контурного интеграла / Г.С. Писаренко, В.П. Науменко, Г.С. Волков. – Киев: Наукова думка, 1978. – 124 с.
177. Плоткин, В.С. К оценке запасов усталостной прочности надрессорных балок и боковых рам тележки ЦНИИ-ХЗ-О по результатам полных усталостных

- испытаний / В.С. Плоткин, и др. // Сб. науч. тр. ВНИИВ. – М., 1978. – Вып.35. – С.41-47.
178. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении, утвержденное Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества протокол от 16-17 октября 2012 г. №57 – М.: ОАО «ВНИИЖТ». – 15 с.
179. Попов, С.И. Выбор критерия для оценки влияния литейных дефектов на циклическую прочность деталей тележек грузовых вагонов / С.И. Попов, Н.А. Худякова // Повышение надежности и совершенствование ремонта вагонов: сб. науч. тр. ВНИИЖТ. – М., 1982. – Вып. 652. – С.115-120.
180. Попов, С.И. Продление срока службы литых деталей тележек / С.И. Попов // Железнодорожный транспорт. - 2003. – №3. - С.46-49.
181. Пранов, В. А. Анализ повреждаемости боковых рам тележек грузовых вагонов в эксплуатации / А. В. Смольянинов, В. А. Пранов / Проблемы вагоностроения, технического обслуживания и ремонта вагонов и городского рельсового транспорта: коллективная монография / Под ред. проф. В.Ф. Лапшина. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011. – С. 38–44.
182. Пранов, В.А. Анализ повреждаемости боковых рам тележек грузовых вагонов в эксплуатации / А. В. Смольянинов, В. А. Пранов // Транспорт Урала. – 2007. – №4(15). – С. 65–69.
183. Пранов, В.А. Методика оценки эксплуатационной надежности литых деталей тележки грузового вагона / В.А. Пранов // Транспорт Урала. – 2011. – №2 (29). – С. 56–61.
184. Пранов, В.А. Повышение усталостной долговечности боковой рамы тележки грузового вагона: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: 05.22.07 / Пранов Вадим Александрович. – Екатеринбург, 2012. – 16 с.
185. Проведение испытаний на выносливость надрессорных балок и боковых рам тележек ЦНИИ-ХЗ со сроком службы, превышающим 30 лет: отчет о НИР. – Брянск: Брян. гос. техн. ун-т, 1999. – 57 с.

186. Прокопенко, А.В. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщение 1. Зависимость предела текучести от глубины слоя / А.В. Прокопенко, В.Н. Торгов // Проблемы прочности. – 1986. - №4. – С. 28-34.
187. Прокопенко, А.В. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщение 2. Неравномерность свойств на поверхности / А.В. Прокопенко, И.А. Маковецкая, А.С. Штукатурова // Проблемы прочности. – 1986. - №6. – С. 41-44.
188. Прокопенко, А.В. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщение 3. Модель усталостного разрушения металла с учетом аномальных свойств поверхностного слоя. Масштабный эффект. Остаточные напряжения / А.В. Прокопенко, В.Н. Торгов // Проблемы прочности. – 1986. – №6. – С. 44-51.
189. Прокопенко, А.В. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщение 4. Расчет предела выносливости при концентрации напряжений и асимметричном циклическом нагружении / А.В. Прокопенко, В.Н. Торгов // Проблемы прочности. – 1986. – №10. – С. 18-26.
190. Просвиряков, Е.Ю. Устойчивость деформирования стержневой системы, осуществляющей растяжение с кручением полый цилиндрической детали из разупрочняющегося материала: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Просвиряков Евгений Юрьевич. – Пермь, 2009. – 17 с.
191. Протопопов, А.Л. Живучесть литых деталей подвижного состава с технологическими дефектами: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.22.07 / Протопопов Андрей Леонидович. – М., 2020. – 24 с.
192. Протопопов, А.Л. Моделирование живучести боковой рамы трехэлементной тележки грузового вагона численными методами / А.Л. Протопопов, В.С. Коссов, Э.С. Оганьян, и др. // Транспорт Российской Федерации. – 2019. - №4(83). - С. 51-55.
193. Протопопов, А.Л. Моделирование развития трещины для оценки живучести по условию исчерпания несущей способности боковой рамы тележки 18-100 грузового вагона / А.Л. Протопопов, Э.С. Оганьян // Вестник научно-

- исследовательского и конструкторского-технологического института подвижного состава (Вестник ВНИКТИ). – 2010. – Вып.92. – С.86-93.
194. Протопопов, А.Л. Размер трещины и живучесть боковой рамы тележки / А.Л. Протопопов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. - №2. – С. 32-34.
195. Протопопов, А.Л. Размер трещины и живучесть боковой рамы тележки / А.Л. Протопопов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. - №2. – С.32-34.
196. Протопопов, А.Л. Расчет предельного размера поверхностного дефекта в боковой раме тележки 18-100 грузового вагона из условия безопасной эксплуатации в межремонтный период / А.Л. Протопопов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения (Вестник ВЭЛНИИ). – 2012. - №1(63). – С. 185-193.
197. Работнов, Ю.Н. Избранные труды. Проблемы механики деформируемого твердого тела. / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1991. – 196 с.
198. Работнов, Ю.Н. О механизме длительного разрушения / Ю.Н. Работнов // Вопросы прочности материалов и конструкций. – М.: АН СССР, 1959. – С.5-7.
199. Работнов, Ю.Н. О разрушении твердых тел / Ю.Н. Работнов // Проблемы механики твердого деформируемого тела. – Л., 1970. – С.353-357.
200. Работнов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю.Н. Работнов. – М., 1966. – 250 с.
201. Рама боковая литая тележки двухосной трехэлементной с семи пружинным рессорным комплектом. Программа и методики предварительных испытаний. ПГУПС.667151.001 ПМ: секреты производства (ноу-хау), уч. №2, утв. протоколом №2 от 11.02.2014 г. / Якушев А.В., Комиченко С.О. – Санкт-Петербург: Петербургский университет путей сообщения, 2014. – 31 с.
202. Рамы боковые и балки надрессорные литые тележки двухосной грузовых вагонов. Расчет коэффициентов пересчета расчетных напряжений от испытательных нагрузок. ПГУПС.667112.002 РР1: секреты производства (ноу-хау), уч. №9, утв. протоколом №2 от 11.02.2014 г. / Якушев А.В., Комиченко С.О. – Санкт-Петербург: Петербургский университет путей сообщения, 2014. – 9 с.

203. Расщепкина, Д.В. Методика моделирования роста трещины в буксовом проеме боковой рамы и определения ее предельной длины / Д.В. Расщепкина, А.В. Якушев // Подвижной состав XXI века: Идеи, требования, проекты. Матер. X Международ. науч.-тех. конф. – СПб., 2015. – С.22-25.
204. 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.
205. Расщепкина, Д.В. Оценка ресурса литых деталей тележек грузового вагона после возникновения усталостной трещины: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. тех. наук: 05.22.07 / Расщепкина Дарья Владимировна. – Санкт-Петербург, 2020. – 18 с.
206. 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.
207. РД 24.050.37.95 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М.: НИИ Вагоностроения, 1995. – 100 с.
208. РД 32.68-95 Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. – М.: ВНИИЖТ, 1997. – 20 с.
209. Рузметов, Я.О. Методика расчета прочности литых боковых рам тележек грузовых вагонов с учетом внутренних литейных дефектов / Я.О. Рузметов, А.В. Якушев, С.О. Комиченко // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – Выпуск 3, май – июнь. – С.1-14.
210. Рузметов, Я.О. Повышение прочности боковых рам тележек грузовых вагонов: монография / Я.О. Рузметов, А.В. Якушев. – Ташкент: ООО «Complex Print», 2021. – 130 с.
211. Рузметов, Я.О. Повышение прочности боковых рам тележек грузовых вагонов: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. тех. наук: 05.22.07 / Рузметов Ядгор Озодович. – Санкт-Петербург, 2014. – 18 с.

212. Савоськин, А.Н. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак, А.П. Матвеевичев, и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
213. Савчук, О.М. Штамповарная надрессорная балка грузовой тележки / О.М. Савчук, В.Т. Вислогузов, В.П. Воронович // Подвижной состав XXI века: Идеи, требования, проекты. Сб. науч. статей Междунар. науч.-тех. конф. – СПб., 2001. – С.70-74.
214. Самошкин, С.Л. Исследование несущих элементов тележек модели 18-100 грузовых вагонов / С.Л. Самошкин, А.А. Хоменко, А.А. Виноградов // Тяжелое машиностроение. – 2007. - №9. – С.23-25.
215. Самуль, В.И. Основы теории упругости и пластичности / В.И. Самуль // Учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. школа, 1982. – 264 с.
216. Северинова, Т.П. Исследование трещиностойкости сталей литых деталей тележек грузовых вагонов после длительного периода эксплуатации / Т.П. Северинова // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1999. – №3 – С. 35-40.
217. Северинова, Т.П. Исследование характеристик трещиностойкости стали типа 20 ГФЛ при регулярном и случайном нагружениях / Т.П. Северинова, А.Г. Козлов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1994. - №2 – С. 32-35.
218. Северинова, Т.П. Метод расчета напряженного состояния зоны технологического дефекта / Т.П. Северинова, С.М. Шудрак // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 1996. – №1. - С.26-29.
219. Северинова, Т.П. Определение коэффициента интенсивности напряжений при наличии трещины в нижнем поясе надрессорной балки грузового вагона / Т.П. Северинова // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1990. – №1 – С. 32-34.

220. Северинова, Т.П. Расчетно-теоретическое обоснование живучести боковых рам и надрессорных балок с допустимыми дефектами / Т.П. Северинова // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2002. – №5 – С. 40-45.
221. Северинова, Т.П. Спектр нагруженности боковой рамы тележки грузового вагона в эксплуатации / Т.П. Северинова // Сб. трудов. – М.: ВНИИЖТ, 1992. – С. 70-80.
222. Северинова, Т.П. Стандартизованный спектр нагрузок для моделирования эксплуатации деталей вагона / Т.П. Северинова // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 1988. – №7. - С.25-28.
223. Северинова, Т.П. Экспериментальное исследование длительности роста усталостной трещины в натуральных деталях при квазислучайном нагружении / Т.П. Северинова, В.И. Шахов, А.В. Гудков // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1994. – №6 – С.45-48.
224. Северинова, Т.П. Экспериментальное исследование напряженного состояния надрессорной балки тележки грузового вагона / Т.П. Северинова, Л.О. Грачева // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 1988. – №5. - С.33-36.
225. Сенько, В.И. Анализ причин повреждения и возможности продления срока службы боковых рам тележек грузовых вагонов / В.И. Сенько, М.И. Пастухов, С.В. Макеев, и др. // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2010. – №4(43). – С.13-18.
226. Сенько, В.И. Итоги комплексной оценки остаточного ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов / В.И. Сенько, И.Ф. Пастухов, М.И. Пастухов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2006. – №1-2. – С.5-10.
227. Сенько, В.И. О несущей способности надрессорных балок тележек грузовых вагонов / В.И. Сенько, И.Ф. Пастухов, С.В. Макеев, и др. // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2009. – №1. – С.16-20.

228. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович // Руководство и справочное пособие.– 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
229. Серенсен, С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению / С.В. Серенсен. – М.: Атомиздат, 1975. – 192 с.
230. Сирин, А.В. Метод определения характеристик сопротивления усталости деталей сложной формы / А.В. Сирин // Транспорт Урала. – 2004. - №3. – С.38-43.
231. Сирин, А.В. Теоретическая оценка предела выносливости несущих деталей подвижного состава / А.В. Сирин // Подвижной состав XXI века: Идеи, требования, проекты. Сб. науч. статей Междунар. науч.-тех. конф. – СПб., 2007. – С.98-104.
232. Смольянинов, А.В. Повышение точности оценки ресурса боковой рамы тележки грузового вагона по результатам усталостных стендовых испытаний / А.В. Смольянинов, В.А. Пранов // Транспорт Урала. – 2012. – №1(32). – С.39-42.
233. Солоненко, В.Г. Анализ усталостных повреждений литых деталей тележек грузовых вагонов / В.Г. Солоненко, Н.Н. Еркебаев, Б.П. Камысбаев // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2012. - №2(75). – С.25-31.
234. Сосновский, Л. Концепции поврежденности материалов / Л. Сосновский, С. Щербаков // Вісник ТНТУ. – 2011. – Спецвыпуск – частина 1. – С.14-23.
235. Сосновский, Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения / Л.А. Сосновский. – Минск, 1987. – 288 с.
236. Сосновский, Л.А. Экспериментальное исследование циклической трещиностойкости стали 20 / Л.А. Сосновский, Л.А. Хамаза, Н.К. Бабич // Проблемы прочности. – 1990. - №6. – С.34-38.
237. Степанова, Л.В. Описание рассеянного разрушения: параметр поврежденности Ю.Н. Работнова: историческая справка, фундаментальные результаты и современное состояние / Л.В. Степанова, С.А. Игонин // Вестник СамГУ. – 2014. - №3(114). С. 97-114.

238. Степнов, М.Н. Усталость легких конструкционных материалов / М.Н. Степнов, Е.В. Гиацинтов. – М., 1973. – 317 с.
239. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года: офиц. текст. – М.: Правительство РФ, 2008. – 171 с.
240. Стружанов, В.В. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций / В.В. Стружанов, В.И. Миронов. – Екатеринбург.: УрО РАН, 1995 – 190 с.
241. Стружанов, В.В. Математическое моделирование процесса деформирования, предшествующего разрушению материала в элементах конструкций: автореф. дис. на соиск. учен. степени докт. физ. мат. наук: 01.02.04 / Валерий Владимирович Стружанов. – Новосибирск, 1994. – 36 с.
242. Стружанов, В.В. О применении полных диаграмм деформирования в расчетах на прочность / В.В. Стружанов // Проблемы прочности. – 1988. - №5. – С.122-123.
243. Стружанов, В.В. Об одном подходе к расчету долговечности при циклическом нагружении / В.В. Стружанов, В.И. Миронов, К.А. Тарташник // Вестник СамГТУ. – 2004. Вып.26. – С. 51-54.
244. Сухов, А.В. Влияние конструктивных решений на формирование кривой усталости боковых рам тележек грузовых вагонов / А.В. Сухов, В.А. Рейхарт, Т.Е. Конькова // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 2016. – Т.75. №5. - С.300-307.
245. Сухов, А.В. К изломам боковых рам тележки модели 18-100 в 2006-2014 годах / А.В. Сухов, В.А. Рейхарт // Промышленный транспорт XXI век. – 2017. – №1-2. – С. 42-47.
246. Сухов, А.В. К оценке сопротивления усталости литых деталей тележек грузовых вагонов / А.В. Сухов, В.А. Рейхарт // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2015. - №1 – С. 43-47.
247. Тарабанова, В.П. Оценка структуры и ударной вязкости металла отливок турбины после эксплуатации / Л.Д. Мищенко, О.М. Курманова, С.С. Дьяченко // Тяжёлое машиностроение. – 1993. - № 11,12. - С.24-25.

248. Татаринцев, В.А. Анализ усталостной долговечности рам тележек вагонов метро / В.А. Татаринцев // Сб. докл. межд. конф. The Transport of the 21-st Century. – Warsaw – 2001/ – С. 275-282.
249. Терентьев, В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов / В.Ф. Терентьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 288 с.
250. Тимошенко, С.Л. Теория упругости / С.Л. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
251. Томпсон, Д. Неустойчивость и катастрофы в науке и технике / Д. Томпсон, пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 254 с.
252. Третьяков, А.В. Продление срока службы подвижного состава: Монография. М.: Издательство МБА. - 2011. – 304 с.
253. Трощенко, В.Т. Влияние размеров образцов на характеристики циклической трещиностойкости теплоустойчивых сталей. Сообщение 1 / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, В.Г. Каплуненко // Проблемы прочности. – 1986. - №4. – С. 3-9.
254. Трощенко, В.Т. Влияние размеров образцов на характеристики циклической трещиностойкости теплоустойчивых сталей. Сообщение 2 / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, В.Г. Каплуненко // Проблемы прочности. – 1986. - №6. – С. 13-18.
255. Трощенко, В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении: монография / В.Т. Трощенко. – Киев: Наукова думка, 1981. – 344 с.
256. Трощенко, В.Т. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В.Т. Трощенко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало, и др. – К.: Логос, 2000. – 571 с.
257. Трощенко, В.Т. Соппротивление усталости металлов и сплавов / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский // Справочник. Ч.1. – Киев: Наукова думка, 1987. – 347 с.
258. Трощенко, В.Т. Циклические деформации и усталость металлов. Долговечность металлов с учетом эксплуатационных и технологических факторов / В.Т.

- Трощенко, Л.А. Хамаза, В.В. Покровский, и др. – Киев: Наукова думка, 1985. – Т.2. – 224 с.
259. Ужик, Г.В. Усталость и выносливость металлов / Г.В. Ужик.: сб. статей. – М.: Изд. Иностран. Лит., 1963. – 497 с.
260. Фотоальбом. Случаи излома боковых рам тележек грузовых вагонов в ОАО «РЖД» в 2006-2013 гг. // официальный сайт ОАО «РЖД».
261. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. Деформация и разрушение. Часть 1. / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
262. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность / Я.Б. Фридман. – М., «Машиностроение», 1974. – 368 с.
263. Хлыбов, А.А. Проблемы обеспечения безопасной эксплуатации тележек грузовых вагонов при отрицательных температурах / А.А. Хлыбов, Ю.Г. Кабалдин, М.С. Аносов, и др. // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2019. - №4. – Том 22. – С. 18-26.
264. Хульт, Я. Поврежденность и распространение трещин. Механика деформируемых твердых тел. Направления развития / Я. Хульт; пер. с англ. – М., 1983. – С.230-243.
265. ЦВ-ЦЛ-408 Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотщику вагонов). – М.: ПКБ ЦВ – филиал ОАО «РЖД», 2009. – 128 с.
266. Чаусов, Н.Г. О влиянии размеров образца на параметры трещиностойкости, определяемые на основании полных диаграмм деформаций / Н.Г. Чаусов // Проблемы прочности. – 1984. - №3. – С.39-41.
267. Чаусов, Н.Г. Полная диаграмма деформирования как источник информации о кинетике накопления повреждений / Н.Г. Чаусов // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 2004. - №7. – С. 42-49.
268. Черкашин, Ю.М. Оценка остаточного ресурса ходовых частей подвижного состава после длительного периода эксплуатации / Ю.М. Черкашин, Т.П.

- Северинова, С.Е. Петраков, и др. // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 2000. – №7. - С.30-35.
269. Шахов, В.И. Влияние низких температур на несущую способность надрессорных балок тележки грузовых вагонов / В.И. Шахов, В.Н. Дьяконов, Ю.М. Парышев, и др. // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института инженеров транспорта. – 1983. - №5. – С. 41-42.
270. Шевченко, Д.В. Определение параметров пространственного нагружения литых деталей тележки 18-9855 при проведении стендовых испытаний / Д.В. Шевченко, Т.С. Куклин, А.М. Орлова, и др. // Вестник института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2016. – №1(33). – С. 68-74.
271. Шевченко, Д.В. Определение параметров пространственного нагружения литых деталей тележки 18-9855 при проведении стендовых испытаний (Часть 2) / Д.В. Шевченко, Т.С. Куклин, А.М. Орлова, и др. // Вестник института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2016. – №2(34). – С. 68-81.
272. Школьник, Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник / Л.М. Школьник. – М., Металлургия, 1978. – 304 с.
273. Школьник, Л.М. Скорость роста трещин и живучесть металла / Л.М. Школьник – М.: Металлургия, 1973. – 216 с.
274. Якушев, А. В. Повышение ресурса и живучести вагонных тележек / А.В. Якушев, В.П. Ефимов, В.И. Миронов.: сб. докл. третьей всерос. конф. – Комсомольск – на – Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2005. – С. 212–218.
275. Якушев, А.В. Анализ конструкций и методов расчета боковых рам тележек грузовых вагонов / А.В. Якушев, Я.О. Рузметов // Вестник ТашИИТ. – 2013. - №3/4. – С. 35-39.
276. Якушев, А.В. Метод полных диаграмм в расчетах долговечности / А.В. Якушев, В.И. Миронов // Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности: Сб. стат. XI междунар. науч.-практ. конф. // под ред. А.П.Кудинова – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С.389-390.

277. Якушев, А.В. Методические основы исследований по обоснованию увеличения протяженности гарантийных участков безопасного проследования грузовых поездов / А.В. Якушев, Ю.В. Гомонец, Я.О. Рузметов // Вестник ТашИИТ. – 2018. - №4. – С.76-84.
278. Якушев, А.В. Моделирование напряженного состояния боковых рам грузовых тележек с внутренними литейными дефектами / А.В. Якушев, А.Е. Карибжанов, Я.О. Рузметов // Поиск. Серия естественных и технических наук. – 2012. - №4(1). – С.290-294.
279. Якушев, А.В. Моделирование усталостного разрушения пластины с отверстием / А.В. Якушев, В.И. Миронов, О.А. Лукашук // Вестник УГТУ-УПИ. - 2006. -№11 (82). - С. 87-92.
280. Якушев, А.В. Об одном подходе к расчету долговечности элементов конструкций с учетом стадии развития усталостной трещины / А.В. Якушев, В.И. Миронов // Пробл. и перспективы разв. груз. вагоностроения: Материалы науч.-техн. конф.; Екатеринбург – Нижний Тагил / Под науч. ред. проф. А.В. Смольянинова – Екатеринбург: УрГУПС, 2007. – С.196-205.
281. 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.
282. 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.
283. Якушев, А.В. Прогнозирование усталостного ресурса литых деталей тележки грузового вагона: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: 05.22.07 / Якушев Алексей Вячеславович. – Екатеринбург, 2007. – 16 с.
284. 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.

285. Якушев, А.В. Проектирование установки для нестандартных испытаний на усталость / А.В. Якушев, В.И. Миронов, В.И. Микушин: науч. сб. УрГУПС. – Нижний Тагил, 2002. – №2. – С.16–21.
286. 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. Коми-ченко // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2014. - Выпуск 2 (39). – С.129-133.
287. Якушев, А.В. Структурно-феноменологические модели металлов для вагоностроения / А.В. Якушев, А.В. Смольянинов, К.М. Колясов // Транспорт Урала. – 2021. - №4 (71). – С. 18-23.
288. Якушев, А.В. Теория о деградации механических свойств литых сталей класса 20Л / А.В. Якушев // Транспорт Урала. – 2022. - №1 (72). – С. 8-14.
289. Якушев, А.В. Технология упрочнения литых боковых рам тележек грузовых вагонов с помощью наноматериалов / А.В. Якушев, А.И. Романычев, А.Ю. Арбенин // РСП Эксперт. – 2014. - №5 (61). – С. 17-19.
290. 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.
291. Якушев, А.В. Учет циклической деградации свойств материала в расчете долговечности элементов конструкций / А.В. Якушев, В.И. Миронов, О.А. Лукашук // Современные проблемы проектирования и эксплуатации транспортных и технологических систем: Тр. междунар. науч. тех. конф. - С-Петербург: Политех. универ. – 2006. - С.227-228.
292. 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.
293. Chvojan, R. Experimental methods of the GRP bogie testing / R. Chvojan, J. Vaclavik, R. Mayer // Railway Bogies and Running Gears. Proceedings of the 9th International conf. – Budapest. - 2013. - P.249-257.

294. Chvojan, R. Shaker rig test of EB25 GRP boogie / R. Chvojan, R. Jozefy, R. Mayer, etc. // *Railway Bogies and Running Gears. Proceedings of the 9th International conf. – Budapest. - 2013. - P.241-248.*
295. Griffith, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // *Philos. Trans. of Roy. Soc. of London. – 1920. – Ser. A, V. 221. – P.163-198.*
296. Gubenko, S.I., Ivanov, I.A. & Kononov, D.P. Features of Corrosive Destruction in Different Elements of Railway Wheels. *Steel Transl. 51, 400–415 (2021)*
297. Iakushev, A.V. The method for increasing operational reliability of freight bogie side frames by utilizing an internal stiffener / A.V. Iakushev, S.O. Komichenko, Y. Ling, etc. // *Railway Bogies and Running Gears. Proceedings of the 9th International conf. – Budapest. - 2013. - P.41-47.*
298. Irwin, G. Analysis of stresses and strains near the end of a crack / G. Irwin // *J. Appl. Mech. – 1957. – V. 24. #3. – P. 361-364.*
299. Kik, W. Project infra-radial – bogies for axle loads of 25t – test and simulation / W. Kik, D. Scholdan, J. Stephanides // *Rolling Stock of the XXI Century. Proceedings of Inter. conf. – Saint-Petersburg. – 2009. – P. 130-138.*
300. Kobishanov, V.V. The estimation of durability of molded side frame of freight-car bogies / V.V. Kobishanov, D.Y. Antipin // *Railway Bogies and Running Gears. Proceedings of the 9th International conf. – Budapest. - 2013. - P.241-243.*
301. Kononov D., Gubenko S., Ivanov I., Urushev S. Using fractal characteristics to analyze the development of whole-rolled wheel destruction // *MATEC Web of Conferences, Vol. 329, Article Number 02009 (2020).*
302. Kossov, V.S. A computer simulation of operation loading of freight wagon bogie side frame / V.S. Kossov, G.M. Volokhov, M.N. Ovechnikov, etc. // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2018. – Vol. 9. Iss. 13 (Dec.). – P. 791-795.*
303. Li, W. Durability analysis of wagon side frame based on the PFMA / W. Li, Q. Li, P. Wang // *Measuring technology and mechatronics automation. International conf. – Zhangjiajie, Hunan. – 2009. – P.25-32.*

304. M-203 Guidelines for Standards and Recommended Practices Association of American Railroads. Cast parts. Bogie side frames, cast – design and testing. Conditions. – Washington: Association of American Railroads, 2005. – 12 p.
305. 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.
306. 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.
307. Orowan, E.O. Fundamentals of brittle behavior in metals / E.O. Orowan // Simp. Fatigue and Fracture of Metals. – N.Y.: Willey. 1952. – P. 139-167.
308. Sabitz, L. Pre-Designing of a welded side frame and bolster of a 100t freight car three-piece bogie with respect to fatigue life / L. Sabitz, I. Zobory, E. Bekefi, etc. // Railway Bogies and Running Gears. Proceedings of 9th International conf. – Budapest. – 2013. – P.247–249.
309. Scholdan, D. Freight car bogies – design today and in the future / D. Scholdan // Rolling Stock of the XXI Century. Proceedings of Inter. conf. – Saint-Petersburg. – 2007. – P. 125-132.
310. 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 the 11th Int. scientific and practical conf. of students, postgraduates and young scientists, MTT' 2005. – Tomsk, 2005. – p.70-72.
311. Yefimov, V. P. Development of design and computation based research of bogies with increased axial loads for advanced freight cars / V. P. Yefimov, A. E. Pavlyukov, A. A. Pranov // Railway Bogies and Running Gears. Proceedings of the 5th International conf. – Budapest. – 2001. – P.37–39.
312. Zellagui, R. The Mechanical fracture of a railway bogie under cyclic loading by Ansys / R. Zellagui, A. Bellaouar, M. Lachi // MATEC Web of Conferences [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net>.

Приложение А
(справочное)

Программа расчета параметров ПДД модели материала Даниэльса
с упруго-хрупкими волокнами

Пользовательский интерфейс программы показан на рисунке А.1.

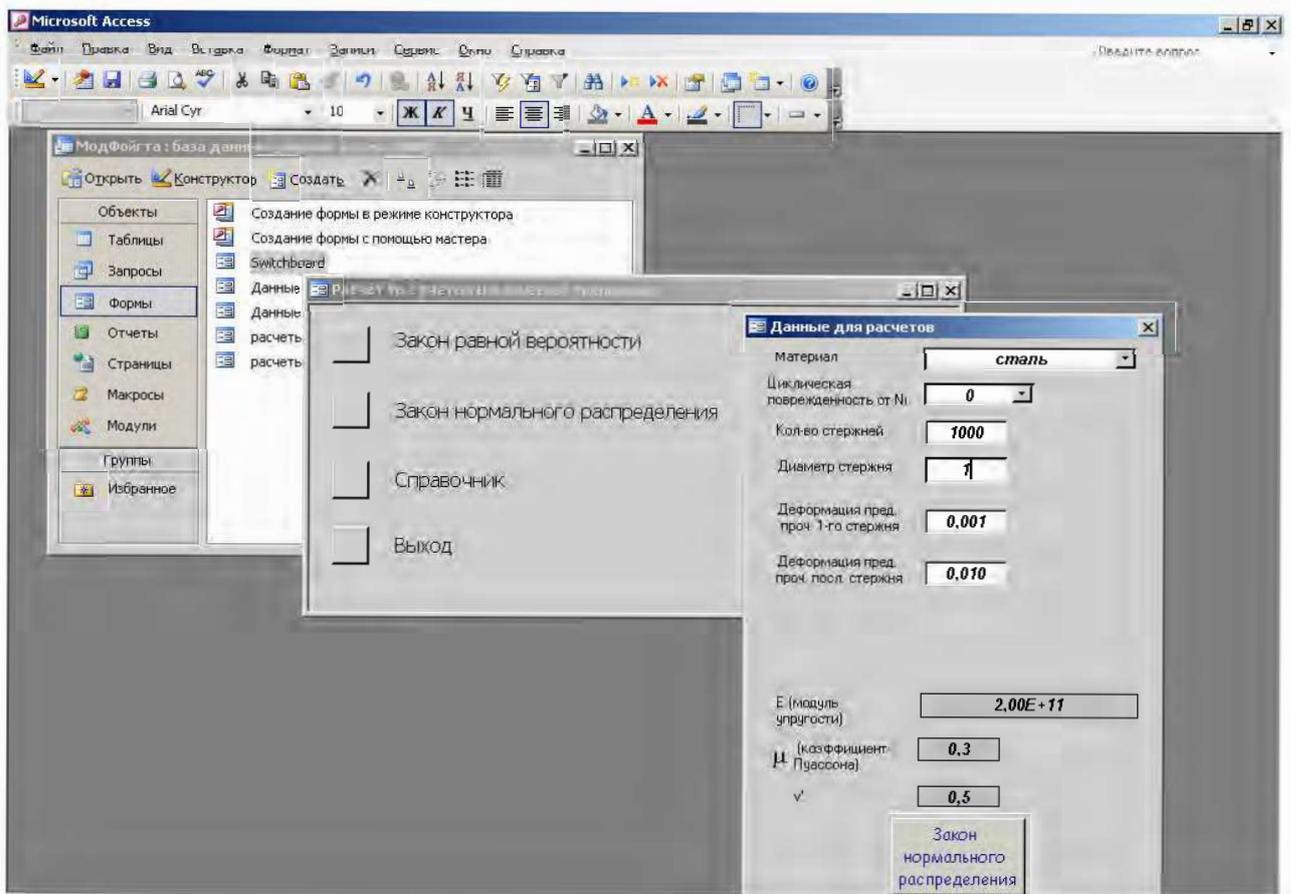


Рисунок А.1 – Формы пользовательского интерфейса

Фрагмент программного кода на языке Visual Basic for Applications (VBA) приведен ниже.

Do While n1 < Nb

alb2 = Ebb0 / Ea

If alb2 > 6 Then

alb2 = 6

End If

zb2 = Nb ^ alb2

Eb1 = Eb10 - ((Ebb0 - Ea) / zb2) * (n1 ^ alb2)

$$E_{bb} = E_{bb0} - ((E_{bb0} - E_a) / z_{b2}) * (n_1 \wedge a_{lb2})$$

$$e_{bi} = E_{bl}$$

$$x_{spt} = (E_{bl} + E_{bb}) / 2$$

$$G_{dt} = (E_{bb} - E_{bl}) / 6$$

If $E_{bl} \leq E_a$ Then

$$a_l = E_{bl}$$

$$b = E_a$$

$$t_1 = (a_l - x_{spt}) / G_{dt}$$

$$t_2 = (b - x_{spt}) / G_{dt}$$

If $t_1 > 0$ Then

$$ft_1 = \text{integral}(t_1)$$

Else

$$ft_1 = -\text{integral}(t_1)$$

End If

If $t_2 > 0$ Then

$$ft_2 = \text{integral}(t_2)$$

Else

$$ft_2 = -\text{integral}(t_2)$$

End If

$$k_1 = \text{Round}((ft_2 - ft_1) * m, 2)$$

$$m_1 = m - k_1$$

End If

$$d_{eb} = (E_{bb} - E_{bl}) / (m_1 - 1)$$

$$\text{sum}_k = 0$$

$$k = 0$$

$$n = m_1$$

$$P = (E * e_{bi} * n) / m$$

$$a_0 = m \wedge 0.5 * d_0$$

$$d_2 = d_0 * (1 - \mu * e_{bi})$$

$$f = (n * d_2 * d_2) + (k_1 * d_0 * d_0)$$

$$a = f \wedge 0.5$$

$$e_2 = (a_0 - a) / a_0$$

$$'V = e_2 / e_{bi}$$

$$'E_u = P / e_{bi}$$

Приложение Б
(справочное)

Программа расчета параметров ПДД модели материала Мазинга
с упругопластическими волокнами

Пользовательский интерфейс программы показан на рисунке Б.1.

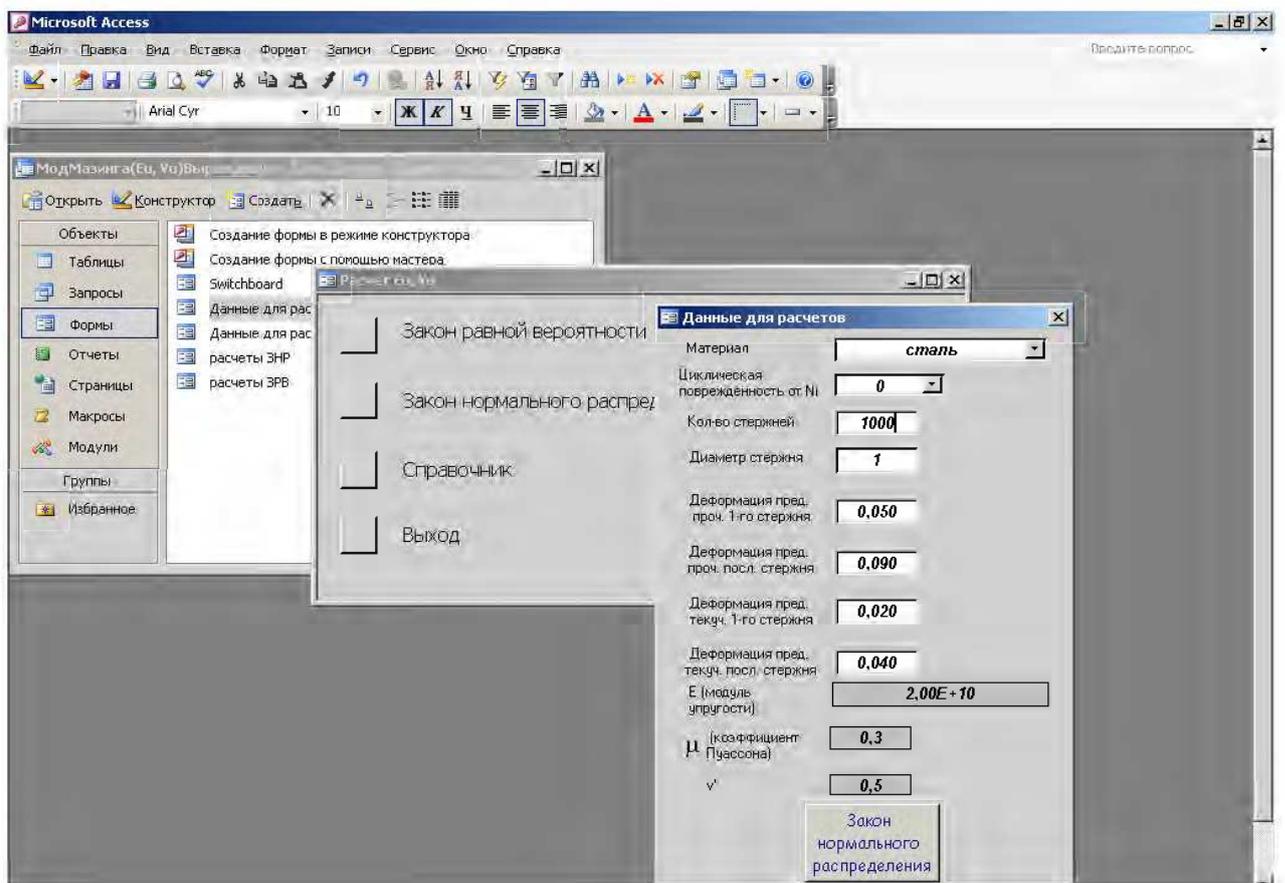


Рисунок Б.1 – Формы пользовательского интерфейса

Фрагмент программного кода на языке Visual Basic for Applications (VBA) приведен ниже.

```

Do While n1 < Nb
alb = Ebb0 / Ea
  If alb > 6 Then
    alb = 6
  End If
zb = Nb ^ alb

```

```

Etl = Etl0 - ((Etb0 - Etl0) / zb) * (n1 ^ alb)
Etb = Etb0 - ((Etb0 - Etl0) / zb) * (n1 ^ alb)
Ebl = Ebl0 - ((Ebb0 - Ebl0) / zb) * (n1 ^ alb)
Ebb = Ebb0 - ((Ebb0 - Ebl0) / zb) * (n1 ^ alb)
eti = Etl
xspt = (Etl + Etb) / 2
Gdt = (Etb - Etl) / 6
  If Etl <= Ea Then
    al = Etl
    b = Ea
    t1 = (al - xspt) / Gdt
    t2 = (b - xspt) / Gdt
    If t1 > 0 Then
      ft1 = integral(t1)
    Else
      ft1 = -integral(t1)
    End If
    If t2 > 0 Then
      ft2 = integral(t2)
    Else
      ft2 = -integral(t2)
    End If
    k1 = Round((ft2 - ft1) * m, 2)
    m1 = m - k1
  End If
det = (Etb - Etl) / (m1 - 1)
deb = (Ebb - Ebl) / (m1 - 1)
sumGt = 0
sumk = 0
k = 0
n = m1
a0 = m ^ 0.5 * d0

```

Приложение В (справочное)

Программа расчета параметров ПДР модели материала Миронова-Якушева с упруго разупрочняющимися волокнами

Пользовательский интерфейс программы показан на рисунке В.1.

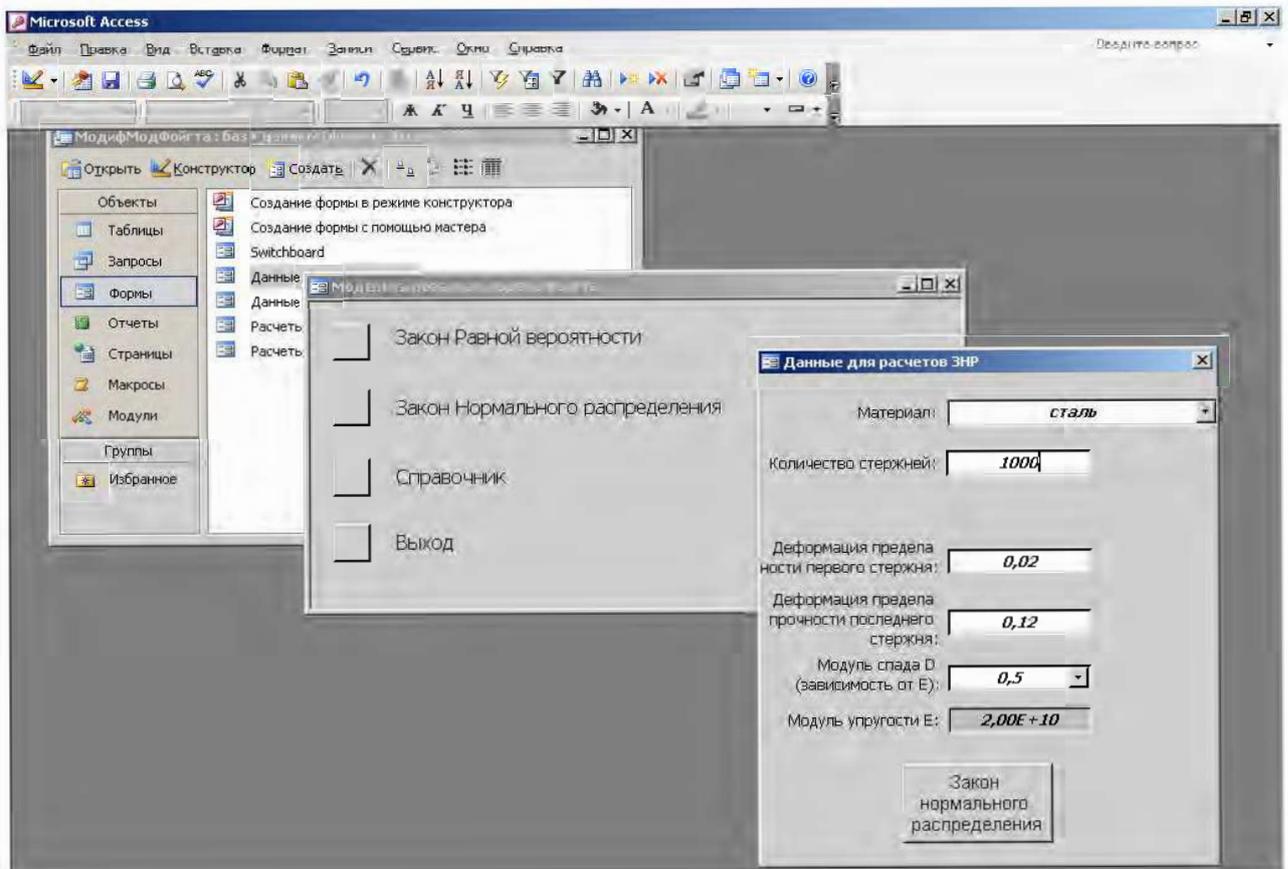


Рисунок В.1 - Формы пользовательского интерфейса

Фрагмент программного кода на языке Visual Basic for Applications (VBA) приведен ниже.

```

Do While eti <= Ebb
sumG = 0
sumf = 0
sumk = 0
ebi = Ebl
ebri = Erl

```

```

Do While ebi < eti
  Gb = E * ebi
  de = eti - ebi
  G = Gb - Dp * de
  al = ebi
  b = ebi + deb
  t1 = (al - xspb) / Gdb
  t2 = (b - xspb) / Gdb
  If t1 > 0 Then
    ft1 = integral(t1)
  Else
    ft1 = -integral(t1)
  End If
  If t2 > 0 Then
    ft2 = integral(t2)
  Else
    ft2 = -integral(t2)
  End If
  If G > 0 Then
    k = Round((ft2 - ft1) * m1, 2) 'стержней на падающей ветви
    sumk = sumk + k
    sumG = sumG + k * G
    d2 = d0 * (1 - 0.3 * D * (ebri - eti))
    sumf = sumf + k * (d2 ^ 2)
  End If
  If eti >= ebr Then
    al = ebr
    b = etr
    t1 = (al - xspr) / Gdr
    t2 = (b - xspr) / Gdr
    If t1 > 0 Then
      ft1 = integral(t1)
    Else
      ft1 = -integral(t1)
    End If
  End If

```

```

    If t2 > 0 Then
        ft2 = integral(t2)
    Else
        ft2 = -integral(t2)
    End If
    k1 = Round((ft2 - ft1) * m1, 2)
    sumk1 = sumk1 + k1 * (d0 ^ 2)
    etr = etr + der
    ebr = ebr + der
End If
ebi = ebi + deb
ebri = ebri + der
Loop
p2 = ((m1 - sumk1 - sumk) * E * eti + sumG) / n
d1 = d0 * (1 - 0.3 * eti)
f = (m1 - sumk1 - sumk) * (d1 ^ 2) + sumf + sumk1 'm * (d1 ^ 2) + sumf + sumk1 ' * d0 ^ 2 ' + k2 *
d0 ^ 2 'sumf
a = f ^ 0.5
e2 = (a0 - a) / a0
Vu = e2 / eti
Eu = p2 / eti
Ep = (p2 - p1) / deb
Vp = (e2 / deb) - (e1 / deb)
    DoCmd.GoToRecord acDataForm, "Расчеты ЗНП", acNewRec
    Forms![Расчеты ЗНП]![eps] = eti
    Forms![Расчеты ЗНП]![p] = p2
    Forms![Расчеты ЗНП]![E] = Vp / Vp1 ' Ep / Ep1 'Vu / Vu1 'Eu / E ' dg ' / dg1 ' Ku / Ku1 ' Kp /
Kp1 ' Kq / Kq1 'Vu "
    eti = eti + deb
    e1 = e2
    p1 = p2
Loop

```

Приложение Г (справочное)

Программа расчета усталостной долговечности пластины с отверстием методами континуальной механики при силовом подходе

Пользовательский интерфейс программы показан на рисунке Д.1.

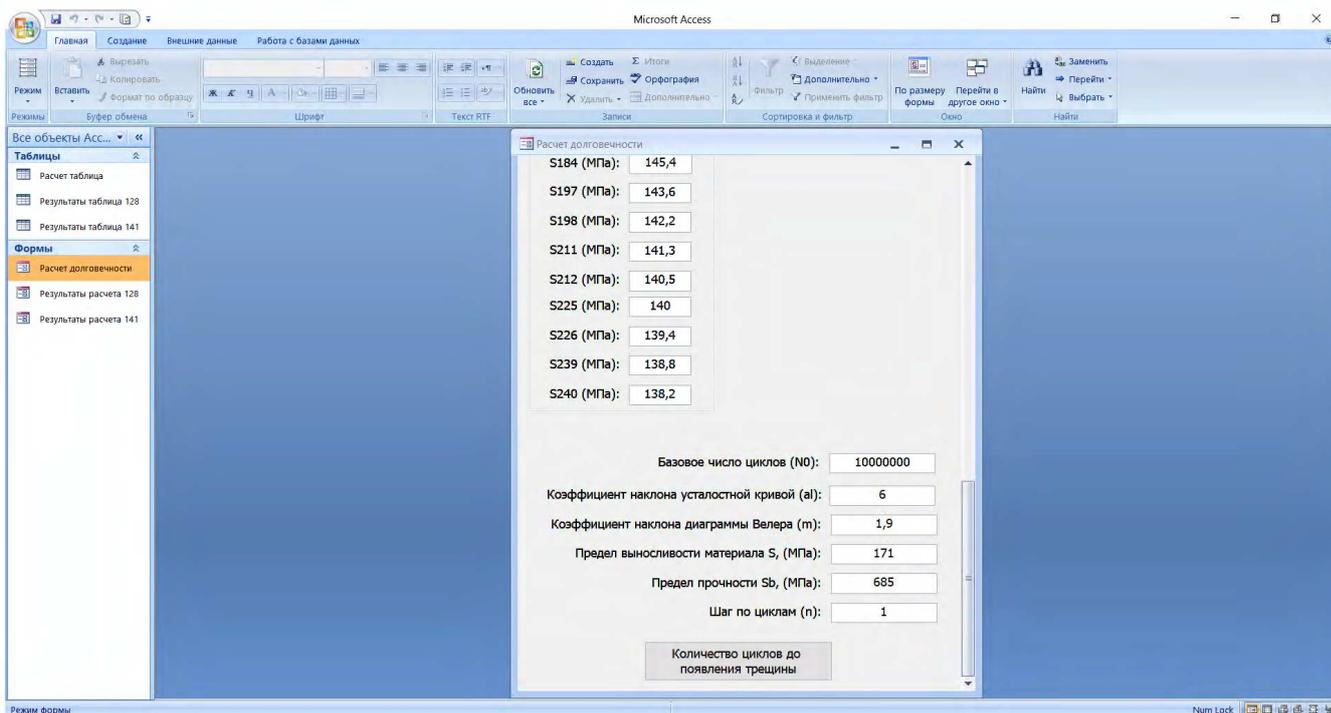


Рисунок Д.1 - Форма ввода исходных данных с кнопкой запуска на расчет

Таблицы вывода результатов расчетов приведены на рисунке Д.2.

Рисунки Д.1 и Д.2 являются скриншотами программного интерфейса Microsoft Access. Рисунки Д.1 и Д.2 являются скриншотами программного интерфейса Microsoft Access. Рисунки Д.1 и Д.2 являются скриншотами программного интерфейса Microsoft Access.

Рисунок Д.2 – Таблицы вывода результатов расчетов

Фрагмент программного кода на языке Visual Basic for Applications (VBA) приведен ниже.

```

Do 'While k < 2122 'dn < n + 0.0001 / 10000 'k = 0 '
  If k > 0 Then ' включить если не нужны все результаты
  N1 = A / S1 ^ al
  'При первом расчете выражение nj1 > 0 заменить на nj1 = 0
  If nj1 = 0 Then
    b = (nj1 + dn) ^ m
    c = (Sb - S1) * b
    d = c / N1 ^ m
    SS1 = Sb - d
    If SS1 < S1 Then
      Exit Do
    End If
  End If
  N2 = A / S2 ^ al
  If nj2 = 0 Then
    b = (nj2 + dn) ^ m
    c = (Sb - S2) * b
    d = c / N2 ^ m
    SS2 = Sb - d
    If SS2 < S2 Then
      Exit Do
    End If
  End If
  N15 = A / S15 ^ al
  If nj15 = 0 Then
    b = (nj15 + dn) ^ m
    c = (Sb - S15) * b
    d = c / N15 ^ m
    SS15 = Sb - d
    If SS15 < S15 Then
      Exit Do
    End If
  End If
End If

```

Приложение Д (справочное)

Программа расчета усталостной долговечности пластины с отверстием методами механики разрушений при деградации коэффициентов интенсивности напряжений

Пользовательский интерфейс программы показан на рисунке Е.1.

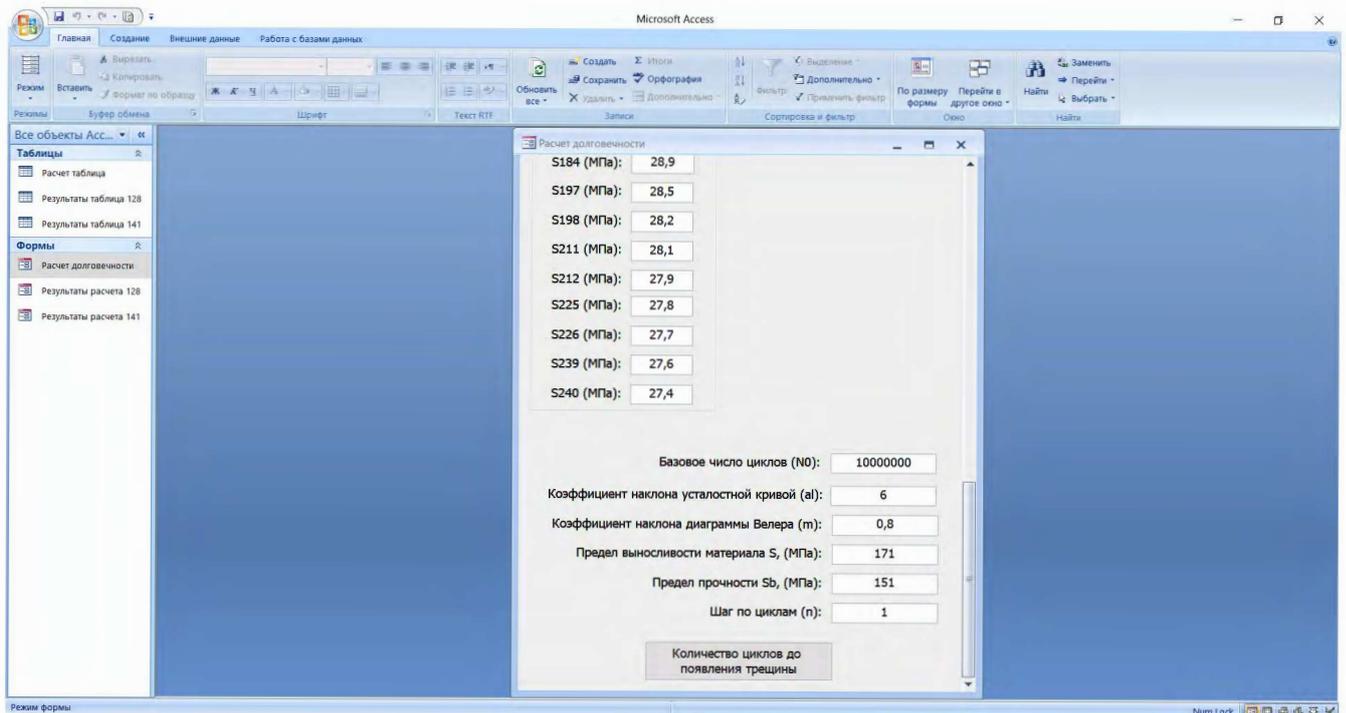


Рисунок Е.1 - Форма ввода исходных данных с кнопкой запуска на расчет

Фрагмент программного кода на языке Visual Basic for Applications (VBA) приведен ниже.

```

Do 'While dn < n + 0.0001 / 10000 'k = 0 '
If k > 0 Then 'выключить при расчетах всех элементов
N1 = A / S1 ^ a1
'При первом расчете выражение nj1 > 0 заменить на nj1 = 0
If nj1 = 0 Then
b = (nj1 + dn) ^ m
c = (1 - 0.272) * Sb * b
d = c / N1 ^ m

```

```

SS1 = Sb - d
  If SS1 < S1 Then
    Exit Do
  End If
End If
N2 = A / S2 ^ al
  If nj2 = 0 Then
    b = (nj2 + dn) ^ m
    c = (1 - 0.272) * Sb * b
    d = c / N2 ^ m
    SS2 = Sb - d
    If SS2 < S2 Then
      Exit Do
    End If
  End If
N15 = A / S15 ^ al
  If nj15 = 0 Then
    b = (nj15 + dn) ^ m
    c = (1 - 0.272) * Sb * b
    d = c / N15 ^ m
    SS15 = Sb - d
    If SS15 < S15 Then
      Exit Do
    End If
  End If
N16 = A / S16 ^ al
  If nj16 = 0 Then
    b = (nj16 + dn) ^ m
    c = (1 - 0.272) * Sb * b
    d = c / N16 ^ m
    SS16 = Sb - d
    If SS16 < S16 Then
      Exit Do
    End If
  End If

```

Приложение Е
(справочное)

Описание изобретения к патенту
«Устройство и способ для испытания образцов материалов на растяжение»
и акт об использовании

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 251 676** (13) **С1**(51) МПК
G01N 3/08 (2000.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**(21)(22) Заявка: **2003130046/28**, 09.10.2003(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.10.2003(45) Опубликовано: **10.05.2005** Бюл. № 13(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: SU 905707 A1, 15.02.1982. SU 678383
A1, 05.08.1979. RU 2097734 C1, 27.11.1997.
RU 2091743 C1, 27.09.1997. US 3916681 A,
04.11.1975.

Адрес для переписки:

**622051, Свердловская обл., г. Нижний Та-
гил, Восточное ш., 28, ФГУП "ПО"Уралва-
гонзавод"**

(72) Автор(ы):

**Миронов В.И. (RU),
Андронов В.А. (RU),
Якушев А.В. (RU),
Бамбулевич В.Б. (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

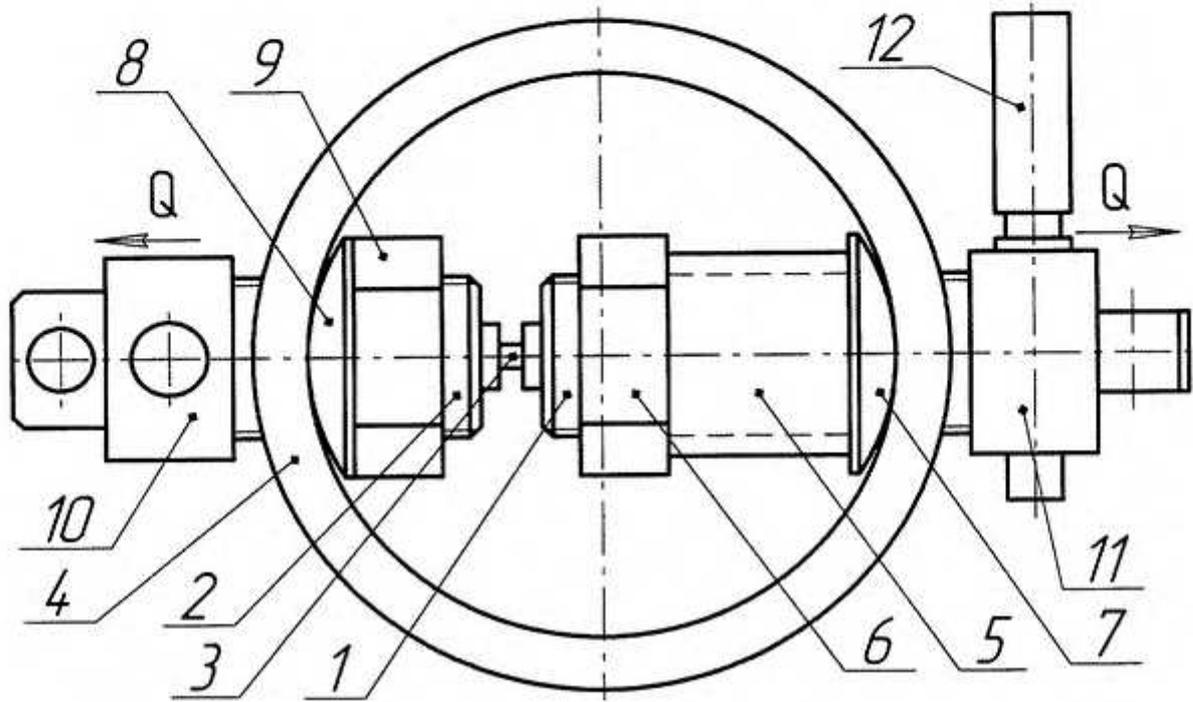
**Федеральное государственное унитарное
предприятие "Производственное объеди-
нение "Уралвагонзавод" им. Ф.Э. Дзер-
жинского (RU)**

(54) **УСТРОЙСТВО И СПОСОБ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к испытательной технике. Устройство для испытания образцов материалов на растяжение состоит из элемента повышенной жесткости системы нагружения зоны локализации деформации, внутри которого расположены самоцентрирующиеся захваты с резьбой для крепления образца и системы сбора и обработки информации. Система сбора и обработки информации содержит мессдозу, а элемент повышенной жесткости системы нагружения выполнен в виде кольца, изготовленного из пружинной стали, установленного между упорами на захватах (внутри и снаружи кольца). Устройство выполнено переносным. Сущность способа испытания образцов материалов на растяжение: образец растягивают монотонно возрастающим усилием до разрушения. Усилие монотонно снижают до достижения нуля в момент совпадения величины деформации образца с максимально возможной остаточной деформацией материала и фиксируют деформацию в процессе растяжения с построением полной диаграммы деформирования. Построение полной диаграммы

деформирования осуществляется при помощи устройства, повышающего жесткость системы нагружения зоны локализации деформации, в котором с момента начала растяжения происходит квазистатическое деформирование образца и растягивающее усилие на нем снижается, обеспечивая равновесное деформирование образца на стадии разупрочнения, а предварительно поджатая мессдоза в системе сбора и обработки информации, растягиваясь, фиксирует изменение силы растяжения, прикладываемой к образцу. Технический результат: повышение достоверности испытаний. 2 с.п. ф-лы, 3 ил.



Фиг. 1

Испытания материалов с построением полностью равновесных диаграмм деформирования имеют большую информативность по сравнению со стандартными испытаниями. Они дают логически завершённое представление о сопротивлении материала деформированию, в полной мере отражая происходящие в нем физические процессы, вскрывая резерв несущей способности. Испытания показывают, что предельное состояние разрушения материала определяется как собственно его свойствами, так и условиями нагружения, в чем нетрудно убедиться, испытывая образцы с разной степенью структурной неоднородности и разной длины. Модуль спада, определяющий крутизну падающей ветви полной диаграммы деформирования, как известно, тесно коррелирует с трещиностойкостью материала. Проводя периодические разгрузки, можно найти дефект модуля упругости, определяющий степень деструкции (разрыхления) материала, и т.д.

Изобретения относятся к испытательной технике, преимущественно к статическим испытаниям материалов на растяжение во всем диапазоне деформирования, и могут быть использованы для изучения реологически неустойчивого состояния материала (зоны разупрочнения) при растяжении.

Известна установка для определения механических свойств материала на стадии разупрочнения (Миронов В.И., Микушин В.И., Владимиров А.П. и др.// Завод. Лаборатория, 2001, т. 67, №3. - с.48-51). Она содержит неподвижные и подвижные платформы, направляющие стержни, скрепляющие стержни, элемент повышенной жесткости системы нагружения непосредственно в зоне образца, состоящий из двух горизонтальных упругих балок и двух вертикальных стержней, внутри которого расположены самоцентрирующиеся захваты с резьбой для крепления образца, полый дюралюминиевый стержень или

динамометр ДОСМ-3-1, нажимной винт, червячный редуктор, на нижнем захвате наклеен тензометрический мост, систему сбора и обработки информации. Эта установка наиболее близка по технической сути к предлагаемому устройству и выбрана в качестве прототипа.

К недостаткам известной установки относятся:

1. Применение устройства повышенной жесткости возможно только вместе с установкой из-за того, что оно является составляющей частью установки, не позволяющей производить нагружение с помощью другого испытательного оборудования на растяжение и тем более прессов, работающих на сжатие.
2. Перекос образца из-за одновременного включения параллельных тяг, затрудняющий обеспечение одноосного растяжения образца.
3. Малый диапазон деформаций при включенных тягах из-за небольшой упругой деформации тяг в направлении оси растяжения, не обеспечивающий равновесное деформирование образца из достаточно пластичного материала.

Известен способ испытания образцов материалов на растяжение (пат. РФ №4034709/25-28, класс G 01 N 3/08, опубл. 23.02.88, Бюл. №7), при котором образец растягивают монотонно возрастающим усилием до разрушения, после достижения на образце деформации, соответствующей пределу прочности материала, усилие на нем монотонно снижают до достижения нуля в момент совпадения величины деформации образца с максимально возможной остаточной деформацией материала и фиксируют деформацию в процессе растяжения с построением полной диаграммы деформирования

Недостатки такого способа:

1. Необходимость замены разгружающего механизма при испытаниях образцов из различных материалов, т.к. в противном случае построение полной диаграммы деформирования не удастся из-за несоответствия жесткости разгружающего механизма с характеристиками: деформация, соответствующая пределу прочности материала; максимальное суммарное усилие на образец; максимально возможная остаточная деформация материала.
2. Деформирование в зоне разупрочнения происходит монотонно снижающейся нагрузкой, из-за чего стандартный образец может разрушиться в любой момент, т.к. для построения полной диаграммы деформирования растяжение образца в зоне разупрочнения должно быть квазистатическим (бесконечно медленным).
3. Требуется создать в системе нагружения большое растягивающее усилие из-за применения стандартных образцов и дополнительного разгружающего механизма, не позволяющее при испытаниях применять менее мощные и габаритные испытательные установки и прессы.

Предлагаемыми изобретениями решается задача: изучение процесса разрушения путем обеспечения равновесного деформирования материала в зоне реологической неустойчивости (разупрочнения) более простым способом, чем известный. При этом достигается следующий технический результат: построение полной диаграммы деформирования с помощью жесткой системы нагружения зоны локализации деформации.

Для получения такого технического результата в предлагаемом устройстве для испытания образцов материалов на растяжение, содержащем элемент повышенной жесткости системы нагружения зоны локализации деформации, внутри которого расположены самоцентрирующиеся захваты с резьбой для крепления образца, систему сбора и обработки информации, которая содержит мессдозу, элемент повышенной жесткости системы нагружения выполнен в виде кольца, изготовленного из пружинной стали, установленного между упорами на захватах (внутри и снаружи), при этом устройство выполнено переносным.

Отличительными признаками предлагаемого устройства является то, что система сбора и обработки информации содержит мессдозу, а элемент повышенной жесткости системы нагружения выполнен в виде кольца, изготовленного из пружинной стали, установленного между упорами на захватах (внутри и снаружи), при этом устройство выполнено переносным.

При этом значительно упрощается конструкция, т.к. отсутствует оригинальная установка для нагружения образца; создается возможность производить нагружение с помощью любого испытательного оборудования на растяжение, а также прессов, работающих на сжатие. Элемент повышенной жесткости системы нагружения образца выполнен в виде кольца, изготовленного из пружинной стали, что обеспечивает одноосное растяжение образца и приводит к повышению качества испытаний и снижению трудоемкости при изготовлении, а также при проведении испытаний. Увеличивается диапазон деформаций в направлении оси растяжения за счет применения элемента повышенной жесткости в виде кольца, изготовленного из пружинной стали, что обеспечивает равновесное деформирование образца из достаточно пластичного материала.

Для достижения названного технического результата предлагается способ испытания образцов материалов на растяжение, который, как и наиболее близкий к нему известный, включает то, что образец растягивают монотонно возрастающим усилием до разрушения, усилие монотонно снижают до достижения нуля в момент совпадения величины деформации образца с максимально возможной остаточной деформацией материала и фиксируют деформацию в процессе растяжения с построением полной диаграммы деформирования, но построение полной диаграммы деформирования осуществляется при помощи устройства, повышающего жесткость системы нагружения зоны локализации деформации, в котором с момента начала растяжения происходит квазистатическое деформирование образца и растягивающее усилие на нем снижается.

Отличительными признаками предлагаемого способа является то, что построение полной диаграммы деформирования осуществляется при помощи устройства, повышающего жесткость системы нагружения зоны локализации деформации, в котором с момента начала растяжения происходит квазистатическое деформирование образца и растягивающее усилие на нем снижается.

Это обеспечивает устойчивое квазистатическое деформирование образцов из различных материалов с построением полной диаграммы деформирования из-за достаточно большой жесткости элемента повышенной жесткости системы нагружения зоны локализации деформации. Создается небольшое растягивающее усилие в системе нагружения из-за применения однократных микрообразцов, что приводит к применению менее мощного и габаритного испытательного оборудования на растяжение, а также прессов, работающих на сжатие.

Предлагаемые изобретения иллюстрируются чертежами, на которых изображены:

на фиг.1 - устройство для испытания образцов материалов на растяжение с помощью испытательного оборудования на растяжение;

на фиг.2 - устройство для испытания образцов материалов на растяжение с помощью прессов, работающих на сжатие;

на фиг.3 - способ испытания на растяжение.

Устройство состоит из самоцентрирующихся цилиндрических захватов (фиг.1) поз. 1, 2, в которые вкручивается однократный микрообразец поз.3. Захваты поз. 1, 2 расположены внутри кольца поз.4, выполненного из пружинной стали, на один из захватов устанавливается мессдоза поз. 5 для измерения усилия на образце, предварительно поджатая гайкой поз.6 к буртику поз.7 цилиндрического захвата. На захват поз.2 устанавливается шайба поз.8 и поджимается гайкой поз.9. В первом исполнении (фиг.1) устройство имеет захваты поз. 10, 11 для разрывной испытательной машины, фиксируемые с захватами для крепления образца штырями поз. 12. Удлинение образца измеряется тензометром вилочного типа. При проведении испытаний на прессе захваты поз. 10, 11 снимаются, на концы захватов поз. 1, 2 для крепления образца накручиваются гайки поз. 13, 14 (фиг.2) с шайбами поз. 15, 16.

Принцип работы кольцевого нагружающего устройства заключается в следующем.

В первом варианте исполнения при приложении растягивающего усилия Q через захваты поз. 10, 11 (фиг.1) происходит деформирование кольца поз.4, а параллельно с ним и

образца поз.3. При растяжении предварительно поджатая мессдоза поз.5 фиксирует с помощью специальной аппаратуры изменение силы растяжения, прикладываемой к образцу. Во втором варианте исполнения испытания проводятся на прессе путем приложения сжимающего усилия P к упругому кольцу поз.4 (фиг.2) перпендикулярно направлению растяжения образца. В остальном принцип работы и система измерения данных те же, что и в первом варианте.

Предлагаемый способ испытания образцов материалов на растяжение осуществляется следующим образом.

Для более устойчивого протекания квазистатического деформирования образца с построением полной диаграммы деформирования, а также увеличения жесткости и создания небольших растягивающих усилий в системе нагружения, построение полной диаграммы деформирования следует осуществлять при помощи устройства, повышающего жесткость системы нагружения зоны локализации деформации, в котором с момента начала растяжения происходит квазистатическое деформирование образца и растягивающее усилие на нем снижается.

Пример. Требуется изучить процесс разрушения путем равновесного деформирования материала (по предлагаемому устройству) в зоне реологической неустойчивости. Если образец растягивать монотонно возрастающим усилием до разрушения и фиксировать деформации в процессе растяжения, после достижения на образце деформации, соответствующей пределу прочности материала, усилие на нем монотонно снижать до достижения нуля в момент совпадения величины деформации образца с максимально возможной остаточной деформацией материала, то для достижения результата понадобится по табличным данным или стандартным испытаниям материала определить: деформацию, соответствующую пределу прочности материала Δl_u , максимальное суммарное усилие на образец Δl_r , максимально возможную остаточную деформацию материала $F_{\text{так}}$; выбрать жесткость разгружающего механизма, произвести растяжение стандартного образца монотонно возрастающим усилием, после достижения на образце деформации Δl_u (и соответственно усилия F_{max}) включается в работу разгружающий механизм, который создает в образце усилие S , монотонно возрастающее по мере дальнейшего деформирования образца, а суммарное усилие F на образец уменьшается, т.к. $F=Q-S$. В момент достижения на образце деформации Δl_r наступает разрушение образца, а усилие F на нем уменьшается до нуля. По полученным данным строится полная диаграмма напряжение - деформация вплоть до полного его разрушения.

По предлагаемому способу построение полной диаграммы деформирования следует осуществлять при помощи устройства, повышающего жесткость системы нагружения зоны локализации деформации, в котором с момента начала растяжения происходит квазистатическое деформирование образца и растягивающее усилие на нем снижается, т.е. обеспечивается устойчивое протекание квазистатического деформирования образца с построением полной диаграммы деформирования, а также увеличивается жесткость системы нагружения.

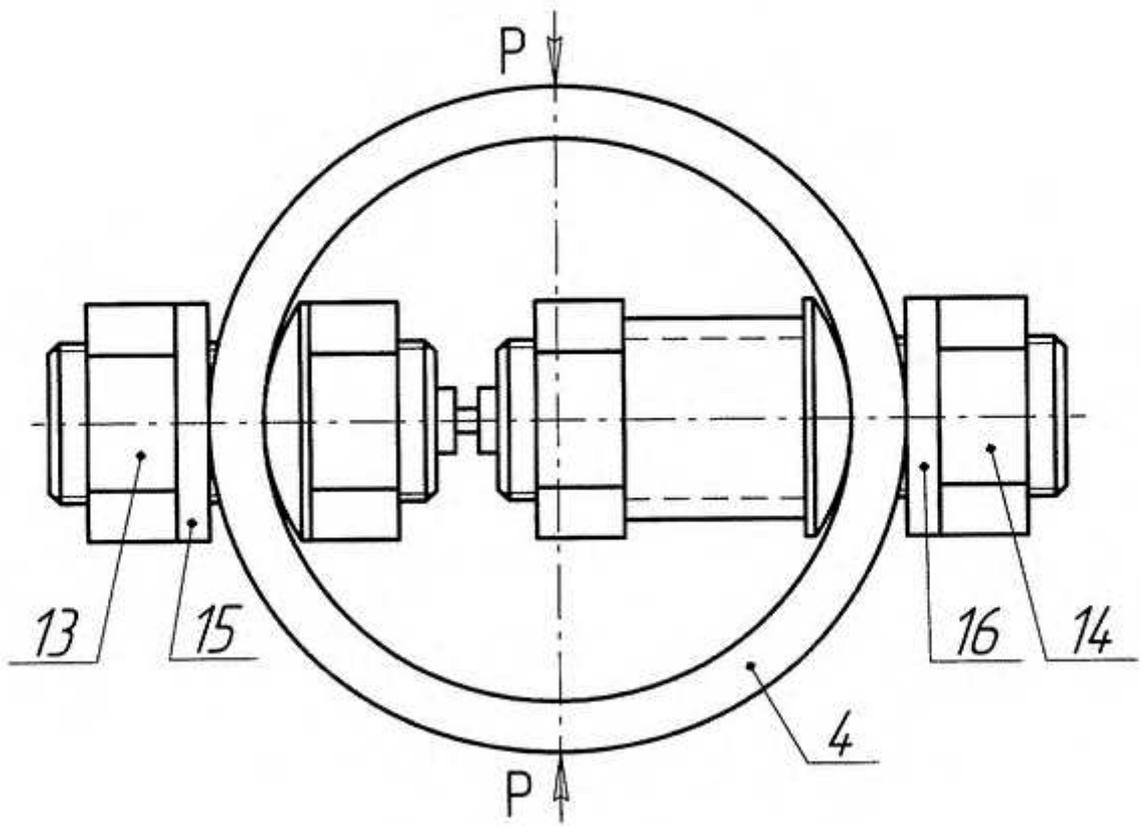
Из всего вышеописанного следует, что задача изучения процесса разрушения путем обеспечения равновесного деформирования материала в зоне реологической неустойчивости (разупрочнения) решена. При этом значительно упростилась конструкция устройства, повысилась качество испытаний и снизилась трудоемкость при изготовлении, а также при проведении испытаний обеспечивается равновесное деформирование образца из достаточно пластичного материала, следовательно, существует возможность изучения процесса разрушения и обеспечивается равновесное деформирование образца в зоне реологической неустойчивости.

Предлагаемые изобретения просты, надежны, экономичны, пригодны для широкого использования в испытательной технике.

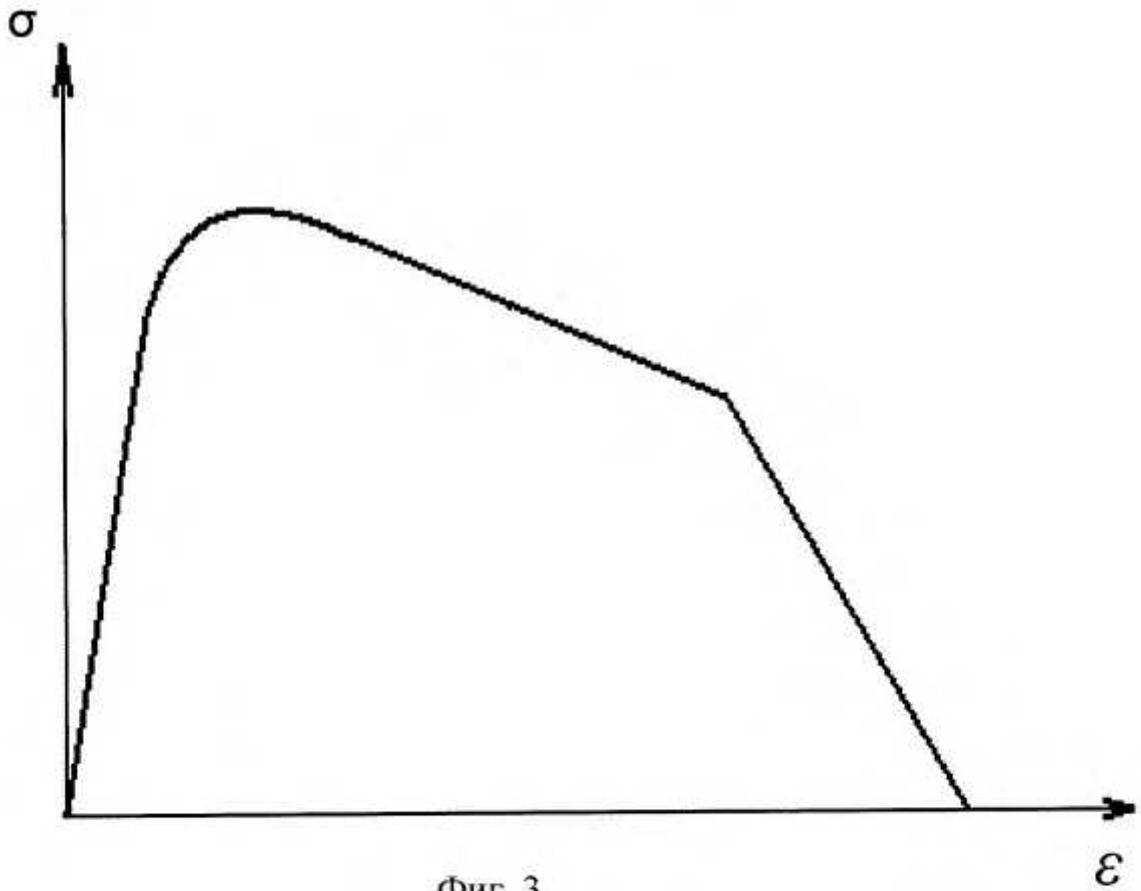
Формула изобретения

1. Устройство для испытания образцов материалов на растяжение, содержащее элемент повышенной жесткости системы нагружения зоны локализации деформации, внутри которого расположены самоцентрирующиеся захваты с резьбой для крепления образца, систему сбора и обработки информации, отличающееся тем, что система сбора и обработки информации содержит мессдозу, а элемент повышенной жесткости системы нагружения выполнен в виде кольца, изготовленного из пружинной стали, установленного между упорами на захватах (внутри и снаружи кольца), при этом устройство выполнено переносным.

2. Способ испытания образцов материалов на растяжение, заключающийся в том, что образец растягивают монотонно возрастающим усилием до разрушения, усилие монотонно снижают до достижения нуля в момент совпадения величины деформации образца с максимально возможной остаточной деформацией материала и фиксируют деформацию в процессе растяжения с построением полной диаграммы деформирования, отличающийся тем, что построение полной диаграммы деформирования осуществляется при помощи устройства, повышающего жесткость системы нагружения зоны локализации деформации, в котором с момента начала растяжения происходит квазистатическое деформирование образца и растягивающее усилие на нем снижается, обеспечивая равновесное деформирование образца на стадии разупрочнения, а предварительно поджатая мессдоза в системе сбора и обработки информации, растягиваясь, фиксирует изменение силы растяжения, прикладываемой к образцу.



Фиг. 2



Фиг. 3

Приложение № 2

Типовая межведомственная форма Р-2



АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

изобретения, полезной модели, промышленного образца

Номер патента 2251676

Название Устройство и способ для измерения образцов мате-
(изобретения, полезной модели, промышленного образца)
риалов на растительные

авторов Мельников В.И., Андронов В.А., Куршев А.В., Бабай-
цев В.Б.

использовано с «20» мая 2005 г. УММ-35, лаборатория
(цех/отдел, где используется)
механических испытаний отдела СДУ

в соответствии с формулой изобретения, полезной модели, в соответствии со всеми суще-
 ственными признаками промышленного образца (необходимое подчеркнуть).

Ответственность за дальнейшее использование возлагается на
Куршева А.В., который в случае прекращения использования изобретения,
 полезной модели, промышленного образца обязан поставить в известность исполнителя
 по БРИЗу в течение пяти дней.

Начальник цеха/отдела

[Подпись]
(подпись, дата)

Шванский
(ф.и.о.)

Исполнитель по БРИЗу
цеха/отдела

- Вур
(подпись, дата)

Вурмширова Н. П.
(ф.и.о.)

Ответственный за
использование

[Подпись]
(подпись, дата)

Куршев А.В.
(ф.и.о.)

Приложение Ж
(справочное)

Описание полезной модели «Боковая рама тележки железнодорожного вагона»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **144 455** (13) **U1**

(51) МПК
B61F 5/00 (2006.01)
B61F 5/52 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: **2014111616/11**, **25.03.2014**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.03.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **25.03.2014**

(45) Опубликовано: **20.08.2014** Бюл. № **23**

Адрес для переписки:

**188643, Ленинградская обл., г. Всеволожск,
ул. Заводская, 8, лит. Б, ООО "СтройАтом-
Проект-Т"**

(72) Автор(ы):

**Якушев Алексей Вячеславович (RU),
Глебов Сергей Михайлович (RU),
Иванов Вячеслав Анатольевич (RU),
Корнилов Николай Алексеевич (RU),
Носов Игорь Юрьевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью "СтройАтомПроект-Т" (RU)

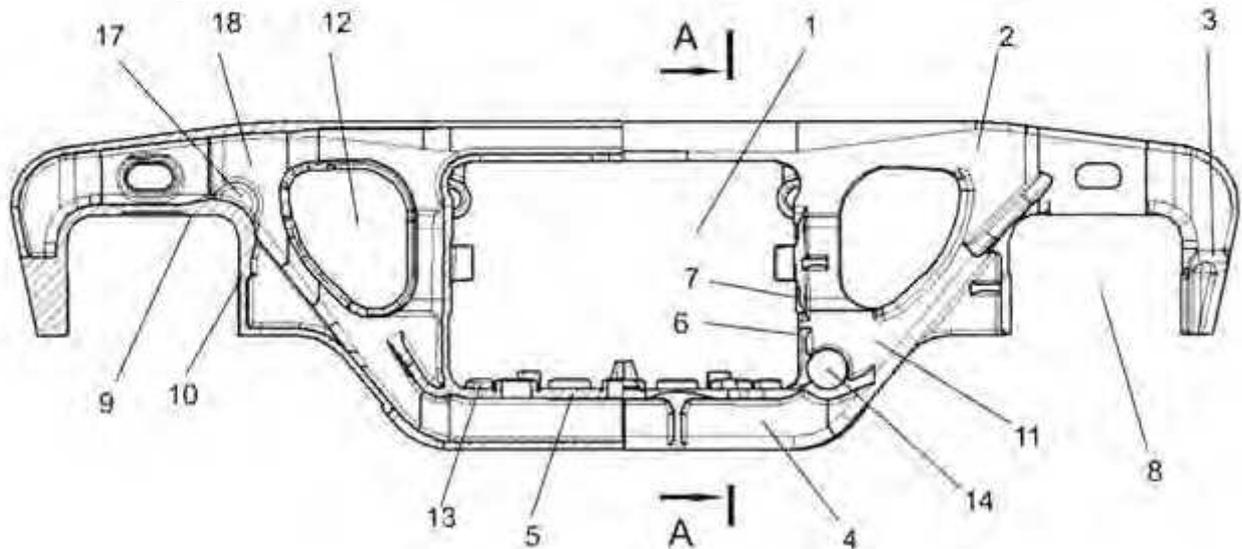
(54) **БОКОВАЯ РАМА ТЕЛЕЖКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА**

(57) Реферат:

1. Боковая рама тележки железнодорожного вагона, содержащая рессорный проем для рессорного комплекта, образованный верхним поясом с консольными частями, образующими внешние челюсти, нижним поясом замкнутого сечения с опорной площадкой для рессорного комплекта и вертикальными стенками с площадкой для крепления фрикционной планки, соединяющими верхний пояс и нижний пояс, буксовые проемы для буксовых узлов колесных пар, образованные внешними челюстями, опорными поверхностями верхнего пояса, а также внутренними челюстями, соединенными с наклонными поясами, при этом вертикальные стенки рессорного проема для рессорного комплекта, наклонные пояса и верхний пояс образуют симметрично расположенные относительно поперечной оси рамы отверстия, имеющие треугольную форму, при этом в нижних углах рессорного проема для рессорного комплекта имеются буртики для фиксации положения подклиновых пружин рессорного комплекта, не сопряженные с радиусом перехода опорной площадки в вертикальные стенки, первые и вторые приливы металла, первые приливы выполнены на боковой стенке внешней стороны боковой рамы, отличающаяся тем, что вторые приливы металла выполнены в зонах внутренних углов челюстных проемов, а толщина вертикальных стенок нижнего пояса в 1,5-2 раза больше толщины нижней горизонтальной стенки с плавным переходом до номинальных толщин стенок наклонных поясов от пересечения нижнего пояса с осями вертикальных стенок рессорного проема.

2. Боковая рама по п.1, отличающаяся тем, что вторые приливы металла выполнены в форме секторов цилиндров с образующей поперёк боковой рамы, радиусом 40-60 мм, с центром в вершине угла челюстного проема, с основаниями на боковых стенках и высотой в 1,5-2 раза больше толщины боковой стенки.

3. Боковая рама по п.1, отличающаяся тем, что первые приливы металла выполнены в форме цилиндров, вписанных в переходы между рёбрами в зонах сочленения наклонных поясов с вертикальными колонками, при этом высота цилиндров ограничена максимальной высотой рёбер, расположенных на боковых стенках наклонных поясов.



Полезная модель относится к подвижному составу железнодорожного транспорта, конкретно к конструкции боковой рамы для двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов.

В эксплуатируемых двухосных тележках модели 18-100 грузовых вагонов (Вагоны / Под ред. Л.А. Шадура. - М.: Транспорт, 1980. - 439 с.) и ее аналогах боковая рама выполнена в виде стальной отливки, в средней части которой расположен рессорный проем, образованный верхним поясом, нижним горизонтальным поясом и двумя вертикальными колонками, на которых имеются упоры для ограничения поперечного перемещения фрикционных клиньев. В нижней части рессорного проема выполнена опорная поверхность для размещения рессорного комплекта, на которой отлиты бонки для установки и ограничители от смещения пружин. Сечения наклонных поясов и вертикальных колонок имеют корытообразную форму с некоторым загибом внутрь концов полок, а нижний и верхний пояса имеют в сечении коробчатую форму. На концах боковой рамы расположены челюстные проемы с наружными и внутренними челюстными направляющими.

Одним из основных направлений в совершенствовании конструкции литых боковых рам является повышение прочности и коэффициента запаса сопротивления усталости введением местных утолщений для создания условий направленного затвердевания отливок с целью снижения числа внутренних дефектов, введением дополнительных ребер и изменением профиля сечения элементов конструкции. Это относится в первую очередь к наиболее нагруженным местам боковых рам - ближним углам челюстных проемов и углам переходов от опорной поверхности к вертикальным колонкам.

Известна боковая рама тележки грузового вагона, содержащая верхний пояс замкнутого сечения с опорными поверхностями для буксы и консолями, образующими боковые проемы, нижний пояс замкнутого сечения с опорной площадкой для рессорного комплекта, два наклонных пояса замкнутого сечения, связывающих верхний и нижний пояса, центральный рессорный проем, причем сечения рамы в местах радиусных переходов нижнего и наклонного поясов и опорных поверхностей для буксы имеют W-образную форму,

вершина ее центральной части направлена внутрь рамы, не выходя за ее габариты RU 2393968, В61F 5/52, 10.07.2010).

Известна боковая рама трехэлементной тележки грузового вагона, выполненная в виде стальной отливки или сварной конструкции, в которой между верхней и нижней полками нижнего пояса в зоне расположения двухрядных подклиновых пружин установлены дополнительные элементы жесткости в виде ребра или в форме колонн (RU 65006, В61F 3/02, 27.07.2007).

Известна боковая рама тележки грузового вагона, выполненная в виде стальной отливки, включающей верхний и нижний горизонтальные пояса, соединенные между собой вертикальными колонками, образующими совместно с горизонтальными поясами рессорный проем, в нижней части которого расположена опорная поверхность с бонками для установки пружин и ограничителями от смещения пружин, наклонных поясов, сопряженных с нижним поясом и горизонтальными опорными участками челюстных проемов, имеющих наружные и внутренние опорные упоры, опорные поверхности челюстных проемов выполнены с двумя рядами отверстий на выступающих за вертикальные стенки полках, наружные и внутренние направляющие челюстных проемов в нижней части имеют горизонтальные полки с отверстиями, во внутренних стенках прямоугольное отверстие и открытое сечение с наружной стороны, в середине вертикальных стенок горизонтального пояса выполнены отверстия над внутренним и наружным углами челюстного проема, на нижней полке нижнего горизонтального пояса между вертикальными стенками выполнены утолщения в виде секторов цилиндра с образующей поперек боковой рамы (RU 115315, В61F 5/52, 27.04.2012).

Общим недостатком упомянутых технических решений является сложная литейная технология изготовления стержней, выполняющих внутренние стенки и ребра жесткости нижнего пояса. Кроме того, ребра жесткости в местах соединения с горизонтальной стенкой нижнего пояса образуют термические узлы, создающие условия для формирования дефектов усадочного происхождения.

Известна боковая рама тележки грузового вагона, содержащая верхний и нижний пояса, которые связаны двумя наклонными поясами, в зоне соединения нижнего пояса с каждым наклонным поясом выполнены ребра, симметрично относительно центральной плоскости рамы в зонах схождения ребер образованы создающие условия для направленной кристаллизации выступы, объединяющие ребра и сопряженные с их боковыми поверхностями, не выступающие в центральный рессорный проем (RU 2294855, В61F 5/52, 10.03.2007).

Недостатком этой боковой рамы является низкая надежность из-за невозможности удаления выступов без повреждения геометрии отливки в случае проникновения в нее усадочной раковины при недостаточной работе устанавливаемых сверху приливов.

Наиболее близкой к заявляемой полезной модели является конструкция боковой рамы тележки железнодорожного вагона, включающая рессорный проем для рессорного комплекта, образованный верхним поясом с консольными частями, образующими внешние челюсти, нижним поясом замкнутого сечения с опорной площадкой для рессорного комплекта и вертикальными стенками с площадкой для крепления фрикционной планки, соединяющими верхний пояс и нижний пояс, буксовые проемы для буксовых узлов колесных пар, образованные внешними челюстями, опорными поверхностями верхнего пояса, а также внутренними челюстями, соединенными с наклонными поясами, при этом вертикальные стенки рессорного проема для рессорного комплекта, наклонные пояса и верхний пояс образуют симметрично расположенные относительно поперечной оси рамы отверстия, имеющие треугольную форму, при этом в нижних углах рессорного проема для рессорного комплекта имеются буртики для фиксации положения подклиновых пружин рессорного комплекта, не сопряженные с радиусом перехода опорной площадки в вертикальные стенки, а также мастные приливы металла, в консольной части внутри верхнего пояса в месте его перехода в наружную челюсть выполнен первый прилив металла, со стороны отверстия на вертикальной стенке рессорного проема для рессорного комплекта

выполнены местные утолщения металла, между местными утолщениями металла выполнена перемычка, со стороны отверстия на площадке для крепления фрикционной планки выполнен второй прилив металла (RU 105871, В61F 5/00, 27.06.2011).

Недостатком данной конструкции является низкая технологичность из-за сложности организации питания отливки в зонах радиусных переходов горизонтальных стенок буксовых проемов к внутренним клыкам, а также в зонах переходов опорной площадки рессорного проема к вертикальным стенкам, и низкая надежность из-за высокой концентрации эквивалентных напряжений в указанных зонах.

Задачей заявляемой полезной модели является разработка конструкции боковой рамы железнодорожного вагона технологичной в изготовлении и надежной в эксплуатации.

Техническим результатом, на достижение которого направлена полезная модель, является повышение надежности боковой рамы за счет повышения прочности нижней части рессорного проема без внесения снижающих технологичность дополнительных элементов в конструкцию нижнего пояса, а также снижение вероятности формирования усадочных дефектов в зонах внутренних углов челюстных проемов и в нижних углах рессорного проема.

Технический результат достигается тем, что в боковой раме тележки железнодорожного вагона, содержащей рессорный проем для рессорного комплекта, образованный верхним поясом с консольными частями, образующими внешние челюсти, нижним поясом замкнутого сечения с опорной площадкой для рессорного комплекта и вертикальными стенками с площадкой для крепления фрикционной планки, соединяющими верхний пояс и нижний пояс, буксовые проемы для буксовых узлов колесных пар, образованные внешними челюстями, опорными поверхностями верхнего пояса, а также внутренними челюстями, соединенными с наклонными поясами, при этом вертикальные стенки рессорного проема для рессорного комплекта, наклонные пояса и верхний пояс образуют симметрично расположенные относительно поперечной оси рамы отверстия, имеющие треугольную форму, при этом в нижних углах рессорного проема для рессорного комплекта имеются буртики для фиксации положения подклиновых пружин рессорного комплекта, не сопряженные с радиусом перехода опорной площадки в вертикальные стенки, первые и вторые приливы металла, первые приливы выполнены на боковой стенке внешней стороны боковой рамы, вторые приливы металла выполнены в зонах внутренних углов челюстных проемов, а толщина вертикальных стенок нижнего пояса в 1,5-2 раза больше толщины нижней горизонтальной стенки с плавным переходом до номинальных толщин стенок наклонных поясов от пересечения нижнего пояса с осями вертикальных стенок рессорного проема.

Вторые приливы металла выполнены в форме секторов цилиндров с образующей поперек боковой рамы, радиусом 40-60 мм, с центром в вершине угла челюстного проема, с основаниями на боковых стенках и высотой в 1,5-2 раза больше толщины боковой стенки.

Первые приливы металла выполнены в форме цилиндров, вписанных в переходы между ребрами в зонах сочленения наклонных поясов с вертикальными колонками, при этом высота цилиндров ограничена максимальной высотой ребер, расположенных на боковых стенках наклонных поясов.

Все размеры определены расчетно-опытным путем.

Сущность полезной модели поясняется чертежами, где на фиг. 1 представлен главный вид боковой рамы с вырезом 1/4 по продольной вертикальной и поперечной осям; на фиг. 2 представлено сечение боковой рамы по линии А-А.

Боковая рама представляет собой отливку, которая содержит рессорный проем 1 для рессорного комплекта, образованный верхним поясом 2 с консольными частями, образующими внешние челюсти 3, нижним поясом 4 замкнутого сечения с опорной площадкой 5 для рессорного комплекта и вертикальными стенками 6 с площадкой 7 для крепления фрикционной планки, соединяющими верхний пояс 2 и нижний пояс 4, буксовые проемы 8 для буксовых узлов колесных пар, образованные внешними челюстями 3, опорными поверхностями 9 верхнего пояса 2, а также внутренними челюстями 10, соединенными с

наклонными поясами 11. При этом вертикальные стенки 6 рессорного проема 1 для рессорного комплекта, наклонные пояса 11 и верхний пояс 2 образуют симметрично расположенные относительно поперечной рамы отверстия 12, имеющие треугольную форму, а в нижних углах рессорного проема 1 для рессорного комплекта имеются буртики 13 для фиксации положения подклиновых пружин рессорного комплекта, не сопряженные с радиусом перехода опорной площадки 5 в вертикальные стенки 6. Боковая рама содержит первые приливы металла 14, выполненные на боковой стенке внешней стороны боковой рамы.

Толщина вертикальных стенок 15 (фиг. 2) нижнего пояса 4 в 1,5-2 раза больше толщины нижней горизонтальной стенки 16 с плавным переходом до номинальных толщин стенок наклонных поясов 11 от пересечения нижнего пояса 4 с осями вертикальных стенок 6 рессорного проема 1.

Это увеличивает жесткость нижнего пояса 4, снижая значения эквивалентных напряжений в углах переходов опорной поверхности рессорного подвешивания к вертикальным колонкам без дополнительных внутренних ребер, создающих термические узлы в зоне обязательного неразрушающего контроля и увеличивающих вероятность формирования усадочных дефектов. Заявляемая конструкция нижнего пояса 4 исключает условия для формирования усадочных дефектов в углах переходов вертикальных стенок 15 к горизонтальной 16.

В зонах внутренних углов челюстных проемов, образованных стенками опорных поверхностей 9 и внутренними челюстями 10, выполнены вторые приливы металла 17 (фиг. 1) в форме секторов цилиндров с образующей поперек боковой рамы радиусом 40-60 мм, с центром в вершине угла, с основаниями на боковых стенках 18 и высотой в 1,5-2 раза больше толщины боковой стенки 18. Приливы металла 17 создают условия для направленного затвердевания и исключения усадочных дефектов в зонах обязательного неразрушающего контроля.

Первые приливы металла 14 (фиг. 1) на стенке внешней стороны боковой рамы выполнены в форме цилиндров, вписанных в переходы между ребрами в зонах сочленения наклонных поясов 11 с вертикальными стенками 6 рессорного проема 1, при этом высота цилиндров ограничена максимальной высотой ребер, расположенных на боковых стенках наклонных поясов 11. Заявляемые приливы 14 выполняют функции шеек прибылей, обеспечивающих питание термических узлов, образованных опорной площадкой 5 рессорного подвешивания и вертикальными стенками 6 рессорного проема 1. Расположение приливов 14 дополнительно обеспечивает возможность их удаления, при необходимости, без повреждения геометрии отливок.

Увеличение толщины вертикальных стенок нижнего пояса в заявляемых пределах повышает жесткость нижнего пояса и уменьшает концентрации эквивалентных напряжений в зонах переходов опорной площадки рессорного проема к вертикальным стенкам. При этом максимальные значения эквивалентных напряжений, полученные расчетным путем, приблизительно в 1,5 раза ниже допустимых, что подтверждает достижение поставленной цели.

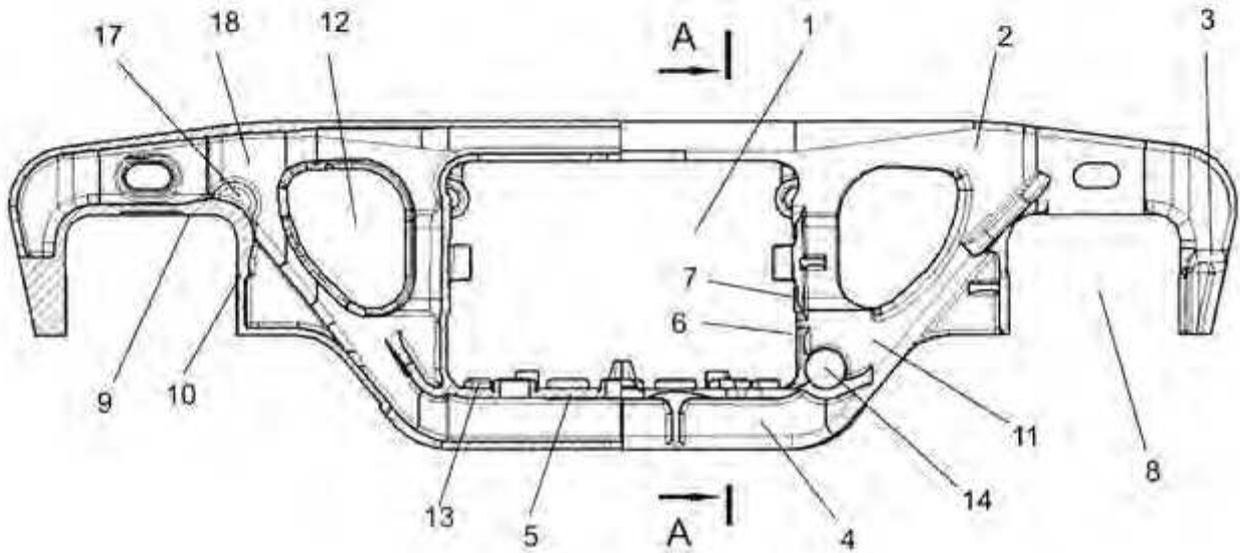
Формула полезной модели

1. Боковая рама тележки железнодорожного вагона, содержащая рессорный проем для рессорного комплекта, образованный верхним поясом с консольными частями, образующими внешние челюсти, нижним поясом замкнутого сечения с опорной площадкой для рессорного комплекта и вертикальными стенками с площадкой для крепления фрикционной планки, соединяющими верхний пояс и нижний пояс, буксовые проемы для буксовых узлов колесных пар, образованные внешними челюстями, опорными поверхностями верхнего пояса, а также внутренними челюстями, соединенными с наклонными поясами, при этом вертикальные стенки рессорного проема для рессорного комплекта, наклонные пояса и верхний пояс образуют симметрично расположенные относительно поперечной оси рамы отверстия, имеющие треугольную форму, при этом в нижних углах рессорного проема для рессорного комплекта имеются буртики для фиксации положения подклиновых

пружин рессорного комплекта, не сопряженные с радиусом перехода опорной площадки в вертикальные стенки, первые и вторые приливы металла, первые приливы выполнены на боковой стенке внешней стороны боковой рамы, отличающаяся тем, что вторые приливы металла выполнены в зонах внутренних углов челюстных проемов, а толщина вертикальных стенок нижнего пояса в 1,5-2 раза больше толщины нижней горизонтальной стенки с плавным переходом до номинальных толщин стенок наклонных поясов от пересечения нижнего пояса с осями вертикальных стенок рессорного проёма.

2. Боковая рама по п.1, отличающаяся тем, что вторые приливы металла выполнены в форме секторов цилиндров с образующей поперёк боковой рамы, радиусом 40-60 мм, с центром в вершине угла челюстного проема, с основаниями на боковых стенках и высотой в 1,5-2 раза больше толщины боковой стенки.

3. Боковая рама по п.1, отличающаяся тем, что первые приливы металла выполнены в форме цилиндров, вписанных в переходы между рёбрами в зонах сочленения наклонных поясов с вертикальными колонками, при этом высота цилиндров ограничена максимальной высотой рёбер, расположенных на боковых стенках наклонных поясов.



Приложение И
(справочное)

Описание полезной модели «Надрессорная балка тележки грузового вагона»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **144 454** (13) **U1**

(51) МПК
B61F 5/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: **2014111615/11, 25.03.2014**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.03.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **25.03.2014**

(45) Опубликовано: **20.08.2014** Бюл. № **23**

Адрес для переписки:

**188643, Ленинградская обл., г. Всеволожск,
ул. Заводская, 8, лит. Б, ООО "СтройАтом-
Проект-Т"**

(72) Автор(ы):

**Якушев Алексей Вячеславович (RU),
Глебов Сергей Михайлович (RU),
Иванов Вячеслав Анатольевич (RU),
Корнилов Николай Алексеевич (RU),
Носов Игорь Юрьевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Общество с ограниченной ответствен-
ностью "СтройАтомПроект-Т" (RU)**

(54) **НАДРЕССОРНАЯ БАЛКА ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА**

(57) Реферат:

Полезная модель относится к подвижному составу железнодорожного транспорта, конкретно к конструкции надрессорной балки для двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов. Технический результат - повышение технологичности и надежности надрессорной балки тележки грузового вагона. Надрессорная балка тележки грузового вагона содержит верхний пояс с внутренним вертикальным ребром, подпятником с плоской опорной плитой и упорным кольцевым буртом, нижний пояс, вертикальные боковые стенки и расположенную между верхним и нижним поясами опорную колонку подпятника, внутреннее вертикальное ребро соединяет верхний и нижний пояса по всей длине балки с увеличением по толщине к центру, на внутренней поверхности перехода опорных плит в нижний пояс выполнены симметрично расположенные ребра жесткости длиной 300-350 мм. Во внутреннем вертикальном ребре выполнены восемь технологических отверстий вытянутой вдоль вертикальной оси балки формы с короткими радиусными сторонами, вписанные в прямоугольники со сторонами не более 400 мм и 100 мм, по четыре отверстия с каждой стороны относительно оси опорной колонки подпятника, при этом расстояние от оси опорной колонки подпятника до ближайшей стороны прямоугольника составляет 240-250 мм. Под внутренними прибылями подпятника в вертикальном ребре выполнены технологические отверстия овальной или круглой формы, сопряженные с горизонтальной поверхностью прибыли хордой 35-45 мм, а в месте сопряжения на поверхности прибыли выполнено

углубление в форме конуса, у которого диаметр основания 30-40 мм, а высота 20-25 мм. 2 з.п. ф-лы, 3 ил.

Полезная модель относится к подвижному составу железнодорожного транспорта, конкретно к конструкции надрессорной балки для двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов.

В эксплуатируемых двухосных тележках модели 18-100 грузовых вагонов (Вагоны / Под ред. Л.А. Шадура. - М.: Транспорт, 1980. - 439 с.) и ее аналогах надрессорная балка имеет коробчатое поперечное сечение и форму близкую к брусу равного сопротивления изгибу. Толщина стенок уменьшается от среднего сечения к крайнему.

Концевые части балки выполнены плоскими, сечение балки в средней части имеет постоянную ширину и расширяется к концам. В верхней и боковых стенках балки имеются отверстия, несколько облегчающие конструкцию и используемые при литье и транспортировке балки. Подпятник является несъемным и отлит заодно с надрессорной балкой. В концевой части имеются литые опоры для скользунов, а снизу - литые бонки для ограничения перемещений внутренних пружин и упоры - для фиксации наружных двухрядных пружин. По бокам концевой части балки предусмотрены специальные гнезда для фрикционных клиньев, усиленные горизонтальными косынками, с углом наклона плоской опорной поверхности 45° к горизонту. Нижняя полка балки имеет внутреннее ребро, проходящее по всей ее длине и в концевой части увеличивающееся на всю высоту балки. Снизу подпятник подперт продольными и поперечными ребрами.

Основным недостатком конструкции является низкая надежность из-за высокой концентрации напряжений в зоне увеличения внутреннего ребра, проходящего по всей длине нижнего пояса, на всю высоту.

Известна надрессорная балка, содержащая верхний пояс с подпятником и упорным кольцевым буртом, нижний пояс включает опорную поверхность на пружины тележки, переходящую в наклонный пояс, вертикальные боковые стенки, в зоне опорной поверхности на пружины по центру балки выполнено ребро, соединяющее верхний и нижний пояс, плавно переходящее под опорной площадкой скользуна в два вертикальных ребра, проходящие по всей длине балки до ее центра, под упорным кольцевым буртом подпятника ребра соединены поперечной перемычкой (RU, №104523, В61F 5/52, 20.05.2011).

Известна надрессорная балка, содержащая верхний пояс с цилиндрическим подпятником с плоской опорной поверхностью и упорным кольцевым буртом нижний пояс, выполненный с опорной поверхностью на пружины рессорного подвешивания, переходящей в наклонный пояс, вертикальные боковые стенки, карманы для установки фрикционных клиньев в концевых частях надрессорной балки, два параллельных вертикальных ребра, соединяющих верхний и нижний пояса, два отверстия овальной формы в боковых стенках под опорными площадками под боковые скользуны, ребра выполнены по всей длине балки и увеличивающимися по толщине к центру, под буртом подпятника между ребрами и боковыми стенками выполнены внутренние прибыли по форме близкие к цилиндру с вертикальной образующей (RU, №118275, В61F 5/52, 20.07.2012).

Общим недостатком упомянутых технических решений является сложность литейной технологии в отношении изготовления стержней, выполняющих два внутренних ребра, соединяющих верхний и нижний пояса по всей длине балки. Кроме того, в местах соединения с горизонтальными стенками ребра образуют термические узлы, создающие условия для формирования дефектов усадочного происхождения. Применение таких надрессорных балок целесообразно в составе тележек грузовых вагонов с повышенной до 25-27 тс нагрузкой на ось.

Наиболее близкой к заявляемой полезной модели является конструкция надрессорной балки тележки грузового вагона, содержащая верхний пояс с внутренним вертикальным ребром, подпятником с плоской опорной плитой и упорным кольцевым буртом, нижний

пояс, вертикальные боковые стенки и расположенную между верхним и нижним поясами опорную колонку подпятника, причем верхний пояс выполнен с усиленными технологическими отверстиями, радиус сопряжения вертикальных стенок с верхним поясом и радиус сопряжения внутреннего вертикального ребра с верхним поясом изменяется от величины R_2 до величины R_1 составляет от 10 до 400 мм, при этом $R_2 \geq 2R_1$ (RU, №79509, B61F 5/52, 10.01.2009).

Недостатком данной конструкции наддрессорной балки тележки грузового вагона, как и большинства литых наддрессорных балок, применяемых в тележках грузовых вагонов с нагрузкой на ось 23,5 тс, является высокая концентрация напряжений в зоне перехода внутреннего вертикального ребра, проходящего по всей длине нижнего пояса, на всю высоту, что снижает живучесть балок в процессе эксплуатации.

Задачей заявляемой полезной модели является разработка конструкции наддрессорной балки тележки грузового вагона технологичной в изготовлении и надежной в эксплуатации за счет снижения концентрации напряжений.

Техническим результатом, на достижение которого направлена полезная модель, является повышение надежности за счет снижения концентрации напряжений без снижения технологичности, а также снижение вероятности формирования усадочных дефектов в зоне подпятника.

Технический результат достигается тем, что в наддрессорной балке тележки грузового вагона, содержащей верхний пояс с внутренним вертикальным ребром, подпятником с плоской опорной плитой и упорным кольцевым буртом, нижний пояс, вертикальные боковые стенки и расположенную между верхним и нижним поясами опорную колонку подпятника, внутреннее вертикальное ребро соединяет верхний и нижний пояса по всей длине балки с увеличением по толщине к центру, на внутренней поверхности перехода опорных плит в нижний пояс выполнены симметрично расположенные ребра жесткости длиной 300-350 мм.

Во внутреннем вертикальном ребре выполнены восемь технологических отверстий вытянутой вдоль вертикальной оси балки формы с короткими радиусными сторонами, вписанные в прямоугольники со сторонами не более 400 мм и 100 мм, по четыре отверстия с каждой стороны относительно оси опорной колонки подпятника, при этом расстояние от оси опорной колонки подпятника до ближайшей стороны прямоугольника составляет 240-250 мм.

Под внутренними прибылями подпятника в вертикальном ребре выполнены технологические отверстия овальной или круглой формы, сопряженные с горизонтальной поверхностью прибылей хордой 35-45 мм, а в месте сопряжения на поверхности прибылей выполнено углубление в форме конуса, у которого диаметр основания 30-40 мм, а высота 20-25 мм.

Все размеры определены расчетно-опытным путем.

Сущность полезной модели поясняется чертежами, где на фиг. 1 представлено продольное вертикальное сечение наддрессорной балки; на фиг. 2 представлено продольное горизонтальное сечение наддрессорной балки; на фиг. 3 представлен разрез подпятника.

Надрессорная балка содержит верхний пояс 1 с внутренним вертикальным ребром 2, подпятником с плоской опорной плитой 3 и упорным кольцевым буртом 4, нижний пояс 5, вертикальные боковые стенки 6 (фиг. 2) и расположенную между верхним 1 и нижним 5 поясами опорную колонку подпятника 7. Внутреннее вертикальное ребро 2 (фиг. 1) соединяет верхний 1 и нижний 5 пояса по всей длине балки с увеличением по толщине к центру, на внутренней поверхности перехода опорных плит 3 в нижний пояс 5 выполнены симметрично расположенные ребра жесткости 8 (фиг. 2) длиной 300-350 мм, при этом верхний пояс 1 выполнен без технологических отверстий. Совокупность заявляемых решений снижает концентрацию напряжений в наддрессорной балке, увеличивая ее живучесть в процессе эксплуатации.

Во внутреннем вертикальном ребре 2 выполнены восемь технологических отверстий 9 вытянутой вдоль вертикальной оси балки формы с короткими радиусными сторонами,

вписанные в прямоугольники с размерами сторон не более 400 мм и 100 мм, по четыре отверстия с каждой стороны относительно оси опорной колонки подпятника 7 на расстоянии 240-250 мм.

Заявляемое техническое решение повышает технологичность изготовления надрессорной балки с внутренним вертикальным ребром, соединяющим верхний и нижний пояса по всей длине балки.

Под внутренними прибылями 10 (фиг. 1) подпятника в вертикальном ребре 2 выполнены технологические отверстия 11 (фиг. 1) овальной или круглой формы, сопряженные с горизонтальной поверхностью прибыли 12 (фиг. 3) хордой 35-45 мм, а в месте сопряжения на поверхности прибыли выполнено углубление 13 в форме конуса, у которого диаметр основания равен 30-40 мм, а высота равна 20-25 мм.

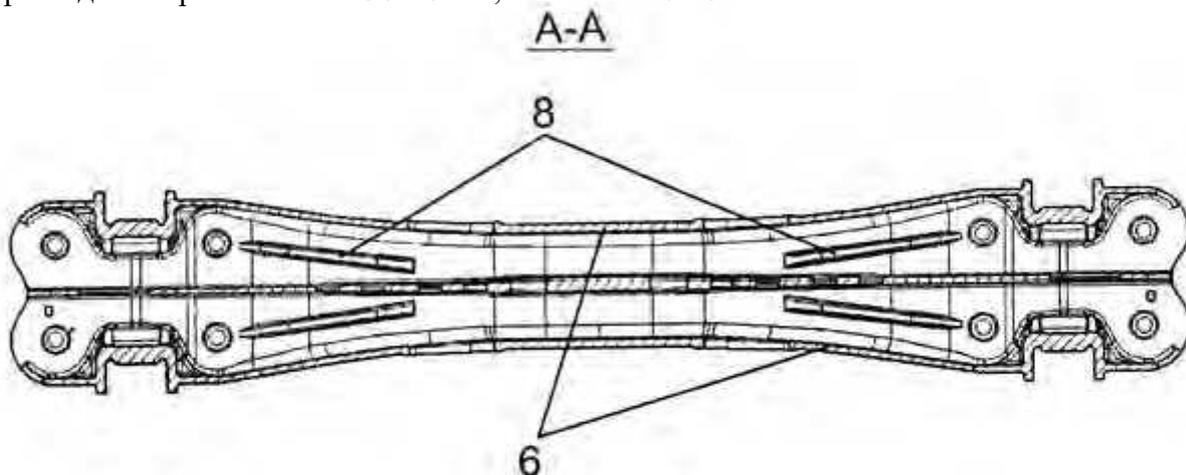
Данная надрессорная балка тележки грузового вагона обладает высокой надежностью по сравнению с прототипом за счет снижения вероятности формирования усадочных дефектов в зоне подпятника, что подтверждено разрушающим контролем опытных отливок, а также за счет уменьшения концентрации эквивалентных напряжений в 1,6-1,8 раза.

Формула полезной модели

1. Надрессорная балка тележки грузового вагона, содержащая верхний пояс с внутренним вертикальным ребром, подпятником с плоской опорной плитой и упорным кольцевым буртом, нижний пояс, вертикальные боковые стенки и расположенную между верхним и нижним поясами опорную колонку подпятника, отличающаяся тем, что внутреннее вертикальное ребро соединяет верхний и нижний пояса по всей длине балки с увеличением по толщине к центру, на внутренней поверхности перехода опорных плит в нижний пояс выполнены симметрично расположенные ребра жесткости длиной 300-350 мм.

2. Надрессорная балка по п. 1, отличающаяся тем, что во внутреннем вертикальном ребре выполнены восемь технологических отверстий вытянутой вдоль вертикальной оси балки формы с короткими радиусными сторонами, вписанные в прямоугольники со сторонами не более 400 мм и 100 мм, по четыре отверстия с каждой стороны относительно оси опорной колонки подпятника, при этом расстояние от оси опорной колонки подпятника до ближайшей стороны прямоугольника составляет 240-250 мм.

3. Надрессорная балка по п. 1, отличающаяся тем, что под внутренними прибылями подпятника в вертикальном ребре выполнены технологические отверстия овальной или круглой формы, сопряженные с горизонтальной поверхностью прибыли хордой 35-45 мм, а в месте сопряжения на поверхности прибыли выполнено углубление в форме конуса, у которого диаметр основания 30-40 мм, а высота 20-25 мм.



Приложение К
(справочное)

Описание полезной модели

«Литниковая система для заливки формы отливки
боковой рамы тележки грузового вагона»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **128 528** (13) **U1**

(51) МПК
B22C 9/08 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: **2012158227/02**, 24.12.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.12.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.12.2012

(45) Опубликовано: **27.05.2013** Бюл. № 15

Адрес для переписки:

190031, Санкт-Петербург, Московский пр.,
9, ФГБОУ ВПО ИГПС, патентный отдел

(72) Автор(ы):

**Бороненко Юрий Павлович (RU),
Глебов Сергей Михайлович (RU),
Пирайнен Виктор Юрьевич (RU),
Якушев Алексей Вячеславович (RU),
Маненков Александр Владимирович (RU),
Мишин Вячеслав Михайлович (RU),
Набиуллин Марат Идрисович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Петер-
бургский государственный университет
путей сообщения" (RU),
Открытое акционерное общество "Рузаев-
ский завод химического машинострое-
ния" (RU)**

(54) **ЛИТНИКОВАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЗАЛИВКИ ФОРМЫ ОТЛИВКИ БОКОВОЙ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ
ГРУЗОВОГО ВАГОНА**

(57) Реферат:

Полезная модель относится к литейному производству. Технический результат - повышение качества отливок за счет устранения усадочных дефектов в отливке. Литниковая система для заливки формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона содержит стояк (1), соединенный с шлаковиком (2), расположенным вдоль формы (3) отливки боковой рамы тележки грузового вагона, с которым соединены питатели (4), которые расположены с обеих сторон шлаковика (2) и соединены со стенкой нижнего короба рессорного проема формы (3) отливки боковой рамы тележки грузового вагона, а шлаковик (2) имеет длину 700-1000 мм. Стояк (1) установлен в центре шлаковика (2), но может быть установлен и на одном из концов шлаковика (2). 2 з.п. ф-лы, 2 ил.

Полезная модель относится к литейному производству.

Известна литниковая система для заливки формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона, состоящая из стояка, через который подают расплавленный металл в форму, шлаковика, питателей (Т.Е. Конькова, В.Б. Беловодский, А.В. Великанов «О путях повышения эксплуатационной надежности стальных литых деталей тележек грузовых вагонов», Вестник ВНИ-ИЖТА, №1, 2009 г., с.23).

Подвод жидкого металла при заливке формы боковой рамы осуществляют в «челюсти» буксового проема. При этом вся масса жидкой стали проходит через наиболее опасные участки детали - внутренний и внешний радиусы буксового проема, что приводит к образованию усадочных дефектов в этих сечениях и к снижению качества отливок.

Наиболее близкой литниковой системой к заявляемой является литниковая система для заливки формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона, содержащая стояк, через который подают расплавленный металл в форму, шлаковик, расположенный в форме вдоль отливки и предназначенный для отделения неметаллических включений, и питателей для подвода металла из шлаковика в полость формы (В.Н. Михайлов, Д.С. Краснятов «Применение компьютерного моделирования стальной отливки «рама боковая» с целью выявления литейных дефектов», Вестник Брянского государственного технического университета, №2 (18), 2008 г., с.117-118). Питатели соединены с шлаковиком и направлены к клыкам буксовых проемов отливки. При этом минимальная длина шлаковика составляет 1500-1520 мм, что соответствует размерам боковых рам между внутренними клыками буксовых проемов.

Недостатком данной литниковой системы является схема распределения жидкого металла на два встречных потока, протекающих через стенки буксовых проемов и встречающихся в области рессорного проема отливок. В результате перегрева формы в области буксовых проемов отливки увеличивается вероятность формирования там горячих трещин, а на границах встречных потоков, в области рессорного проема, концентрируются дефекты в виде засоров и плен.

Заявляемая полезная модель направлена на решение задачи повышения качества отливок за счет создания условий заполнения формы жидким металлом, снижающих локальный перегрев стенок формы и сокращающих число мест образования встречных потоков.

Технический результат - повышение качества отливок за счет устранения усадочных дефектов в отливке.

Технический результат достигается за счет того, что в литниковой системе для заливки формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона, содержащей стояк, соединенный с шлаковиком, расположенным вдоль формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона, с которым соединены питатели, которые расположены с обеих сторон шлаковика и соединены со стенкой нижнего короба рессорного проема формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона, а шлаковик имеет длину 700-1000 мм.

Стояк может быть установлен в центре шлаковика или на одном из концов шлаковика.

Полезная модель поясняется чертежами: на фиг.1 изображена литниковая система и форма отливки боковой рамы тележки грузового вагона, на фиг.2 изображена литниковая система со стояком, расположенным на конце шлаковика.

Литниковая система для заливки формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона содержит стояк 1, соединенный с шлаковиком 2, расположенным вдоль формы 3 отливки боковой рамы тележки грузового вагона, с которым соединены питатели 4, которые расположены с обеих сторон шлаковика 2 и соединены со стенкой нижнего короба рессорного проема формы 3 отливки боковой рамы тележки грузового вагона, а шлаковик 2 имеет длину 700-1000 мм. Стояк 1 установлен в центре шлаковика 2, но может быть установлен и на одном из концов шлаковика 2 (фиг.2).

Жидкий металл через питатели 4 заполняет стенки нижнего короба рессорного проема формы 3 отливки боковой рамы тележки грузового вагона и растекается в стороны буксовых проемов и к верхнему поясу рессорного проема, не образуя встречных потоков и охлаждаясь. Последнее снижает перегрев стенок формы 3 отливки боковой рамы тележки грузового проема в области буксового проема и, дополнительно, создает условия для направленного затвердевания отливки от буксовых проемов к литниковой системе.

Минимальная длина шлаковика 2 ограничена значением 700 мм конструктивными особенностями форм 3 отливок боковых рам тележек грузовых вагонов - протяженностью стенок нижнего короба рессорного проема боковой рамы тележки грузового вагона. Уменьшение длины шлаковика 2 снижает его функцию по отделению неметаллических включений.

Шлаковик 2 длиной 1000 мм конструктивно оптимально обеспечивает размещение стояка 1 на одном из его концов. Увеличение длины шлаковика 2 свыше 1000 мм повышает заливочный вес формы и, соответственно, ухудшает экономические показатели производства.

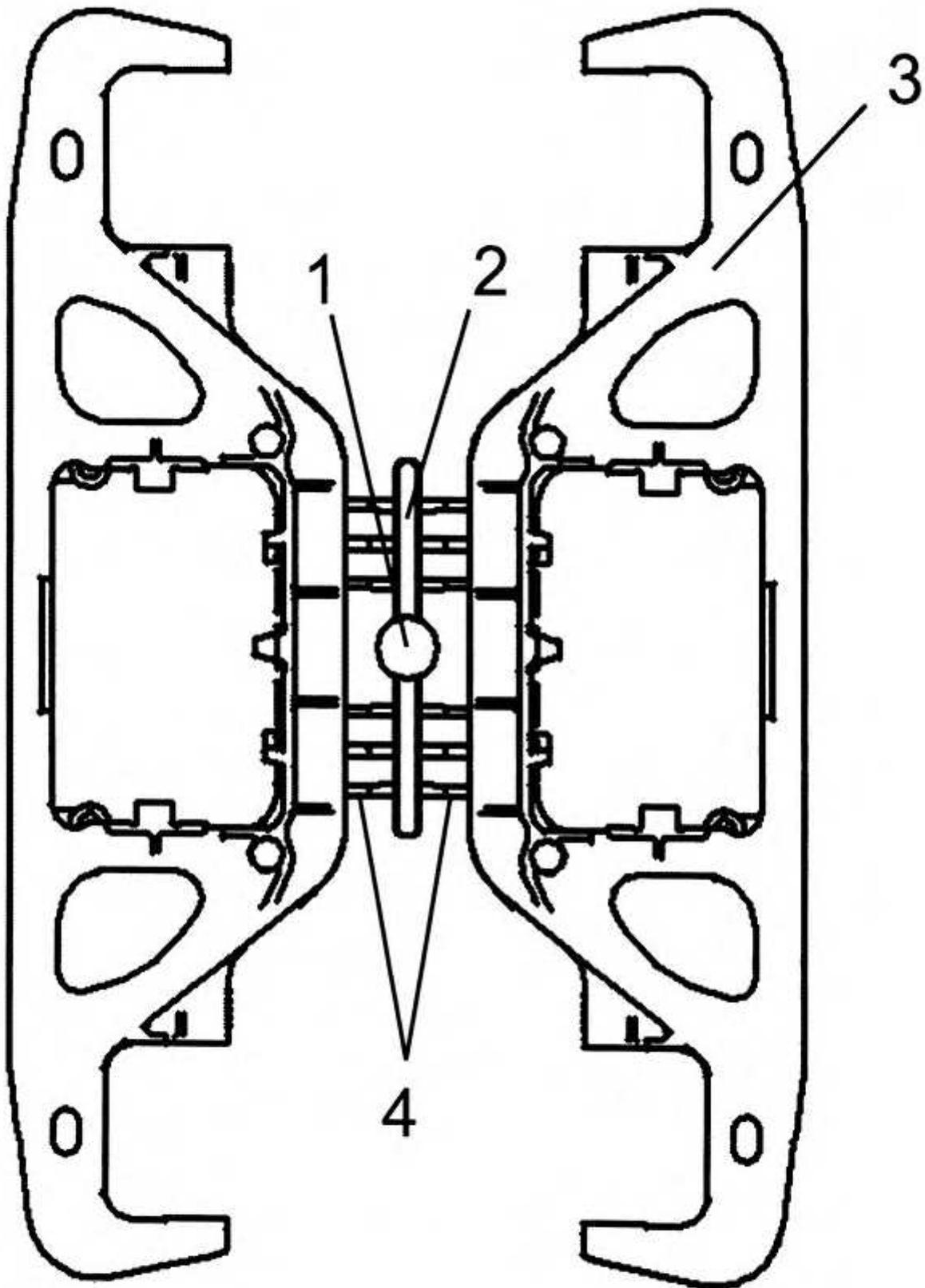
По сравнению с прототипом данная литниковая система для заливки формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона позволяет получить отливки более высокого качества в отношении дефектов в виде горячих трещин в радиусах буксовых проемов и усадочных раковин по всему телу отливки.

Формула полезной модели

1. Литниковая система для заливки формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона, содержащая стояк, соединенный со шлаковиком, расположенным вдоль формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона, с которым соединены питатели, отличающаяся тем, что питатели расположены с обеих сторон шлаковика и соединены со стенкой нижнего короба рессорного проема формы отливки боковой рамы тележки грузового вагона, а шлаковик имеет длину 700-1000 мм.

2. Литниковая система по п.1, отличающаяся тем, что стояк установлен в центре шлаковика.

3. Литниковая система по п.1, отличающаяся тем, что стояк установлен на одном из концов шлаковика.



Приложение Л
(справочное)

Описание полезной модели

«Литниковая система для заливки формы отливки
надрессорной балки тележки грузового вагона»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **132 364** (13) **U1**

(51) МПК
B22C 9/08 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: **2012158225/02**, 24.12.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.12.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **24.12.2012**

(45) Опубликовано: **20.09.2013** Бюл. № 26

Адрес для переписки:

**190031, Санкт-Петербург, Московский пр.,
9, ФГБОУ ВПО ИГПУС, Патентный отдел**

(72) Автор(ы):

**Бороненко Юрий Павлович (RU),
Глебов Сергей Михайлович (RU),
Пирайнен Виктор Юрьевич (RU),
Якушев Алексей Вячеславович (RU),
Маненков Александр Владимирович (RU),
Мишин Вячеслав Михайлович (RU),
Набиуллин Марат Идрисович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Петер-
бургский государственный университет
путей сообщения" (RU),
Открытое акционерное общество "Рузаев-
ский завод химического машинострое-
ния" (RU)**

(54) **ЛИТНИКОВАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЗАЛИВКИ ФОРМЫ ОТЛИВКИ НАДРЕССОРНОЙ БАЛКИ ТЕ-
ЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА**

(57) Реферат:

Полезная модель относится к литейному производству. Технический результат - повышение качества отливок. Литниковая система для заливки формы отливки надрессорной балки тележки грузового вагона содержит стояк 1, соединенный с шлаковиком 2, расположенным вдоль формы 3 отливки надрессорной балки тележки грузового вагона (фиг.2), поперечно расположенные шлаковики 4, которые соединены с питателями 5, направленными к торцевым стенкам формы 3 отливки надрессорной балки тележки грузового вагона, длина шлаковика 2, расположенного вдоль формы 3 отливки надрессорной балки тележки грузового вагона, составляет 1500 мм. 2 ил.

Полезная модель относится к литейному производству.

Известна литниковая система, содержащая горизонтальный литниковый ход, щелевой питатель и прибыль-шлакоуловитель, соединенную с литниковым ходом и щелевым питателем (RU 2357832, В22С 9/08, 10.06.2009).

Выполнение данной литниковой системы в форме для заливки отливки наддресорной балки тележки грузового вагона ограничено геометрическими особенностями отливки.

Наиболее близкой литниковой системой к заявляемой является литниковая система для заливки формы отливки наддресорной балки тележки грузового вагона, включающая стояк, через который подают в форму расплавленный металл, шлаковик, расположенный в форме вдоль отливки и предназначенный для отделения неметаллических включений, два шлаковика, расположенные в поперечном направлении, питатели, расположенные между поперечными шлаковиками и торцевыми стенками отливки для подвода металла из шлаковика в полость формы, при этом длина шлаковика, расположенного в форме вдоль отливки составляет от 2500 мм до 2800 мм, что обусловлено размерами наддресорных балок в продольном направлении (Глебов С.М., Пречесный М.А., Якушев А.В. Оптимизация технологии изготовления отливок «Балка наддресорная» тележек грузовых вагонов с применением компьютерного моделирования литейных процессов. «Транспорт Российской Федерации», №2(33), 2011, с.16).

Недостатком данной литниковой системы является схема распределения жидкого металла на два встречных потока, встречающихся в средней части отливки. Жидкий металл в каждом из потоков, протекая в полости формы, теряет температуру, что увеличивает вероятность формирования в средней части отливок дефектов в виде засоров и плен. Кроме того, шлаковики, расположенные в поперечном направлении, охлаждаются быстрее основного тела отливок, а в результате их термической усадки увеличивается вероятность деформации отливок и формирования продольных трещин.

Заявляемая полезная модель направлена на решение задачи повышения качества отливок за счет создания условий заполнения формы жидким металлом без формирования встречных потоков и устранения термической усадки шлаковиков, расположенных в поперечном направлении с двух сторон отливки наддресорной балки.

Технический результат - повышение качества отливок.

Технический результат достигается за счет того, что в литниковой системе для заливки формы отливки наддресорной балки тележки грузового вагона, содержащей стояк, соединенный с шлаковиком, расположенным вдоль формы отливки наддресорной балки тележки грузового вагона и соединенным с шлаковиками, расположенными в поперечном направлении, которые соединены с питателями, направленными к одной из торцевых стенок формы отливки наддресорной балки тележки грузового вагона, шлаковик, расположенный вдоль формы отливки наддресорной балки тележки грузового вагона, имеет длину до 1500 мм.

Сущность полезной модели поясняется чертежами, где на фиг.1 изображена литниковая система для заливки формы отливки наддресорной балки тележки грузового вагона, на фиг.2 изображена литниковая система и форма отливки наддресорной балки тележки грузового вагона.

Литниковая система для заливки формы отливки наддресорной балки тележки грузового вагона содержит стояк 1, соединенный с шлаковиком 2, расположенным вдоль формы 3 отливки наддресорной балки тележки грузового вагона (фиг.2), поперечно расположенные шлаковики 4, которые соединены с питателями 5, направленными к одной из торцевых стенок формы 3 отливки наддресорной балки тележки грузового вагона, длина шлаковика 2, расположенного вдоль формы 3 отливки наддресорной балки тележки грузового вагона не более 1500 мм, данная длина шлаковика 2 определена экспериментальным путем.

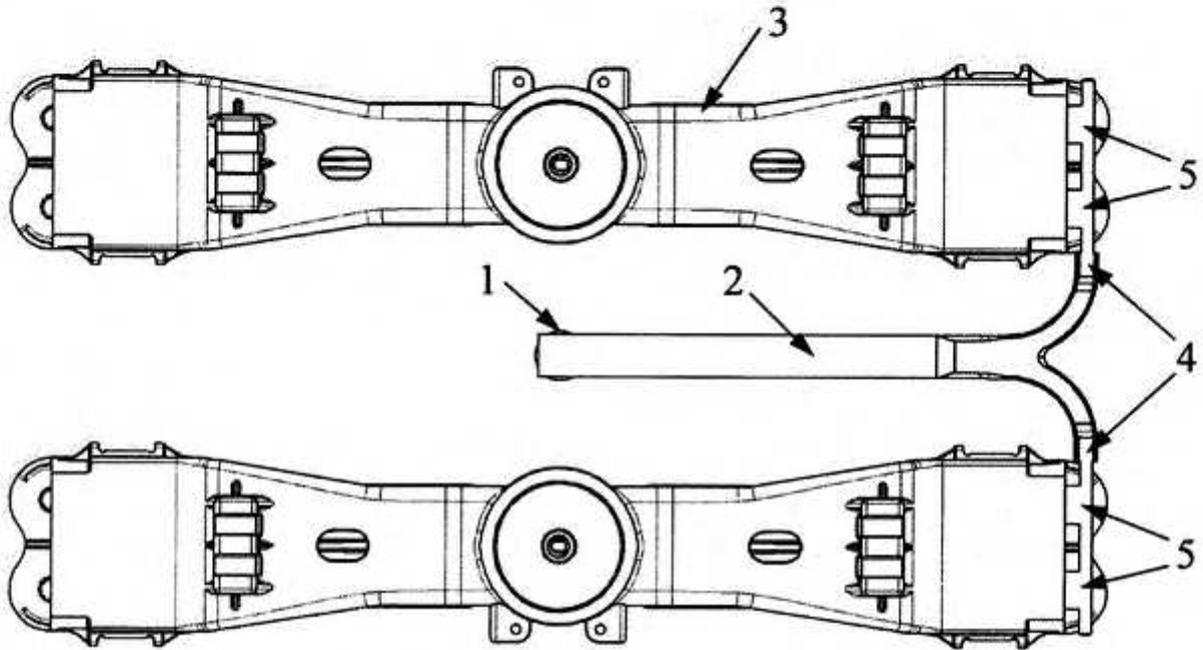
Жидкий металл через литниковую систему заполняет полость формы наддресорной балки с одной стороны, не образуя встречных потоков. Отсутствие шлаковика, расположенного в поперечном направлении с противоположной торцевой стенки формы 3 отливки наддресорной балки тележки грузового вагона, как в прототипе, исключает его

воздействие в результате термической усадки на деформацию отливки и снижает вероятность формирования продольных трещин.

По сравнению с прототипом данная литниковая система для заливки формы отливки надрессорной балки тележки грузового вагона позволяет получить отливки более высокого качества за счет снижения вероятности формирования продольных трещин.

Формула полезной модели

Литниковая система для заливки формы отливки надрессорной балки тележки грузового вагона, содержащая стояк, соединенный со шлаковиком, расположенным вдоль формы отливки надрессорной балки тележки грузового вагона и соединенным со шлаковиками, расположенными в поперечном направлении, которые соединены с питателями, направленными к одной из торцевых стенок формы отливки надрессорной балки тележки грузового вагона, отличающаяся тем, что шлаковик, расположенный вдоль формы отливки надрессорной балки тележки грузового вагона, имеет длину 1500 мм.



Приложение М
(справочное)

Описание полезной модели «Испытательная машина»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **161 341** (13) **U1**

(51) МПК
G01M 17/08 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: **2016100278/11**, **11.01.2016**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.01.2016

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **11.01.2016**

(45) Опубликовано: **20.04.2016** Бюл. № **11**

Адрес для переписки:

**196105, Санкт-Петербург, Яковлевский
пер., 6, кв. 98, Якушеву Алексею Вячесла-
вовичу**

(72) Автор(ы):

**Якушев Алексей Вячеславович (RU),
Филимонов Игорь Евгеньевич (RU),
Прокудин Павел Андреевич (RU),
Белобородов Дмитрий Владимирович
(RU)**

(73) Патентообладатель(и):

Якушев Алексей Вячеславович (RU)

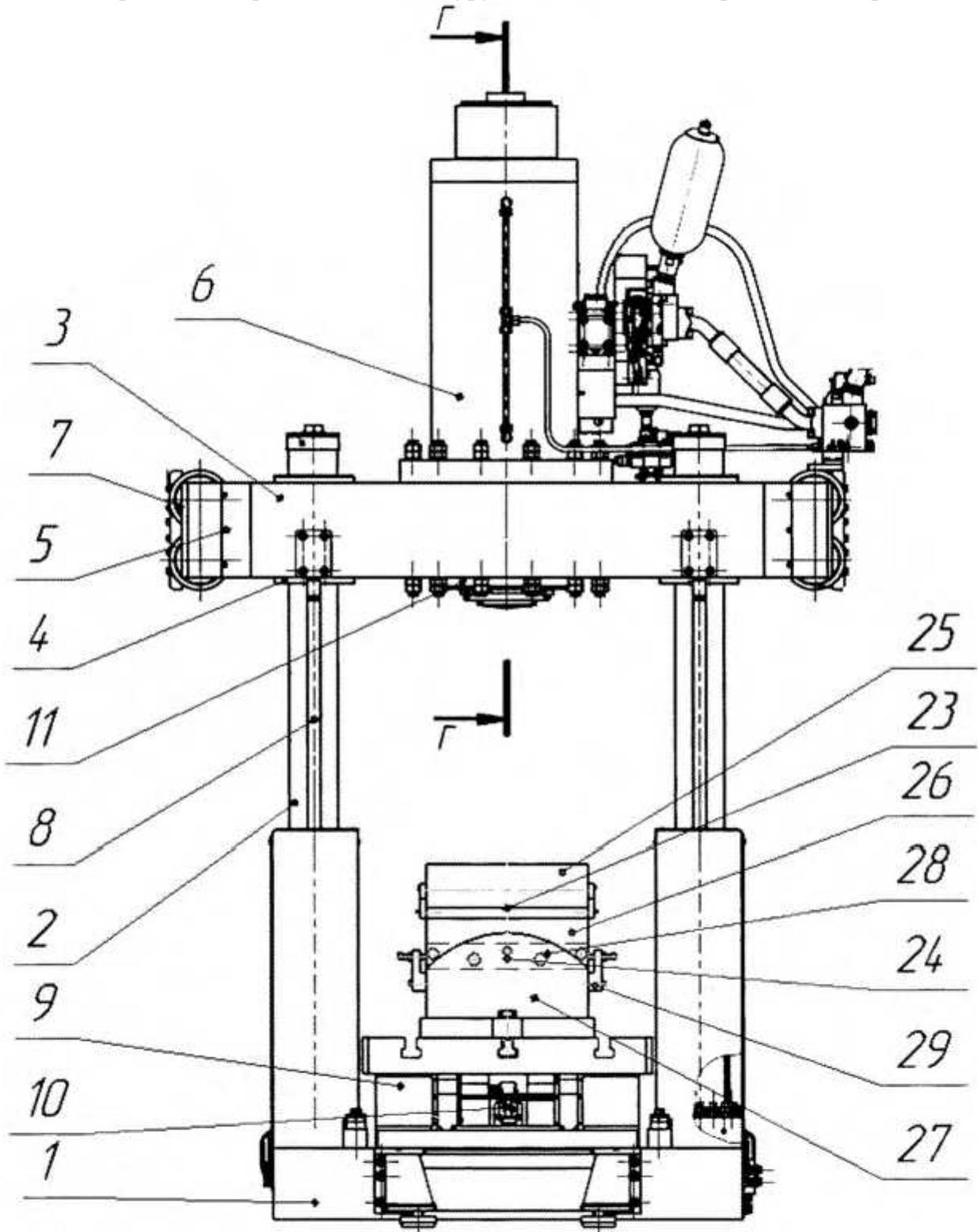
(54) **ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА**

(57) Реферат:

1. Испытательная машина, содержащая основание, закрепленные на нем четыре колонны, траверсу с клеммными зажимами и стягивающими шпильками, установленную на колоннах с возможностью перемещения по ним с помощью гидроцилиндров, расположенных по бокам от колонн между траверсой и основанием, силовой гидроцилиндр, расположенный на траверсе в центре, гидроцилиндры разжима, расположенные по торцевым сторонам траверсы, выкатной стол с двумя опорами для установки испытуемого изделия и гидроцилиндр перемещения стола, установленные на основании между колоннами, отличающаяся тем, что траверса содержит механизм компенсации радиальных нагрузок на шток силового гидроцилиндра, состоящий из центрирующего кольца с четырьмя линейными роликовыми опорами качения, равномерно расположенными по внутреннему диаметру кольца, закрепленного внизу траверсы соосно с силовым гидроцилиндром, и модуля нагружения, подвешенного к штоку силового гидроцилиндра через резиновые прокладки и ступенчатое кольцо, прикрученное к фланцу на штоке силового гидроцилиндра, модуль нагружения содержит цилиндрический корпус со сферической пяткой, закрепленной снизу, и с четырьмя направляющими планками под линейные роликовые опоры качения, закрепленными снаружи, внутри цилиндрического корпуса, установлен датчик силы с нагрузочными площадками так, что поверхность верхней нагрузочной площадки поджата через опору штоком силового гидроцилиндра, а поверхность нижней нагрузочной площадки опирается через опору на сферическую пятку.

2. Испытательная машина по п.1, отличающаяся тем, что опоры для установки испытуемого изделия выполнены в виде тумб с роликами, закрепленными сверху тумб, причем одна

из тумб содержит верхнюю и нижнюю опоры с пазами, направляющую планку, установленную в пазы между верхней и нижней опорами, и два кронштейна, расположенные с торцевых сторон тумбы, нижняя поверхность верхней опоры вогнута, а верхняя поверхность нижней опоры повторяет по контуру нижнюю поверхность верхней опоры.



Полезная модель относится к испытаниям транспортных средств, в частности железнодорожного транспорта, а именно для проведения испытаний элементов железнодорожного транспорта.

Известен испытательный стенд, предназначенный для усталостных испытаний рам боковых и надрессорных балок тележек грузовых вагонов (RU №80001, G01M 17/08, 20.01.2009). Испытательный стенд содержит основание, закрепленные на нем четыре колонны, траверсу, силовой гидроцилиндр с закрепленным на нем усилителем электрогидравлическим, зафиксированный на траверсе, гидроцилиндры подъема и опускания, отсечной клапан, встроенный в магистраль высокого давления, гидрозамок, предотвращающий самопроизвольное движение траверсы при выключенной насосной установке.

Недостатком данного испытательного стенда является низкий срок службы из-за износа штока силового гидроцилиндра от возникающей при испытании радиальной нагрузки на шток.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемой полезной модели является динамическая многоцелевая испытательная машина серии LFV 3000 производства «walter + bai ag Prufmaschinen - Testing Machines», **Löhningen** (В.В. Клипачевский, Модельный ряд машин фирмы Walter + Bai AG (Швейцария) для решения исследовательских задач в промышленных и научных лабораториях, ИТБ "Литье Украины", №9 (145) 2012 г.). Испытательная машина содержит основание, закрепленные на нем четыре колонны, траверсу, свободно перемещающуюся по колоннам, силовой гидроцилиндр установленный на траверсе, клеммные зажимы, встроенные в траверсу, гидроцилиндры разжима, гидроцилиндры перемещения траверсы, выкатной стол.

Недостатком данного технического решения является наличие радиальной нагрузки на штоке силового гидроцилиндра от горизонтальной составляющей вектора силы реакции испытуемого изделия, что ведет к интенсивному износу поверхности штока силового гидроцилиндра и отказу испытательной машины.

Задача заявляемой полезной модели - повышение срока службы испытательной машины, путем устранения износа штока силового гидроцилиндра.

Поставленная задача достигается тем, что испытательная машина, содержащая основание, закрепленные на нем четыре колонны, траверсу с клеммными зажимами и стягивающими шпильками, установленную на колоннах с возможностью перемещения по ним с помощью гидроцилиндров, расположенных по бокам от колонн между траверсой и основанием, силовой гидроцилиндр, расположенный на траверсе в центре, гидроцилиндры разжима, расположенные по торцевым сторонам траверсы, выкатной стол с двумя опорами для установки испытуемого изделия и гидроцилиндр перемещения стола, установленные на основании между колоннами, траверса содержит механизм компенсации радиальных нагрузок на шток силового гидроцилиндра, состоящий из центрирующего кольца с четырьмя линейными роликовыми опорами качения, равномерно расположенными по внутреннему диаметру кольца, закрепленного внизу траверсы соосно с силовым гидроцилиндром, и модуля нагружения, подвешенного к штоку силового гидроцилиндра через резиновые прокладки и ступенчатое кольцо, прикрученное к фланцу на штоке силового гидроцилиндра, модуль нагружения содержит цилиндрический корпус со сферической пяткой, закрепленной снизу, и с четырьмя направляющими планками под линейные роликовые опоры качения, закрепленными снаружи, внутри цилиндрического корпуса, установлен датчик силы с нагрузочными площадками так, что поверхность верхней нагрузочной площадки поджата через опору штоком силового гидроцилиндра, а поверхность нижней нагрузочной площадки опирается через опору на сферическую пятку.

Опоры для установки испытуемого изделия выполнены в виде тумб с роликами, закрепленными сверху тумб, причем одна из тумб содержит верхнюю и нижнюю опоры с пазами, направляющую планку, установленную в пазы между верхней и нижней опорами, и два кронштейна, расположенные с торцевых сторон тумбы, нижняя поверхность верхней опоры вогнута, а верхняя поверхность нижней опоры повторяет по контуру нижнюю поверхность верхней опоры.

Сущность полезной модели поясняется чертежом, где на фиг. 1 представлена испытательная машина, вид спереди, на фиг.2 механизм компенсации радиальных нагрузок штока силового гидроцилиндра.

Испытательная машина содержит основание 1, четыре колонны 2, установленные на основании 1, траверсу 3 с клеммными зажимами 4 и стягивающими шпильками 5, свободно перемещающуюся по колоннам 2, силовой гидроцилиндр 6, расположенный на траверсе 3 в центре, гидроцилиндры разжима 7, расположенные по торцевым сторонам траверсы 3, гидроцилиндры 8 перемещения траверсы 3, установленные по бокам от колонн 2 и соединяющие траверсу 3 и основание 1, выкатной стол 9 и гидроцилиндр 10 перемещения стола 9, установленные на основание 1, механизм компенсации радиальных нагрузок штока силового гидроцилиндра 6, состоящий из центрирующего кольца 11 с четырьмя линейными опорами качения роликовыми 12, закрепленного под траверсой 3, соосно с силовым гидроцилиндром 6, и модуля нагружения 13, подвешенного к штоку силового гидроцилиндра 6 через резиновые прокладки 14 и ступенчатое кольцо 15, прикрученное к фланцу 16 штока силового гидроцилиндра 6. Линейные роликовые опоры качения 12 равномерно расположены по внутреннему диаметру центрирующего кольца 11. Модуль нагружения 13 содержит цилиндрический корпус 17 со сферической пяткой 18, закрепленной снизу, четыре направляющих планки 19, закрепленные снаружи корпуса, под линейные роликовые опоры качения 12. Между штоком силового гидроцилиндра 6 и сферической пяткой 18 установлен датчик силы 20 с нагрузочными площадками 21 и опорами 22, установленными на датчик силы 20 сверху и снизу. Верхняя нагрузочная площадка 21 через опору 22 поджата штоком силового гидроцилиндра 6, а нижняя нагрузочная площадка 21 через опору 22 упирается в сферическую пятку 18. На выкатном столе 9 расположены опоры 23 для испытуемого изделия в виде тумб 24 с роликами 25, закрепленными сверху тумб 24. Тумба одной из опор 23 содержит верхнюю опору 26, нижнюю опору 27, направляющую планку 28, установленную между верхней опорой 26 и нижней опорой 27, и два кронштейна 29, расположенные по торцевым сторонам опоры 23 для установки испытуемого изделия.

Испытательная машина работает следующим образом.

Перед установкой испытуемого изделия рабочая жидкость от силовой гидравлической станции (на рисунке не показана) направляется в полости гидроцилиндров разжима 7, гидроцилиндров 8 перемещения траверсы 3, гидроцилиндра 10 перемещения стола 9. Траверса 3 выставляется на необходимую высоту в зависимости от испытуемого изделия. Для перемещения траверсы 3 производится разжатие клеммных зажимов 4 при помощи гидроцилиндров разжимов 7. Перемещение траверсы 3 осуществляется при разжатых клеммных зажимах 4 посредством гидроцилиндров 8 перемещения траверсы 3. После установки траверсы 3 на необходимую высоту и отвода рабочей жидкости из полости гидроцилиндров разжима 7, клеммные зажимы 4 фиксируют траверсу 3 при помощи шпилек 5, установленных с предварительным натягом. Передвижение выкатного стола 9 осуществляется с помощью гидроцилиндра 10 перемещения стола 9. Испытуемое изделие устанавливается на опоры 23 с роликами 25. Одна из опор 23 для установки испытуемого изделия, тумба 24 которой содержит верхнюю опору 26 и нижнюю опору 27, является регулируемой, за счет того, что верхняя опора 26 самовыставляется относительно опорной плоскости испытуемой детали на угол необходимый для компенсации погрешностей формы и расположения поверхностей испытуемого изделия. Направляющая планка 28 ограничивает поперечное смещение верхней опоры 26 относительно нижней опоры 27. Кронштейны 29 препятствуют заваливанию верхней опоры 26 относительно нижней опоры 27 при продольном смещении. Шток силового гидроцилиндра 6 под действием потока рабочей жидкости от силовой гидравлической станции, подающейся к силовому гидроцилиндру 6, перемещается вниз или вверх, нагружая или разгружая испытуемое изделие. Нагружение испытуемого изделия происходит в соответствии с режимом, установленным в системе управления и измерения (на рисунке не показана). При нагружении крупногабаритного испытуемого изделия, кроме вертикальной составляющей силы нормальной реакции опоры, неизбежно

возникает горизонтальная составляющая, которая воспринимается линейными роликовыми опорами качения 12 на центрирующем кольце 11 через направляющие планки 19. Датчик силы 20, установленный в цилиндрическом корпусе 17, через опоры 21 и нагрузочные площадки 22 воспринимает и измеряет вертикальную нагрузку, передаваемую от штока силового гидроцилиндра 6 к сферической пятке 18 на испытуемое изделие. Постоянный контакт между опорами 21 и нагрузочными площадками 22 обеспечен предварительным поджатием модуля нагружения 13 к штоку силового гидроцилиндра 6 через резиновые прокладки 14 и ступенчатое кольцо 15, прикрученное к фланцу 16 штока силового цилиндра 6.

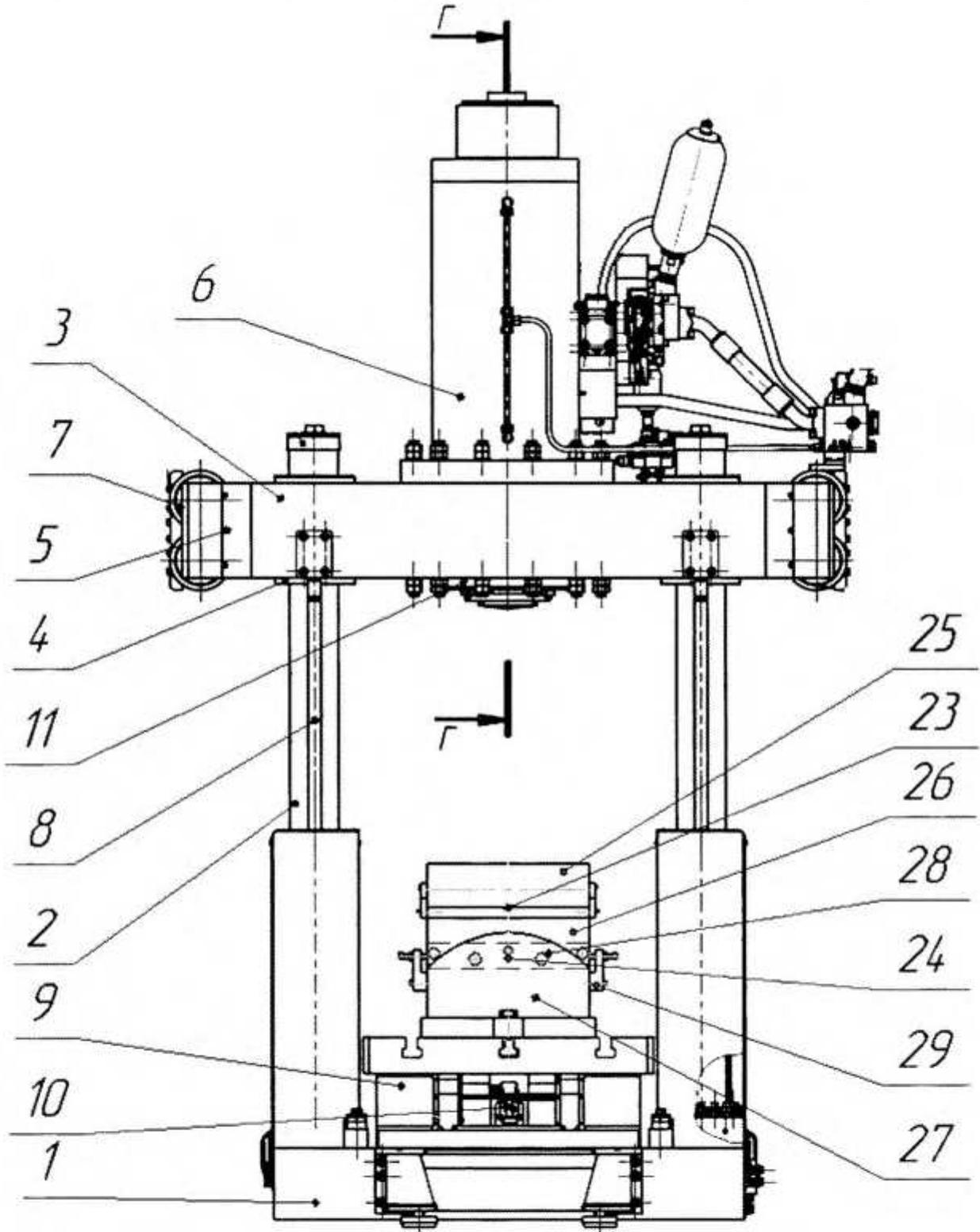
Таким образом, предложена испытательная машина для испытаний элементов железнодорожного транспорта с механизмом компенсации радиальных нагрузок на шток силового гидроцилиндра и опорами 23, одна из которых самовыставляется под испытуемое изделие, при наличии погрешностей формы и расположения опорных поверхностей испытуемого изделия. Использование данной испытательной машины устраняет износ поверхности штока от радиальных нагрузок, что приводит к повышению срока службы силового гидроцилиндра 6 и в целом увеличивает общий срок службы испытательной машины.

Формула полезной модели

1. Испытательная машина, содержащая основание, закрепленные на нем четыре колонны, траверсу с клеммными зажимами и стягивающими шпильками, установленную на колоннах с возможностью перемещения по ним с помощью гидроцилиндров, расположенных по бокам от колонн между траверсой и основанием, силовой гидроцилиндр, расположенный на траверсе в центре, гидроцилиндры разжима, расположенные по торцевым сторонам траверсы, выкатной стол с двумя опорами для установки испытуемого изделия и гидроцилиндр перемещения стола, установленные на основании между колоннами, отличающаяся тем, что траверса содержит механизм компенсации радиальных нагрузок на шток силового гидроцилиндра, состоящий из центрирующего кольца с четырьмя линейными роликовыми опорами качения, равномерно расположенными по внутреннему диаметру кольца, закрепленного внизу траверсы соосно с силовым гидроцилиндром, и модуля нагружения, подвешенного к штоку силового гидроцилиндра через резиновые прокладки и ступенчатое кольцо, прикрученное к фланцу на штоке силового гидроцилиндра, модуль нагружения содержит цилиндрический корпус со сферической пяткой, закрепленной снизу, и с четырьмя направляющими планками под линейные роликовые опоры качения, закрепленными снаружи, внутри цилиндрического корпуса, установлен датчик силы с нагрузочными площадками так, что поверхность верхней нагрузочной площадки поджата через опору штоком силового гидроцилиндра, а поверхность нижней нагрузочной площадки опирается через опору на сферическую пятку.

2. Испытательная машина по п.1, отличающаяся тем, что опоры для установки испытуемого изделия выполнены в виде тумб с роликами, закрепленными сверху тумб, причем одна из тумб содержит верхнюю и нижнюю опоры с пазами, направляющую планку, установленную в пазы между верхней и нижней опорами, и два кронштейна, расположенные с торцевых сторон тумбы, нижняя поверхность верхней опоры вогнута, а верхняя

поверхность нижней опоры повторяет по контуру нижнюю поверхность верхней опоры.



Приложение Н
(справочное)

Описание полезной модели

«Стенд для испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **165 307** (13) **U1**

(51) МПК
G01M 17/08 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: **2016112197/11**, 31.03.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
31.03.2016

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **31.03.2016**

(45) Опубликовано: **10.10.2016** Бюл. № **28**

Адрес для переписки:

**196105, Санкт-Петербург, Яковлевский
пер., 6, кв. 98, Якушеву Алексею Вячесла-
вовичу**

(72) Автор(ы):

**Якушев Алексей Вячеславович (RU),
Филимонов Игорь Евгеньевич (RU),
Прокудин Павел Андреевич (RU),
Белобородов Дмитрий Владимирович
(RU)**

(73) Патентообладатель(и):

Якушев Алексей Вячеславович (RU)

(54) **СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ И УЗЛОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА**

(57) Реферат:

Стенд испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта содержит силовой пол (1), четыре колонны (2), траверсу (3) с клеммными зажимами (4) и стягивающими шпильками (5), силовой гидроцилиндр (6), модули нагружения (7), расположенные вертикально на траверсе (3), гидроцилиндры (8) перемещения траверсы, гидроцилиндры разжима (9). На силовом полу (1) установлены опоры (10) с модулями нагружения (7), расположенными горизонтально. Опоры (10) состоят из основания (11), двух боковых пластин (12), рамки (14). Модули нагружения (7) содержат фланец (17) с центратором (18), причем центратор (18) выполнен в виде кольца (20) с пазами и шестью пружинами (21), силовой гидроцилиндр (22), две тяги (23), расположенные по бокам от силового гидроцилиндра (21). Техническим результатом полезной модели является расширение функциональных возможностей стенда при меньших габаритах и металлоемкости стенда, чем у аналогов. 3 ил.

Полезная модель относится к испытаниям транспортных средств, а именно ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта.

Известен стенд СТ 211 для проведения испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта производства ОАО «СКБИМ», Армавир (Виктор Роженцев, Анатолий Новиков, Владимир Мараховский, Александр Шаманин, Автоматизированная система управления стендом для натуральных испытаний элементов железнодорожного транспорта, «Современные технологии автоматизации», №4, 2006 г. С. 34-39). Стенд содержит силовой пол, четыре колонны, закрепленные на нем, поперечные балки, попарно соединенные с колоннами, продольные балки, закрепленные на поперечных балках, силовые гидроцилиндры вертикального нагружения, силовые гидроцилиндры горизонтального нагружения.

Недостатком данного технического решения является большие габариты стенда, что приводит к ограниченным возможностям при размещении испытательного стенда и к дополнительным затратам при изготовлении.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемой полезной модели является испытательная машина DynaSet-2000 для проведения испытаний элементов железнодорожного транспорта производства ООО НПО «Нанотек» г. Екатеринбург (Филимонов И.Е., Прокудин П.А., Якушев А.В., Динамическая машина нового поколения для усталостных испытаний деталей грузовых и пассажирских вагонов, «Подвижной состав XXI века: Идеи, требования, проекты, тез докл. VII Междунар. науч.-тех. конф. СПб», 2011 г. С. 115-117»). Испытательная машина содержит основание, закрепленные на нем четыре колонны, траверсу с клеммными зажимами и стягивающими шпильками, установленную на колоннах, гидроцилиндры подъема траверсы, силовой гидроцилиндр, установленный на траверсе, гидроцилиндры разжима, выкатной стол с двумя опорами для установки испытуемого изделия, гидроцилиндр перемещения стола.

Недостатком данного технического решения является отсутствие возможности воспроизведения на испытуемом объекте полного спектра эксплуатационных нагрузок, так как конструкция предусматривает установку только одного силового гидроцилиндра для вертикального нагружения испытуемого изделия.

Задача полезной модели - расширение функциональных возможностей стенда для испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта путем применения дополнительных модулей нагружения, воспроизводящих горизонтальные и вертикальные нагрузки, при меньших габаритах и металлоемкости стенда, чем у аналогов.

Поставленная задача достигается тем, что стенд для испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта, содержащий силовой пол, четыре колонны, закрепленные на силовом полу, траверсу с клеммными зажимами и стягивающими шпильками, установленную на колоннах, силовой гидроцилиндр и модули нагружения, вертикально установленные на траверсе, гидроцилиндры перемещения траверсы, установленные по бокам от колонн между траверсой и силовым полом, гидроцилиндры разжима, расположенные по торцевым сторонам траверсы, дополнительно содержит опоры, установленные на силовом полу, с дополнительными модулями нагружения, расположенными горизонтально, причем опоры, состоят из основания, двух боковых пластин с пальцами сверху и снизу, закрепленных на основании, двух Г-образных планок, расположенных по торцам основания, прижимающих опору к силовому полу, и рамки, прикрепленной к боковым пластинам посредством шпилек, вкрученных в пальцы, а модули нагружения выполнены в виде фланца прямоугольной формы с центратором, установленным в корпус фланца с помощью двух фиксирующих планок, причем центратор содержит кольцо с пазами и шесть пружин, равномерно расположенных по внутреннему диаметру кольца, модули нагружения содержат силовой гидроцилиндр с проушинами с обоих концов, установленный в фланец таким образом, что шесть пружин центратора упираются свободными концами в корпус силового гидроцилиндра, две тяги, расположенные по бокам от силового гидроцилиндра одним концом закрепленные в пазах фланца и соединенные с другого конца между собой через проушину силового гидроцилиндра посредством оси и двух втулок.

Силовой пол в центральной части выполнен с двумя пазами, в которых установлены направляющие и упорные планки, причем направляющие имитируют головки рельс.

Сущность полезной модели поясняется чертежами, где на фиг. 1. представлен стенд испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта, вид спереди, на фиг. 2 центральная часть силового пола выполненного с пазами, в которых установлены направляющие и упорные планки, на фиг. 3 опора с модулем нагружения, расположенным горизонтально, вид спереди, на фиг. 4 опора с модулем нагружения, расположенным горизонтально, вид сбоку.

Стенд для испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта содержит силовой пол 1, четыре колонны 2, установленные на силовом полу 1, траверсу 3 с клеммными зажимами 4 и стягивающими шпильками 5, установленную на колоннах 2, силовой гидроцилиндр 6 и модули нагружения 7, вертикально установленные на траверсе 3, гидроцилиндры 8 перемещения траверсы, установленные по бокам от колонн 2 между траверсой 3 и силовым полом 1, гидроцилиндры разжима 9, расположенные по торцевым сторонам траверсы 3. На силовом полу 1 установлены опоры 10, состоящие из основания 11 двух боковых пластин 12 с пальцами 13, расположенными сверху и снизу боковых пластин 12, двух Г-образных планок 14, расположенных по торцам основания 11, и рамки 15, прикрепленной к боковым пластинам 12 посредством шпилек 16, вкрученных в пальцы 13. На опорах 10 закреплены дополнительные модули нагружения 7, расположенные горизонтально. Модули нагружения 7 содержат фланец 17 прямоугольной формы с центратором 18, установленным в корпус фланца 17 с помощью двух фиксирующих планок 19, причем центратор 18 выполнен в виде кольца 20 с пазами и шестью пружинами 21, равномерно по внутреннему диаметру кольца 20, силовой гидроцилиндр 22 с проушинами с обоих концов, установленный в фланец 17 таким образом, что шесть пружин 21 центратора 18 упираются свободными концами в корпус силового цилиндра 22, две тяги 23, расположенные по бокам от силового цилиндра 22, одним концом закрепленные в пазах фланца 17 и соединенные с другого конца между собой через проушину силового гидроцилиндра 22 посредством оси 24 и двух втулок 25. Силовой пол 1 в центральной части выполнен с двумя пазами, в которых установлены направляющие 26 и упорные планки 27, причем направляющие 26 имитируют головки рельс.

Стенд для испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта работает следующим образом.

Перед установкой испытуемого изделия рабочая жидкость от силовой гидравлической станции (на рисунке не показана) направляется в полости гидроцилиндров разжима 9, гидроцилиндров 8 перемещения траверсы 3. Траверса 3 выставляется на необходимую высоту в зависимости от испытуемого изделия. Для перемещения траверсы 3 производится разжатие клеммных зажимов 4 при помощи гидроцилиндров разжима 9. Перемещение траверсы 3 осуществляется при разжатых клеммных зажимах 4 посредством гидроцилиндров 8 перемещения траверсы 3. После установки траверсы 3 на необходимую высоту и отвода рабочей жидкости из полости гидроцилиндров разжима 9, клеммные зажимы 4 фиксируют траверсу 3 при помощи шпилек 5, установленных с предварительным натягом. Опоры 10 с дополнительными модулями нагружения 7, расположенными горизонтально, выставляются на силовом полу 1, а модули нагружения 7 в опорах 10 выставляются по высоте под испытуемое изделие и его фланец 17 зажимается между двух боковых пластин 12 опоры 10 и рамкой 15 с помощью шпилек 16, вкрученных в пальцы 13, так что шток силового гидроцилиндра 22 находится напротив нагружаемой площадки испытуемого изделия. Штоки силовых гидроцилиндров 22 модулей нагружения 7, установленных вертикально, под действием потока рабочей жидкости от силовой гидравлической станции, подающейся к силовому гидроцилиндру 22 модулей нагружения 7, перемещаются вниз или вверх, нагружая или разгружая испытуемое изделие в соответствии с режимом, установленным в системе управления и измерения (на рисунке не показана). Штоки силовых гидроцилиндров 22 модулей нагружения 7, установленных горизонтально в опорах 10, под действием потока рабочей жидкости от силовой гидравлической станции, подающейся к модулям нагружения 7, установленным горизонтально, перемещаются вдоль горизонтальных осей, передавая

испытуемому изделию нагрузки в соответствии с режимом, установленным в системе управления и измерения. Направляющие 26, закрепленные в пазах силового пола 1, образуют колею шириной 1520 миллиметров. Ширина колеи может быть изменена на 1435 миллиметров с помощью перестановки направляющих 26 в пазах силового пола 1. При перестановке направляющих 26 упорные планки 27 также переставляются таким образом, что направляющие 26 упираются одной стороной в упорные планки 27.

Таким образом, предложен стенд для испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта, содержащий модули нагружения 7, вертикально установленные на траверсе 3, опоры 10 с модулями нагружения 7, расположенными горизонтально. Модули нагружения 7, вертикально установленные на траверсе 3, позволяют прикладывать вертикальные нагрузки одновременно с силовым гидроцилиндром 6, а опоры 10 с модулями нагружения 7, расположенными горизонтально, позволяют прикладывать поперечные и продольные нагрузки, тем самым расширяя функциональные возможности стенда. С помощью направляющих 26 на силовом полу 1 стенда возможно размещение вагонных тележек, как для колеи 1520 миллиметров, так и для колеи 1435 мм, что увеличивает номенклатуру испытуемых изделий. За счет конструкции опоры 10, предусматривающей размещение модуля нагружения 7 внутри корпуса опоры 10, значительно сокращаются габариты силового пола 1 при сохранении габаритов испытуемых ходовых частей. Опора 10 выставляется под испытуемое изделие с помощью Г-образных планок 14, конструкция опоры 10 и модуля нагружения 7 позволяет установить высоту силового гидроцилиндра 22 так, что его шток будет находиться напротив нагружаемой площадки испытуемого изделия. Сокращение габаритов силового пола 1 ведет к значительному снижению металлоемкости стенда.

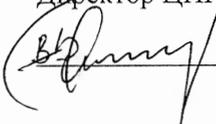
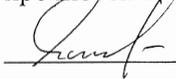
Формула полезной модели

1. Стенд для испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта, содержащий силовой пол, четыре колонны, закрепленные на силовом полу, траверсу с клеммными зажимами и стягивающими шпильками, установленную на колоннах, силовой гидроцилиндр и модули нагружения, вертикально установленные на траверсе, гидроцилиндры перемещения траверсы, установленные по бокам от колонн между траверсой и силовым полом, гидроцилиндры разжима, расположенные по торцевым сторонам траверсы, отличающийся тем, что содержит опоры, установленные на силовом полу, с дополнительными модулями нагружения, расположенными горизонтально, причем опоры состоят из основания, двух боковых пластин с пальцами сверху и снизу, закрепленных на основании, двух Г-образных планок, расположенных по торцам основания, прижимающих опору к силовому полу, и рамки, прикрепленной к боковым пластинам посредством шпилек, вкрученных в пальцы, а модули нагружения выполнены в виде фланца прямоугольной формы с центратором, установленным в корпус фланца с помощью двух фиксирующих планок, причем центратор содержит кольцо с пазами и шесть пружин, равномерно расположенных по внутреннему диаметру кольца, модули нагружения содержат силовой гидроцилиндр с проушинами с обоих концов, установленный во фланец таким образом, что шесть пружин центратора упираются свободными концами в корпус силового гидроцилиндра, две тяги, расположенные по бокам от силового гидроцилиндра одним концом закрепленные в пазах фланца и соединенные с другого конца между собой через проушину силового гидроцилиндра посредством оси и двух втулок.

2. Стенд для испытаний ходовых частей и узлов железнодорожного транспорта по п. 1, отличающийся тем, что силовой пол в центральной части выполнен с двумя пазами, в которых установлены направляющие и упорные планки, причем направляющие имитируют

Приложение П
(справочное)

Технологическая инструкция
«Методика сравнительной оценки усталостной прочности, несущей способности
и трещиностойкости сталей»

		ГОСТ 3.1105-84 Форма 1	
			ЭКЗ № 1
ФГУП «ПО УВЗ»		АДК 25003.30021	
Методика сравнительной оценки усталостной прочности, несущей способности и трещиностойкости сталей			
<p>УТВЕРЖДАЮ</p> <p>И. о. Главного инженера</p> <p>ФГУП «ПО Уралвагонзавод»</p> <p> Ю. А. Любимов</p> <p>11.03.06</p>			
<h2>Технологическая инструкция</h2>			
<p>Директор ЦИИМ-35</p> <p> В. Б. Бамбулевич</p>			
<p>Начальник лаборатории прочности ЦИИМ-35</p> <p> А. В. Якушев</p>			
Дубл. Взам. Пошл.	Рег. № 300-41111/07-01111-11		ТЛ
			1

АДК 25003.30021

1 ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Сравнительная экспресс оценка усталостной прочности, несущей способности и трещиностойкости сталей для изготовления деталей машин по квазистатическим испытаниям на растяжение нестандартных образцов. Экспериментальные результаты испытаний: параметры полной диаграммы деформирования стали с падающей ветвью.

Общий результат – заключение об изменении усталостной прочности, несущей способности и трещиностойкости стали для изготовления деталей машин.

Дубл.	
Взам.	
Подл.	Рез. № 260-111111/01-01-01-01

АДК 25003.30021

3 ОТБОР ОБЪЕКТОВ ИСПЫТАНИЙ

Проводят из одного интервала гистограммы эмпирического распределения диаметров d нестандартных образцов. Нестандартные образцы вытачиваются из заготовки исследуемой стали для изготовления деталей машин. Единообразие формы и размеров образцов достигается жесткими допусками на их отклонения, применением специально спрофилированного доводочного резца и шлифовкой. Готовые образцы тщательно обмеряются под микроскопом и группируются в гистограмму эмпирического распределения диаметров d .

Для испытания отбирают не менее трех нестандартных образцов одной плавки исследуемой стали, с радиусами галтелей $R_1 = R_2$, одинаковой длины l и диаметра d с точностью до 0,01 мм.

После проведения испытаний на образцах, при положительных изменениях свойств стали, могут быть применены методы испытаний, типы образцов и характеристики усталостной прочности, несущей способности и трещиностойкости в соответствии с отраслевыми нормативно-техническими документами.

При отправке на испытания нестандартные образцы сопровождают документом, с указанием марки стали, химического состава и технологии выплавки.

Дубл.
Взам.
Полл.

Лен. н. Зер. 22.11.11 / 04.06.11 -

АДК 25003.30021

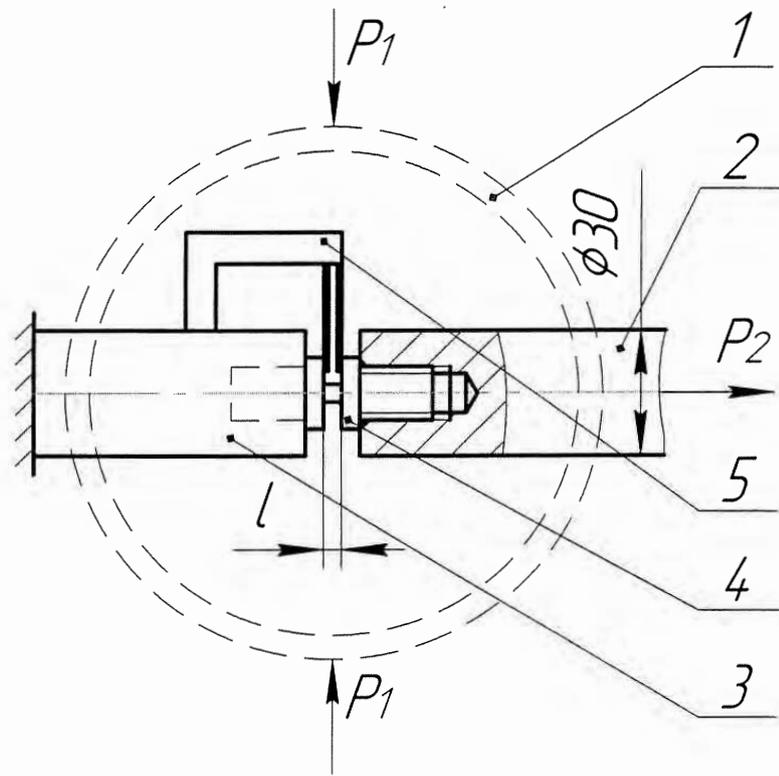


Рисунок 3 Схема нагружения нестандартного образца.

Дубл.	
Взам.	
Подл.	Рез. и ЗЕР-цшшш/04 Штос-

АДК 25003.30021

где: $F_0 = \pi r_0^2$ - первоначальная площадь рабочей части образца (мм^2),

$F_K = \pi r_K^2$ - конечная площадь рабочей части образца при $r_K = \frac{d_K}{2}$ (мм^2).

При обработке трех полных диаграмм деформирования стали одной плавки их усредняют и получают среднюю полную диаграмму деформирования стали полученную в координатах $P - \Delta l$. Среднюю машинную диаграмму, полученную в координатах $P - \Delta l$, переводят в координаты $\sigma - \varepsilon$ по формулам (3, 4):

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_0}; \quad (3)$$

где: P_i - текущее усилие растяжения образца при заданном перемещении Δl (Н), $F_0 = \pi r_0^2$ - первоначальная площадь поперечного сечения рабочей части нестандартного образца (мм^2), r_0 - первоначальный радиус поперечного сечения рабочей части образца (мм).

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_0}; \quad (4)$$

где: Δl_i - текущее перемещение рабочей части образца (мм), l_0 - первоначальная длина рабочей части образца (мм).

Дубл.
Взам.
Полл.

Ред. и 360 - 30000 / 07 010203 -

ТИ

11

АДК 25003.30021

По средней полной диаграмме $\sigma - \epsilon$ определяют условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ (МПа), предел прочности σ_B (МПа), напряжение перелома падающей ветви σ_M (МПа), деформацию перелома падающей ветви ϵ_M , деформацию разрушения ϵ_p . Модуль хрупкости D (МПа) металла рассчитывают по формуле:

$$D = \frac{\sigma_M}{\epsilon_M} \quad (5)$$

Средние данные сравнительных испытаний образцов металлов представляют в виде таблицы 1.

Таблица 1. Средние данные сравнительных испытаний нестандартных образцов сталей

№ п/п	Марка стали	№ плавки	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение $\delta\%$	Относительное сужение $\psi\%$	Модуль хрупкости D (МПа)	Деформация разрушения ϵ_p
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Несущая способность стали зависит от уровня прочностных свойств $\sigma_{0,2}, \sigma_B$. Чем выше прочностные свойства, тем выше несущая способность.

Дубл.
Взам.
Подл.

Лист 260-44444 / 07 011111

АДК 25003.30021

Модуль хрупкости D стали тесно коррелирует с ее трещиностойкостью. Чем ниже значение модуля хрупкости D (падающая ветвь полной диаграммы более пологая) относительно модуля упругости стали $E = 2 \times 10^5 \text{ МПа}$, тем выше трещиностойкость стали. Когда значение модуля хрупкости D стремится к значению модуля упругости E (падающая ветвь полной диаграммы более крутая), то это говорит, о снижении трещиностойкости стали.

Длина полной диаграммы деформирования стали коррелирует с ее усталостной прочностью. Чем больше деформация разрушения металла ε_p , тем выше усталостная прочность стали, и наоборот.

Первоначально для трех плавков одной марки стали, соответствующих отраслевым нормативно-техническим документам, параллельно проводят испытания на растяжение по ГОСТ 1497-84 и по данной методике на нестандартных образцах. При соответствии результатов испытаний трех плавков стали на растяжение по ГОСТ 1497-84 отраслевым нормативно-техническим документам, устанавливают минимально допустимые значения предела текучести $\sigma_{0,2}$ (МПа), предела прочности σ_B (МПа), деформации разрушения ε_p , максимально допустимого значения модуля хрупкости D (МПа) на нестандартных образцах.

При проведении дальнейших испытаний сталей по данной методике критерием оценки результатов являются первоначально установленные значения характеристик этих сталей, полученных на нестандартных образцах.

Дубл.
Взам.
Подл.

№ 2. н 360-ИИИИ/с.О.В.С.С.

АДК 25003.30021

8 ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Результаты сравнительных квазистатических испытаний на растяжение нестандартных образцов стали считают положительными, если:

- полученные средние значения модуля хрупкости D стали, не выше первоначально установленного модуля хрупкости D этой стали;
- средняя деформация разрушения ε_p стали, не меньше первоначально установленной деформации разрушения ε_p этой стали;

9 ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Результаты контрольных и сравнительных испытаний оформляют актом, в котором приводят:

- наименование, № чертежа, условные номера нестандартных образцов;
- фактические размеры d , l , R_1 , R_2 рабочей части каждого образца;
- результаты замеров рабочей части (d_k и l_k) каждого образца после разрушения;
- марку стали, технологию выплавки, режимы термообработки и другие изменения технологии получения металла, а также химический состав по плавочным сертификатам, механические свойства по испытаниям нестандартных образцов, модуль хрупкости и деформацию разрушения;

Дубл.
Взам.
Полл.

Р.н. 360-шшш/040613

АДК 25003.30021

ССЫЛОЧНЫЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Обозначение документа, на который дана ссылка	Номер раздела, пункта, приложения в котором дана ссылка
ГОСТ 25.502-79	Вводная часть
ГОСТ 25.506-85	Вводная часть, 5
ГОСТ 1497-84	Вводная часть, 7
ГОСТ 28840-90	5
ГОСТ Р8.568-97	6

Дубл. Взам. Подл. *Лес. н 360 - цинк / 04 01/01/01*

Приложение Р
(справочное)

Расчет экономической эффективности

«Метода оценки усталостной прочности и трещиностойкости литых деталей тележки вагона с помощью нестандартных испытаний микрообразцов»

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Метода оценки усталостной прочности и трещиностойкости литых деталей тележки вагона с помощью нестандартных испытаний микрообразцов

В настоящее время для оценки целесообразности замены марки материала, изменения химического состава, технологии изготовления отливок и т. д. проводятся статические и усталостные испытания натуральных деталей с определением несущей способности, долговечности и трещиностойкости конструкции. При этом конструкция испытываемых деталей не меняется.

ФГУП «ПО УВЗ» ежегодно проводит усталостные испытания 53 шт. надрессорных балок и 53 шт. боковых рам различных конструкций. Из них в ЦИИМ-35 по 30 шт. надрессорных балок и боковых рам, в ЦПМ УО ВНИИЖТ г. Екатеринбург по 23 шт. надрессорной балки и боковых рам.

В ЦИИМ-35, совместно с УрО РАН Институт Машиноведения, разработаны и запатентованы «Устройство и способ испытания материалов на растяжение», позволяющие на нестандартных образцах строить полную диаграмму растяжения материала, которая дает полное представление о несущей способности, долговечности и трещиностойкости материала. Устройство и способ опробован и имеет качественное сходство со статическими и усталостными испытаниями натуральных деталей.

Внедрение данного устройства и способа позволит прогнозировать несущую способность, долговечность и трещиностойкость (живучесть) материалов, при освоении новых технологий производства материалов, изменения химического состава, замене марки материала и т. д., а также отказаться от дорогостоящих испытаний натуральных деталей одной и той же конструкции.

От внедрения устройства и способа произойдет снижение количества испытываемых натуральных деталей и как следствие разгрузка испытательной машины. Тем самым можно догрузить испытательную машину деталями, испытываемыми в ЦПМ УО ВНИИЖТ г. Екатеринбург.

1. Количество испытываемых деталей в ЦИИМ-35 (шт./год):
 - 1.1. с измененной технологией производства отливок:
 - надрессорная балка (черт. 100.00.010-4) – 11
 - боковая рама (черт. 100.00.020-4) – 16
 - 1.2. с измененной конструкцией:
 - надрессорная балка – 19
 - боковая рама – 14
- ИТОГО: 60 шт.



Предлагаемый способ заменяет испытания натуральных деталей с измененной технологией производства отливок (всего 27 шт.).

2 Затраты на испытания натуральных деталей в ЦИИМ-35.

2.1. Стоимость изготовления одной детали:

- Отливка надрессорной балки черт. 100.00.010-4 и боковой рамы черт. 100.00.020-4 (цех 562).
- Термообработка деталей (цех 563).
- Механическая обработка деталей (цех 380).

Итого: Надрессорная балка 10782 руб.
Боковая рама 9 719,08 руб.

2.2. Стоимость изготовления всех деталей за год:

Надрессорная балка $10\ 782 \times 11 = 118602$ руб.
Боковая рама $9\ 719,08 \times 16 = 155505,28$ руб.

2.3. Стоимость испытания одной детали в ЦИИМ-35:

Среднее число циклов испытания одной детали за год:

- надрессорная балка до 1900000 циклов.
- боковая рама до 1400000 циклов.

- надрессорная балка – 14878,81 руб.
- боковая рама – 15206,85 руб.

2.4. Стоимость проведения всех испытаний за год:

- надрессорная балка $14878,81 \times 11 = 163666,91$ руб.
- боковая рама $15206,85 \times 16 = 243309,6$ руб.

Итого: 681083,79 руб.

3 Возможность испытательной машины в ЦИИМ-35 (дет./год):

Частота - 18540 циклов/час

Количество рабочих часов в год - 1978

Количество смен в сутках - 3

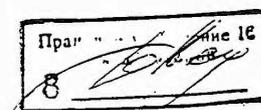
Итого рабочих часов в год - $1978 \times 3 = 5934$

Число циклов в год - $18540 \times 5934 = 110\ 016\ 360$

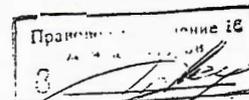
Среднее число циклов испытания надрессорной балки и боковой рамы -
 $(1900000 + 1400000) / 2 = 1650000$

Возможное количество испытанных надрессорных балок и боковых рам в год - $110016360 / 1650000 = 67$ шт.

С учетом времени на проф. ремонт: $67 \times 0,9 = 60$ шт.



- 4 Количество испытываемых деталей в ЦПМ УО ВНИИЖТ г. Екатеринбург за год:
надрессорных балок – 23 шт.
боковых рам – 23 шт.
Всего **46 шт.**
- 5 Затраты на усталостные испытания в ЦПМ УО ВНИИЖТ г. Екатеринбург:
Количество испытываемых деталей в год - 46
Транспортные расходы по доставке 10 деталей – 1928 руб.
Стоимость усталостных испытаний одной надрессорной балки – 58567 руб.
Стоимость усталостных испытаний одной боковой рамы – 58567 руб.
Затраты на испытания 10 надрессорных балок: $58567 \times 10 + 1928 = 587598$ руб.
Итого затраты на 1 деталь: $587598 / 10 = 58760$ руб.
6. Вследствие разгрузки испытательной машины в ЦИИМ при внедрении способа, следует догрузить машину деталями, ранее направляемыми на испытания в г. Екатеринбург – 27 шт.
- 7 Стоимость усталостных испытаний 27 детали (13 надрессорных балок и 14 боковых рам) в ЦПМ УО ВНИИЖТ г. Екатеринбург:
 $27 \times 58760 = 1586520$ руб.
- 8 Стоимость усталостных испытаний 13 надрессорных балок и 14 боковых рам в ЦИИМ: $13 \times 14878,81 + 14 \times 15206,85 = 406320,43$ руб.
- 9 Количество испытываемых микрообразцов в ЦИИМ (шт/год): 27
- 10 Затраты на испытания микрообразцов в ЦИИМ:
- 10.1. Стоимость оборудования (изготовитель цех 180) для испытания микрообразцов – 5140 руб.
- 10.2. Стоимость изготовления одного микрообразца (цех 446) – 636,24 руб.
- 10.3. Стоимость изготовления всех микрообразцов за год (цех 446):
 $636,24 \times 27 = 17178,48$ руб.
- 10.4. Стоимость испытания одного микрообразца в ЦИИМ – 117,82 руб.
- 10.5. Стоимость проведения всех испытаний микрообразцов за год:
 $117,82 \times 27 = 3181,14$ руб.



Итого: 20359,62 руб.

11 Экономический эффект от внедрения устройства и способа
испытания образцов на растяжение:

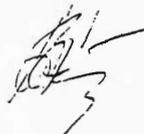
$(681083,79 + 1586520) - (20359,62 + 406320,43) = 1\ 840\ 923,74$ руб.

Начальник отдела 45/8



Т. В. Иваикнова

Начальник отдела 45/20



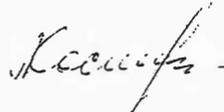
Н. С. Устинов

Директор ЦИИМ



В. Б. Бамбулевич

Начальник БТЗ ЦИИМ-35

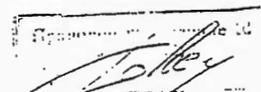


Л. С. Костина

Ст. бухгалтер



П. А. Никулина



334/11