



На правах рукописи

ПРОТОПОПОВ Андрей Леонидович

ЖИВУЧЕСТЬ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, старший научный сотрудник

ОГАНЬЯН Эдуард Сергеевич

Официальные оппоненты:

ОРЛОВА Анна Михайловна,
доктор технических наук, Публичное акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Объединенная Вагонная Компания», заместитель Генерального директора по стратегии и продукту.

ГАДОЛИНА Ирина Викторовна,
кандидат технических наук, доцент ИМАШ РАН, отдел Конструкционное материаловедение, старший научный сотрудник. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Ведущая организация:

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

Защита состоится 18 марта 2020 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д.9., стр. 9 ауд. 2505.

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

Афтореферат разослан ____ 2020 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета**



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В современной науке механики материала к расчету прочности технических конструкций сложились два подхода: классический и неклассический. В первом подходе оценку прочности проводят из предположения что предельное состояние наступает в материале, представляющем собой твердое сплошное тело, не принимается во внимание дискретный характер его строения, что приводит к недостаточности классических методов для оценки прочности. Практика показывает, что реальные конструкции изначально могут содержать различные структурные дефекты материала (неметаллические включения, поры, пустоты и т.д.), которые как концентраторы напряжений могут стать причиной зарождения усталостных трещин. В этом случае используются неклассические подходы механики материала (механика разрушения). Разрушение материала рассматривается как процесс зарождения трещин и дальнейшего их распространения.

Литым деталям тележек грузовых вагонов свойственна приобретенная эксплуатационная дефектность (усталостные трещины), а также исходная технологическая дефектность, которая характерна для крупногабаритных отливок сложной конфигурации. Данная дефектность может привести к аварийным разрушениям литых деталей тележек в процессе их эксплуатации. Изломы боковых рам тележек грузовых вагонов нередко сопровождаются сходом вагона с рельсов, создают угрозу безопасности движения поездов, представляют опасность для жизни и здоровья граждан, приносят значительные убытки ОАО «РЖД» и другим участникам перевозочного процесса (рисунок 1). Бывает, что изломы боковых рам происходят в первые 1–3 года их эксплуатации. Это может быть косвенным подтверждением того, что изломы произошли не из-за приобретенных усталостных трещин, а из-за наличия исходных технологических литейных дефектов. На основе анализа изломов боковых рам по сечению в зоне внутреннего радиуса $R55$ буксового проема, произошедших на сети железных дорог ОАО «РЖД», выявлено влияние характерных дефектов, их начальных размеров и мест локализации по сечению излома.



Рисунок 1 – Сход грузового поезда из-за излома боковой рамы

На рисунке 2 показано распределение влияния дефектов по указанным признакам, представленное в виде диаграммы Парето.

При проведении анализа множество изломов, инициированных технологическими дефектами, разбивалось на следующие категории:

- дефекты с выходом на наружную поверхность нижнего пояса;
- внутренние раковины, рыхлоты в нижнем поясе;
- заварка, наплавка на поверхности нижнего пояса без термообработки;
- уменьшенная толщина вертикальных стенок;
- видимые дефекты в зоне излома отсутствуют.

Из полученной диаграммы следует, что примерно 78 % изломов боковых рам по сечениям в зоне *R55* вызваны в основном двумя причинами: дефекты с выходом на наружную поверхность нижнего пояса; раковины, рыхлоты, находящиеся внутри нижнего пояса. Фактические сроки службы рамы по этим дефектам составляют от 1,4 до 8,8 лет. На остальные три категории дефектов приходится примерно 22 % изломов. Такой результат вполне логичен и отвечает основному принципу диаграммы Парето: «20 % причин вызывает 80 % проблем».

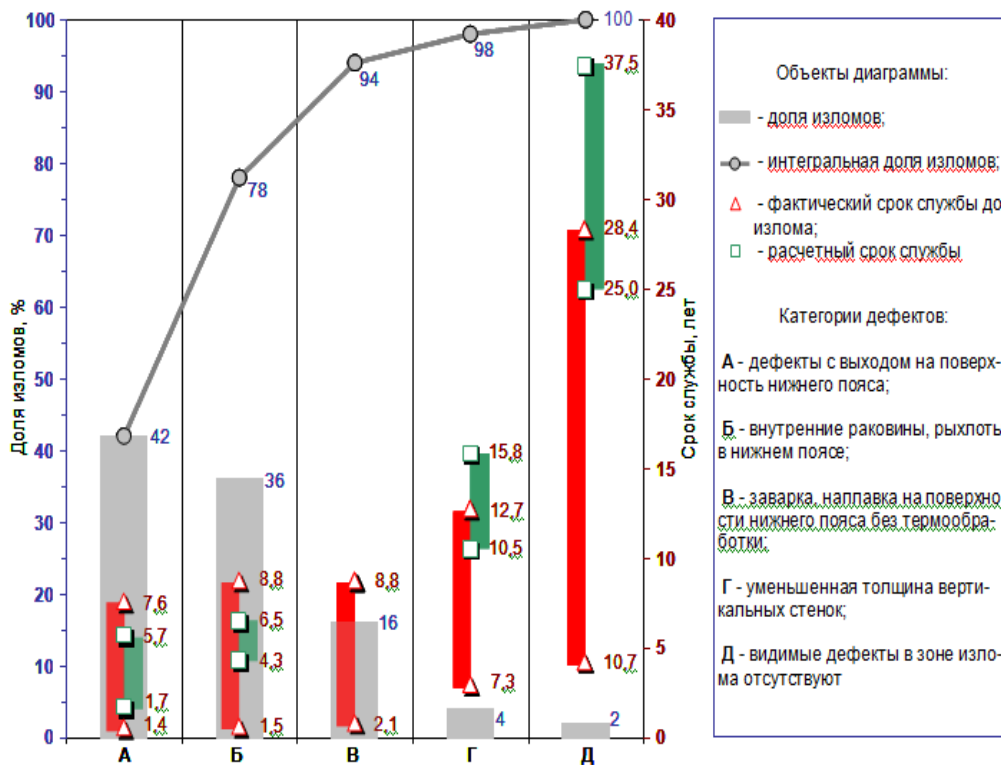


Рисунок 2 – Диаграмма Парето по изломам боковых рам тележки модели 18-100 в зоне *R55*

Для предотвращения аварий от излома боковых рам тележек, в вагонном хозяйстве принята система диагностического метода неразрушающего контроля наличия дефектов в литых деталях тележек грузовых вагонов в первый и последующие межремонтные интервалы эксплуатации. В боковых рамах теле-

жек грузовых вагонов уровень номинальных проектных напряжений относительно низкий, вследствие чего усталостные трещины до момента разрушения рамы могут иметь достаточно протяженные размеры. Поэтому при назначении периодичности межремонтного осмотра, необходимо знать какое время развивающаяся трещина до момента разрушения рамы будет находиться в высокой степени вероятности ее обнаружения. Дефектоскопия должна выявлять дефекты определенного размера, которые при их развитии могут привести к разрушению в последующий межремонтный период обследования грузовых вагонов. В связи с этим является актуальной необходимость уточнения размера дефекта, для оценки возможности эксплуатации боковых рам на различных этапах развития дефекта: от его обнаружения, до момента, когда становится невозможной эксплуатация рамы вследствие угрозы ее разрушения. Поэтому оценка работоспособности рамы выдвигает задачу разработки методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) рамы в эксплуатации, кинетики роста исходных и приобретенных дефектов рамы, для надежного определения безопасного периода их развития до ремонта. Данные о НДС конструкций подвижного состава могут быть получены, как путем натурных экспериментов, так и виртуальных путем создания компьютерных расчетных динамических моделей экипажей. При этом расчётная модель должна достаточно полно отражать реальные свойства исследуемого объекта, учитывать фактический спектр эксплуатационных нагрузок.

Степень разработанности темы. Разработке методов исследований и совершенствованию эксплуатационных качеств, динамики и прочности подвижного состава посвящены труды многих отечественных учёных, инженеров. Они нашли своё отражение в монографиях, учебниках и научных работах. Значительный вклад в развитие этой области внесли отечественные и зарубежные учёные: П.С. Анисимов, И.М. Андреев, Д.Я. Антипин, С.В. Беспалько, Е.П. Блохин, Г.П. Бурчак, Ю.П. Бороненко, М.Ф. Вериге, А.В. Вершинский, М.В. Винокуров, Н.Н. Воронин, А.Д. Гершгорин, В.Н. Данилов, О.Б. Камаев, Н.И. Карякин, В.А. Косарев, В.С. Коссов, Ю. Кофман, А.В. Кузнецов, В.А. Лазарян, А.С. Лисовский, В.П. Лозбинев, Е.А. Луцук, Т. Мацудайра, П. Мюллер, Н.Н. Невзорова, Е.Н. Никольский, Л.Н. Никольский, А.М. Орлова, Г.И. Петров, В.С. Плоткин, Д.Ю. Погорелов, Ю.С. Ромен, Г.В. Полторак, А.А. Попов, П.Г. Проскурнев, В.Б. Проскуряков, А.А. Рахмилевич, В.И. Сакало, О.М. Савчук, А.Н. Савоськин, К.А. Сафонцев, А.Л. Скорман, А.В. Смольянинов, М.М. Соколов, А.Б. Сурвилло, А.В. Табакман, Ю.А. Усманов, В.Ф. Ушкалов, В.Н. Филиппов, В.Д. Хусидов, В.Д. Цукерман, И.И. Черкашин, Л.А. Шадур, Н.Н. Шапошников, Е. Шперлинг, С.М. Шудрак и многие другие.

Исследования по применению положений линейной механики разрушения, для оценки долговечности (живучести) конструкций подвижного состава с трещинами, определения характеристик трещиностойкости материалов, применяемых в железнодорожной технике, выполнялись учеными и инженерами:

В.В. Болотин, Л.Р. Ботвина, Д. Броек, А.С. Гусев, В.П. Когаев, Дж. Коллинз, П.И. Кудрявцев, Н.А. Махутов, В.В. Кобищанов, В.В. Понасюк, Е.М. Морозов, В.З. Партон, А.П. Шлюшенков, И.В. Гадолина, С.Г. Лебединский, Дж.Р. Ирвин, А.А. Гриффитс, Д.С. Дагдейл, А.А. Уэлс, П. Пэрис, Я.Б. Фридман, Ф. Эрдоган. Практика изготовления и эксплуатации ответственных деталей и конструкций железнодорожного транспорта показывает, что при существующем уровне научных, конструкторских и технологических проработок не удастся полностью исключить повреждения, отказы и аварии на железнодорожном транспорте. Требуется дальнейшее развитие работ по оценке и обоснованию прочности, ресурса и рисков эксплуатации объектов.

Объектом исследования является литая боковая рама трёхэлементной тележки грузового вагона.

Цель и основные задачи диссертационного исследования.

Целью работы является на основе исследования живучести конструкции в эксплуатации сформулировать научно обоснованные требования к установлению параметров допустимых дефектов в металле, безопасных в межремонтный период.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- разработка и верификация динамической модели грузового вагона для численного моделирования методом Крейга-Бемптона эксплуатационной динамической нагруженности боковой рамы тележки;
- разработка программного модуля автоматического создания конечно-элементной модели боковой рамы тележки, содержащей трещиноподобные дефекты разных типов (внутренние, поверхностные, сквозные);
- расчет коэффициента интенсивности напряжения (КИН) на фронте трещины и численное моделирование её развития, с разработкой алгоритма развития трещиноподобных дефектов на основе механики разрушения;
- обоснование размеров конечно-элементной сетки для устойчивости результатов расчета КИН на основе сравнения их с известными решениями;
- сравнение предложенной модели развития трещины в раме с экспериментальными данными и реальными случаями их изломов;
- исследование живучести рамы с различными типами дефектов в детерминированной постановке.

Научная новизна. 1 Разработаны численные методы исследования, подтверждающие возможность с приемлемой точностью идентифицировать спектр эксплуатационной нагруженности и живучесть несущих элементов конструкций трёхэлементных тележек средствами виртуального моделирования.

2 На основе экспериментальных исследований образцов боковых рам на живучесть с использованием специализированного стендового оборудования, проведения ходовых динамико-прочностных испытаний грузовых вагонов на испытательном полигоне, выявлены наиболее уязвимые по повреждаемости

элементы боковой рамы и дано уточненное описание их напряженно-деформированного состояния.

3 Решена задача моделирования кинетики роста технологических дефектов литья разных размеров и типов (внутренние, поверхностные, сквозные) в зонах концентрации напряжений боковой рамы тележки грузового вагона с использованием конечно-элементного комплекса MSC.Marc, его процедурных команд, языка программирования Python, данных об эксплуатационной нагруженности рамы и характеристик трещиностойкости материала рамы.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработанные методы определения эксплуатационной нагруженности боковой рамы тележки и моделирования развития трещиноподобных дефектов

в зонах концентрации напряжений, позволяют оценить живучесть рамы в межремонтный период ее эксплуатации;

- полученные результаты обеспечивают возможность назначения минимальных размеров указанных дефектов с разной величиной запаса по живучести, которые должны быть выявлены методами неразрушающего контроля для обеспечения безаварийной эксплуатации рамы в интервалах регламентных ремонтных работ.

Методология и методы исследования. В настоящей диссертации использованы численные методы – путем создания математических моделей с использованием лицензионных программных комплексов (MSC.SOFTWARE), апробированных на сравнении с известными теоретическими результатами, экспериментальными данными и фактическими видами повреждений – разрушений боковых рам тележки грузового вагона в эксплуатации.

На защиту выносятся следующие положения:

- метод исследования эксплуатационного напряженно-деформированного состояния боковой рамы тележки грузового вагона средствами виртуального моделирования;

- способ трехмерного моделирования технологических дефектов в буксовом проеме боковой рамы грузового вагона трещинами разных типов;

- возможность предложенной методики моделировать развитие технологических дефектов в буксовом проеме боковой рамы грузового вагона до потери ею несущей способности при эксплуатации.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность научных исследований и заключений основаны на корректном использовании численных методов, базирующихся на теоретических подходах, классическом методе конечных элементов, а также применения аттестованных методик, измерительных и испытательных средств. Результаты, полученные этими методами, подтверждены удовлетворительным совпадением с эксперименталь-

ными данными и известными теоретическими решениями с приемлемой степенью точности.

Основные положения и полученные в диссертационной работе результаты докладывались и обсуждались на:

- 69 международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» 21.05–22.05.2009, в г. Днепропетровск 2009 г.;

- XI Научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» 21–22 октября 2010 г., Москва, Россия;

- VI Международном симпозиуме по трибофатике МСТФ 2010 в г. Минск, БГУ 2010 г.;

- VII международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» 6–10 июля 2011 г., в г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2011 г.;

- XIII международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта. Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава и энергосбережение», в г. Днепропетровск 2012 г.;

- XIV Научно-практической конференции «БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ» (24–25 октября), в г. Москва, 2013 г.

Публикации. Основные положения диссертации и научные результаты опубликованы в 14 печатных работах. Три статьи опубликованы в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованный ВАК России для публикаций научных результатов диссертаций. Одна статья опубликована в издании, индексируемом в международной цитатно-аналитической базе данных SCOPUS.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения с изложением результатов и выводов, списка литературы из 129 наименований и приложения. Материалы диссертации изложены на 134 страницах, включают 51 рисунок и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе приведен краткий обзор современного состояния исследований живучести и нагруженности литых деталей тележки грузового вагона. Рассмотрены теоретические и экспериментальные методы исследований НДС боковой рамы тележки грузового вагона с технологическими дефектами.

Определены основные направления темы исследования живучести литых деталей подвижного состава, ее цель, научная новизна.

Во втором разделе разработан метод идентификации спектра эксплуатационной нагруженности боковой рамы тележки путём компьютерной имитации ходовых испытаний на виртуальной 3D-модели грузового вагона, движущегося

по представительному участку ж.-д. пути. При этом учитывалось, что 3D-модель системы «вагон-путь» должна отражать свойства реального объекта в части инерционно-жесткостных (частотных) характеристик экипажа, а также в части спектра внешних возмущений от неровностей пути. 3D-модель (рисунок 2) строилась в программном комплексе MSC.ADAMS/Rail как механическая система абсолютно твердых и упругих тел (боковые рамы тележки), связанных шарнирами и силовыми элементами. Модель боковой рамы как упругого тела построена в конечно-элементном комплексе MSC/Marc.

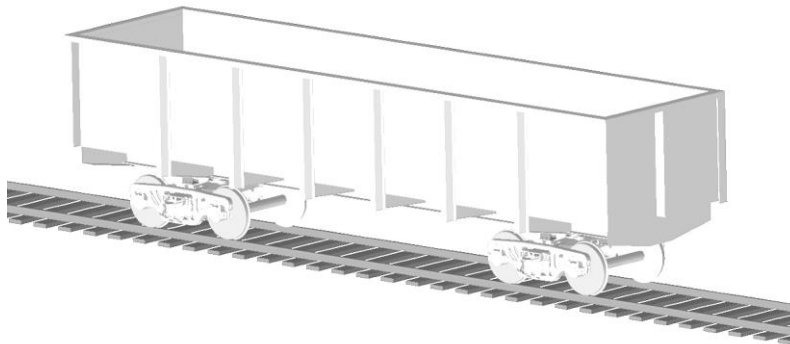


Рисунок 2 – 3D – модель системы «вагон-путь»

Проведена верификация по экспериментальным данным модели вагона на предмет напряженно-деформированного состояния боковой рамы от статической нагрузки на ось и частотных характеристик вагона для первых форм его колебаний. Динамическое поведение боковых рам как упругого тела моделировалось методом динамической редукции Крейга-Бемптона. Боковые и вертикальные неровностей пути задавалась в виде стационарных функций с определённой спектральной плотностью в соответствии с РД 32.68-96. Динамические напряжения в материале боковой рамы тележки (модель 18-100) в зоне их концентрации во внутреннем углу буксового выреза (зона R55) регистрировались при скоростях движения вагона от 40 до 100 км/ч в прямых и кривых участках пути. Схематизация напряжений выполнялась методом «дождя». Полученные в результате схематизации суммарные гистограммы (спектры) статистических распределений амплитуд динамических напряжений по всему диапазону скоростей при имитационных испытаниях и гистограммы напряжений, построенные аналогичным способом при натурных динамико-прочностных испытаниях вагона на железнодорожных путях общего пользования, приведены на рисунке 3.

Сравнение этих результатов с экспериментальными данными подтверждает, что представляется возможным с приемлемой точностью идентифицировать спектр эксплуатационной нагруженности несущих элементов трёхэлементных тележек моделей типа 18-100 средствами виртуального моделирования.

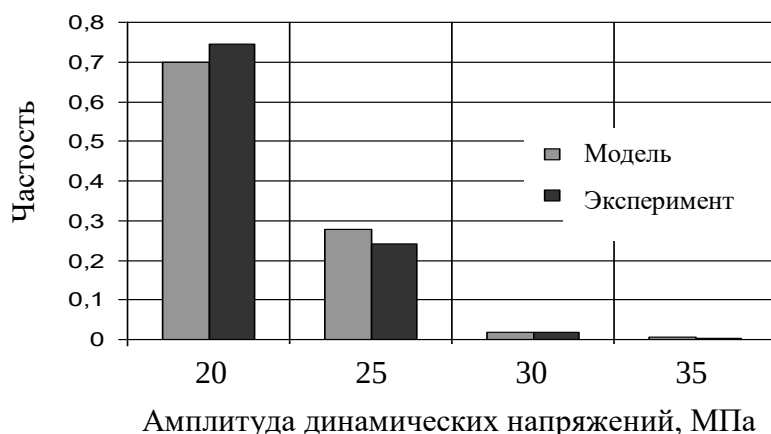


Рисунок 3 – Гистограммы динамических напряжений

В третьем разделе представлена методика алгоритма (на основе процедурных команд программного комплекса MS.Marc и языка программирования высокого уровня Рупон) моделирования развития трещинно-подобных дефектов разных типов (внутренние, поверхностные, сквозные) в зоне внутреннего радиуса R55 буксового выреза боковой рамы методом конечного элемента. Проведена верификация предложенной методики на предмет достоверности полученных результатов расчета коэффициента интенсивности напряжений на фронте трещины. Для схематизации всех видов несплошностей (пор, включений, непроваров, надрывов и т. п.) в данной работе использовался консервативный подход к выбору схематизации дефекта, т.е. из всего многообразия технологических литейных дефектов для расчёта брался наиболее опасный с точки зрения скорости его развития (кинетики). Это подразумевало, что:

- все дефекты схематизировались трещинами, т.е. если даже дефекты являются объемными, учитывалось существование вероятности того, что их граница имеет трещиноподобные заострения;

- форма схематизации дефекта выбиралась из условия, что она наиболее опасная с точки зрения статической и циклической трещиностойкости.

Известно, что наиболее опасной трещиной в технике является трещина типа «разрыв» (тип I раскрытия трещины). Основной задачей при расчете детали с трещиной является определение коэффициента интенсивности напряжения (КИН) на фронте трещины в зависимости от ее размеров. Для определения КИН для трещины (типа I) в инженерной практике обычно используется следующее выражение (1):

$$K_I = \sigma_1 \sqrt{\pi l Y(a)}, \quad (1)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжения для трещины (тип I раскрытия трещины); σ_1 – максимальное главное напряжение в области развития трещины; a – размер трещины; $Y(a)$ – поправочная функция, которая зависит от

формы детали и ее напряженно-деформированного состояния (НДС). Данная функция обычно берется по справочным данным для тел простых форм (пластин, оболочек). Для боковой рамы, детали сложной формы (коробчатое сечение), сложного НДС (изгиб, растяжение), а также при учете возможного двухстадийного характера развития трещины (поверхностная и далее сквозная), очень трудно подобрать поправочную функцию, чтобы быть уверенным в достоверности вычисленного КИН. Эти трудности можно обойти, используя метод конечных элементов (МКЭ). Данный метод позволяет моделировать исходную дефектность и НДС в раме (в реальной детали), рассчитать инвариантный энергетический J -интеграл Райса (расходуемая энергия на малое приращение площади поверхности трещины). В линейной механике разрушения, J -интеграл связан с КИН следующим выражением (2)

$$J = \frac{1}{H}(K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2\nu}K_{III}^2, \quad (2)$$

где K_I , K_{II} , и K_{III} – КИН раскрытия трещины по первому, второму и третьему типам разрушения, соответственно. Программный конечно-элементный комплекс MSC.Marc позволяет рассчитать этот интеграл и соответственно КИН по каждому типу раскрытия трещины, если смоделирована трещина и задан ее фронт. В данной работе исследовалось развитие трещины по первому типу. При этом очень важно, что КИН определялся для конкретной детали с трещиной, то есть учитывались геометрические особенности формы рамы и ее НДС.

Статический расчет НДС (рисунок 4) половины рамы без дефектов от вертикальной нагрузки подтверждает повышенный уровень напряжений в зоне внутреннего буксового выреза. Анализ направления первого главного напряжения в этой зоне выявил ориентацию плоскости (сечение А–А) к которой перпендикулярны эти напряжения в этом месте.

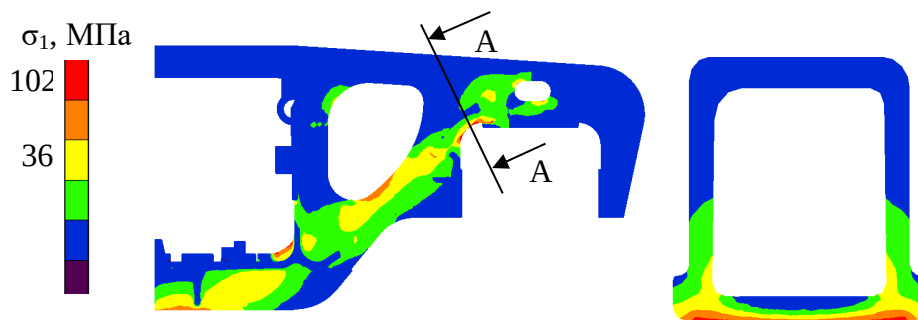


Рисунок 4 – НДС рамы при нагрузке на ось 23,5 тс

Данная плоскость рассматривалась как плоскость, в которой происходит дальнейшее развитие исходных дефектов.

Для моделирования развития (подрастания) дефектов разных типов (внутренние, поверхностные, сквозные) в зоне внутреннего радиуса $R55$ буксо-

вого выреза боковой рамы, был специально разработан программный модуль (макрос) на основе использования процедурных команд программного конечно-элементного комплекса MSC.Marc и языка программирования PYTHON.

Алгоритм программного модуля предусматривает автоматическую реализацию трех этапов.

1 Создание конечно-элементной 3D-модели боковой рамы тележки, содержащей трещиноподобные дефекты разных типов (внутренние, поверхностные, сквозные) в зоне внутреннего радиуса $R55$ буксового выреза. Исходный дефект моделируется в отдельной конечно-элементной подконструкции трещиной с эллиптическим фронтом заданных размеров.

2 Статический расчет НДС рамы с трещиной заданных размеров и типа при осевой нагрузке 23,5 тс для определения КИН на ее фронте.

3 Моделирование развития (подрастания) фронта трещины на основе положений механики разрушения и эксплуатационного блока амплитуд вертикальных сил в буксовом проеме рамы.

При этом принимались следующие допущения:

- фронт трещины в процессе ее развития схематизируется эллиптическими дугами;
- моделирование развития внутренних и поверхностных трещин останавливается на расстоянии 2 мм от свободной поверхности рамы;
- плоскость, в которой моделируется исходная трещина, ориентирована перпендикулярно максимальному главному напряжению в месте ее расположения, то есть исследуется трещина по первому типу развития (отрыв);
- развитие трещины до разрушения моделируется в этой плоскости, что подтверждается реальными случаями изломов.

Конечно-элементная модель рамы состоит из двух частей – основной и подконструкции, содержащей трещину. Расчетная конечно-элементная модель половины рамы с исходным поверхностным дефектом, результаты расчета НДС и КИН, являющиеся реализацией этапов 1 и 2, показаны на рисунке 5. Развитие трещин разных типов (рисунок 6) на третьем этапе моделируется как изменение размеров их текущего фронта в результате геометрических приращений в его контрольных точках для формирования нового фронта трещины. Внутренняя трещина прорастивается наружу, образуя поверхностную трещину. Поверхностная трещина прорастивается на толщину до сквозной, сквозная до разрушения. При таком подходе учитываются возможные разные скорости подрастания фронта в его контрольных точках. По рассчитанным суммарным значениям приращений подрастания фронта определяются размеры нового (текущего) фронта (этап 3). Затем перестраивается конечно-элементная подконструкция с трещиной с учетом изменения размеров ее фронта (этап 1), выполняется расчет КИН при статической нагрузке (этап 2) на новом фронте трещины и процесс повторяется.

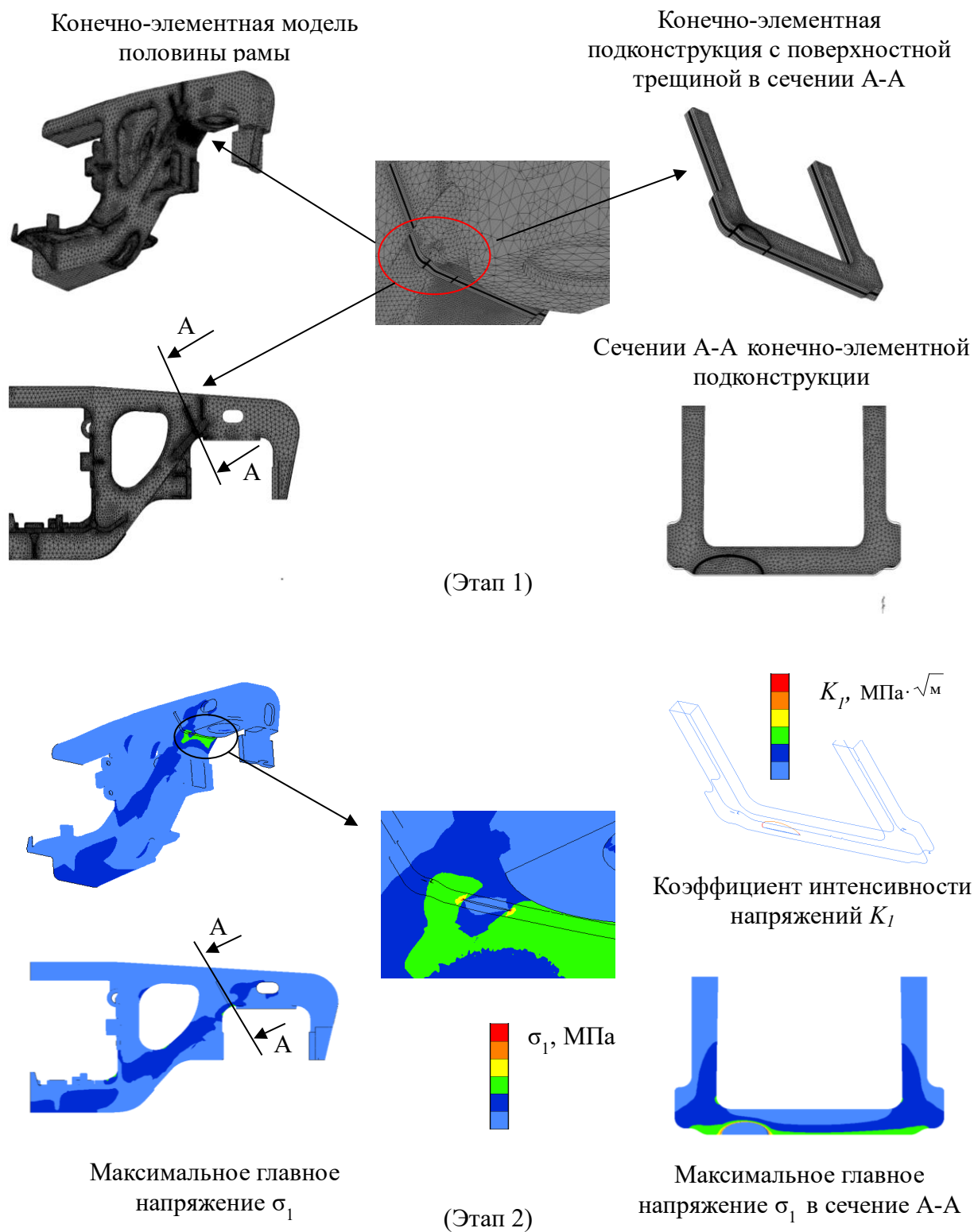


Рисунок 5 – Результаты реализации этапов 1,2 программного модуля

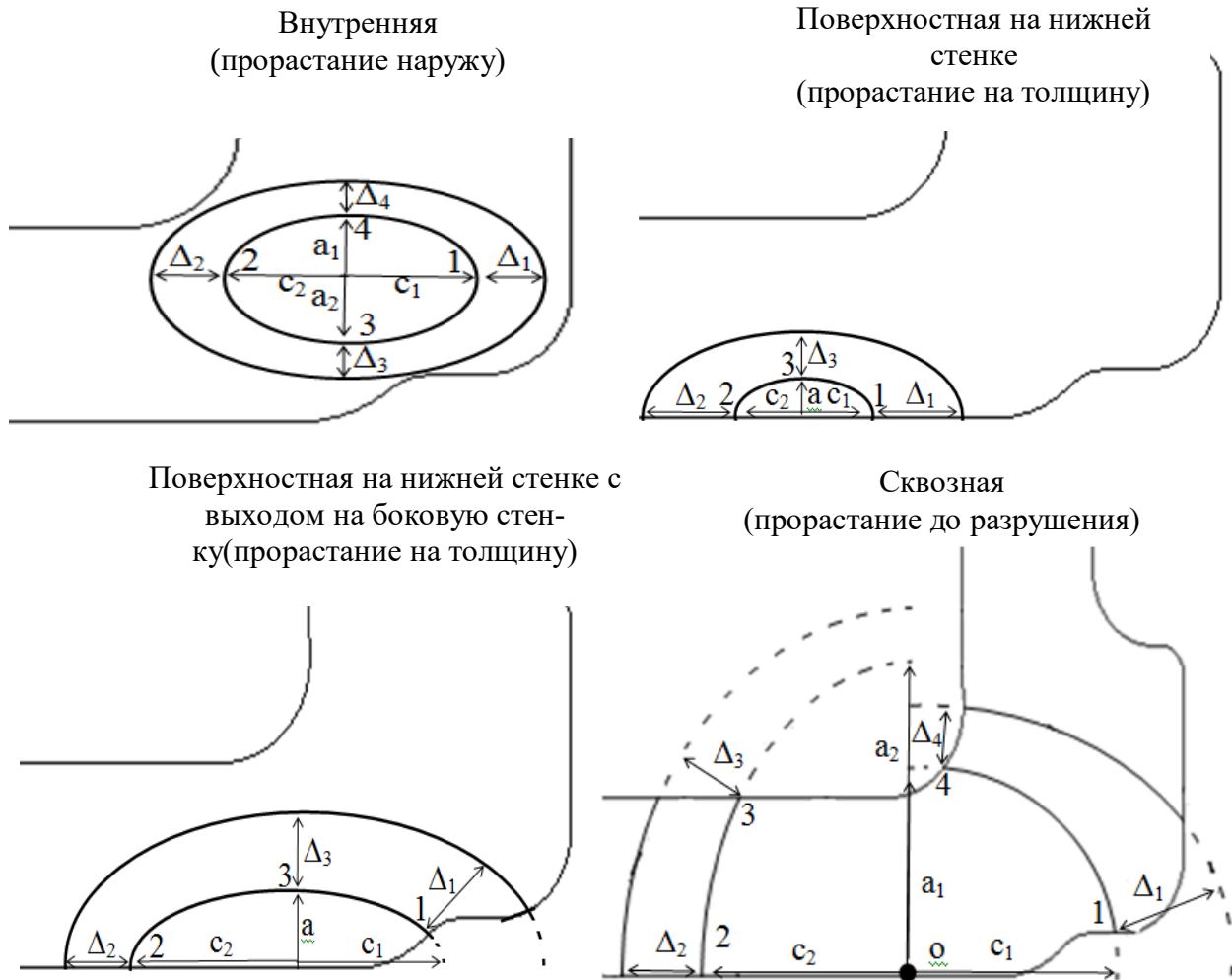


Рисунок 6 – Алгоритм моделирования подрастания фронта разных типов трещин (реализация этапа 3)

Значение предельного подрастание фронта трещины назначается из условия, что КИН на новом фронте, отличается от КИН на предыдущем (текущем) фронте не более чем на 10%. При реализации этапа 3 в качестве эксплуатационных нагрузок берется блок амплитуд вертикальных сил в буксовом проеме рамы. Для кинетической диаграммы усталостного разрушения материала в инженерных расчетах для оценки показателей живучести наиболее приемлемым является выражение для скорости V развития трещины предложенное А. Пэрисом:

$$V = C[\Delta K]^n, \quad (3)$$

где C и n – эмпирические характеристики циклической трещиностойкости материала, $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ – размах КИН в цикле нагрузки.

Формула (3) описывает средний (линейный) участок полной кинетической диаграммы усталостного разрушения, которая в большинстве случаев имеет S – образный вид (рисунок 7).

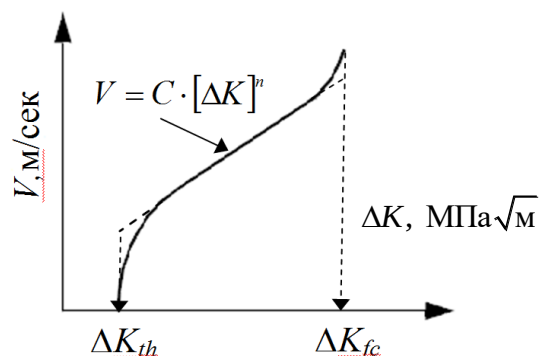


Рисунок 7 – Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Для обеспечения устойчивости расчетных значений КИН на фронте моделируемой трещины в раме необходимая степень сгущения конечно-элементной сетки определялась на основе анализа расчетных значений КИН для тестового примера. В качестве примера было выбрано известное решение распределения КИН на фронте центральной полуэллиптической поверхностной трещины в прямоугольной пластине ограниченных размеров, подверженной растяжению и изгибу.

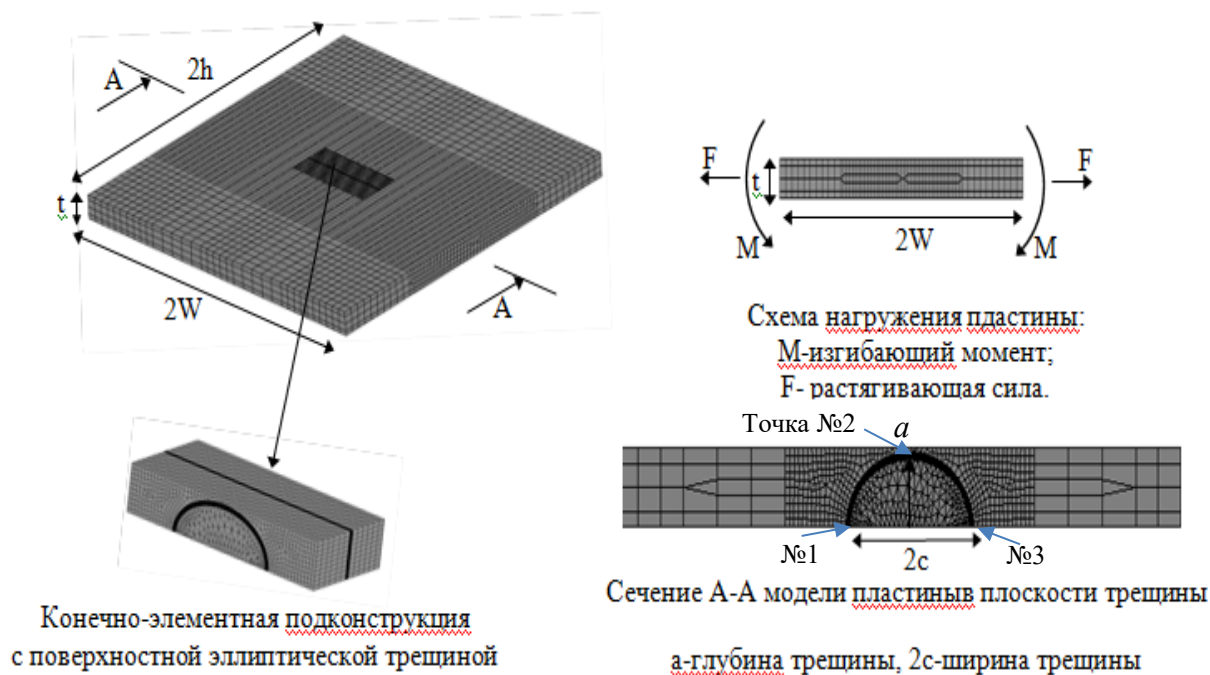


Рисунок 8 – Расчетная конечно-элементная модель пластины с центральной поверхностной трещиной и схема приложенных нагрузок

Расчетная конечно-элементная модель и схема приложения нагрузки приведены на рисунке 8. Значение толщины пластины и прикладываемые нагрузки выбирались из условия соответствия толщине боковой рамы в зоне внутреннего радиуса $R55$ буксового выреза и особенностям напряженно деформированного состояния (сочетание изгиба и растяжения) в этой зоне. По результатам проведенных исследований были определены размеры конечных элементов в окрестности фронта трещины для достижения приемлемой точности расчетных значений КИН на ее фронте.

На рисунке 9 представлены результаты расчетных и известных значений КИН для трещины с глубиной от 2 мм до 18 мм.

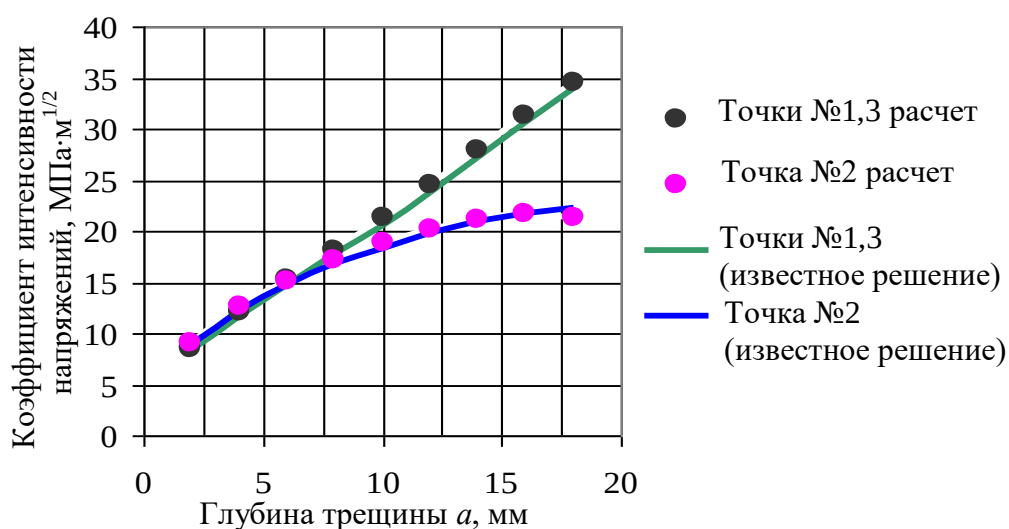


Рисунок 9 – Значения КИН

Приведенные результаты показывают, что достигнуто удовлетворительное совпадение величин КИН с точностью менее 3%. По результатам этих расчетов сформулированы необходимые требования к размеру конечно-элементной сетки, который обеспечивает инженерную точность расчета КИН на фронте трещины. При моделировании развития трещины в боковой раме программный модуль ее генерации автоматически соблюдал необходимые размеры конечно-элементной сетки, полученные в этом исследовании.

В четвертом разделе предложенная методика моделирования дефектов в зоне внутреннего радиуса $R55$ буксового выреза применена для исследования реальных случаев изломов боковой рамы. По данным расчетов определены предельные состояния рамы с дефектами до потери ею несущей способности. Представлен анализ результатов исследований живучести боковой рамы. По результатам исследований, были определены допустимые области начальных размеров поверхностных трещин для разных запасов по живучести рамы в период межремонтного обслуживания вагонов. На рисунке 10 показаны эскизы развития фронта трещины для фактического и расчетного, полученного по предложенной методике, случаев разрушения рамы в эксплуатации.

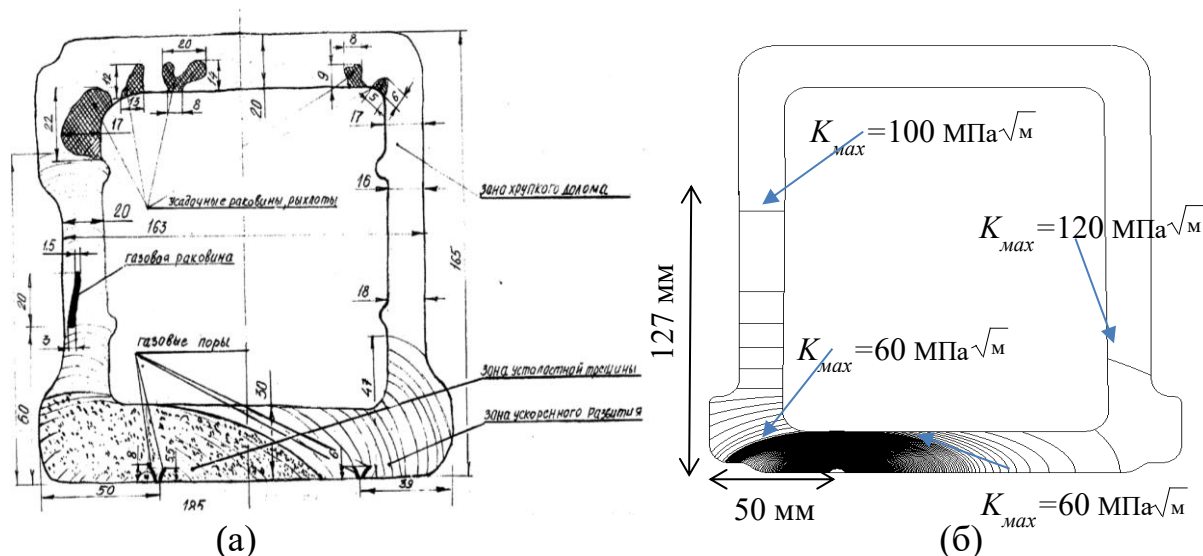


Рисунок 10 – Эскизы развития фронта трещины для фактического (а) и расчетного (б) случая излома боковой рамы в зоне R55

Сопоставление характера развития фронта на эскизе фактического излома рамы и расчетного, указывает на достигнутое качественное их совпадение. На расчетном эскизе эволюции фронта трещины, кривые отображающие фронт трещины, показаны через равное количество циклов нагрузки. Там же приведены максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений для разных этапов эволюции размеров трещины. Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

- достигнуто удовлетворительное совпадение расчетных результатов моделирования развития трещины со случаями разрушения рам в эксплуатации;
- разрушение рамы (хрупкий излом) от исходных поверхностных дефектов в зоне внутреннего радиуса R55 буксового выреза происходит на этапе развития сквозной трещины, то есть когда исходный поверхностный дефект пророс на толщину стенки рамы;
- площадь усталостной трещины при хрупком изломе в зависимости от сезона эксплуатации может составлять от 20 до 50 процентов площади сечения рамы в этом месте (меньшее значение – в зимний период);
- время развития сквозной трещины до разрушения составляет порядка двух процентов от общего времени до разрушения рамы;
- оценка живучести рамы может быть основана на времени прорастания исходного дефекта на толщину стенки рамы до сквозной трещины.

Для боковых рама тележек грузовых вагонов свойственен низкий уровень номинальных проектных напряжений, вследствие чего усталостные трещины до момента разрушения рамы могут иметь достаточно протяженные размеры. Поэтому при назначении периодичности межремонтного осмотра необходимо знать какое время развивающаяся трещина до момента разрушения рамы будет находиться в высокой степени вероятности ее обнаружения. Дефектоскопия должна выявлять дефекты определенного размера, которые при их развитии

могут привести к разрушению в последующий интервал межремонтного периода обследования грузовых вагонов. В связи с этим возникает необходимость уточнения этого размера для оценки возможности эксплуатации боковых рам на различных этапах развития дефекта:

- от его обнаружения;
- до невозможности эксплуатации рамы вследствие ее повреждения.

Для оценки этих размеров и коэффициента запаса живучести $[n_{\text{ж}}]$ (отношение времени эксплуатации до потери несущей способности рамы с трещиной к периоду межремонтного обследования вагонов) были проведены исследования кинетики развития поверхностных и внутренних дефектов по предложенной методике. Исходные дефекты моделировались эллиптическими трещинами (рисунок 10). Варьировались размеры полуосей эллипса c_1 , c_2 , a и глубина залегания l .

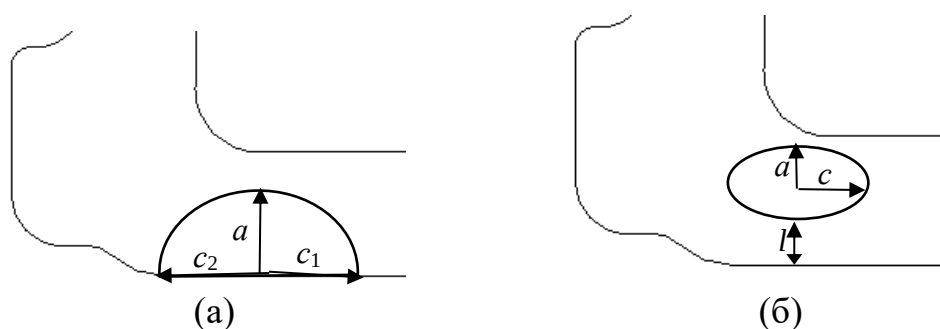


Рисунок 10 – Геометрические размеры исходных дефектов:
(а) – поверхностная трещина; (б) – внутренняя трещина

На рисунке 11 показана графическая зависимость времени t прорастания внутренних дефектов на поверхность от их глубины залегания l и площади S .

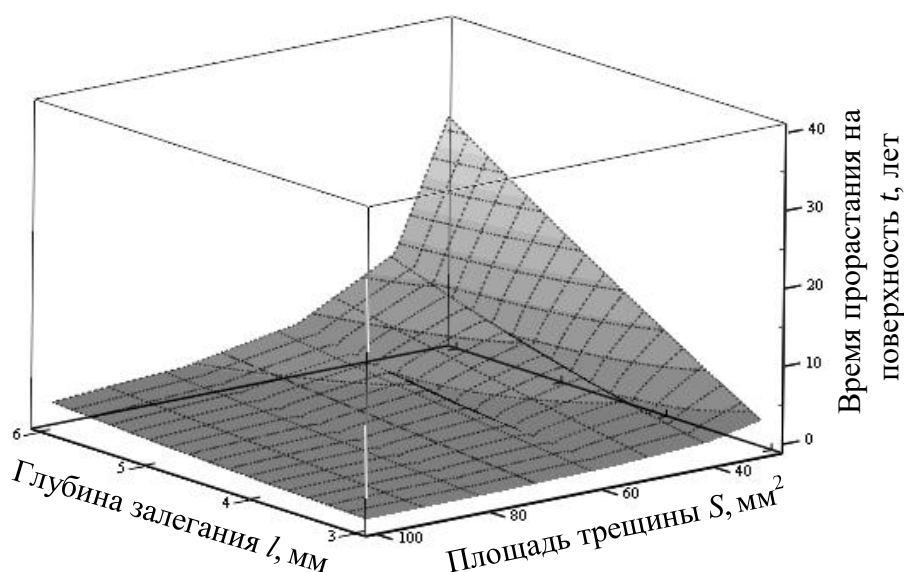


Рисунок 11 – Графическая зависимость времени t прорастания внутренних дефектов на поверхность

Обработка данных приведенных на рисунке 11 с целью определения границ, которые соответствуют области дефектов определенной площади и глубины залегания с различными временами прорастания на свободную поверхность рамы, в виде графической зависимости показана на рисунке 12.

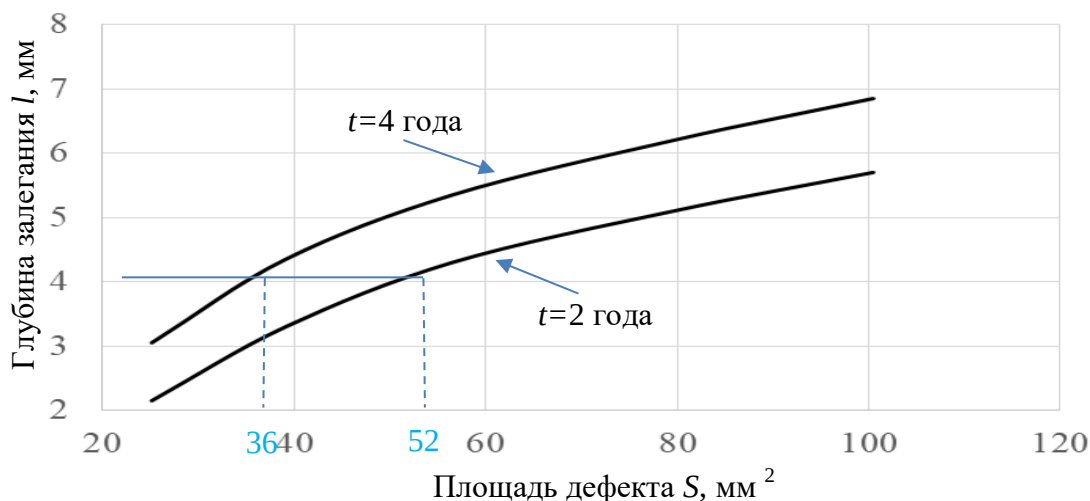


Рисунок 12 – Графическая зависимость времени t прорастания внутренних дефектов на поверхность

Анализ рисунка 11 показывает, что продолжительность прорастания внутреннего дефекта на поверхность рамы существенно зависит от глубины его залегания и площади схематизации эллиптической трещиной. Она может колебаться в диапазоне от полугода до 40 лет при расчетном диапазоне площади дефекта S в пределах 20–100 мм². Например, для времени прорастания 2 года при начальной глубине залегания 4 мм, площадь схематизированного дефекта эллиптической трещиной должна быть не больше 52 мм². Для времени прорастания 4 года при начальной глубине залегания 4 мм, площадь схематизированного дефекта эллиптической трещиной должна быть не больше 36 мм². При этом запасы по живучести, вычисленные по формуле из условия прорастания дефекта на толщину стенки боковой рамы в межремонтный период 2 года, будут соответственно равны 1 и 2. По результатам исследований кинетики развития поверхностных дефектов были определены области их начальных размеров, которые соответствуют разным запасам по живучести рамы в период межремонтного обслуживания вагонов 2 года (рисунок 13). На основании обработки полученных результатов на рисунке 14 приведена зависимость величины запаса по живучести $[n_{ж}]$ и пробега δ вагона до излома боковой рамы тележки от значения площади поверхностного дефекта S , с которой он должен быть обнаружен средствами неразрушающего контроля в межремонтный период эксплуатации рамы. В скобках показан радиус полуокружности данной площади. Зави-

симость отражает 95 % уровень вероятности не разрушения рамы в этот период.

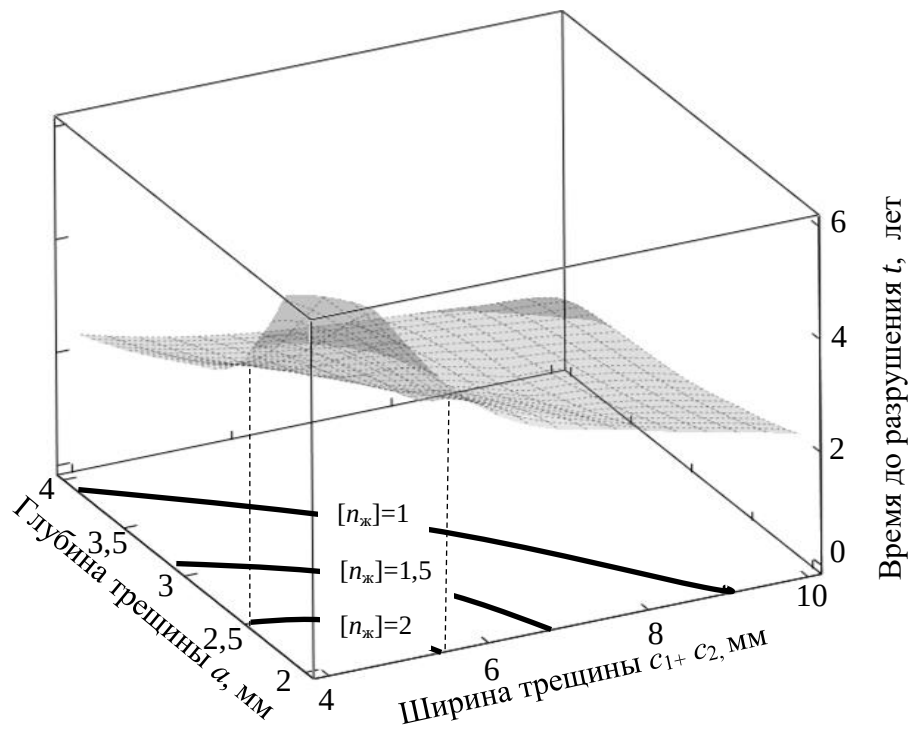


Рисунок 13 – Области исходных размеров поверхностных дефектов с различными запасами живучести $[n_{ж}]$ в межремонтные интервалы эксплуатации

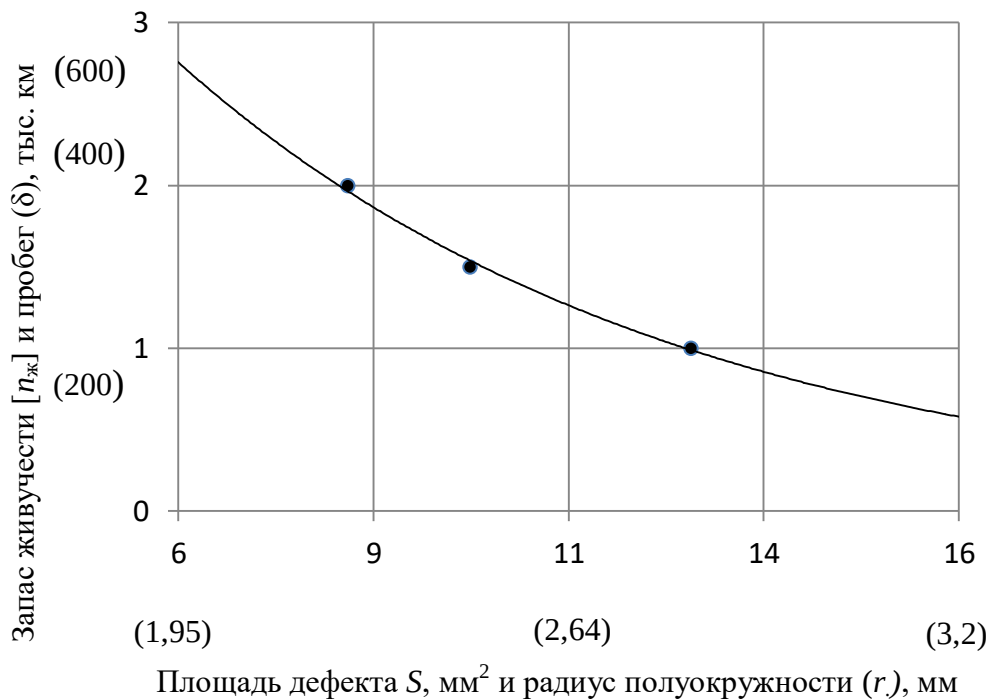


Рисунок 14 – Зависимость запаса живучести $[n_{ж}]$ и пробега (δ) от площади S поверхностного дефекта

Исходя из этой зависимости, можно назначать периодичность осмотра боковых рам методами неразрушающего контроля с заданным уровнем запаса по безопасности их эксплуатации в этот период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с задачами диссертационного исследования получены следующие результаты, даны рекомендации и определены перспективы дальнейшей разработки данной темы.

1 Выполненные расчетно-экспериментальные исследования подтверждают, что представляется возможным с приемлемой точностью идентифицировать спектр эксплуатационной нагруженности несущих элементов трёхэлементных тележек моделей типа 18-100 средствами виртуального моделирования. В частности, создана 3D-модель грузового вагона как механическая система абсолютно твердых тел и упругих боковых рам, динамическое поведение которых моделировалось методом динамической редукции Крейга-Бемптона.

2 Анализ НДС боковой рамы тележки грузового вагона показывает, что наиболее опасной зоной, с точки зрения зарождения и развития усталостной трещины, является угол буксового проема (зона радиуса $R55$). Это подтверждается многочисленными примерами их разрушения в эксплуатации.

3 Моделирование развития усталостной трещины до потери несущей способности рамы путём воспроизведения литейного технологического дефекта в зоне угла буксового проёма показывает ее удовлетворительное соответствие двухстадийности протекания (поверхностная и сквозная). Это подтверждается исследованиями мест изломов разрушившихся в эксплуатации боковин.

4 Достигнуто близкое совпадение расчетных результатов на разработанной модели развития трещины со случаями разрушения рам в эксплуатации.

5 Определено, что время прорастания внутреннего дефекта литья металла в углу буксового проема рамы тележки до выхода его на поверхность рамы в зависимости от глубины залегания (3–6 мм) и площади схематизации (25–120 мм²) эллиптической трещиной находится в интервале от полугода до 40 лет.

6 Установлено, что период развития до разрушения (живучесть) рамы со сквозной трещиной составляет 2–5 % от общего времени накопления повреждений до разрушения.

7 Площадь усталостной трещины при хрупком изломе в зависимости от сезона эксплуатации может составлять от 20 до 50 процентов площади сечения рамы в этом месте (меньшее значение – в зимний период).

8 Для безопасной (с надежностью 0,999) эксплуатации грузовых вагонов в межремонтный период предлагается установить минимальный допускаемый коэффициент запаса живучести $[n_{\text{ж}}]$ несущих литых элементов тележки равный 2,0. Применительно к действующей в настоящее время периодичности ремон-

тов грузового вагона (100–200 тыс. км. пробега) этот показатель обеспечивается, если трещина глубиной до 2,6 мм и шириной до 5,6 мм.

9 Установлена зависимость величины запаса живучести $[n_{\text{ж}}]$ от значения площади поверхностного дефекта S . Исходя из этого, представляется возможным назначать периодичность осмотров боковых рам методами неразрушающего контроля с заданным уровнем запаса по условиям безопасности их эксплуатации в этот период.

10 Предложенная методика исследования эксплуатационного НДС боковой рамы тележки грузового вагона может быть применена на этапе проектирования новых конструкций трёхэлементных тележек моделей типа 18-100 для оценки с приемлемой точностью спектра эксплуатационной нагруженности их несущих элементов средствами виртуального моделирования.

11 Дальнейшие перспективы разработки темы диссертации могут быть связаны с вопросом уточнения развития поверхностных и внутренних дефектов в буксовом проеме боковой рамы грузового вагона не только по первой форме (отрыв) но и по второй (сдвиг) и третьей (срез) формам.

12 Представляется также, что полученные результаты могут послужить основой для назначения научно обоснованных требований к чувствительности методов неразрушающего контроля по обнаружению опасных дефектов в литых деталях железнодорожного подвижного состава.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Протопопов, А. Л. Расчет предельного размера поверхностного дефекта в боковой раме тележки 18-100 грузового вагона из условия безопасной эксплуатации в межремонтный период [Текст] / А. Л. Протопопов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения (Вестник ВЭЛНИИ). – 2012. – № 1 (63). – С. 185–193.

2. Оценка условий безопасности эксплуатации литых деталей тележки грузового вагона [Текст] / В. С. Коссов, Э. С. Оганьян, Н. Ф. Красюков, А. Л. Протопопов // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 5. – С. 20–24.

3. Моделирование живучести боковой рамы трехэлементной тележки грузового вагона численными методами [Текст] / А. Л. Протопопов, В. С. Коссов, Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, М. Н. Овечников // Транспорт российской федерации. – 2019. – № 4 (83). – С. 51–55.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus

4. A computer simulation of operation loading of freight wagon bogie side frame [Текст] / V. S. Kossov, G. M. Volokhov, M. N. Ovechnikov, E. S. Oganyan, A. L. Protopopov // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2018. – Vol. 9. Iss. 13 (Dec.). – P. 791–795.

Публикации в прочих изданиях

5. Протопопов, А. Л. Моделирование развития трещины для оценки живучести по условию исчерпания несущей способности боковой рамы тележки 18–100 грузового вагона [Текст] / А. Л. Протопопов, Э. С. Оганьян // Вестник Научно–исследовательского и конструкторского–технологического института подвижного состава (Вестник ВНИКТИ). – 2010. – Вып. 92. – С. 86–93.

6. Протопопов, А. Л. Размер трещины и живучесть боковой рамы тележки [Текст] / А. Л. Протопопов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 2 – С. 32–34.

7. Коссов, В. С. Оценка периода живучести боковой рамы тележки грузового вагона с технологическими дефектами металла по критерию исчерпания несущей способности [Текст] / В. С. Коссов, Г. М. Волохов, А. Л. Протопопов // Труды VI Международного симпозиума по трибофатике («МСТФ–2010»). – Минск: БГУ, 2010. – С. 123–125.

8. Компьютерные технологии помогают совершенствовать подвижной состав [Текст] / В. С. Коссов, Э. С. Оганьян, Н. Ф. Красюков, А. Л. Протопопов // Локомотив. – 2014. – № 9. – С. 49–53.

9. Коссов, В. С. Исследование живучести боковой рамы тележки грузового вагона, имеющей литейные дефекты, и их развитие до потери ее несущей способности [Текст] / В. С. Коссов, Г. М. Волохов, А. Л. Протопопов // Материалы XI научно–практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ, 2010. – С. VII–2 – VII–6.

10. Оганьян, Э. С. Обоснование показателей сопротивления усталости несущих литых деталей тележек грузовых вагонов [Текст] / Э. С. Оганьян, Н. Ф. Красюков, А. Л. Протопопов // Тезисы докладов VII Международной научно–практической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». – СПб.: ПГУПС, 2011. – С. 111–112.

11. Идентификация эксплуатационной нагруженности боковой рамы тележки грузового вагона [Текст] / В. С. Коссов, Э. С. Оганьян, Н. Ф. Красюков, А. Л. Протопопов, Е. В. Шашкова // Материалы XIV научно–практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ, 2013. – С. III–36 – III–37.

12. К вопросу безопасной эксплуатации литых деталей тележек грузовых вагонов [Текст] / В. С. Коссов, Э. С. Оганьян, Н. Ф. Красюков, А. Л. Протопопов // Материалы XIV научно–практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ, 2013. – С. III–59 – III–60.

13. Протопопов, А. Л. Численное моделирование эксплуатационной нагруженности экипажных частей локомотивов [Текст] / А. Л. Протопопов, Н. Ф. Красюков, Е. В. Шашкова // Вестник Научно–исследовательского и конструкторского–технологического института подвижного состава (Вестник ВНИКТИ). – 2012. – Вып. 94. – С. 104–113.

14. Методы определения ресурса конструкций локомотивов [Текст] / Н. А. Махутов, В. С. Коссов, Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, А. С. Гасюк, Н. Ф. Красюков, А. Л. Протопопов // Труды Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» («Живком –2016»). – М.: ИМАШ РАН, 2016. – С. 76–81.

ПРОТОПОПОВ Андрей Леонидович

ЖИВУЧЕСТЬ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Подписано в печать
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 80 экз. Заказ

Формат бумаги 60x84¹/₁₆

140402, г. Коломна, Московская область, ул. Октябрьской
революции, д. 410, Типография АО «ВНИКТИ».