

На правах рукописи



Чунин Виталий Владимирович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
КОЛЕС ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ МЕТОДАМИ МЕХАНИКИ
РАЗРУШЕНИЯ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

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

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Воронин Николай Николаевич.

Официальные оппоненты: **Воробьев Александр Алфеевич**
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Электрическая тяга», профессор;

Сакало Алексей Владимирович
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет», кафедра «Подъемно-транспортные машины и оборудование», доцент.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Защита состоится 22 июня 2023 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» 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.miiit.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Н. Н. Воронин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Анализ условий эксплуатации и статистики отказов железнодорожных колес показывает, что критерии прочности, указанные в действующих стандартах, не могут полностью гарантировать их безотказность эксплуатации, отсутствуют требования и соответственно методики по оценке стадии развития трещины. При недостаточной вязкости металла и высокой его чувствительности к концентраторам напряжений может начать распространяться усталостная трещина вплоть до критической ее длины, что опасно из-за возможности хрупкого разрушения колеса вследствие влияния сезонных факторов.

Разработчики колес на этапе проектирования не прогнозируют стадию развития усталостных трещины до наступления предельного состояния. Межремонтные пробеги вагона, как правило, устанавливаются исходя из периода технического обслуживания деталей, узлов и не учитывают живучесть основных несущих элементов. Так, например, при увеличении осевой нагрузки, применении новых материалов и конструкций, возрастает вероятность изломов.

В настоящее время активно обсуждается вопрос о возможности эксплуатации литых колес в условиях российских железных дорог. Но учитывая, что технология производства литых колес не подразумевает проведение многостадийного горячего деформирования, а формирование колеса производится путем отливки металла под давлением в форму. Такая технология изготовления обуславливает ряд отличий в свойствах и качестве металла литых колес по сравнению с цельнокатаными колесами.

Таким образом, для исключения возможных рисков возникает необходимость в разработке единой методики оценки стадии развития трещины от динамических воздействий в эксплуатации, проведении исследований поведения металла колес при снижении температуры до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, определение степени изменения свойств и параметров разрушения. По результатам, которых должны быть определены показатели, влияющие на безопасную работу колеса, и получены их минимально допустимые значения, для российских условий эксплуатации.

Степень разработанности темы исследования. Вопросом по применению линейной механики разрушения для оценки живучести элементов подвижного состава выполнялись: В.В. Болотин,

А.С. Гусев, П.И. Кудрявцев, Е.М. Морозов, Дж. Р. Ирвин, А.А. Гриффитс, А.А. Уэлс, Я.Б. Фридман, Ф. Эрдоган и другими.

Значительный вклад в развитие методов исследования динамики и прочности подвижного состава внесли отечественные и зарубежные ученые: П.С. Анисимов, И.М. Андреев, Ю.П. Бороненко, В.Н. Данилов, В.А. Косарев, В.С. Коссов, П. Мюллер, А.М. Орлова, Д.Ю. Погорелов, В.И. Сакало, А.Н. Савоськин, В.Н. Филиппов, В.Д. Цукерман, Е. Шперлинг и многие другие.

Практика эксплуатации железнодорожного транспорта показывает, что в эксплуатации на данный момент не удается полностью исключить повреждения, отказы и аварии, таким образом, следует проводить дальнейшее развитие работ по оценке прочности, ресурса и живучести ответственных деталей, в том числе и железнодорожных колес.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является обеспечение безопасности эксплуатации вагонов путем прогнозирования его пробега после возникновения усталостной трещины в диске колеса до его излома, за счет определения научно обоснованных требований к межремонтным пробегам.

В рамках указанной цели были поставлены и решены следующие задачи исследования:

- анализ методов оценки прочности и живучести железнодорожных колес грузовых вагонов с позиции линейной механики разрушения;
- проведение испытаний литых и цельнокатаных колес по определению количества циклов нагружений до достижения критической длины трещины и исследований их металла по определению характеристик кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) с учетом влияния отрицательных температур;
- разработка математической модели колеса для расчета коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) на фронте трещины и проведение численного моделирования ее развития;
- разработка динамической модели вагона с упругой колесной парой для расчета эксплуатационных амплитуд напряжений в колесе;
- исследование живучести колес в зависимости от климатических температур и определение коэффициентов запаса по живучести, обеспечивающих безопасные межремонтные пробеги.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель грузового вагона с упругой колесной парой для исследования распределения эксплуатационных амплитуд напряжений в колесах средствами виртуального моделирования;
- разработана виртуальная модель стенда для испытаний колес круговым циклическим изгибом и расчета коэффициентов интенсивности напряжений на фронте трещины при моделировании ее развития;
- получены зависимости количества циклов нагружений до достижения критической длины трещины по результатам стендовых испытаний цельнокатаных и литых колес;
- разработан алгоритм вероятностной оценки живучести колес с учетом влияния отрицательных температур.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- представленные методы позволяют на этапе проектирования прогнозировать период развития трещины в колесе с целью обеспечения его безопасной эксплуатации;
- разработанные методы определения напряженно-деформированного состояния колесной пары грузового вагона позволяют оценивать прочность, ресурс и живучесть различных конструкций осей и колес;
- полученные результаты могут быть использованы для установления требований к межремонтным пробегам колесных пар грузовых вагонов.

Методология и методы исследования. Работа выполнена на основе классических методов теории упругости и линейной механики разрушения. В работе использованы численные методы путем создания математических моделей с использованием программных комплексов «MSC.Software» и «Универсальный механизм», апробированных на сравнении с известными теоретическими результатами и экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследований параметров живучести цельнокатаных и литых колес колесной пары грузового вагона и параметров КДУР их металла;
- способ определения КИН на фронте трещины путем проведения трехмерного моделирования развития усталостной трещины в диске колеса;
- метод исследования эксплуатационного напряженно-деформированного состояния колеса грузового вагона средствами виртуального моделирования;
- методика расчета живучести колес, с учетом влияния отрицательных температур, обеспечивающих с заданной вероятностью безопасность эксплуатации.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных исследований и заключений основаны на корректном использовании апробированных численных методах, базирующихся на общепринятых теоретических подходах, а также применения аттестованного испытательного оборудования и поверенных средств измерений. Приведенные в работе модели верифицировались на соответствие экспериментальным данным, полученным на натуральных объектах исследований. Полученные результаты удовлетворительно соответствуют экспериментальным и теоретическим решениям.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

- XXXI Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения МИКМУС-2019 по теме «Моделирование роста трещины в диске ходового колеса подвижного состава» 4-6 декабря 2019 в г. Москва, 2019 г.;
- I Международной научной конференции аспирантов и молодых ученых «Железная дорога: путь в будущее» по теме «Оценка параметров живучести колес подвижного состава с позиции механики разрушения» 28 апреля 2022 в г. Москва, 2022 г.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражены в 12 печатных трудах, из них четыре статьи опубликованы в изданиях, входящих в Перечень рекомендованный ВАК России и в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus, получено два патента на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 119 страниц, включает 12 таблиц, 53 рисунка, список использованных источников из 80 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности и апробации результатов.

В первом разделе выполнен анализ повреждаемости колес колесных пар и способы их контроля. Для безопасной эксплуатации подвижного состава диагностика ходовых его частей является неотъемлемой частью. Проведенный анализ нормативной документации показал отсутствие требований и, следовательно, методики оценки живучести колес с момента возникновения усталостной трещины до излома, а также учета влияния низких климатических температур, при которых изменяются механические свойства металла колес, и увеличивается жесткость пути. Выявление трещин в эксплуатации проводят с помощью внешнего осмотра и неразрушающих методов контроля. Анализ методов обнаружения дефектов колес, при которых проводят неразрушающий контроль (НК), показал, что 3-х мм трещиноподобный дефект в диске колеса с определенной вероятностью может быть не выявлен и допущен в эксплуатацию. Нарушение сроков проведения контроля может привести к разрушению колеса в результате развития трещины.

Согласно статистике отказов по результатам итогов работы вагонного хозяйства в 2021 г. наибольшее количество случаев связано с неисправностями буксового узла 43 %, автотормозного оборудования 27 % и колесных пар 17 %. При этом 26 и 13 цельнокатаных колес были забракованы по причине трещины в диске колеса в 2020 г. и 2021 г. соответственно. Наиболее опасными являются трещиноподобные дефекты эксплуатационного или технологического происхождения, расположенные в местах наибольших амплитуд напряжений. Таким образом, исходя из общего парка эксплуатируемых грузовых вагонов 1249,4 тыс. в 2021 г. вероятности возникновения трещины в дисковой части цельнокатаного колеса составляет порядка 10^{-6} , что соответ-

ствует средней величине риска. Следовательно, оценка развития трещин в колесах является актуальной задачей требующей дополнительные всесторонние как теоретические так экспериментальные исследования.

Во втором разделе проведена оценка прочности колес на этапах жизненного цикла и получены экспериментальные кривые живучести колес. На данный момент существуют две основных, но принципиально различающихся технологии производства колес: многостадийная обработка давлением при кузнечно-прокатном цехе литой заготовки – цельнокатаное колесо, и литья жидкой стали в формы – литое колесо. Поэтому, колеса будут обладать разными наследственными физико-механическими свойствами. Все технологические и конструкторские ухищрения, предназначенные сгладить различия в природе металла литого и катаного колеса, дают лишь частичный результат и полностью неустраняемы.

Для построения диаграммы зависимости количества циклов нагружений до достижения критической длины трещины были проведены стендовые испытания путем приложения циклически изменяющегося знакопеременного кругового изгиба на литых колесах из стали марки ААР В, как типового представителя, и цельнокатаных колесах из стали марки 2 с плоскоконической формой диска.

Далее проводилось тензометрирование колес для фактического подтверждения зоны потенциально-возможного зарождения усталостной трещины и величин максимальных амплитуд деформаций при проведении испытаний. Определение напряжений по замеренным деформациям проводилось по обобщенной формуле Гука, в данном случае, главные напряжения совпадают с меридиональными и окружными напряжениями и вычисляются по формулам 1 и 2:

$$\sigma_M = \frac{E}{(1-\mu^2)} (\epsilon_M + \mu\epsilon_O) \quad (1)$$

$$\sigma_O = \frac{E}{(1-\mu^2)} (\epsilon_O + \mu\epsilon_M) \quad (2)$$

где σ_M и σ_O – амплитуды главных напряжений в меридиональном и окружном направлениях соответственно; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; ϵ_M и ϵ_O – деформации соответственно в меридиональном и окружном направлениях.

Монтаж тензорезисторов производился цепочкой в меридиональном и окружном направлении в виде розеток на наиболее нагружен-

ной стороне колес – внешней для литого и внутренней для цельнокатаного. Общий вид стенда с установленными в нем объектами испытаний на рисунке 1.



а)



б)

а) литое колесо; б) цельнокатаное колесо

Рисунок 1 – Общий вид стенда с установленными в нем объектами испытаний

При испытании колес в момент зарождения усталостной трещины происходило увеличение амплитуды перемещений нагружающего устройства, которое фиксировалось по показаниям установленных на образце акселерометров. Далее происходил рост усталостной трещины с фиксацией количества циклов нагружений с момента ее образования и соответствующей им длины трещины по поверхности диска. По полученным экспериментальным данным строятся кривые живучести колес – кинетика распространения трещины в колесах в зависимости от количества циклов нагружений, которые приведены на рисунке 2.

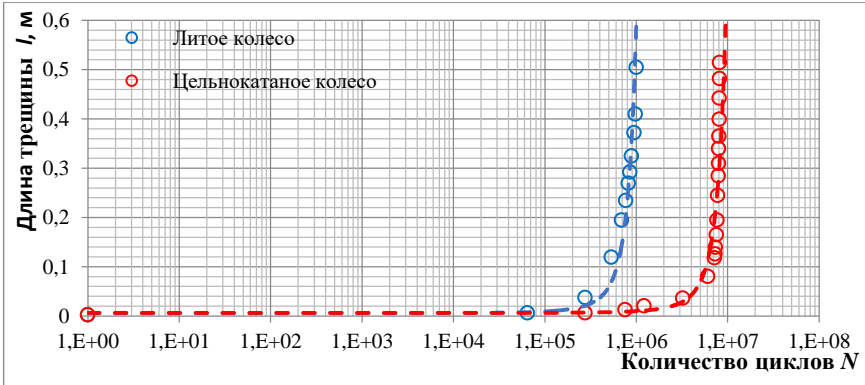


Рисунок 2 – Диаграмма зависимости количества циклов нагружений до достижения критической длины трещины в колесах

Продолжительность процесса разрушения колеса зависит не только от свойств материала, но также и от траектории и направления развития трещины, обусловленное влиянием сложнапряженного состояния, которое также зависит от формы колеса.

В третьем разделе определены характеристики КДУР при различных температурах и разработаны математические модели роста трещины в колесах для оценки КИН на ее фронте. Оценка напряжений вблизи вершины трещины представляет особый интерес, так как здесь достигается максимальная концентрация напряжений.

На прямолинейном участке КДУР в полулогарифмических координатах зависимость роста длины трещины от количества циклов нагружений, является степенным и удовлетворительно аппроксимируется уравнением Пэриса по формуле 3:

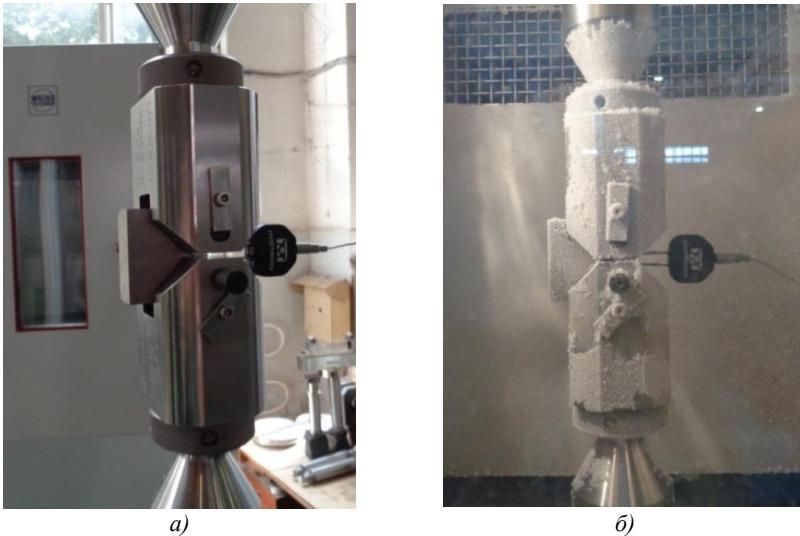
$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n, \quad (3)$$

где C и n – константы материала в данных условиях соответствующие ординате пересечения прямолинейного участка КДУР с осью и тангенсу его наклона соответственно; $\frac{dl}{dN}$ – скорость роста трещины;

ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений.

Для испытания металла колес по определению параметров КДУР были изготовлены масштабные образцы. Образцы вырезались из диска с расположением пропила в окружном направлении, соответствующему направлению роста трещины при испытаниях.

Циклическое нагружение производилось внецентренным растяжением образцов, в которых исходная трещина расположена в плоскости, перпендикулярной наибольшим растягивающим напряжениям (трещины нормального отрыва по типу I). Общий вид системы для измерения параметров испытаний с используемым образцом при различных температурах приведен на рисунке 3.



а) при температуре 20°C; б) при температуре -60°C

Рисунок 3 – Общий вид системы для измерения параметров испытаний с образцом

Результаты испытаний приведены в таблице 1, анализ которых показывает, что данные стали склонны к низкотемпературному охрупчиванию, т.е. зарождение трещины в колесах будет происходить при положительных температурах, а интенсивный рост и излом при низких отрицательных температурах.

Таблица 1 – Характеристики трещиностойкости металла колес

Колесо	Температура, °C	K_{th} , МПа $\sqrt{м}$	K_{fc} , МПа $\sqrt{м}$	C , м/цикл	n
Цельнокатаное	+ 20	17,2	62,5	$1,0 \cdot 10^{-11}$	3,0
	- 60	19,0	35,5	$1,0 \cdot 10^{-11}$	3,0
Литое	+ 20	13,9	55,0	$1,25 \cdot 10^{-12}$	3,4
	- 60	17,2	36,1	$1,0 \cdot 10^{-11}$	3,0

Для определения значений КИН на фронте трещины геометрически сложных конструкций (колес) в условиях сложного напряженного состояния был использован метод конечных элементов (МКЭ) в котором кинетика развития трещины моделируется на основе данных о напряженно-деформированном состоянии (НДС) и положений линейной механики разрушения.

Для создания цифровой модели роста трещины была разработана виртуальная модель стенда для испытаний колес с фрагментом оси, представленная на рисунке 4. Имитация нагружения круговым изгибом достигается за счет изменения сил F_1 и F_2 во времени (формулы 5 и 6), что имитирует режимы нагружения при проведении стендовых испытаний. Обод закреплен от смещений по всем направлениям, на диске колеса в зоне максимальных амплитуд напряжений моделировался трещиноподобный концентратор в виде плоскости половины окружности диаметра 3 мм.

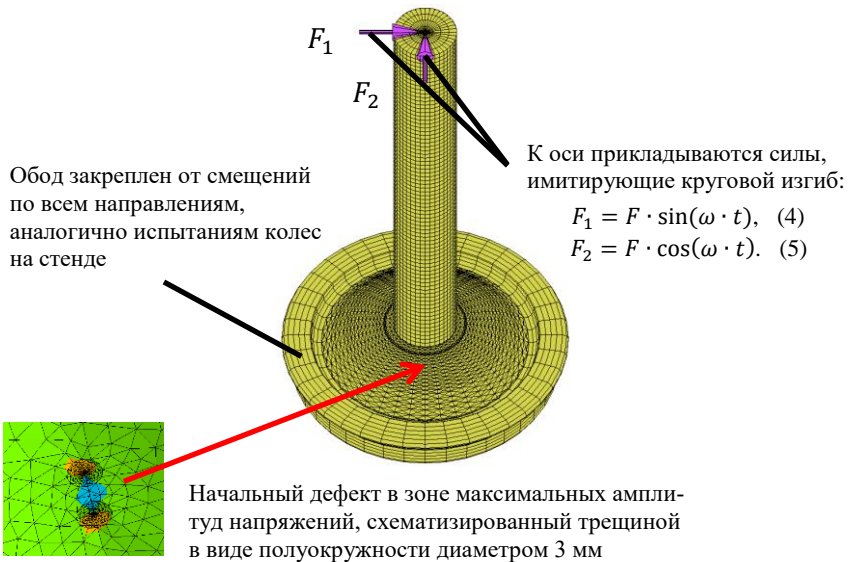


Рисунок 4 – Расчетная схема колес

Оценка живучести конструкции основано на вычислении J-интеграла предложенного независимо Черепановым и Райсом (формула б), который является скоростью высвобождения энергии и имеет связь с коэффициентом интенсивности напряжений по формуле 7:

$$J = \int_C (Wdy - T \frac{du}{dx} ds), \quad (6)$$

где C – контур охватывающий вершину трещины; ds – элемент длины контура; x, y – прямоугольные координаты, перпендикулярные фронту трещины; T – вектор напряжений; u – вектор перемещений, вычисляемый на контуре C ; W – плотность энергии деформации в точках контура C .

$$J = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E}, \quad (7)$$

где ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга.

Моделирование производится следующим образом. Устанавливается период, который составляет один полный цикл нагружения. В течение данного периода рассчитываются локальные значения изменения скорости выделения энергии для каждого узла. Также определяется предполагаемое направление роста трещины, соответствующее наибольшей скорости выделения энергии. В конце периода производится рост трещины и расчет количества циклов, используя полученное изменение скорости выделения энергии через закон Пэриса. Затем начинается следующий период и все повторяется. Процедура расчета количества циклов состоит в том, чтобы использовать в анализе один полный цикл нагружения, а затем с использованием закона Пэриса рассчитывать реальное количество циклов нагружений.

На рисунках 5 - 6 приведены полученные диаграммы зависимости количества циклов нагружений до достижения критической длины трещины литого и цельнокатаного колеса, согласно которым результаты моделирования удовлетворительно сопоставляются с результатами испытаний.



Рисунок 5 – Диаграмма зависимости количества циклов нагружений до достижения критической длины трещины литого колеса



Рисунок 6 – Диаграмма зависимости количества циклов нагружений до достижения критической длины трещины цельнокатаного колеса

По результатам проведенных испытаний рассчитаны зависимости изменения максимальных значений K от длины трещины l в литом и цельнокатаном колесе необходимые для оценки скорости роста трещины в эксплуатации, которые методом наименьших квадратов удовлетворительно аппроксимируются кубическими зависимостями 8 и 9 для литого и цельнокатаного колеса соответственно:

$$K = 3535.7l^3 - 2670.6l^2 + 645.9l, \quad (8)$$

$$K = 1902.3l^3 - 1260.2l^2 + 319.9l. \quad (9)$$

Сопоставление полученных зависимостей по результатам моделирования с расчетными зависимостями по результатам испытаний приведены на рисунках 7 и 8, из анализа которых можно сделать вывод об удовлетворительном их соответствии.

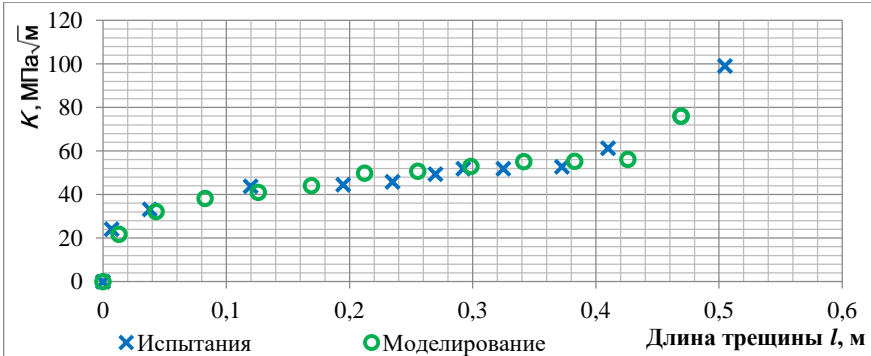


Рисунок 7 – Диаграмма зависимости КИН от длины трещины литого колеса

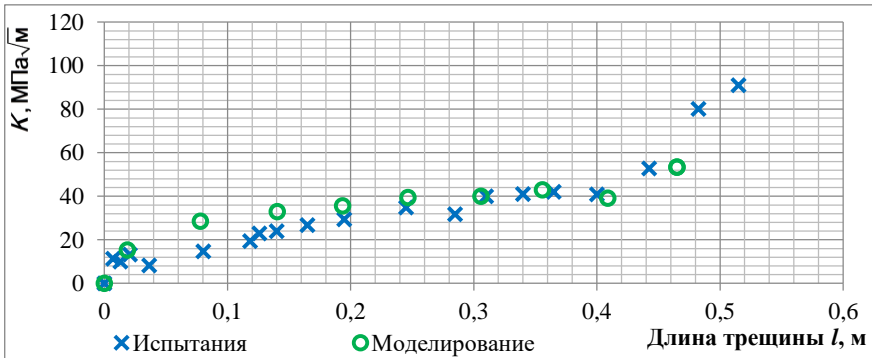


Рисунок 8 – Диаграмма зависимости КИН от длины трещины цельнокатаного колеса

Согласно цифровой модели в колесах K_I практически на порядок превосходят K_{II} и K_{III} на всем протяжении роста трещины. Таким образом, обоснована необходимость оценки момента страгивания трещины и момента излома колес по значениям K_I соответствующему I типу раскрытия. Полученные при этом результаты аппроксимируются методом наименьших квадратов кубическими зависимостями 10 и 11 для литого и цельнокатаного колеса соответственно:

$$K_I = 3049.3l^3 - 2395.1l^2 + 607.9l, \quad (10)$$

$$K_I = 2127.2l^3 - 1721.1l^2 + 452.9l. \quad (11)$$

Живучесть колеса определяется путем сопоставления значений K_I получаемых от действующих в эксплуатации амплитуд напряжений с

пороговым K_{th} и значением циклической вязкости разрушения K_{fc} , полученных при испытании стандартных образцов.

В четвертом разделе разработана динамическая модель вагона и пути, определена живучесть колес в эксплуатации. Для оценки НДС основных несущих конструкций вагона во время эксплуатации в настоящее время используют метод тензометрирования. Существуют измерительные комплексы, позволяющие определять силовое воздействие на путь и тем самым оценить нагрузку на колесную пару во время движения вагона, такие как тензометрические колесные пары. Современное программное обеспечение позволяет создавать математическую модель тензометрической колесной пары и проводить моделирование динамики железнодорожных экипажей в полной пространственной постановке. В качестве объекта моделирования был выбран наиболее распространенный на сети железных дорог России эксплуатируемого в различных климатических условиях – грузовой полувагон на тележках модели 18-100.

Модель вагона состоит из системы абсолютно твердых тел, связанных посредством шарниров и силовых элементов и упругой колесной парой, связанной посредством интерфейсных узлов. Контактное взаимодействие позволяет моделировать зазоры, вход и выход из контакта, режимы скольжения и сцепления, силы трения, а также автоколебательные процессы. На рисунке 9 приведено распределение эквивалентных напряжений от статической нагрузки груженого вагона.

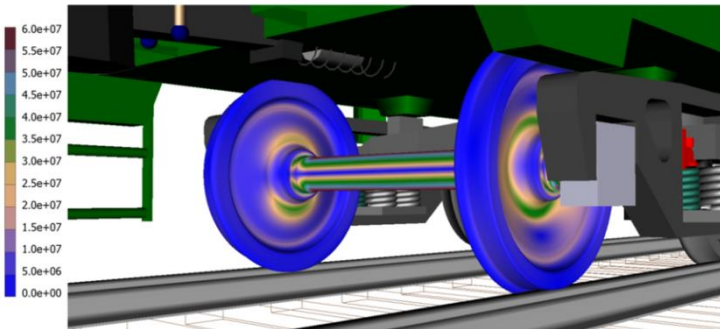


Рисунок 9 – Распределение эквивалентных напряжений в упругой колесной паре модели вагона

Для представления возмущений со стороны пути использовались записи вагона-путеизмерителя, приведенные на рисунке 10, неровно-

сти являются общей характеристикой состоящей из геометрических неровностей рельса, кругов катания колес и неравномерность характеристик пути по его длине.



Рисунок 10 – Геометрические неровности рельсовой нити

Сопоставление динамических показателей математической модели вагона проводилось по результатам ходовых динамико-прочностных испытаний. Испытания вагона в порожнем и груженом состоянии проводились на фиксированных участках пути Голутвин – Озеры Московской железной дороги: в прямых участках пути до скорости 90 км/ч, в кривых радиусом 300 м и 600 м. Согласно которым можно сделать вывод, что математическая модель вагона и рельсового пути адекватно описывает движение вагона в эксплуатации и имеет удовлетворительную сходимость по динамическим показателям.

По результатам моделирования были получены диаграммы изменения динамических напряжений в колесах при различных режимах движения и различных скоростях, после чего для схематизации результатов моделирования и определения распределения амплитуд динамических напряжений от частоты их возникновения они были обработаны методом «дождя». Для формирования суммарных диаграмм полученные диаграммы были просуммированы с учетом их вероятности реализации и приведены на рисунке 11.

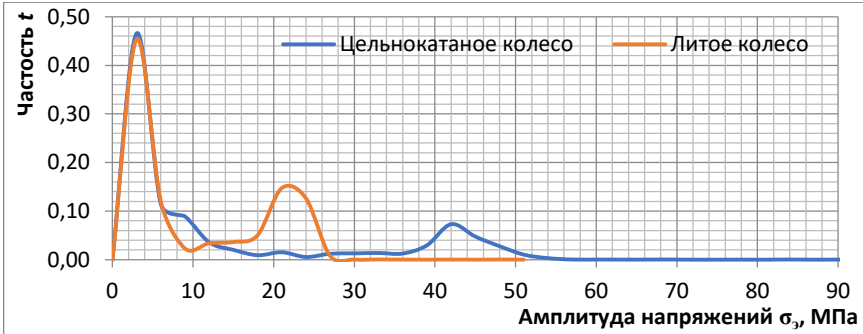


Рисунок 11 – Диаграмма распределения динамических амплитуд напряжений

Подход по оценке живучести вызывает необходимость изучения статистических закономерностей и на основе многочисленных исследований выявлены следующие закономерности. Экспериментальные функции распределения количества циклов нагружений N по параметру длины трещины l удовлетворительно соответствуют логонормальному закону. Распределение характеристик КДУР не противоречат гипотезе нормального распределения.

При вероятности разрушения 10^{-6} определяется соответствующий квантиль U_p по таблицам нормального распределения, и пересчитываются соответствующие характеристики P по уравнению 12:

$$P = \bar{P}(1 - U_p v_i), \quad (12)$$

где v_i – коэффициент вариации; U_p – квантиль; \bar{P} – параметр, полученный при испытаниях.

Исходя из уравнение Пэриса с использованием зависимостей $K=f(l)$ (формулы 8 и 9) полученных по результатам испытаний при амплитуде напряжений σ_n , и учитывая положения линейной механики разрушения, для расчета приращения длины трещины dl_i от действия эксплуатационных амплитуд напряжений σ_{Σ_i} с частотой их возникновения t_i получаем:

$$dl_i = c \left(f(l) \frac{\sigma_{\Sigma_i}}{\sigma_n} \right)^n t_i dN \quad (13)$$

Прогнозирование живучести производится следующим образом. Устанавливается период нагрузки, который составляет один полный цикл действия динамических амплитуд напряжений. Задаваясь приращением количества циклов dN в течение данного периода расчи-

тываются приращение длины трещины dl_i от действия каждого уровня эксплуатационных амплитуд напряжений $\sigma_{Эi}$ и совместно рассчитывается ΔK_I с использованием зависимостей 10 и 11. Далее производится оценка роста трещины:

- при $\Delta K_I < \Delta K_{th}$ длина трещины $l_i = l_{i-1}$, а количество циклов $N_i = N_{i-1} + t_i dN$;

- при $\Delta K_I > \Delta K_{th}$ длина трещины $l_i = l_{i-1} + dl_i$, а количество циклов $N_i = N_{i-1} + t_i dN$.

Затем начинается следующий период и все повторяется, по полученным значениям строятся графики роста трещины от числа циклов нагружений, которые, при пересчете в километры пробега вагона, приведены на рисунках 12 и 13.

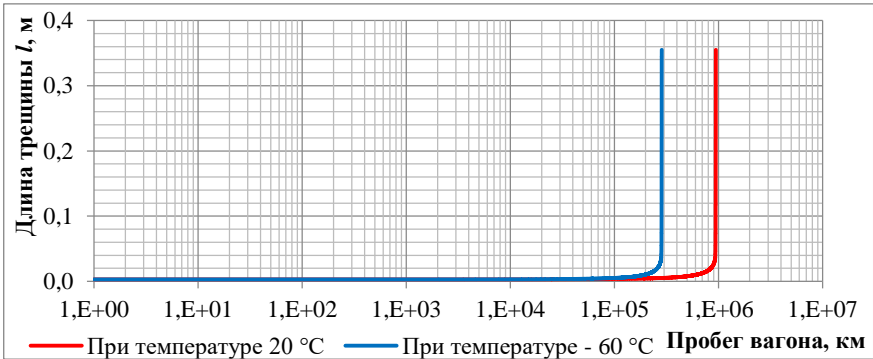


Рисунок 12 – Диаграмма зависимости длины трещины от пробега вагона в литом колесе

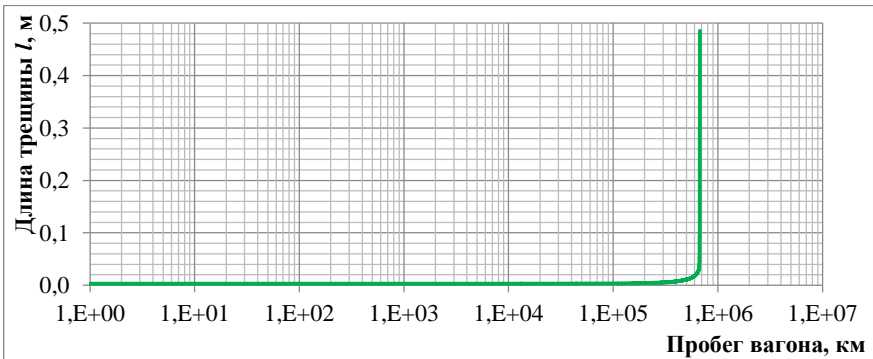


Рисунок 13 – Диаграмма зависимости длины трещины от пробега вагона в цельнокатаном колесе

При достижении ΔK_I циклической вязкости разрушения ΔK_{fc} происходит излом колеса (критическая длина трещины). Получившиеся значения пробега вагона при достижении критической длины трещины приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Живучесть колес в эксплуатации

Колесо	Параметр	Температура 20 °С	Температура -60 °С
Литое	Критическая длина трещины, м	0,345	0,074
	Пробег, тыс. км	944,2	283,8
Цельнокатаное	Критическая длина трещины, м	0,301	0,092
	Пробег, тыс. км	671,8	669,6

В соответствии с руководящем документом по ремонту и техническому обслуживанию и положению о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов установлены нормативные межремонтные пробеги: первый плановый ремонт наступает после прохождения дистанции 210 тыс. км, а последующие в зависимости от вида ремонта выполняются с периодичностью 110 и 160 тыс. км.

Путем отношения полученного пробега вагона до достижения критической длины трещины к нормативным межремонтным пробегам были рассчитаны коэффициенты запаса по живучести при различной температуре, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты запаса по живучести

Колесо	Межремонтный пробег, тыс. км	Коэффициент запаса по живучести	
		При температуре 20 °С	При температуре -60 °С
Литое	110	8,58	2,58
	160	5,90	1,77
	210	4,50	1,35
Цельнокатаное	110	6,11	6,09
	160	4,20	4,19
	210	3,20	3,19

С учетом ограниченного числа экспериментальных данных, а также вероятности увеличения их разброса вследствие невозможности учета всех влияющих факторов, а также возможности наличия дефектов по кругу катания колеса, увеличению жесткости пути и рельсовых стыков с понижением температуры для обеспечения безопасности эксплуатации колес, предоставляется целесообразным принять минимально допускаемый коэффициент запаса по живучести $[n_{ж}]=2$. Таким образом, межремонтный пробег обеспечивающий безопасность дви-

жения вагона для литого колеса будет составлять 110 тыс. км, а для цельнокатаного колеса – 210 тыс. км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ нормативной, научно-технической документации показал отсутствие требований и, следовательно, методики оценки живучести колес, а также учета низких климатических температур, при которых изменяются механические свойства металла колес, и увеличивается жесткость пути. Для обеспечения безопасной эксплуатации установлена необходимость прогнозирования пробега вагона после возникновения трещины в колесе, особенно при увеличении осевой нагрузки до 27 тс, снижении веса тары вагонов на 25 % и применении новых материалов и конструкций.

2 Проведенные исследования показали, что наиболее опасными являются дефекты металла колес, расположенные в зоне максимальных амплитуд эксплуатационных напряжений, которые с определенной вероятностью могут быть не выявлены проведением НК, что приведет к росту трещины, минуя этап накопления усталостных повреждений и ускоренному разрушению.

3 Проведенные экспериментальные испытания стандартных образцов, вырезанных из колес, изготовленных по различным технологическим процессам и, из разных марок сталей для литого колеса из стали марки ААР В, а для цельнокатаного из стали марки 2 показали, что характеристики циклической вязкости разрушения металлов различаются: для стали цельнокатаного колеса при температуре 20 °С выше, чем для стали литого, но при снижении температуры до - 60 °С значения становятся соизмеримыми.

4 Проведенный анализ методов по оценке прочности вагонных колес показал, что при проведении испытаний методом кругового изгиба их нагружение является наиболее приближенным к эксплуатационному. По результатам, которых получены экспериментальные кривые живучести, при этом количество циклов до разрушения цельнокатаных и литых колес составили 8,1 и 1,0 млн. циклов нагружений соответственно.

5 Разработана виртуальная модель стенда для испытаний колес круговым циклическим изгибом для численного моделирования развития трещины в диске литого и цельнокатаного колес от начального дефекта для расчета значений КИН, согласно которым обоснована

необходимость оценки момента страгивания трещины и излома колес по значениям K_1 на фронте трещины соответствующему I типу раскрытия.

6 Разработана динамическая модель грузового вагона с упругой колесной парой, с инерционными, жесткостными, упруго-диссипативными и геометрическими параметрами, соответствующими экипажу грузового вагона. По результатам ходовых динамико-прочностных испытаний модель имеет удовлетворительную сходимость по динамическим показателям и адекватно описывает движение вагона в эксплуатации. Предложенная методика позволять определять НДС колесной пары грузового вагона, оценивать прочность, ресурс и живучесть различных конструкций осей и колес, и может быть применена на этапе проектирования для прогнозирования периода развития трещины в колесе с целью обеспечения его безопасной эксплуатации.

7 По результатам моделирования получены суммарные диаграммы распределения амплитуд динамических напряжений от частоты их возникновения в литом и цельнокатаном колесах. Живучесть литого и цельнокатаного колес в эксплуатации, то есть рост трещины от начального дефекта до излома при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ составила 944,2 тыс. км и 671,8 тыс. км, а при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 283,8 тыс. км и 669,6 тыс. км соответственно.

8 Для безопасной эксплуатации грузовых вагонов предлагается установить минимальный допускаемый коэффициент запаса по живучести колес равный 2,0. Таким образом, безопасность эксплуатации грузового вагона с литыми колесами будет обеспечиваться на межремонтном пробеге 110 тыс. км при этом коэффициент запаса по живучести составит 2,58, с цельнокатаными колесами – 210 тыс. км при этом коэффициент запаса по живучести составит 3,19.

9 Полученные результаты могут быть использованы для установления требований к межремонтным пробегам колесных пар грузовых вагонов.

10 Дальнейшие перспективы исследований могут быть связаны с вопросом уточнения требований к порогу чувствительности методов НК применяемых при обнаружении дефектов колес.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. Акашев, М.Г. Создание модели тензометрической колесной пары с применением программного комплекса «Универсальный механизм» / М.Г. Акашев, А.Н. Савоськин, В.В. Чунин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 4 (76). – С. 81-91.

2. Волохов, Г.М. Моделирование динамики подвижного состава с учетом упругости колесной пары как способ прогнозирования ресурса и живучести ее элементов / Г.М. Волохов, Н.Н. Воронин, Д.А. Князев, В.В. Чунин // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 2-12.

б) в издании, входящих в базу цитирования Scopus:

3. Volokhov, G.M. One of possible approaches to estimating the service life of a wheel set axel of high-speed rolling stock / G.M. Volokhov, A.A. Lunin, D.A. Knyzev, V.V. Chunin, M.V. Timakov // AIP Conference Proceeding. – 2021. – № 2389. – 6 p.

4. Chunin, V.V. The simulation of crack growth in rolling stock running wheel disk / V.V. Chunin, D.A. Knyazev, M.V. Timakov // IOP Publishing. – 2020. – № 747. – P. 012015.

в) патенты на изобретение:

5. Патент № 206193 Российская Федерация, МПК⁵¹ G01M 17/00. Цельнокатаное колесо рельсового транспортного средства: №2021110297: заявл. 13.04.2021: опубл. 30.08.2021 / Е.Ю. Качесов, П.В. Ваулин, Г.И. Михайлов, Г.М. Волохов, Д.А. Князев, М.А. Морозов, В.В. Чунин, А.А. Бубнов; заявитель и патентообладатель ОАО «РЖД». – 6 с.

6. Патент № 2706908 Российская Федерация, МПК⁵¹ G01M 17/10. Стенд для испытания колес и осей колесных пар и способ восстановления внутреннего диаметра кольца рельсоимитатора: №2019105856: заявл. 01.03.2019: опубл. 21.11.2019 / Е.В. Кочетков, Т.В. Трепачева, В.В. Чунин; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 7 с.

г) в прочих научных изданиях и материалах конференций:

7. Волохов, Г.М. Оценка прочности и установление назначенного срока службы колесной пары скоростной вагон-платформы / Г.М. Волохов, Э.С. Оганьян, Г.И. Гаджиметов, Д.А. Князев, В.В. Чунин, М.В. Тимаков // Надежность. – 2021. – № 4. – С. 26-30.

8. Волохов, Г.М. Научные основы обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожного транспорта в условиях Арктики и континентального шельфа / Г.М. Волохов, Э.С. Оганьян, А.С. Гасюк, Д.А. Князев, М.В. Тимаков, В.В. Чунин, Н.А. Махутов, Д.О. Резников,

В.В. Москвичев, А.В. Григорьев // Сб. работ лауреатов междунар. конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа. – 2021. – С. 150-156.

9. Волохов, Г.М. Сопоставление методов испытаний колес немоторных колесных пар железнодорожного подвижного состава / Г.М. Волохов, Э.С. Оганян, Д.А. Князев, В.В. Чунин, М.В. Тимаков // Вестник ВНИКТИ. – 2018. – № 101. – С. 37-45.

10. Волохов, Г.М. Сравнительная оценка скорости роста трещины в дисках литых и цельнокатаных колес / Г.М. Волохов, Э.С. Оганьян, Д.А. Князев, В.В. Чунин, М.В. Тимаков, А.А. Бубнов // Вестник ВНИКТИ. – 2020. – № 103. – С. 41-53.

11. Волохов, Г.М. Моделирование роста трещины в диске ходового колес немоторных колесных пар железнодорожного подвижного состава / Г.М. Волохов, Э.С. Оганьян, Д.А. Князев, В.В. Чунин, М.В. Тимаков // Вестник ВНИКТИ. – 2018. – № 101. – С. 37-45.

12. Чунин, В.В. Оценка параметров живучести колес подвижного состава с позиции механики разрушения / В.В. Чунин, Д.А. Князев, М.В. Тимаков // Актуальные проблемы железнодорожной науки глазами молодых исследователей: сб. материалов круглого стола, посвященного Дню железнодорожника. – Москва: ВНИИЖТ, 2022. – С. 162–167.

Чунин Виталий Владимирович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОЛЕС ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ МЕТОДАМИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «__» _____ 202_ г.

Формат 60×90/16

Усл. печ. л. – 1,5 Заказ

Тираж 80 экз.

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