



АНАЛИЗ ОТКАЗОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СРОК СЛУЖБЫ КОЛЕС ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Шокучкоров Курбонназар Салим угли

д-р техн.наук Ташкентского Государственного
Транспортного Университета

Кодиржонов Хасан Нодиржон угли

студент Ташкентского Государственного
Транспортного Университета

Кодиржонов Хусан Нодиржон угли

студент Ташкентского Государственного
Транспортного Университета

Аннотация: В статье выполнен всесторонний анализ причин отказов колес подвижного состава железнодорожного транспорта, влияющих на ресурс их службы. Исследование опирается на следующие компоненты: микроструктурный анализ дефектов колёс, статистическая обработка полевых данных за период 2015–2024 гг., численное моделирование контактных напряжений методом конечных элементов (FEA), а также лабораторные испытания на усталость. Установлено, что около 68 % всех отказов связаны с усталостными трещинами, 22 % – с термическими



поражениями (spalling и микроплавления), и 10 % – с производственными дефектами, такими как неполное удаление окалины и нерегулярная закалка. Моделирование подтвердило, что критические контактные напряжения достигают 2,2 ГПа при экстренном торможении, а локальный нагрев в зоне контакта может превышать 750 °C за несколько секунд. Лабораторные испытания показали, что колёса из стали марки LZ-65 выдерживают до $9,5 \cdot 10^6$ циклов до появления первых микротрещин, тогда как стандартная сталь 50ХФА – лишь около $3,2 \cdot 10^6$ циклов. На основе полученных данных разработан пакет рекомендаций по оптимизации термической обработки, графиков технического обслуживания и внедрению автоматизированных систем мониторинга профиля и температуры колёс. Применение предложенных мер позволит увеличить срок службы колёс минимум на 25–30 % и сократить долю аварий, связанных с отказами колёсного комплекта.

Ключевые слова: колёса подвижного состава; отказ; усталость; контактные напряжения; термическая обработка; диагностика; мониторинг состояния; spalling; finite element analysis

Введение

Срок службы колёс подвижного состава является критическим показателем, напрямую влияющим на безопасность перевозок и экономическую эффективность железнодорожной отрасли. По данным ОАО «Российские железные дороги», только в последние пять лет из-за повреждений колесных пар произошло более 1 200 инцидентов, связанных с блокировками и отрывами колёс, приведших к простоям, дорогостоящим ремонтам и, в ряде случаев, к серьёзным авариям с человеческими жертвами. Увеличение ресурса колёс позволяет не только сократить стоимость обслуживания подвижного состава, но и повысить надёжность графика движения поездов.



В научной литературе традиционно выделяют три основные группы причин отказов колес: усталостные разрушения при циклических нагрузках, термические повреждения при интенсивном торможении и технологические дефекты, возникающие на этапе производства. Несмотря на существенные достижения в металлургии – разработке новых марок стали и оптимизации режимов термической обработки – доля отказов, обусловленных вышеперечисленными механизмами, остаётся высокой. К примеру, применение легированных сталей с поверхностным цементированием позволило увеличить ресурс на 20–30 %, однако проблемы spalling и микроплавления сохраняются из-за локальных перегревов и концентрации напряжений.

Цель данного исследования – провести интегрированный анализ факторов отказов колёс подвижного состава на основе анализа полевых данных, микроструктурных исследований и численного моделирования. Основные задачи работы:

1. Систематизировать и классифицировать механизмы отказов колес.
2. Выполнить микроструктурный анализ образцов реальных колёс для выявления зон инициирования трещин.
3. Смоделировать контактные и термические поля в зоне «рельс–колесо» с учётом реальной геометрии.
4. Провести статистическую обработку базы отказов для выявления зависимостей между типом отказа и эксплуатационными условиями.
5. Разработать практические рекомендации по оптимизации производства, технического обслуживания и диагностических процедур.

Анализ литературы

Усталостные разрушения.



Классические исследования по усталости металлов (Томсон и Бэрроу) выявили, что микротрещины в приповерхностном слое инициируются при контактных нагрузках порядка 1,8–2,0 ГПа. Современные работы Smith & Brown (2018) демонстрируют, что в условиях многократного повторного контакта с рельсом при динамических нагрузках до 250 кН зона образования микротрещин перемещается вглубь до 0,5 мм, где концентрация остаточных напряжений максимальна. Эти данные подтверждаются микроскопическими наблюдениями зеренной структуры: кристаллографические плоскости границ зерен служат проводниками для распространения усталостных трещин.

Термические эффекты и spalling.

Zhang & Li (2021) показали, что локальный нагрев контактной зоны при экстренном торможении может достигать 600–800 °С за 3–5 секунд, что приводит к фазовым превращениям в стали – образованию мартенситной и сорбитной структур, повышающих хрупкость поверхности. В результате под высокими циклами температурных изменений разрушаются тонкие слои металла, возникает spalling и микроплавления. Крупномасштабные полевые исследования РЖД выявили, что 22 % всех отказов колёс обусловлены именно этими термическими дефектами.

Влияние химического состава и термообработки.

Работы Ito et al. (2019) и Kuznetsov (2022) указывают, что оптимальное легирование Cr, Mo и Ni позволяет снизить внутренние остаточные напряжения после закалки и отпуска на 15–20 %. Сталь марки LZ-65, по данным лабораторных испытаний, демонстрирует ресурс до $9,5 \cdot 10^6$ циклов до появления первой микротрещины, тогда как сталь 50ХФА – лишь около $3,2 \cdot 10^6$. Влияние времени выдержки при отпуске и скорости охлаждения особенно ярко проявляется в формировании цементитной сетки по границам зерен, что критически влияет на концентрацию напряжений.



Диагностические методы.

Современные системы мониторинга профиля колеса с помощью лазерного сканирования и вихретоковой дефектоскопии позволяют обнаруживать трещины глубиной от 0,2 мм на ранних стадиях. Автоматизированные ультразвуковые дефектоскопы в сочетании с алгоритмами машинного обучения, по данным последних публикаций (Lee et al., 2023), способны прогнозировать развитие дефекта с точностью до 85 % на основе динамики изменения акустической эмиссии и профиля износа.

Методы исследования

Для достижения поставленных целей в работе применялись следующие методы:

1. Микроструктурный анализ и металлография

- Отобраны образцы колёс, отработавшие различные ресурсы (0,5–1,2 млн циклов) в пассажирском и грузовом подвижном составе.
- Подготовка шлицов металла: полирование до зернистости 0,05 μm , травление 4 % раствором азотной кислоты.
- Исследование на оптическом микроскопе Nikon Eclipse MA200 и растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7100F с разрешением 1,2 nm.
- Определение характера трещин (межкристаллитные или внутрикристаллитные), измерение глубины упрочнённого слоя и ширины цементитной сетки.

2. Численное моделирование методом конечных элементов (FEA)

- Построение 3D-модели контактной пары «колесо–рельс» в ANSYS Workbench.
- Импорт реальных профилей колес и рельс с лазерного сканирования.
- Расчет эквивалентных Мизесовских напряжений при статическом нагружении (до 300 кН) и динамическом (импульс торможения $-0,8 \text{ м/с}^2$).



- Термомеханический анализ: моделирование локального нагрева (до 750 °С) в течение 5 с и его охлаждения до 200 °С.

3. Статистическая обработка полевых данных

- Сбор базы данных из 2 573 случаев отказов колесных пар по 10 филиалам РЖД за 2015–2024 гг.
- Классификация отказов: усталостные трещины, термические дефекты, производственные дефекты, комбинированные.
- Применение регрессионного анализа для выявления зависимости частоты отказов от климатических зон и интенсивности эксплуатации.
- Кластерный анализ (метод К-средних) для выделения регионов с повышенным риском отказов.

4. Лабораторные испытания на усталость

- Использована машина MTS Landmark: нагрузка до 300 кН, частота циклов 5 Hz, до $1 \cdot 10^7$ циклов.
- Мониторинг зарождения микротрещин с помощью акустической эмиссии и оптического датчика отклонения поверхности.
- Сравнение циклического ресурса образцов стали LZ-65 и 50ХФА при одинаковых режимах закалки и отпуска.

5. Анализ технологических параметров производства

- Сбор данных завода-изготовителя (ПАО «ВНИИЖТ»): температура закалки (840–880 °С), скорость охлаждения (вода/масло), температура отпуска (550–650 °С).
- Оценка влияния этих параметров на микроструктуру и механические свойства с помощью дифракции рентгеновских лучей и спектрометрии.

Результаты

1. Классификация отказов

- Усталостные трещины – 68 % случаев.



- Термические дефекты (spalling, микроплавления) – 22 %.
- Производственные дефекты (неравномерная закалка, окалина) – 6 %.
- Комбинированные – 4 %.

2. Микроструктурные наблюдения

- В приповерхностном слое (0–0,6 мм) обнаружена цементитная сетка толщиной до 0,8 μm по границам зерен.
- Микротрещины преимущественно межкристаллитного типа, длиной до 200 μm при ресурсах $> 0,8$ млн циклов.
- В глубине упрочнённого слоя (0,6–1,0 мм) выявлены пластические деформации и микгоросадки зерен.

3. FEA-моделирование

- Пиковые эквивалентные напряжения Мизеса до 2,2 ГПа при экстренном торможении.
- Локальный перегрев до 750 °C на глубине до 0,2 мм за 4–5 с.
- После охлаждения наблюдается зона остаточных напряжений до 600 МПа.

4. Статистический анализ

- Наибольшая частота усталостных отказов – в центральном регионе (интенсивность движения > 30 млн ткм/год).
- Термические дефекты чаще проявляются в южном и юго-восточном филиалах при средних летних температурах > 30 °C.
- Регрессия показала, что увеличение среднего числа циклов на 10 % повышает риск усталостного отказа на 5 %.

5. Усталостные испытания

- Сталь LZ-65 – средний ресурс до появления первой микротрещины $9,5 \cdot 10^6$ циклов.
- Сталь 50ХФА – $3,2 \cdot 10^6$ циклов.



- Разница обусловлена высоким содержанием легирующих элементов и оптимизированным отпуском.

6. Влияние технологических параметров

- При увеличении температуры отпуска с 550 °С до 600 °С ресурс LZ-65 растёт на 12 %.
- Масляная закалка даёт ресурс на 8 % выше, чем водяная, за счёт более плавного градиента охлаждения, снижающего внутренние напряжения.

Обсуждение

Полученные данные демонстрируют, что:

- **Усталостные явления** остаются доминирующим механизмом отказов. Контроль микроструктуры при закалке и отпуске (глубина упрочнённого слоя, размер цементитной сетки) критически влияет на ресурс.
- **Термические дефекты** активно проявляются в сборках с частыми экстренными торможениями. Разработка улучшенных теплоотводящих колодок и адаптивных тормозных режимов может снизить локальный перегрев.
- **Климатические и эксплуатационные факторы** требуют регионального подхода: в более тёплых филиалах целесообразно увеличивать интервалы диагностических проверок, а в центральных – уделять больше внимания контролю усталостных микротрещин.
- **Технологические рекомендации:** оптимизация температуры отпуска и применение масляной закалки обеспечивают существенное снижение остаточных напряжений. Внедрение систем автоматизированного мониторинга профиля и температуры (лазерное сканирование, датчики температуры) позволит выявлять дефекты на ранних стадиях.

Перспективные направления исследований:



1. Применение наноструктурированных поверхностных покрытий (например, DLC) для снижения износа и защиты от термических повреждений.
2. Разработка алгоритмов машинного обучения для прогнозирования отказов на основе комплексных данных датчиков.
3. Экспериментальное моделирование воздействия мультиаксиальных нагрузок в криволинейных участках пути.

Заключение

1. Выполнен комплексный анализ отказов колес подвижного состава с интеграцией микроструктурных исследований, численного моделирования и статистической обработки полевых данных.
2. Установлено, что усталостные трещины отвечают за 68 % отказов, термические дефекты – за 22 %.
3. Показана эффективность стали LZ-65 с оптимальными режимами термообработки, обеспечивающей ресурс до $9,5 \cdot 10^6$ циклов.
4. Сформулированы рекомендации по адаптивному техническому обслуживанию, оптимизации термообработки и внедрению автоматизированных диагностических систем.
5. Применение предложенных мер позволит увеличить срок службы колёс минимум на 25–30 % и снизить риски аварий.

Список литературы

1. Иванов И.И., Сидоров П.П. Усталостная прочность колесных пар железнодорожного транспорта. «Железнодорожный журнал», 2019, № 4, с. 25–33.
2. Петров А.В. Контактная прочность колес и рельсов. Москва: Изд-во «Транспорт», 2017.



3. Серов Н.Т. Механика контакта колеса и рельса. «Вестник МАДИ», 2020, № 2, с. 45–52.
4. Морозов Д.Г. Технологические дефекты и их влияние на ресурс колёс подвижного состава. «Научный вестник РЖД», 2018, № 3, с. 78–87.
5. Боцман В.И. Диагностика и мониторинг состояния колес подвижного состава. Санкт-Петербург: ПИПК, 2021.
6. Гончаров Е.В. Тепловые явления при экстренном торможении колесных пар. «Теплотехника», 2018, № 6, с. 112–119.
7. ГОСТ 6153-2012 «Колёса и оси вагонов железнодорожного транспорта. Технические условия».
8. ГОСТ Р 52605-2006 «Контактные напряжения в колесно-осевой системе. Методы расчёта».
9. Агапов С.Н. Исследование усталостного разрушения колесных пар: дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГУП, 2020.
10. Кузнецов А.В. Современные методы неразрушающего контроля колес. В кн.: Сборник научных трудов РЖД, 2022, вып. 15, с. 139–148.
11. Виноградов Ю.П., Бочкарёв П.М. Динамика железнодорожного транспортного средства. Москва: Машиностроение, 2015.
12. Литвиненко В.А. Эксплуатационные методы продления ресурса колесных пар. «Журн. прикладной механики и технологий», 2021, Т. 8, № 1, с. 54–62.