

УДК 629.4.027

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР
ЛОКОМОТИВОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ***Рустамов Бобур Абдубакир угли**Магистрант 2-го курса направления «Локомотивы»**Зайниддинов Н.С.,**Научный руководитель,**д.т.н., доц., ТГТУ г. Ташкент*

Аннотация: В статье приведены основные факторы, влияющие на нагруженное состояние колесных пар локомотивов. Установлено, что кроме рабочей нагрузки на колесные пары действуют различные динамические усилия в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Одним из главных причин, вызывающих динамические нагрузки, влияющие на колесные пары, являются неровности рельсовых путей. При движении по этим неровностям возникают инерционные и ударные нагрузки между колесом и рельсом. Проведено моделирование и определение максимальных значений напряжений в колесных парах локомотива и предложены рекомендации по использованию метода конечных элементов при решении подобных задач.

Ключевые слова: колесная пара локомотива, моделирование узлов локомотивов, анализ нагруженного состояния, метод конечных элементов.

Введение. Введение

В условиях современного железнодорожного транспорта наблюдается устойчивая тенденция к увеличению массы поездов, росту скоростей движения и усложнению эксплуатационных условий. Эти факторы приводят к значительному возрастанию нагрузок, действующих на основные конструктивные элементы локомотивов, в том числе на колесные пары. Колесные пары являются одним из наиболее ответственных узлов подвижного состава, поскольку они воспринимают вес локомотива, передают тяговые и тормозные усилия, а также обеспечивают направляющую функцию при движении по рельсовому пути. Техническое состояние колесных пар напрямую влияет на безопасность движения, надежность эксплуатации и экономическую эффективность железнодорожного транспорта.

В процессе эксплуатации на колесные пары, помимо статических рабочих нагрузок, воздействуют значительные динамические усилия в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Эти усилия возникают вследствие неровностей рельсового пути, ударного взаимодействия в системе «колесо–рельс», а также в

результате тормозных и тяговых режимов движения. Воздействие указанных факторов приводит к формированию сложного напряженно-деформированного состояния колесных пар, что создает предпосылки для ускоренного износа и возникновения различных дефектов.

Анализ эксплуатационных данных показывает, что наиболее распространёнными дефектами колесных пар локомотивов являются выщербины, ползуны, навары, кольцевые выработки, тонкий и подрезанный гребень, остроконечный накат, прокат и неравномерный прокат.

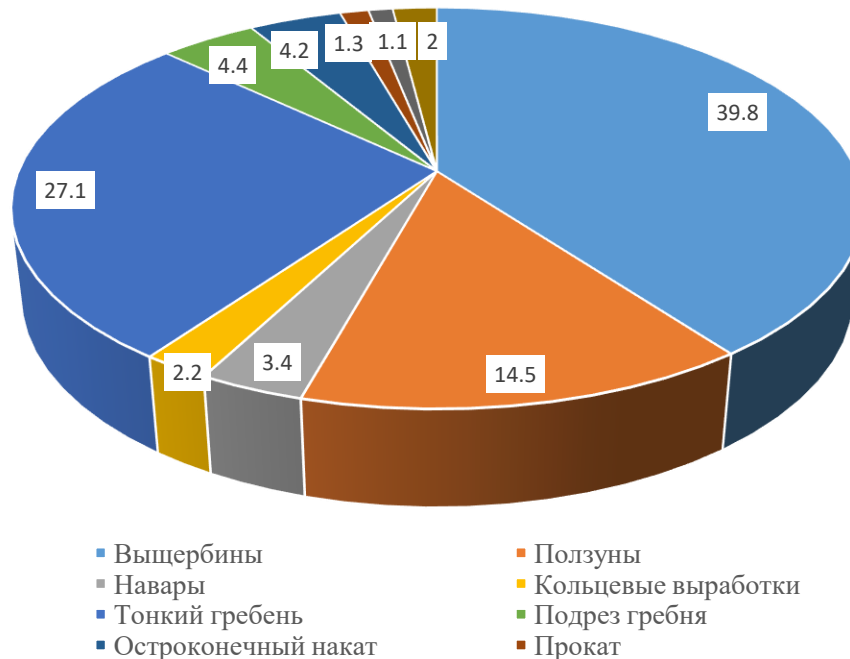


Рисунок 1. Анализ основных дефектов, возникающих в колесных парах локомотивов

Среди перечисленных дефектов особую опасность представляют выщербины, так как они вызывают локальные ударные нагрузки при каждом обороте колеса, приводя к резкому росту динамических напряжений в зоне контакта и в теле колеса. Наличие выщербин существенно ускоряет развитие усталостных процессов в диске и в зоне перехода обода к диску, что может привести к образованию трещин и разрушению колесной пары.

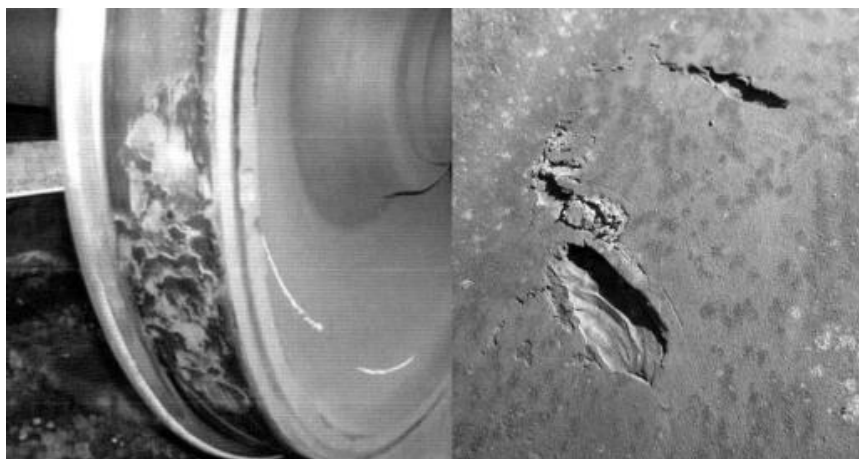


Рисунок 2. Выщербины на поверхности катания железнодорожного колеса

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является исследование напряженно-деформированного состояния колесных пар локомотивов с учетом реальных эксплуатационных дефектов, а также разработка методов оценки их прочностного ресурса. Одним из наиболее эффективных инструментов для решения данной задачи является метод конечных элементов, позволяющий выполнить детальный анализ напряжений и деформаций в колесных парах при различных режимах нагружения.

Моделирование колесных пар локомотивов методом конечных элементов

Моделирование колесных пар локомотивов методом конечных элементов (МКЭ) является современным и эффективным способом исследования их напряженно-деформированного состояния в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Данный метод позволяет учитывать сложную геометрию колесной пары, физико-механические свойства материалов, а также воздействие статических и динамических нагрузок, возникающих в процессе движения локомотива.

На первом этапе моделирования формируется трехмерная геометрическая модель колесной пары, включающая колесо с ободом, диском и гребнем, а также ось. При необходимости в модель вводятся характерные эксплуатационные дефекты поверхности катания, в первую очередь выщербины, а также ползуны и участки неравномерного проката. Геометрическая модель дискретизируется на конечные элементы с учетом зон ожидаемой концентрации напряжений, таких как контактная область «колесо–рельс» и зона перехода обода к диску.

В расчетной модели задаются упругие свойства материала колеса и оси, включая модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность. Взаимодействие колеса с рельсом рассматривается как контактная задача, при которой на поверхность катания прикладываются вертикальные и горизонтальные нагрузки, соответствующие весу локомотива, тяговым и тормозным усилиям, а также динамическим воздействиям от неровностей пути.

Граничные условия моделируют закрепление колесной пары в буксовых узлах и условия ее вращения.

Результаты расчетов, выполненных методом конечных элементов, позволяют выявить неравномерность распределения напряжений в колесной паре. Установлено, что наличие выщербин на поверхности катания приводит к существенной концентрации эквивалентных напряжений в зоне контакта «колесо–рельс», а также к росту напряжений в диске колеса и в приободной зоне. Эти области являются наиболее опасными с точки зрения зарождения и развития усталостных трещин. Моделирование также позволяет оценить влияние изменения скорости движения, величины нагрузки и параметров дефекта на уровень напряжений и долговечность колесной пары.

Таким образом, применение метода конечных элементов при моделировании колесных пар локомотивов с учетом эксплуатационных дефектов, прежде всего выщербин, обеспечивает возможность объективной оценки их прочностного ресурса, определения критических зон и разработки инженерных мероприятий, направленных на повышение надежности и безопасности эксплуатации подвижного состава.

В настоящей работе рассматривается процесс перекатывания колеса через рельсовый стык, который носит периодический характер и сопровождается радиальным ударным воздействием колеса на край рельса. Данное взаимодействие приводит к возникновению повышенных контактных напряжений в зоне «колесо–рельс», что может способствовать формированию выщербин контактно-усталостного типа. Согласно действующим нормативам укладки рельсов, предельно допустимый зазор между рельсами составляет 21 мм. Однако в процессе эксплуатации железнодорожного пути вследствие температурных деформаций, смещений рельсов и ослабления креплений возможно увеличение данного зазора. На труднодоступных участках пути такие изменения не всегда выявляются своевременно, в результате чего фактический зазор может превышать нормативное значение в 1,5–2 раза. В связи с этим при численном моделировании рассматривался диапазон величин зазора между рельсами от 2 до 40 мм.

Геометрическая модель системы «колесо–рельс» представлена на рисунке 3. Поскольку анализ проводится для движения колесной пары по прямолинейному участку пути, с учетом симметрии нагружения и граничных условий в численном исследовании использовалась половина расчетной модели. В качестве глобальной системы координат была принята правая декартова система, при этом ось OX направлена вдоль рельса, ось OY — поперек рельса, а ось OZ — вертикально вверх.

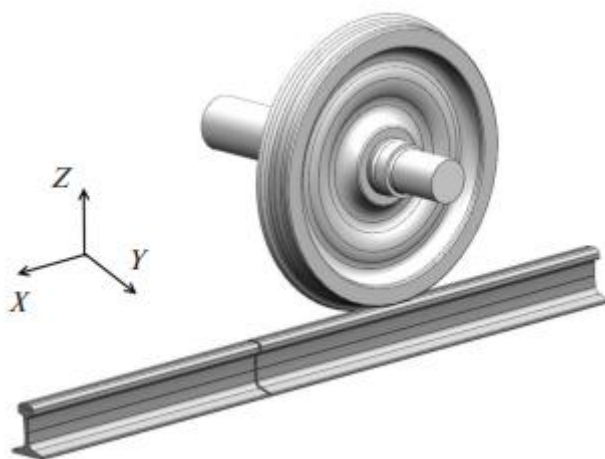


Рисунок 3. Геометрическая модель системы «колесо–рельс»

В соответствии с требованиями к устройству железнодорожного пути рельсовые стыки должны быть соединены прижимными накладками, закрепляемыми болтами с обеих сторон, что предотвращает продольные и вертикальные смещения рельсов. Однако в условиях длительной эксплуатации возможно ослабление крепежных элементов, в результате чего край рельса получает возможность перемещаться в вертикальном направлении при наезде на него колеса. В рамках настоящего численного исследования соединительная пластина в зоне стыка не учитывалась, исходя из предположения, что вертикальное смещение рельса вдоль оси OZ усиливает ударное взаимодействие колеса со следующим рельсом.

В расчетной модели были заданы следующие граничные условия: ограничение перемещений вдоль оси OY на плоскости симметрии колесной пары; запрет перемещений вдоль оси OX на торцевых поверхностях рельсов; а также полное закрепление поверхностей опирания рельсов на шпалы (рис. 4). Ширина шпал принималась равной 180 мм, расстояние между ними — 502 мм. К внешней поверхности оси колесной пары в зоне примыкания подшипникового адаптера прикладывалась сосредоточенная сила, направленная против оси OZ и равная 122,6 кН, что соответствует одной восьмой части массы груженого вагона полной массой 100 т.

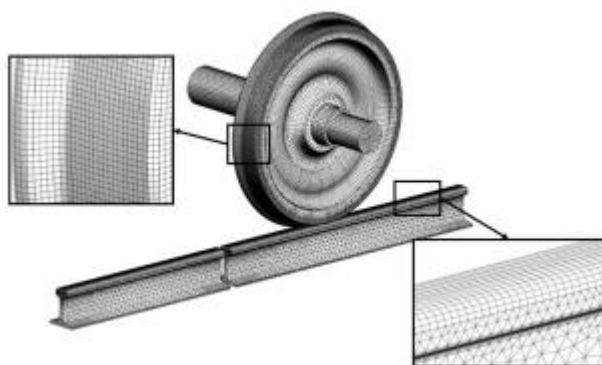


Рисунок 4. Вид конечно-элементной модели

В качестве материала колеса в расчетах использовалась сталь 2 с модулем упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$, пределом текучести около 700 МПа и временным сопротивлением порядка 1000 МПа. Материалом рельса принималась сталь 76ХФ с аналогичным модулем упругости и коэффициентом Пуассона, пределом текучести около 800 МПа и временным сопротивлением порядка 1180 МПа.

Результаты численного моделирования

В ходе проведенного численного моделирования системы «колесо–рельс» методом конечных элементов были получены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне контакта колеса с краем рельса при различных значениях зазора между рельсами. Анализ результатов показал, что величина зазора оказывает существенное влияние на уровень возникающих контактных напряжений.

При нормативном значении зазора в 2–8 мм максимальные эквивалентные напряжения в зоне контакта колеса с рельсом находились в пределах упругой работы материала и не превышали предела текучести стали 76ХФ. Однако при увеличении зазора до 20 мм наблюдался резкий рост контактных напряжений, что обусловлено усилением ударного взаимодействия колеса с краем рельса. При зазоре 30–40 мм максимальные эквивалентные напряжения в локальной зоне контакта достигали и превышали предел текучести материала рельса, что свидетельствует о возможности возникновения остаточных пластических деформаций.

Установлено, что наибольшая концентрация напряжений возникает на верхней кромке торца рельса — именно в той зоне, где происходит первичный ударный контакт с поверхностью катания колеса. Кроме того, значительные напряжения фиксируются и в ободке колеса в области контактного взаимодействия, что объясняет преимущественное формирование выщербин контактно-усталостного типа именно в этой зоне.

Анализ влияния скорости движения

Дополнительное моделирование при варьировании скорости движения локомотива в диапазоне от 40 до 120 км/ч показало, что с ростом скорости динамическая составляющая нагрузки увеличивается пропорционально скорости, что согласуется с теоретическими положениями, рассмотренными выше при суммировании нагрузок, передаваемых колесом рельсу. Полученные расчетные данные подтверждают, что при превышении скоростей 80–100 км/ч в сочетании с увеличенным зазором между рельсами (более 20 мм) уровень контактных напряжений достигает критических значений, при которых процессы зарождения усталостных трещин и развития выщербин существенно ускоряются.

Обсуждение результатов

Полученные результаты численного моделирования согласуются с данными эксплуатационных наблюдений, согласно которым на участках пути с увеличенными зазорами между рельсами и в зонах рельсовых стыков фиксируется повышенная интенсивность образования выщербин на поверхности катания колес локомотивов. Это подтверждает обоснованность применения метода конечных элементов для прогнозирования напряженно-деформированного состояния колесных пар с учетом реальных эксплуатационных условий.

Особо следует отметить, что наличие даже небольших дефектов на поверхности катания колеса (выщербин, ползунов) приводит к значительному локальному увеличению контактных напряжений, формируя самоусиливающийся механизм развития дефекта: возникшая выщербина вызывает дополнительные ударные нагрузки, которые ускоряют ее дальнейшее развитие и способствуют появлению новых дефектных зон. Этот эффект подтверждается результатами моделирования и должен учитываться при разработке рекомендаций по техническому обслуживанию и ремонту колесных пар.

Практические рекомендации

На основании выполненного исследования предложены следующие рекомендации:

1. Усилить контроль за состоянием рельсовых стыков, особенно на труднодоступных участках пути, с целью своевременного выявления случаев увеличения зазора между рельсами свыше нормативных значений.
2. При проведении плановых ремонтов колесных пар уделять особое внимание контролю поверхности катания в зоне обода и приободной области, где формируется максимальная концентрация напряжений.
3. Применять метод конечных элементов на этапе проектирования и модернизации колесных пар для оценки их прочностного ресурса с учетом возможных эксплуатационных дефектов.
4. При определении допустимых скоростей движения локомотивов учитывать не только состояние верхнего строения пути, но и фактическое состояние колесных пар, поскольку их совместное влияние существенно сказывается на уровне динамических нагрузок.

Заключение

В результате выполненного исследования установлено, что нагруженное состояние колесных пар локомотивов формируется под воздействием комплекса статических и динамических факторов, среди которых определяющую роль играют неровности рельсового пути и состояние рельсовых стыков. Применение

методики суммирования случайных нагрузок с использованием их математических ожиданий и среднеквадратических отклонений позволяет получить обоснованные расчетные значения нагрузок, действующих на колесную пару.

Проведенное численное моделирование системы «колесо–рельс» методом конечных элементов показало, что величина зазора между рельсами оказывает существенное влияние на уровень контактных напряжений. При зазорах, превышающих 20 мм, максимальные эквивалентные напряжения в зоне ударного контакта приближаются к пределу текучести материала рельса, что создает условия для формирования выщербин контактно-усталостного типа.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности применения метода конечных элементов при решении задач оценки прочности и долговечности колесных пар локомотивов в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Предложенные рекомендации направлены на повышение надежности и безопасности эксплуатации железнодорожного подвижного состава.

Список использованной литературы

1. Вершинский С. В., Данилов В. Н., Хусидов В. Д. Динамика вагона. — М.: Транспорт, 1991. — 360 с.
2. Лысюк В. С., Каменский В. Б., Башкатова Л. В. Прочный и надежный железнодорожный путь. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. — 589 с.
3. Иванов И. А., Кушнер В. Я., Урушев С. В. Восстановление и упрочнение деталей подвижного состава. — СПб.: ПГУПС, 2014. — 217 с.
4. Богданов А. Ф., Чурсин В. Г. Эксплуатация и ремонт колесных пар вагонов. — М.: Транспорт, 1985. — 270 с.
5. Зайниддинов Н. С. Анализ напряженно-деформированного состояния узлов локомотивов. — Ташкент: ТашИИТ, 2019.