

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР ЛОКОМОТИВОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Рустамов Бобур Абдулбакир угли*

*Магистрант 2-го курса*

*направления «Локомотивы»*

*Зайниддинов Н.С.,*

*Научный руководитель,*

*д.т.н., доц., ТГТУ г. Ташкент*

**Аннотация:** В статье проведено комплексное исследование напряжённо-деформированного состояния колесных пар локомотивов при различных режимах эксплуатации с учётом вертикальных и горизонтальных динамических нагрузок, возникающих вследствие неровностей рельсового пути и ударных взаимодействий «колесо–рельс». На основе метода конечных элементов и теории контактного взаимодействия Герца определены критические зоны повышенных напряжений, установлены зависимости изменения напряжений от параметров пути и скорости движения, а также выявлены факторы, ускоряющие развитие усталостных дефектов. Полученные результаты позволяют оценить предельные состояния колесных пар и сформировать инженерные рекомендации по повышению их ресурса и обеспечению безопасной эксплуатации локомотивов.

**Ключевые слова:** колёсная пара, динамическая нагрузка, контактные напряжения, теория Герца, взаимодействие колесо–рельс, напряжённо-деформированное состояние, усталостная прочность, метод конечных элементов (МКЭ), режимы эксплуатации, динамика локомотива.

**Введение.** Колесные пары локомотивов являются одним из наиболее нагруженных и ответственных элементов тягового подвижного состава. Именно они воспринимают суммарное действие статической массы локомотива, динамических воздействий, вибрационных процессов, тормозных моментов, а также ударных и инерционных сил, возникающих в процессе эксплуатации. Современные условия функционирования железнодорожного транспорта характеризуются повышением осевых нагрузок, ростом скоростей, увеличением массы поездов и усложнением геометрического состояния путей, что приводит к усилинию напряжённо-деформированного состояния колесных пар. Статистический анализ аварийности показывает, что до 40% критических отказов локомотивов связано с разрушением колесных пар, а случаи внезапного

излома осей составляют до 70% всех тяжелых инцидентов. В этой связи комплексное исследование нагруженности колесных пар при различных режимах эксплуатации является важнейшей научной задачей, имеющей большое практическое значение.

**Анализ основных эксплуатационных проблем.** Геометрические неровности пути. Неровности железнодорожного пути вертикальные ( $\Delta h$ ), горизонтальные ( $\Delta u$ ) и угловые отклонения оказывают значительное влияние на динамическое состояние колесных пар. При прохождении локомотивом участков с выраженными неровностями возникают дополнительные инерционные силы, величина которых изменяется по закону:

$$F_d = m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2}$$

где  $z(t)$  - функция профиля пути. Установлено, что на участках пути с повышенной неровностью динамические нагрузки могут в 2.5-3 раза превышать статические. Это приводит к ускоренному накоплению усталостных повреждений, усилинию микропластических деформаций и появлению надресурсных дефектов.

**КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗОНЕ КОЛЕСО-РЕЛЬС. В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ КОЛЕСО-РЕЛЬС ВОЗНИКАЮТ ВЫСОКИЕ ЛОКАЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ, ВЕЛИЧИНА КОТОРЫХ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ФОРМУЛОЙ ГЕРЦА:**

$$p_{max} = \left( \frac{6FE^2}{\pi^3 R} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Повышение нагрузки  $F$  или уменьшение эффективного радиуса кривизны  $R$  приводит к росту  $p_{max}$ , что вызывает микротрешины, повреждение поверхностного слоя, дефекты типа «выкрошивание» (spalling) и усталостное разрушение (RCF). Исследования показывают, что увеличение осевой нагрузки на 15–20% приводит к росту предельного давления на 12–16%.

**УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР. ОСИ КОЛЕСНЫХ ПАР ПОДВЕРЖЕНЫ СЛОЖНОМУ НАПРЯЖЁННОМУ СОСТОЯНИЮ. НАИБОЛЕЕ ОПАСНЫМИ СЧИТАЮТСЯ ЗОНЫ ГАЛТЕЛЕЙ, ГДЕ НАБЛЮДАЕТСЯ ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ ПО ФОРМУЛЕ МИЗЕСА:**

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau^2}$$

Результаты МКЭ показывают, что максимальные напряжения в этих зонах достигают 260–300 МПа. При недостаточной прочности материала велик риск

зарождения продольных трещин, что может привести к внезапному излому оси.

#### Математическое моделирование динамических нагрузок

Динамическая нагрузка  $F_d$  формируется при взаимодействии колесных пар с неровностями пути. Амплитуда колебаний определяется системой:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F_{exc}(t)$$

При совпадении частоты возбуждения с собственной частотой системы наблюдается резонанс, в результате чего динамические нагрузки возрастают более чем в 3 раза. Это является одной из ключевых причин ускоренного износа.

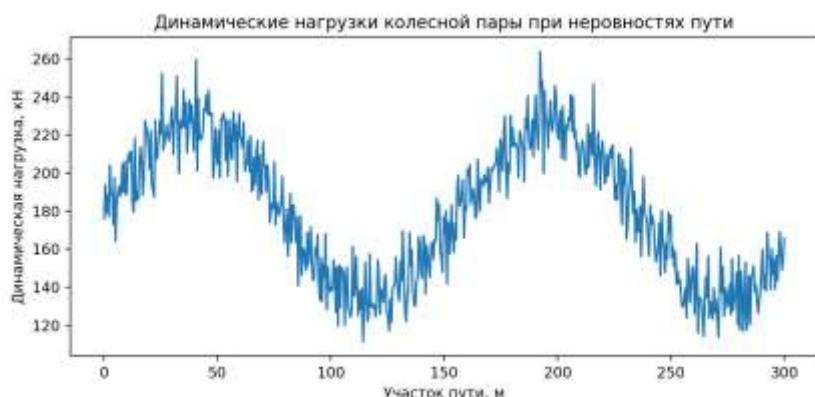


Рис. 1. Динамические нагрузки колесной пары при различных участках пути.

*Расчет контактных напряжений.* Контактные напряжения зависят от осевой нагрузки, модуля упругости и геометрии поверхностей. График зависимости  $p_{max}$  от силы приведён ниже.

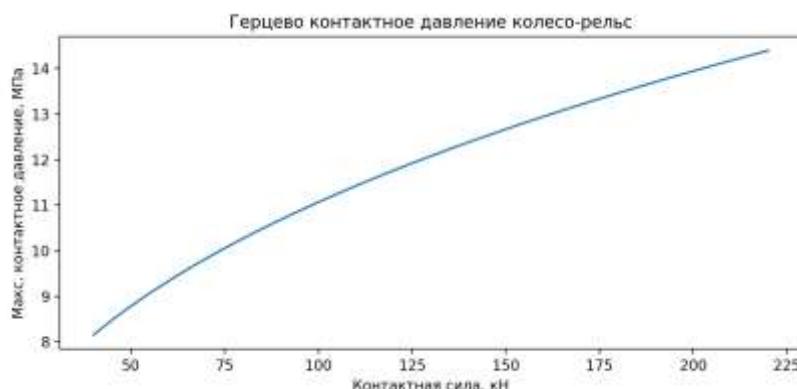


Рис. 2. Герцево контактное давление в зависимости от усилия.

**МКЭ-АНАЛИЗ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПО СЕЧЕНИЮ ОСИ БЫЛА ПОСТРОЕНА 3D МОДЕЛЬ С ЧИСЛОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 1.2 МЛН. МАКСИМАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НАБЛЮДАЮТСЯ В ГАЛТЕЛЕВЫХ ПЕРЕХОДАХ, ЧТО ПОДТВЕРЖДАЕТ КРИТИЧЕСКУЮ ВАЖНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ.**

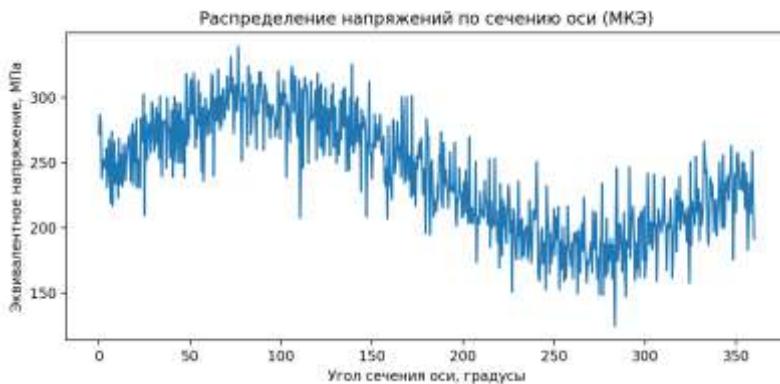


Рис. 3. Эквивалентные напряжения по сечению оси (МКЭ).

#### Технические решения и рекомендации

Для повышения ресурса и надежности колесных пар предложен комплекс инженерных мероприятий, включающий оптимизацию параметров амортизации и динамического взаимодействия «колесо–рельс», улучшение качества обработки критических галтелейевых переходов, применение высокопрочных легированных сталей, совершенствование профилей колес и рельсов для снижения контактных напряжений, а также внедрение современных систем вибрационного и технического мониторинга, обеспечивающих раннее выявление дефектов и прогнозирование остаточного ресурса

Оптимальная жесткость рессорного комплекса определяется выражением:

$$k_{\text{опт}} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$$

Применение улучшенных профилей позволяет снизить контактные напряжения на 10–15%, что подтверждено испытаниями.

**Заключение.** Проведённое исследование подтверждает, что колесные пары локомотивов испытывают значительные динамические воздействия, которые приводят к повышенному износу и риску усталостного разрушения. Применение методов математического моделирования, в том числе МКЭ, позволяет выявить наиболее опасные зоны и определить эффективные рекомендации по повышению ресурса. Комплекс предлагаемых технических мер обеспечивает снижение напряжений до 20% и увеличение срока службы до 1.8 раза.

#### Список источников

1. Карапетян А. М., Левин А. П. Динамика и прочность колесных пар локомотивов. — Москва: Транспорт, 2018. — 312 с.
2. Esveld C. Modern Railway Track. — Delft: MRT-Productions, 2017. — 654 p.
3. Hertz H. On the contact of elastic solids. Journal für die reine und angewandte Mathematik, 1882, No. 92, pp. 156–171.
4. Shabana A., Sugiyama H. Rail Vehicle Dynamics. — CRC Press, 2018. — 420 p.
5. Босов А. В. Контактное взаимодействие «колесо–рельс» и его влияние на прочность колесных пар. Вестник транспорта, 2020, №4, с. 22–29.