

На правах рукописи



ЕФИМОВ РОМАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЙ
ЦЕЛЬНОКАТАНОГО КОЛЕСА ВАГОНА
ПРИ ТОРМОЖЕНИИ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» (МГУПС (МИИТ))

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Саврухин Андрей Викторович

Официальные оппоненты: **Овечников Михаил Николаевич**, доктор технических наук, доцент, Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», ведущий научный сотрудник

Антипин Дмитрий Яковлевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Подвижной состав железных дорог»

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество Научная организация «Тверской институт вагоностроения» ЗАО НО «ТИВ»

Защита диссертации состоится «20» июня 2017 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» (МГУПС (МИИТ)) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГУПС (МИИТ) www.miit.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Н.Н. Воронин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Цельнокатаное колесо является одним из наиболее ответственных элементов конструкции грузового вагона, от безотказной работы которого непосредственно зависит безопасность движения поездов. В настоящее время сохраняется высокий уровень повреждаемости цельнокатаных колес в эксплуатации и, как следствие, отцепки грузовых вагонов.

Цельнокатаные колеса (ЦКК) повреждаются такими дефектами, как износы, выщербины на поверхности катания, отколы обода и гребня и другие. Для анализа причин образования дефектов и выработки рекомендаций по их предупреждению необходимо наличие достоверной информации о нестационарных процессах, которые имеют место в ЦКК в эксплуатации.

Завершающей операцией при изготовлении колеса является термическая обработка, включающая закалку и последующий отпуск. В результате проведения термической обработки в колесе формируется неоднородная по объему структура и напряженно-деформированное состояние. Структурный состав в совокупности с остаточными напряжениями определяют основные свойства ЦКК, его безотказность и долговечность в эксплуатации.

Взаимодействие колеса с рельсом и тепловые нагружения, связанные с реализацией режимов торможения приводят к протеканию в колесе сложных нестационарных процессов, которые изменяют первоначальное состояние ЦКК, сформированное при изготовлении, что является причиной образования различного рода дефектов колеса и отказов в эксплуатации.

Современные методы оценки текущего состояния цельнокатаного колеса ориентированы, прежде всего, на выявление уже сформировавшегося дефекта и не позволяют в полном объеме проводить анализ нестационарных процессов в эксплуатации, мониторинг текущего состояния в течение всего жизненного цикла.

Таким образом, разработка методов объективной оценки текущего состояния цельнокатаного колеса в эксплуатации с учетом всего спектра механических и тепловых нагружений, а также уменьшения толщины обода в результате износов и восстановления профиля поверхности катания при в ремонте в на-

стоящее время является актуальной задачей, решение которой оказывает непосредственное влияние на оценку ресурса колеса и безопасность движения поездов.

Наиболее полный и объективный анализ нестационарных процессов в цельнокатаном колесе можно проводить комплексно, используя данные средств неразрушающего контроля совместно с компьютерным моделированием последовательных технологических и эксплуатационных воздействий с учетом их взаимного влияния и предыстории нагружения. Данный подход позволяет не только оценить влияние каждого из факторов технологического или эксплуатационного воздействия, но и выявить периоды нагружений, оказывающие определяющее влияние на текущее состояние ЦКК, остаточный ресурс, произвести оценку надежности.

Объектом исследования является процесс взаимодействия тормозной колодки с цельнокатаным колесом при реализации различных режимов торможения.

Предметом исследования является повышение работоспособности цельнокатаных колес грузовых вагонов в эксплуатации на основе анализа тепловых процессов, возникающих в цельнокатаном колесе при различных режимах торможения.

Степень разработанности темы. Функционирование и развитие железнодорожного транспорта связано с вопросом обеспечения безопасности движения грузовых поездов. Исследованиями в области изучения процессов колодочного торможения и тепловых процессов в цельнокатаном колесе при торможении проводились научными коллективами АО «ВНИИЖТ», вузами МГУПС (МИИТ), ОмГУПС, ПГУПС, РГУПС, БГТУ и другими.

Значительный вклад внесли отечественные и зарубежные ученые С. Н. Киселев, А. С. Киселев, А. В. Саврухин, А. Н. Неключов, Г. Д. Кузьмина, П. С. Анисимов, И. А. Жаров, С. М. Захаров, А. А. Александров, А. Л. Озябкин, И. Н. Воронин, Д. П. Марков, В. И. Сакало, А. В. Сакало, Д. В. Титарев, Г. И. Петров, В. А. Карпычев, О. Л. Голубенко, Marek Sitarz, Johan Ahlstrom, Birger Karlsson, Tore Vernersson, Ю. И. Матяш, П. Т. Гребенюк и другие видные ученые и специалисты.

Настоящее диссертационное исследование является логическим развитием в современных условиях ранее выполненных

научно-технических исследований в области оценки тепловых процессов в цельнокатаных колесах грузовых вагонов при различных режимах торможения.

Цель работы – разработка методики оценки тепловых процессов и структурного состава цельнокатаного колеса в эксплуатации при реализации различных режимов торможения.

Основные задачи диссертационного исследования:

- анализ методов оценки теплового состояния цельнокатаного колеса в эксплуатации при различных режимах торможения;
- разработка методики уточненной оценки тепловых нагрузок на ЦКК при торможении;
- определение и обоснование факторов, определяющих интенсивность тепловых нагружений цельнокатаного колеса при различных режимах торможения;
- разработка рациональных конечно-элементных моделей цельнокатаных колес с различной геометрией дисков для компьютерного моделирования протекания тепловых процессов и анализа структурных превращений в цельнокатаном колесе при торможении;
- проведение уточненного анализа изменения теплового и структурного состояния цельнокатаного колеса при различных режимах торможения с учетом особенностей геометрии колеса и износа обода колеса в эксплуатации.

Методология и методы исследования, применяемые в диссертационной работе, включают:

- метод конечных элементов. Этот метод, основанный на решении дифференциальных уравнений с частными производными, получил широкое признание мирового научного сообщества при решении широкого спектра задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена и ряда других и является основой множества программных комплексов, осуществляющих инженерный и научный анализ;
- метод оценки тепловыделения в контакте «колесо – тормозная колодка» и количества тепла, поступающего в колесо при торможении с учетом текущей скорости движения;
- перенос тепла и распределение температурных полей;
- механика деформируемого твердого тела;
- применение современных языков программирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика компьютерного моделирования протекания тепловых процессов и изменения структурного состава в цельнокатаном колесе при реализации различных режимов торможения в эксплуатации с учетом текущей скорости движения;
- впервые получены зависимости интенсивности тепловых нагрузок и распределения полей температур в колесе при различных режимах торможения с учетом скорости движения;
- определена степень влияния отдельных факторов на интенсивность тепловыделения в контакте «колесо – тормозная колодка» и протекание тепловых процессов в цельнокатаном колесе при торможении;
- исследовано влияние геометрии диска колеса на характер перемещений при длительном торможении на затяжном спуске.

Теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования состоит в следующем:

- разработаны рациональные конечно-элементные модели цельнокатаных колес с различной геометрией диска для компьютерного моделирования тепловых процессов и анализа структурного состава цельнокатаных колес при торможении с учетом скорости движения;
- разработана методика численного определения значений тепловых нагрузок на цельнокатаное колесо при различных режимах и условиях торможения с учетом широкого спектра факторов: типа тормозной колодки, уклона пути, износа обода, скорости движения и других;
- проведен уточненный анализ изменения теплового и структурного состояния цельнокатаного колеса при различных режимах торможения с учетом особенностей геометрии колеса и уменьшения толщины обода колеса в эксплуатации;
- выполнен анализ структурных превращений в ЦКК в результате моделирования нескольких последовательных торможений на участке пути с различным профилем и получено подтверждение возможности образования закалочных структур в приповерхностном слое обода цельнокатаного колеса в зоне контакта с тормозной колодкой.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

- методика численного определения значений тепловых нагрузок на цельнокатаное колесо при различных режимах торможения с учетом влияния широкого спектра факторов: начальная скорость торможения, тип тормозной колодки, уклон пути, скорость движения, износ обода колеса и других;
- рациональные трехмерные и осесимметричные конечно-элементные модели цельнокатаных колес с различной геометрией диска и износом обода для компьютерного моделирования тепловых процессов и изменения структурного состава при реализации различных условий торможения;
- результаты компьютерного моделирования тепловых процессов в цельнокатаном колесе при различных режимах торможения;
- результаты компьютерного моделирования изменения структурного состояния в колесе при реализации многократного последовательного торможения на участке следования поезда.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Результаты исследований, полученные в ходе выполнения диссертационной работы коррелируются с результатами по данной тематике, опубликованными в научных изданиях и расхождение с ними не превышает 12 %.

Основные положения диссертационной работы докладывались на X Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Trans-Mech-Art-Chem», тринадцатой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», научно-практических конференциях «Наука МИИТа – Транспорту» в 2011 – 2013 годах.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» (МГУПС (МИИТ)).

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, имеющих теоретическую и практическую значимость, в том числе в 3 работах, опубликованных в научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные

результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, рекомендованный ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы. Диссертация включает 196 страниц машинописного текста, 55 рисунков и 50 таблиц. Список литературы включает 114 наименований источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, определена научная новизна и практическое значение работы, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе выполнен обзор научно-исследовательских работ в области методов анализа колодочного торможения и тепловых процессов в цельнокатаном колесе при нем, анализ конструктивных особенностей цельнокатаных колес грузовых вагонов, а также основные виды неисправностей при эксплуатации.

Значительный вклад в исследование процессов колодочного торможения и тепловых процессов в цельнокатаном колесе при торможении внесли научные коллективы АО «ВНИИЖТ», вузами МГУПС (МИИТ), ОмГУПС, ПГУПС, РГУПС, БГТУ и другими.

В работе рассматриваются цельнокатаные колеса с прямолинейным и криволинейным дисками с составом и механическими свойствами колесной стали марки 2 по ГОСТ 10791-2011.

Анализ данных по отказам цельнокатаных колес в эксплуатации свидетельствует о том, что наибольшее количество дефектов приходится на долю выщербин поверхности катания (до 40 %) и дефекты тормозного происхождения (ползуны, навары – до 25 %).

Все выщербины являются следствием эксплуатационных тепловых и механических воздействий на ЦКК в результате сложных нестационарных процессов, протекающих в колесе при сочетании теплового и механического воздействия. Следует от-

метить, что если механические воздействия на ЦКК приводят, главным образом, к протеканию деформационных процессов и накоплению пластических деформаций в приповерхностных слоях поверхности катания колеса, то тепловые воздействия, связанные с торможением, приводят к сложным нестационарным процессам теплопереноса и, как следствие, структурным и фазовым превращениям в ободе, изменению напряженно-деформированного состояния, сформированного на этапе изготовления в результате термической обработки.

Второй раздел посвящен основным положениям методологической основы моделирования тепловых процессов и напряженно-деформированного состояния цельнокатаного колеса в эксплуатации.

Изложены основные положения метода конечных элементов для решения задач теплопереноса, структура и функциональный состав программного комплекса SANAK, который использовался при проведении компьютерного моделирования нестационарных тепловых процессов, изменения структурного состава и напряженно-деформированного состояния в колесе при торможении.

Для проведения многовариантного компьютерного моделирования разработаны конечно-элементные модели цельнокатаного колеса высокой степени дискретизации (рисунки 1 – 2) с прямолинейным и криволинейным дисками, а также с различной толщиной обода в эксплуатации: 70 мм, 40 мм, 22 мм. Для данных моделей описаны граничные условия (зоны теплоотвода, а также зоны приложения тепловой нагрузки (теплопритоков) на поверхности катания колеса) и заданы свойства стали марки 2 по ГОСТ 10791—2011.

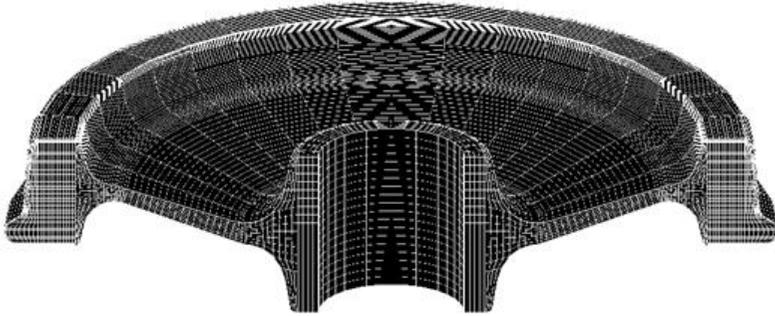


Рисунок 1 – Объемная конечно-элементная модель половины ЦКК с прямолинейным диском (толщина обода 70 мм)

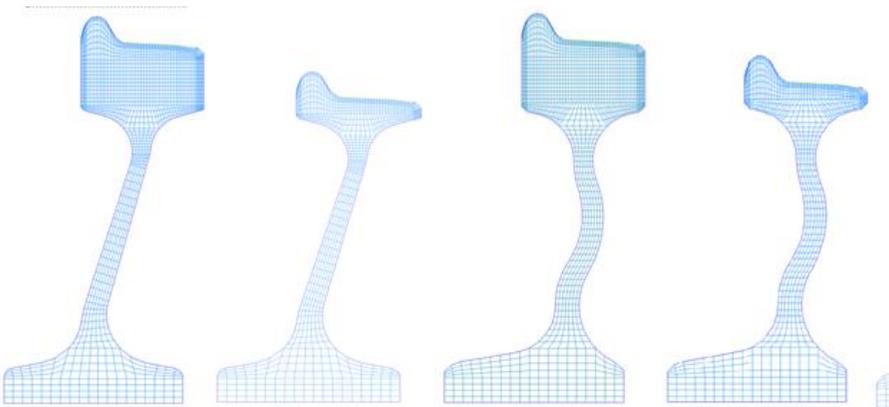


Рисунок 2 - Осесимметричные модели ЦКК с различной формой диска и толщиной обода 70 и 22 мм

Верификация результатов моделирования тепловых процессов при торможении поезда с колесами, имеющими различную степень износа в эксплуатации с результатами расчетных и экспериментальных исследований, проводимых учеными МГУПС (МИИТ) в рамках научно-исследовательских работ в предыдущие годы показала хорошее соответствие разработанных моделей реальным процессам, расхождение результатов при одинаковых граничных условиях не превышает 8 %.

Разработанное автором семейство конечно-элементных моделей позволяет адекватно моделировать изменение тепловых

процессов в колесе с различной геометрией диска и при реализации различных режимов торможения, что обеспечивает возможность проведения объективной оценки теплового состояния реальных цельнокатаных колес.

Результаты проведенного моделирования позволяют сделать вывод о том, что максимальные температуры в паре «колесо – колодка» формируются в колесе на поверхности катания в зоне фрикционного взаимодействия с колодкой и при экстренном торможении существенным образом не зависят от толщины обода колеса.

Третий раздел посвящен изложению основных положений разработанной методики расчетной оценки тепла, выделяемого в системе «колесо – колодка» при различных режимах торможения, позволяющей проводить уточненную оценку тепловых нагрузок на колесо с учетом различных факторов: тип тормозной колодки, скорость движения, толщина обода колеса, профиль пути и другие.

Действительный тормозной путь (1) вычисляется в результате суммирования тормозных путей, определяемых по интервалам скорости, при условии постоянства тормозной силы, удельного сопротивления движению и уклона в принятом интервале скоростей:

$$S_d = \sum \frac{500 \cdot [V_n^2 - V_k^2]}{\xi \cdot (b_t + \omega_{ox} + \omega_i)}, \quad (1)$$

где V_n и V_k - начальная и конечная скорости движения в рассматриваемом интервале скоростей, м/с; ξ - замедление поезда под действием удельной замедляющей силы; b_t - удельная тормозная сила при средней скорости в каждом интервале, кгс/т; ω_{ox} - удельное сопротивление движению поезда при средней скорости в каждом интервале, кгс/т; ω_i - удельное замедляющее или ускоряющее усилие, вызванное весом поезда при движении по уклону железнодорожного пути, кгс/т.

Ускорение a_i (2) определяется зависимостью:

$$a_i = \frac{V_n^2 - V_k^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot \Delta S_d}. \quad (2)$$

Общее время торможения (3) складывается из фактического времени торможения t_{ϕ} , с и подготовительного t_{π} , с:

$$t_{\text{общ}} = t_{\phi} + t_{\pi}. \quad (3)$$

В течение подготовительного времени t_{π} тормоза не работают и поезд проходит подготовительный путь S_{π} . По истечении этого времени, после наполнения тормозных цилиндров, тормоза мгновенно срабатывают и поезд проследует остальную часть тормозного пути при полной силе нажатия тормозных колодок. Стоит отметить неоднородность по времени наполнения тормозных цилиндров головных и хвостовых вагонов.

Для определения количества выделившейся теплоты автором учитывалась только составляющую t_{ϕ} , которая определяется формулой (4):

$$t_{\phi} = \sum \frac{V_{\text{н}} - V_{\text{к}}}{3,6 \cdot a_i}. \quad (4)$$

Кинетическая энергия состава (5) при торможении определяется по формуле:

$$\Omega = \frac{m \cdot V^2}{2}, \quad (5)$$

где m - масса вагона, т; V - начальная скорость торможения, м/с.

Средняя мощность (6) за время торможения:

$$q = \frac{\Omega}{t}, \quad (6)$$

где t - фактическое время торможения, с.

Средняя мощность выделяемого тепла за время торможения при использовании композиционных и чугунных колодок (7 – 8) определяется формулами:

$$q_{\text{к}} = \frac{\Omega}{t_{\text{к}}}; \quad (7)$$

$$q_{\text{ч}} = \frac{\Omega}{t_{\text{ч}}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{к}}$, $t_{\text{ч}}$ - время торможения для соответствующего типа тормозных колодок (композиционные, чугунные).

При анализе тепловых воздействий на колесо в расчетах по методикам, указанных в работах ряда авторов мощность тепловых нагрузений принималась постоянной на всем отрезке

торможения – от начала торможения до его окончания и зависела только от типа тормозной колодки. Однако, в процессе торможения интенсивность выделяемого тепла в паре «колесо – колодка» зависит от скорости вращения колеса (скорости движения состава) и различается во времени.

В данном исследовании автором предложено проведение дифференцированной оценки интенсивности тепловых нагрузок на колесо (9 – 10) в зависимости от текущей скорости движения.

В этом случае:

$$\Omega_i = \frac{m \cdot (V_i^2 - V_{i+1}^2)}{2}; \quad (9)$$

$$q_i = \frac{\Omega_i}{t_i}, \quad (10)$$

где Ω_i - кинетическая энергия в заданном интервале скоростей торможения, кДж; m - масса поезда, т; t_i - время торможения в заданном интервале скоростей торможения, сек.; V_i, V_{i+1} - соответственно начальная и конечная скорости торможения в заданном интервале, м/с;

На рисунке 3 представлены максимальные значения температур на поверхности катания колеса, которые получены в результате моделирования режима экстренного торможения. При формировании граничных условий учитывались значения мощности тепловыделений, полученные с использованием разработанной методики ($q_{расч}$) и постоянного значения ($q=const=43,07$ кВт/см²), определенного по рекомендациям других авторов.

Как видно из рисунка 3, максимальная температура на поверхности катания колеса, полученная при моделировании с использованием значений мощности тепловыделений, определенных по разработанной методике отмечается не в момент окончания торможения, а на 32 секунде после начала торможения.

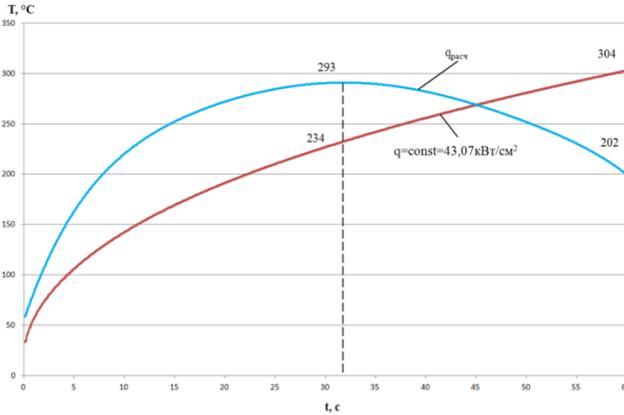


Рисунок 3 - График распределения температур на поверхности катания колеса при постоянном коэффициенте тепловложений и коэффициенте тепловложений, рассчитанном на каждом интервале (по 10 км/ч) снижения скорости движения

С целью уточненной оценки значений количества тепла, выделяющегося в паре «колесо – колодка» и поступающего в колесо при торможении в работе рассмотрены следующие факторы, влияющие на процесс движения и торможения вагона:

- начальная и конечная скорости поезда в расчетном интервале V_n и V_k , км/ч; основное удельное сопротивление движению $\omega_{ок}$, кгс/т; уклон пути i , ‰; режим воздухораспределителя (груженный, средний, порожний); осевая нагрузка q_0 , т; расчетный коэффициент трения тормозных колодок φ_k ; сила нажатия тормозных колодок, действительная K_0 и расчетная K_p , тс; тип тормозных колодок (чугунные, композиционные); количество тормозных колодок на одно колесо; расчетный коэффициент тормозного нажатия поезда ϑ_p , тс/т; вес состава, т; тип торможения (экстренное, полное служебное, ступень торможения).

Границы изменения параметров принимались исходя из ограничений, указанных в нормативных документах и их наиболее вероятного изменения в эксплуатации.

Результаты оценки влияния типа тормозной колодки на время экстренного торможения и значения мощности тепловыделений в паре «колесо – колодка» дискретно с учетом текущего значения скорости движения представлены в таблице 1. Применение композиционной колодки сокращает время торможения на

40,5 с, а максимальные значения мощности тепловыделения увеличиваются в 2,27 раза.

Таблица 1 - Коэффициенты мощности тепловыделений в контакте тормозной колодки с ободом колеса по интервалам скорости

Интервал скорости	Ω_i , кДж	Композиционные колодки		Чугунные колодки	
		$t_{ик}$, с	$q_{ик}$, кВт/см ²	$t_{ич}$, с	$q_{ич}$, кВт/см ²
1	2	3	4	5	6
120-110	8341,049	5,5	74,39	10,6	32,8
110-100	7615,741	5,5	68,62	10,4	30,49
100-90	6890,432	5,4	62,85	10,2	28,22
90-80	6165,123	5,3	57,05	9,9	25,99
80-70	5439,815	5,3	51,2	9,6	23,76
70-60	4714,506	5,2	45,26	9,2	21,52
60-50	3989,198	5,1	39,2	8,7	19,25
50-40	3263,889	4,9	32,95	8,1	16,89
40-30	2538,58	4,8	26,46	7,4	14,36
30-20	1813,272	4,6	19,62	6,6	11,55
20-10	1087,963	4,4	12,31	5,6	8,16
10-0	362,6543	4,2	4,33	4,4	3,46
Сумма	52222,22	60,2	-	100,7	-

На рисунках 4...6 представлены результаты оценки влияния некоторых из рассмотренных параметров на время торможения и максимальные значения температур, полученные по результатам компьютерного моделирования режима экстренного торможения.

На рисунке 7 представлены кривые изменения максимальных значений температур при реализации торможения на участках пути с постоянным уклоном в диапазоне от минус 20 % до плюс 20 %.

Анализ результатов показал, что при изменении руководящего уклона от +20 % до -20 % время торможения увеличивается в два раза, а максимальные значения температур увеличиваются на 30%.

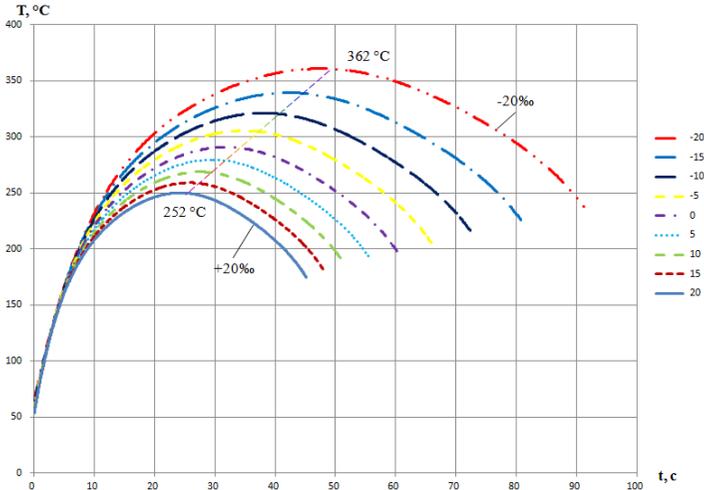
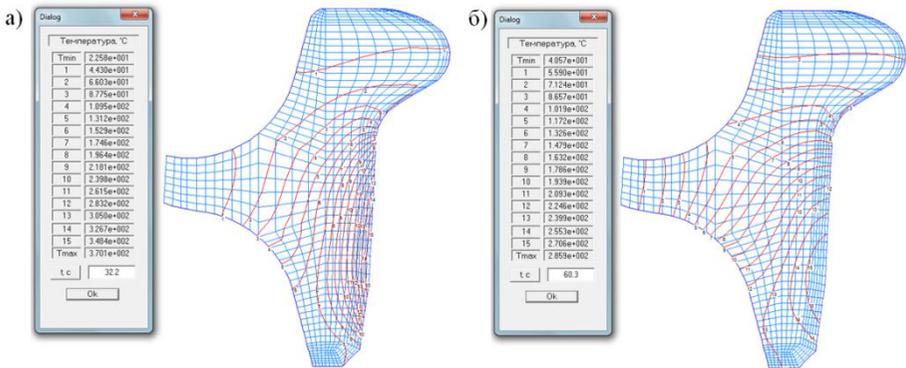


Рисунок 4 – График изменения значений максимальных температур при экстренном торможении на пути с различной величиной уклона, композиционные тормозные колодки

Проведенные исследования показали, что толщина обода незначительно влияет на изменение значений максимальных температур на поверхности катания (рисунок 5).



а) в момент максимальной температуры в ободу колеса; б) в момент окончания торможения

Рисунок 5 - Изолинии распределения температур в цельнокатаном колесе с толщиной обода 22 мм при экстренном торможении

Проведенные исследования показали, что при реализации экстренного режима торможения наибольшее влияние на значения максимальных температур и время торможения оказывают следующие параметры: начальная скорость торможения, вес брутто вагона, вид торможения (экстренное, полное служебное, ступенчатое), тип тормозной колодки, уклон пути, износ колеса (рисунок 6). Такие параметры, как – температура окружающей среды и основное удельное сопротивление движению с учетом низких температур и сильного бокового ветра – не оказывают существенного влияния на процесс движения и торможения и могут не учитываться при компьютерном моделировании тепловых процессов и оценке текущего состояния колеса при торможении.

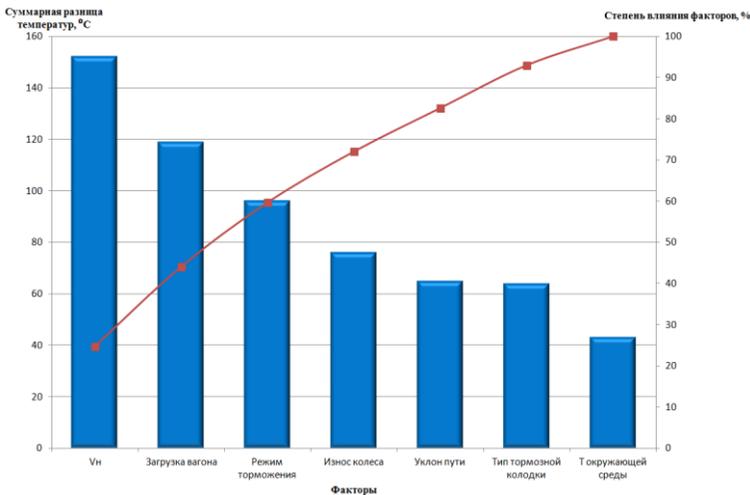


Рисунок 6 - Диаграмма Паретто распределения степени влияния факторов на интенсивность нагрева ЦКК в момент окончания экстренного торможения

В четвертом разделе приводятся результаты компьютерного моделирования тепловых и термомеханических процессов, а также структурных превращений в цельнокатаном колесе при реализации различных режимов торможения.

Рассмотрен вариант движения экипажа по участку, на котором реализуется трехкратное торможение, первое из которых

является экстренным, с экстремальными значениями факторов, влияющих на нагрев ЦКК при торможении: скорость движения, масса брутто вагона, режим торможения, износ колеса, уклон пути и тип тормозной колодки. Интенсивное тепловое воздействие в этом случае приводит к высоким максимальным значениям и градиенту температур в приповерхностных слоях. Причем, в точках на поверхности катания в зоне воздействия тормозной колодки максимальные температуры значительно превышают значения 727°C , что свидетельствует о наличии условий для протекания фазовых и структурных превращений, перехода феррито-цементитных смесей в аустенит.

По окончании этапа торможения в результате интенсивного теплоотвода в центральную часть обода колеса на поверхности катания в зоне контакта колеса с тормозной колодкой отмечаются скорости охлаждения равные или близкие к критическим, что способствует образованию закалочных структур на поверхности катания колеса, процентное содержание которого зависит от степени аустенизации в период нагрева и интенсивности охлаждения в результате теплоотвода по окончании торможения.

При реализации последующих торможений, как показали результаты компьютерного моделирования, нагрев поверхностных слоев колеса способствует распаду закалочных структур на феррито-цементитные смеси различной степени дисперсности (рисунок 7). Таким образом, в процессе движения поезда в результате реализации этапов торможения наблюдается кратковременное образование закалочных структур с последующим возвратом к исходному феррито-цементитному структурному составу.

Формирование закалочных структур на одном из этапов торможения в сочетании с механическими воздействиями при движении способствует образованию микротрещин на поверхности катания колеса, которые, в свою очередь, могут приводить к выкрашиванию металла - образованию выщербин.

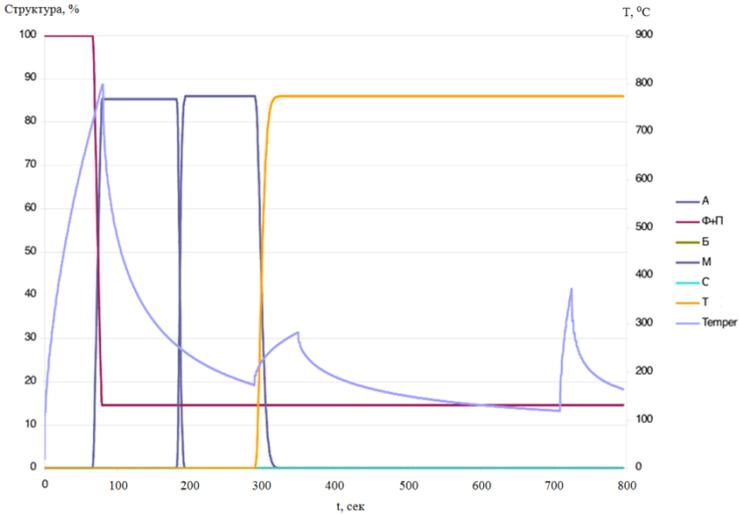


Рисунок 7 – Диаграмма изменения структурного состава в точке на поверхности катания колеса в процессе движения грузового вагона по рассматриваемому участку

Компьютерное моделирование тепловых и термомеханических процессов в ЦКК при реализации длительного торможения на затяжном спуске в течение 1200 секунд позволило провести оценку деформационных процессов элементов конструкции колеса и распределения временных напряжений в ЦКК в момент окончания торможения. К моменту окончания торможения высокие значения температур (более 120°C) отмечаются в ободе и большей части диска колеса (рисунок 8). Деформационные процессы в ЦКК в момент окончания длительного торможения приводят к смещению обода колеса к центру оси колесной пары и увеличению диаметра колеса (рисунок 9). Перемещения обода колеса в осевом направлении приводят к тому, что расстояние между внутренними поверхностями гребней колес колесной пары уменьшается на 5,22 мм.

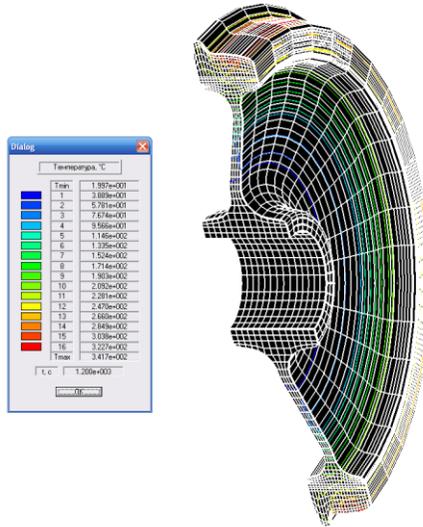


Рисунок 8 - Распределение температур в объемной конечно-элементной модели ЦКК с прямолинейным диском в момент окончания длительного торможения

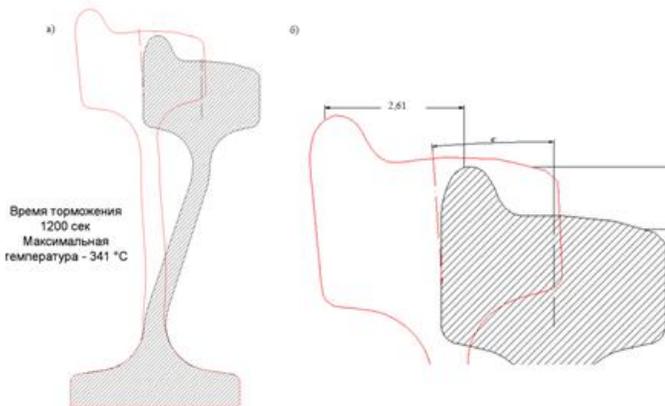


Рисунок 9 - Деформации ЦКК в результате тепловых нагрузений при длительном режиме торможения, увеличенные в 30 раз

Напряженно-деформированное состояние ЦКК в момент окончания длительного торможения носит неоднородный характер. Максимальные растягивающие радиальные напряжения (рисунок 10) формируются в зонах верхнего внутреннего радиу-

са сопряжения диска с ободом и нижнего наружного радиуса сопряжения диска со ступицей. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными о разрушениях цельнокатаных колес с прямолинейным диском в эксплуатации. Как правило, трещина зарождается на внутренней стороне зоны перехода от обода к диску с последующим развитием в окружном направлении и отколом обода колеса.

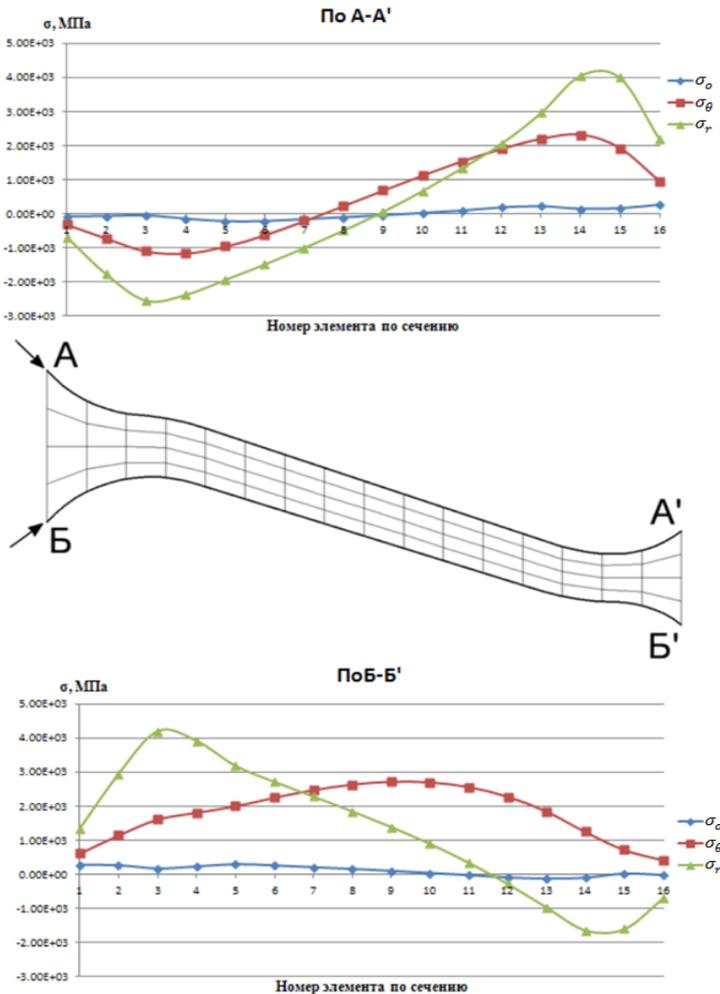


Рисунок 10 – Распределение напряжений в прямолинейном диске колеса в момент окончания длительного торможения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Обоснована актуальность разработки методики оценки текущего теплового и напряженно-деформированного состояния, а также структурного состава цельнокатаного колеса при реализации различных режимов торможения.

2) Разработаны рациональные конечно-элементные модели цельнокатаного колеса с прямолинейным и криволинейным дисками, а также с различной толщиной обода, которые позволяют проводить компьютерное моделирование тепловых и термомодеформационных процессов, а также структурных превращений в ЦКК при торможении в эксплуатации.

3) Разработана методика дифференцированной оценки интенсивности тепловыделений в паре «колесо – колодка» по интервалам скоростей торможения поезда. При реализации данного подхода получены уточненные значения распределения температур по сечению обода колеса на различных этапах торможения с учетом текущей скорости движения.

4) Выполнен анализ влияния различных факторов на процесс движения и торможения вагона. Установлено, что наибольшее влияние на максимальные значения и распределение температур оказывают следующие факторы: начальная скорость торможения, загруженность вагона, режим торможения (экстренное, полное служебное, ступенчатое), износ колеса в эксплуатации (толщина обода), тип тормозной колодки и профиль пути (величина уклона).

5). Установлено, что реализация торможения, приводят протеканию к сложным нестационарным процессам теплопереноса по объему колеса, структурным и фазовым превращениям, изменению напряженно-деформированного состояния, сформированного на этапе термической обработки в результате закалки и последующего отпуска.

6) Деформационные процессы в ЦКК в момент окончания длительного торможения приводят к смещению обода колеса к центру колесной пары и увеличению диаметра колеса. Перемещения в осевом направлении обода колеса приводят к тому, что

расстояние между внутренними поверхностями гребней колесной пары уменьшается на 5,22 мм.

7) В результате компьютерного моделирования установлена возможность образования закалочных структур по окончании торможения, что в сочетании с механическими воздействиями в процессе движения может приводить к образованию микротрещин на поверхности катания колеса.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах

1 В изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации:

1 Ефимов, Р. А. Моделирование кинетики состояния колеса [Текст] / А. В. Саврухин, А. Н. Неклюдов, Р. А. Ефимов // Мир транспорта. – 2012. – № 5. – С. 42-47.

2 Ефимов, Р. А. Моделирование тепловых нагружений цельнокатаных колёс [Текст] / А. В. Саврухин, А. Н. Неклюдов, Р. А. Ефимов // Мир транспорта. – 2014. – № 5. – С. 22-37.

3 Ефимов, Р. А. Тепловые и деформационные процессы в ЦКК при длительном торможении [Текст] / А. В. Саврухин, А. Н. Неклюдов, Р. А. Ефимов // Мир транспорта. – 2015. – № 2. – С. 44-50.

2 В других научно-технических изданиях:

4 Ефимов, Р. А. Оценка влияния тепловых процессов при торможении на безопасность эксплуатации цельнокатаных колес [Текст] / А. В. Саврухин, А. В. Терехов, Р. А. Ефимов, А. А. Петрушина // Труды Одиннадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов”. – М. : Изд-во МГУПС (МИИТ). – 2010. – С. I-18 – I-19.

5 Ефимов, Р. А. Оценка ресурса цельнокатаного колеса на основе анализа текущего состояния [Текст] / Р. А. Ефимов // Труды научно-практической конференции “Неделя науки-2011” «Наука МИИТа – Транспорту» Часть 2. – М. : Изд-во МГУПС (МИИТ). – 2011. – С. IV-53 – IV-54.

6 Ефимов, Р. А. Расчетная оценка рисков колесных пар вагонов / А. А. Петрушина, Р. А. Ефимов [Текст] / Труды научно-практической конференции “Неделя науки-2011” «Наука МИИТа – Транспорту» Часть 2. – М. : Изд-во МГУПС (МИИТ). – 2011. – С. IV-55 – IV-56.

7 Ефимов, Р. А. Оценка влияния теплового нагружения цельнокатаных колес при торможении на безопасность движения [Текст] / Р. А. Ефимов // Труды научно-практической конференции “Неделя науки-2012” «Наука МИИТа – Транспорту». – М. : Изд-во МГУПС (МИИТ). – 2012. – С. IV-3 – IV-4.

8 Ефимов, Р. А. Анализ кинетики тепловых процессов и структурных превращений в цельнокатаных колёсах в процессе эксплуатации [Текст] / Р. А. Ефимов, Д. О. Миронов, М. В. Когут // Труды Тринадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов”. – М. : Изд-во МГУПС (МИИТ). – 2012. – С. VII-2 – VII-3.

9 Ефимов, Р. А. Моделирование контактного взаимодействия в системе «колесо-рельс» [Текст] / Р. А. Ефимов // Труды научно-практической конференции “Неделя науки-2013” «Наука МИИТа - Транспорту». – М. : Изд-во МГУПС (МИИТ). – 2013. – IV-77.

10 Ефимов, Р. А. Сравнительный анализ деформаций цельнокатаных колёс с различной формой диска в результате длительного торможения [Текст] / Р. А. Ефимов / Труды X Международной научно-практической конференции “Trans-Mech-Art-Chem”. – М. : Изд-во МГУПС (МИИТ). – 2014. – С. I-116 – I-118.

Ефимов Роман Александрович

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЙ ЦЕЛЬНОКАТАНОГО КОЛЕСА ВАГОНА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать – Заказ № Формат 60x90/16
20.04.17

Усл. печ. л., – 1,5 Тираж 80 экз.

127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, УПЦ ГИ МИИТ.