

ГОСУДАРСТВЕННАЯ АДМИНИСТРАЦИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ УКРАИНЫ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Гребенкин Николай Кириллович

УДК 629.4.027.4.001.57:539.37

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВАГОННЫХ КОЛЕС
ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ДИСКА
ПУТЕМ ЕГО СПРЯМЛЕНИЯ

05.22.07. – Подвижной состав железных дорог
и тяга поездов

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск – 1994

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Харьковской государственной академии
железнодорожного транспорта

Научные руководители – доктор технических наук,
профессор

Шевченко Павел Васильевич

– кандидат технических наук,
доцент
Горбенко Анатолий Петрович

Научный консультант – доктор технических наук
Молдавский Анатолий Авраамович

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор
Данович Виктор Данилович

– кандидат технических наук
Маркова Ольга Михайловна

Ведущее предприятие – Стахановский вагоностроительный
завод.

Защита состоится " 27 " июня 1994 г. в " 14 " часов
на заседании специализированного совета К 114.07.01 при Днепро-
петровском государственном техническом университете железнодо-
рого транспорта по адресу: 320629, ГСП, г. Днепропетровск – 10,

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Железнодорожный транспорт призван удовлетворять потребности предприятий и населения страны в перевозках грузов и пассажиров при обеспечении должных условий их перевозок и безопасности движения. Интенсификация эксплуатации подвижного состава железных дорог за счет увеличения грузоподъемности вагонов и повышения скоростей движения, принятые в последнее десятилетие, привели к резкому увеличению повреждений вагонов. В частности, значительно увеличилось число усталостных разрушений вагонных колес. Для выяснения причин этого явления необходимы исследования эволюции конструкции вагонных колес, в том числе качественный и количественный анализ конструктивных параметров и геометрических характеристик колес.

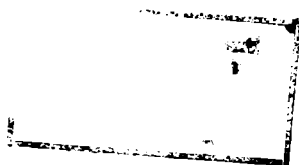
Требуются также углубленные исследования напряженно-деформированного состояния вагонных колес от эксплуатационных нагрузок с выявлением в них концентраторов напряжений. В этой связи научно-исследовательские работы, направленные на совершенствование конструкции вагонного колеса путем исследований эволюции колес и анализа их конструктивных параметров, а также углубленных исследований напряженно-деформированного состояния стандартных и улучшенных колес, являются актуальными как с научной, так и с практической точек зрения.

Особую актуальность имеют в настоящее время исследования, направленные на создание методов расчета и экспериментов с автоматизированной обработкой геометрических объектов и экспериментальных данных при большом их количестве и громоздкой обработке.

Цель работы. Создать методику оценки качества конструкции вагонного колеса по его конструктивным признакам как детали, подверженной воздействию циклически меняющихся нагрузок. Построить математические модели геометрического профиля отечественных стандартных колес и выполнить расчеты их геометрических характеристик (толщины, площади, металлоемкости, массы). Провести качественный и количественный анализ распределения металла по радиусу колес. Выявить зоны концентрации напряжений в стандартных колесах и причины появления этих зон. Предложить конструкцию колеса улучшенной геометрии за счет ликвидации концентраторов напряжений.

Разработать методику, технологию, необходимую оснастку для изготовления моделей колес и проведения на них экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния колес от эксплуатационных нагрузок методом фотоупругости. Выполнить анализ напряженно-деформированного состояния колес по распре-

5810а



НТБ
ДНУЖТ

делению напряжений как на поверхности колес, так и во внутренних точках сечений по трехосной схеме с привлечением пяти составляющих напряженного состояния. Выполнить расчеты напряженно-деформированного состояния стандартных и улучшенных колес на эксплуатационные нагрузки МКЗ с анализом результатов по всем шести компонентам напряженного состояния.

Общая методика исследования. В работе использован комплексный подход. Проведено изучение отечественной и зарубежной научно-технической, патентной и рекламной литературы по конструкции вагонных колес а также теоретическим и экспериментальным исследованиям их напряженно-деформированного состояния. Средствами и методами геометрического моделирования созданы геометрические схемы, алгоритмы и пакет прикладных программ интерактивного и автоинтерактивного построения аналитических (точных) математических моделей геометрического очертания профиля колес "GAMMA" и ПП1 автоматического расчета геометрических характеристик колес "PARKOL".

Научная новизна. Разработан метод поискового конструирования, ориентированный на автоматизированную обработку геометрических очертаний профилей вагонных колес, включающий геометрические схемы, алгоритмы и пакеты прикладных программ построения математических моделей профиля колес и их анализа. Выявлены невидимые по чертежам всех стандартных колес пороки их конструкции в виде локальных уменьшений и увеличений толщины дисков в приступичной и приободной зонах. Предложена спрямленная конструкция колеса, свободная от концентраторов напряжений, присущих всем стандартным колесам.

Практическая ценность работы. Создан метод поискового конструирования колес, включающий пакеты прикладных программ автоматизированного построения математических моделей профиля колес "GAMMA" и программы автоматического расчета геометрических характеристик профиля колес "PARKOL". Предложена улучшенная за счет спрямления диска конструкция колеса, свободная от присущих всем отечественным колесам концентраторов напряжений в виде перегибов профиля и сопутствующих им локальных уменьшений и увеличений толщины диска в приступичной и приободной зонах. По исследованию напряженно-деформированного состояния стандартных и улучшенных колес экспериментально (методом фотоупругости) и теоретически (МКЗ) выявлены закономерности распределения напряжений по профилю колес от действия эксплуатационных нагрузок с учетом всех шести компонентов напряженного состояния как на поверхности профиля так и во внутренних точках колес.

НТБ
ДНУЖТ

Реализация работы. На основе анализа размеров и геометрических характеристик стандартных колес, разработанным автором, методом поискового конструирования и углубленных исследований напряженного состояния их методом фотоупругости и МКЭ, выявлены существенные пороки конструкций во всех стандартных колесах. Даны рекомендации по совершенствованию конструкции колес путем спрямления профиля диска в приступичной и приободной зонах. Предложена улучшенная конструкция колеса, исследованы ее построение и закономерности. Результаты теоретических и экспериментальных исследований стандартных и улучшенных колес, выполненные в диссертации, учтены при разработке ГОСТ 9036-76. По рекомендациям автора Уралвагонзаводом разработаны чертежи улучшенного за счет спрямления диска колеса, решение о внедрении опытной партии которого принято ЦВ МПС.

Апробация. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на:

- научно-технических конференциях кафедр ХИМТа с участием инженерно-технических работников Юной железной дороги и предприятий города Харькова (1974 - 1993 г.г.);
- научно-техническом совете ОГК Вагоностроения Уральского вагоностроительного завода (1974 г.);
- заседаниях кафедры "Вагоны" ХИМТа (1974, 1976, 1978, 1982, 1985, 1986-1993 г.г.);
- заседании кафедры "Вагоны и вагонное хозяйство" УЭМИИТа (1984 г.);
- заседании кафедры "Вагоны и вагонное хозяйство" МИИТа (1984 г.);
- заседании кафедры "Вагоны и вагонное хозяйство" ДПТУЖТа (1994 г.);
- Межвузовской научно-технической конференции "Повышение надежности и совершенствование технического обслуживания вагонов", г.Свердловск (1984 г.);
- научно-технической конференции "Метрополитан и планировка крупнейшего города", Харьков, 1986 г.;
- на юбилейной научно-технической конференции РИИИТа (1989 г.);
- на 8-ой международной конференции "Проблемы механики жел.-дор. транспорта", Днепропетровск, 1992 г.;
- на Днепропетровском городском семинаре по механике (1994 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 статей в труды БелИИЖТа, УЭМИИТа, ХИМТа, одна статья депонирована в ИНИИТЭИ МПС, издано 2 методические разработки в ХИИТе, изданы тезисы 6 докладов на научно-технических конференциях.

НТБ
ДНУЖТ

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников, содержащего 134 наименований, из которых 123 на русском языке.

Объем диссертации составляет 175 страниц машинописного текста, включая 21 рисунок, 5 таблиц, 7 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности диссертационной работы в свете развития железнодорожного транспорта страны. Показана необходимость разработки методов оценки качества конструкций вагонных колес по их конструктивным признакам на стадии проектирования и углубленного исследования их напряженно-деформированного состояния теоретическими и экспериментальными методами на действие эксплуатационных силовых нагрузок.

В первой главе представлен исторический очерк эволюции конструкций вагонных колес, совершенствования их отдельных элементов, состояния и путей развития отечественных и зарубежных конструкций колес. Дана классификация колес и их основных параметров. Выполнен обзор отечественных и зарубежных работ по расчету и экспериментальным исследованиям напряженно-деформированного состояния колес от технологических и эксплуатационных нагрузок.

Вагонное колесо — сложный и чрезвычайно ответственный элемент вагона, работающий в тяжелых условиях на ряд противоречивых воздействий. Усилиями многих выдающихся отечественных и зарубежных ученых — А. А. Попова, В. А. Кислика, Т. В. Ларина, Н. Н. Кудрявцева, П. В. Шевченко, Г. Я. Андреева, Л. М. Школьника, Г. И. Узлова, О. М. Савчука, И. Лаутенбаха, О. Рейха, большими работами ведущих научно-исследовательских лабораторий ВНИИЖТа, МИИТа, ПИИТа, ДГТУЖТа, РИИЖТа, ХГАЖДТа, ИЧМ АН Украины, коллективами заводов-изготовителей вагонных колес — Днепропетровского металлургического завода им. К. Либкнехта, Нижне-Тагильского металлургического комбината, Уральского вагоностроительного завода проведена большая работа, приведшая к существенному повышению эксплуатационной надежности вагонных колес. Однако, эти исследования касаются, в основном, выбора металла, улучшения технологии изготовления и обработки колес, определения сил взаимодействия колес с рельсами и элементами вагона, а также между элементами самого колеса.

В меньшей степени изучены вопросы, касающиеся оценки качества конструкции различных колес по их конструктивным параметрам. Несмотря на ряд успешно выполненных в последние десяти-

НТБ
ДНУЖТ

летия теоретических работ Г. Я. Андреева, С. В. Дуваляна, П. В. Шевченко, А. Г. Андреева, В. П. Есаулова, В. В. Калинин, О. М. Савчука, Н. Н. Шапошникова, В. И. Сакалю, Э. Н. Никольской, Н. А. Пастернака, Г. А. Неклюдовой, И. Лаутенбаха, С. Йонсона, О. Рейха, В. Пригге, У. Виллы, Ф. Поля, Ф. Тейле, Б. Томаше, Г. Крауза, А. Т. Хоппера основное внимание при создании новых конструкций колес уделяется экспериментальной оценке напряженно-деформированного состояния колес и для вальной проверки колес в эксплуатационных условиях. При этом теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния колес ведутся по двухосной схеме с определением радиальных и окружных нормальных и касательных напряжений на поверхности дисков колес. В литературе отсутствует оценка остальных трех компонентов напряженного состояния на поверхности дисков и всех шести во внутренних зонах дисков колес.

Объектами отечественных исследований НДС колес практически являются две конструкции - с плоскоконическим диском (традиционная) и с криволинейным волнистым диском (европейская). В расчетах и экспериментах варьируются толщина обода, толщина диска, смещение ступицы относительно обода.

Зарубежными исследованиями НДС колес оцениваются обычно традиционные для этих стран конструкции колес. При этом решаются задачи анализа сравнительными исследованиями нескольких вариантов конструкций колес. В них отсутствуют основополагающие теории построения конструкций колес по конструктивным параметрам и решения задач синтеза конструкций вагонных колес по их расчетам на прочность.

Опыт эксплуатации вагонных колес нашей страны в последнее десятилетие показывает, что основные проблемы эксплуатационной надежности колес связаны с повышенным появлением таких опасных неисправностей колес, как усталостные разрушения дисков в приободной зоне, усталостные разрушения ободьев колес.

На основании приведенного обзора сделан вывод о необходимости создания методики оценки качества конструкции цельнокатаных вагонных колес по их конструктивным параметрам и методик углубленного исследования НДС колес экспериментальным методом фотоупругости на объемных моделях с привлечением трехосного анализа как на поверхности, так и во внутренних точках колес.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

- разработан метод поискового конструирования вагонных колес, включающий геометрические схемы, алгоритмы и ППП автоматизированного построения аналитических математических моделей профиля колеса;

- разработаны алгоритмы и ППП автоматического расчета геометрических характеристик стандартных отечественных колес;

НТБ
ДНУЖТ

- выполнен анализ конструкций отечественных стандартных колес, выявивший основные закономерности построения конструкций колес, в том числе пороки конструкций;

- предложена и подвергнута исследованию улучшенная за счет спрямления диска конструкция колеса, имеющая повышенную стойкость к усталостным разрушениям колес;

- для углубленного экспериментального исследования НДС колес от действия внешних нагрузок разработаны методика, технология, оснастка для выполнения экспериментов с объемными моделями колес;

- разработан алгоритм и вычислительная программа автоматизированной обработки результатов эксперимента с моделями колес методом фотоупругости;

методом фотоупругости выполнены и подвергнуты анализу сравнительные эксперименты НДС стандартных колес с различной приободной зоной и колес улучшенной конструкции;

- из решения задачи о разложении сосредоточенно приложенных к колесу нагрузок показано, что в плоскости приложения нагрузок ряды расходятся;

- МКЭ выполнены и подвергнуты анализу расчеты НДС колес улучшенной конструкции.

Во второй главе изложена методика построения математических моделей профиля отечественных стандартных колес и расчет их геометрических характеристик. В ней построены и подвергнуты анализу аналитические (точные) модели стандартных отечественных вагонных колес.

Конструкция колеса задается его чертежом в графической (геометрической) форме. Отсекающие поверхности геометрического сечения профиля стандартных колес выполнены прямыми линиями и дугами окружностей. Примитивами математических моделей колес являются прямые линии, дуги окружностей, граничные контурные и вспомогательные точки. В математической модели профиля прямые линии и дуги окружностей выражаются в алгебраической форме. Геометрическим изображением профиля колеса (по чертежу) часть граничных и вспомогательных точек задается двумя координатами. Другая их часть задается одной координатой, вторую надо определить расчетом. Обе координаты некоторых точек неизвестны без проведения алгебраических расчетов.

Система координат модели выбрана такой: ось абсцисс направлена по радиусу колеса с началом на оси вращения колеса; ось ординат совпадает с осью вращения. Начало оси ординат отстоит от внутренней грани обода на 102 мм. во внутреннюю сторону колеса.

НТБ
ДНУЖТ

Построение математических моделей профиля колес ведется на ЭВМ в диалоговом режиме интерактивным или автоинтерактивным способом. Программы интерактивной обработки моделей включают расчеты коэффициентов k и b уравнения прямой с угловым коэффициентом

$$y = kx + b, \quad (1)$$

а также расчет координат точек (x, y) , лежащих на этой прямой. Параметры k и b определяются также из условия параллельности, перпендикулярности, пересечения двух прямых, прохождения прямой под заданным углом через заданную точку либо соединяющей две точки, заданные своими координатами.

Более сложные схемы и алгоритмы привлекаются для моделирования узлов, включающих дуги окружностей. Круговые переходы имеются на всех гранях ступицы и обода колеса, в приступичной и приободной зонах дисков и на некоторых участках поверхности катания колес. Такие модели по своей структуре требуют привлечения автоинтерактивной обработки, при которой решается обычно комплекс задач по сопрягаемым элементам модели.

Так при моделировании выкружек вводятся следующие исходные данные: номер квадранта q окружности, в котором находится выкружка, радиус R сопрягающей дуги, ордината y_1 граничной точки на боковой грани обода или ступицы и коэффициенты k_2 и b_2 прямой проходящей отсекающей поверхности конической образующей обода или ступицы (рис. 1).

Расчетами определяются ордината y_3 и абсцисса x_3 центра сопрягающей дуг

$$y_3 = y_1 + R \text{ или } y_3 = y_1 - R; \quad (2)$$

$$x_3 = (y_3 - b_4)/k_4; \quad (3)$$

абсцисса граничной точки y_1 на боковой грани обода или ступицы

$$x_1 = x_3; \quad (4)$$

абсцисса x_2 и ордината y_2 граничной точки на конической поверхности обода или ступицы

$$x_2 = (b_5 - b_2)/(k_2 - k_5); \quad (5)$$

$$y_2 = k_2 x_2 + b_2. \quad (6)$$

Интересное решение в автоинтерактивном режиме имеет задача определения коэффициентов k и b прямых, проходящих по коническим образующим диска. Геометрическая схема их модели для стандартных колес представляется задачей на внутреннее сопряжение прямой линией двух окружностей (в этом геометрическая особенность конструкции диска стандартных колес). В этой схеме известны координаты центра одной (A_0) и другой (A_1) окружностей - x_0, y_0 и соответственно x_1, y_1 а также их радиусы R_0 и R_1 (рис. 2).

Для определения неизвестных - k и b воспользуемся тем, что прямая с искомыми коэффициентами состоит от точки A_0 на расстоянии R_0 , а от точки A_1 на расстоянии R_1 мн. Из этого ус-

НТБ
ДНУЖТ

ловия получим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{k \cdot x_0 - y_0 + b}{-\sqrt{k^2 + 1}} &= -R_0 \\ \frac{k \cdot x_1 - y_1 + b}{-\sqrt{k^2 + 1}} &= -R_1 \end{aligned} \right\} , \quad (7)$$

из решения которой определяются значения k , b . Затем вычисляются координаты обеих граничных точек диска. Расчеты ведутся по подпрограмме "DISK" ППП "ГАММА".

Эта же подпрограмма применяется для обработки модели спрямленного диска колеса улучшенной конструкции. Геометрическая особенность этого колеса состоит в том, что при построении образующих конических поверхностей диска они сопрягаются непосредственно с выкружками ступиц и ободьев с каждой стороны колеса. При этом производится наружное сопряжение окружностей расположенных на одной стороне колеса по касательной. В стандартных же колесах два сопряжения выполняются правильно (по касательной), а два — неправильно: образующие диска пересекают окружности выкружек, с которыми осуществляется их сопряжение с этими окружностями.

Для автоинтерактивной обработки разработаны также решения по построению моделей конических образующих ступиц и внутренних поверхностей ободьев. В этой задаче вводятся наибольший и наименьший диаметры конусной части ступицы или обода (для колеса по ГОСТ 9036-88 — угол наклона конической образующей). По результатам расчета получаются коэффициенты прямых, проходящих через конические поверхности обода или ступицы. Вычисления производятся подпрограммами "KONUSK" и "KONUSU", входящих в ППП "ГАММА".

Параметры математических моделей использованы нами для решения ряда позиционных и метрических задач. Координаты граничных точек моделей позволили определить размеры элементов и зон колес и их расположение (топологию). Кроме того, для оценки распределения металла в колесе выполнены расчеты геометрических характеристик конструкции колес. Последние отражают изменение по радиусу колеса толщины, площади сечения, материальности (объема) и массы, а также градиенты этих величин в расчетных сечениях.

Для выполнения расчетов геометрических характеристик нами создан ППП "PARKOL". Он включает вычислительные программы расчета геометрических характеристик для всего колеса по каждому стандарту с модификациями, соответствующими номинальным, средним, максимальным и минимальным размерам колеса с учетом поля допуска — KOL59N, KOL64SR, KOL76MA и другие, а также

НТБ
ДНУЖТ

программы расчета геометрических характеристик отдельных зон всех конструкций колес с модификациями - STUP88N, STUP893R, DISK05M*, POKAT88N и другие.

Расчеты по всем программам ППП "PARKOL" выполняются в автоматическом режиме с выдачей результатов в табличной форме. Основная часть расчетов - вычисление и печать геометрических характеристик на каждом шаге циклических расчетов (нами применялся, в основном, шаг 1мм.) выполняется подпрограммой "CHAR".

В работе выполнен сравнительный анализ эволюции конструкции отечественных стандартных цельнокатаных вагонных колес за время их выпуска в нашей стране - с 1934 года. Исследование геометрического очертания профиля, конструкции, размеров, топологии и геометрических характеристик колес по ОСТ/НКТП 8709/1709, ГОСТ 9036-59, ГОСТ 10830-64, ГОСТ 9036-76, ГОСТ 9036-88 выполнено графически, численными методами и средствами САПР по разработанным автором ППП: "ГАММА" и "PARKOL". Оно показало, что все колеса имеют родственную конструкцию с массивными ступицей и ободом и с пологим коническим диском линейно-переменной толщины с уменьшением толщины диска при увеличении радиуса колеса. Перекольные зоны диска в приступичной и приободной части образованы круговыми переходами и содержат перегибы сечений.

В процессе эволюции изменениям подверглись все элементы колеса. Незначительно облегчена ступица и уменьшена толщина диска в приступичной зоне. Более существенно изменилась приободная зона и, в особенности, очертание внутренних поверхностей обода колеса, приведшее к уменьшению площади сечения приободной зоны на 20 проц. Произошло изменение топологии зон колеса: приступичная зона удлинилась на 2 мм. за счет ступицы, приободная зона удлинилась на 2 мм. за счет обода, диск удлинился на 8 мм., а с учетом переходных зон - на 12 мм. Произошло смещение зон колеса.

Анализ геометрического очертания колес показывает, что все отечественные стандартные колеса имеют явные концентраторы напряжений в приступичной и приободной зонах в виде перегибов сечений, осуществляемыми при штамповке (выгибке) диска.

Анализ изменения толщины диска по радиусу колеса показывает, что в тех же зонах все стандартные колеса имеют еще и невидимые по чертежам колес скрытые концентраторы напряжений в виде местных уменьшений и увеличений толщины диска (рис.3). Оба концентратора напряжений (перегибы сечения диска и локальные экстремумы их толщины), как известно, ведут к повышенной чувствительности дисков к усталостным разрушениям, и их наличие свидетельствует о несовершенстве конструкции колес, а точнее, о наличии порока конструкции.

Более благоприятное распределение толщины диска t по ра-

НТБ
ДНУЖТ

Рис.3. Распределение толщины диска стандартных колес

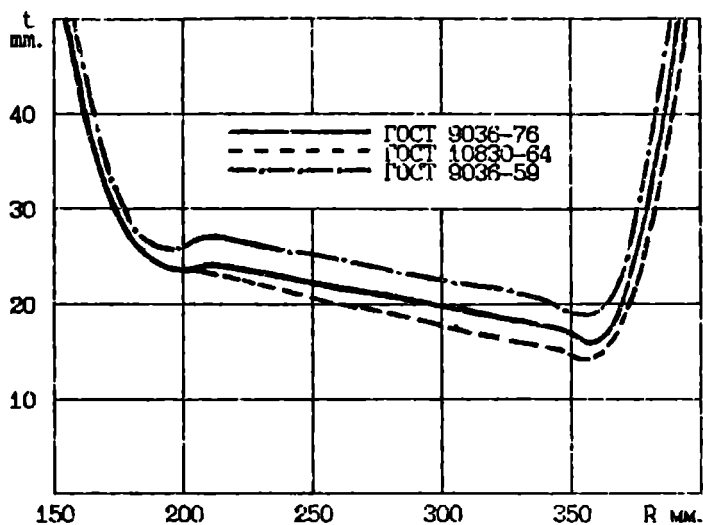
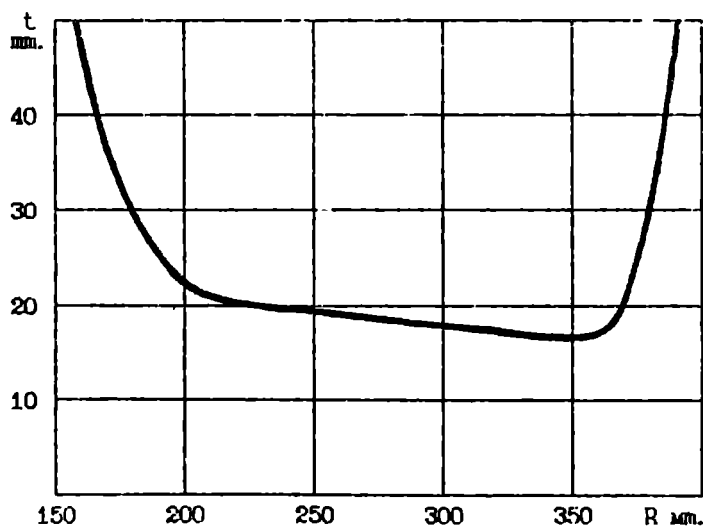


Рис.4. Распределение толщины диска улучшенного колеса



НТБ
ДНУЖТ

диусу колеса R имеет предложенное нами колесо улучшенной конструкции со спрямленным диском (рис. 4). Очевидно, что колесо с таким распределением толщины имеет меньшую по сравнению со стандартным колесом чувствительность к усталостным разрушениям, а, следовательно, повышенную надежность в эксплуатации и больший срок службы, чем стандартное.

В третьей главе изложена методика экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния вагонных колес методом фотоупругости на объемных моделях, разработанная с участием автора, и результаты сравнительного испытания колес на действие эксплуатационных нагрузок. Исследование объемных моделей колес в 1:5 натуральной величины методом "замораживания" деформаций, выполненное в лаборатории фотоупругости кафедры "Вагоны" Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта, включает разработку технологии и необходимой оснастки для отливки и изготовления моделей колесных пар, нагрузочных приспособлений, температурных режимов нагружения моделей, проведения экспериментов по "замораживанию" деформаций в моделях и их отжига, разрезки моделей на срезы и субсрезы, подбор геометрических и оптических параметров моделей колес.

Изготовление моделей колесных пар производилось из оптически активного композита ЭД-БМ с соблюдением полного геометрического подобия. Модели колес отливались, а затем и обтачивались на токарном станке заводно с частью оси (шейкой, неподступичной, подступичной частью и небольшими отрезками средней части оси). Две таких детали и оставшийся отрезок средней части оси затем склеивались в мономодель колесной пары.

Нагружение моделей производилось на специальном грузовом нагрузочном приспособлении. Нагрузка на колеса передавалась через опоры, изготовленные из того же композита ЭД-БМ, что и колеса. Профиль опор имитировал геометрическое очертание головки рельса Р-65. Загружение моделей колес осуществлялось по схемам, соответствующим условиям нагружения колес в эксплуатации. К колесам прикладывались вертикальные и боковые нагрузки (с наружной или внутренней стороны) величиной 10, 12 или 15 Н. При этом нагрузочное приспособление вместе с моделью помещалось в термостат, где по графику подогревалось до температуры 135-140 градусов Цельсия, выдерживалось при этой температуре 8-10 часов. Затем температура в термостате медленно снижалась по графику до комнатной, после чего модель колесной пары вынималась из печи.

Для проведения геометрических и оптических параметров из колес вырезались срезы и субсрезы. Вырезка срезов производилась радиальными сечениями в плоскости нагружения колеса, субсрезов - параллельными оси колеса сечениями. Срезы и суб-

НТБ
ДНУЖТ

лись на на алмазно-отрезном станке, а субсрезы-ручную. Замер геометрических размеров срезов осуществлялся с помощью оптического микроскопа и микрометров, а замер оптических параметров с помощью КСП-6 и СКК Красноба.

В этой главе изложен разработанный автором алгоритм автоматизированной обработки результатов экспериментов с моделями колес методом фотоупругости. Эта разработка выполнена в связи с тем, что получение количественных значений напряжений по экспериментальным данным методом "замораживания" деформаций на объемных моделях связаны с большим объемом вычислений по обработке результатов эксперимента. При обработке экспериментальных данных по исследованию напряженного состояния моделей колес возникают специфические трудности. К ним относятся расчет напряжений в граничных точках, где контурные линии дисков колес имеют различный наклон к оси интегрирования, и необходимость задавать ЭВМ знак напряжения (плюс или минус). Это связано тем, что по рабочей формуле расчета нормальных напряжений в граничных точках они всегда получаются положительными.

Алгоритм автоматизированной обработки результатов эксперимента с вычислением напряжений в модели и в натурном колесе реализован в составленной по нему автором вычислительной программе "GRIN". Программа автоматизирует выполнение всех расчетов по каждому сечению колеса, содержащему до 30 точек. Обработка данных производится в диалоговом режиме, причем информация, общая для нескольких сечений (условно постоянная), вводится в память ЭВМ один раз.

Программа составлена по модульному принципу и включает 13 последовательно выполняемых блоков. Наиболее сложными и интересными блок оптических параметров и касательных напряжений и блок нормальных напряжений. В блоке нормальных напряжений автоматически ведутся вычисления граничных нормальных напряжений с учетом их знака. Расчеты нормальных напряжений в промежуточных и выходных точках выполняются численным интегрированием, затем в выходной точке сечения вычисляется ошибка интегрирования и с ее учетом корректируются напряжения во всех точках, кроме входной.

ЭВМ автоматически выполняет наряду с вычислительными операциями ряд рутинных и логических операций с элементами анализа - чтение паспорта компенсатора (таблицы соответствия деления шкалы паспорта значению оптического параметра), определение экстремальных значений каждой составляющей напряженного состояния, построение эпюр напряжений, печать таблиц исходной информации и результатов расчета в удобной для обозрения форме.

НТБ
ДНУЖТ

В четвертой главе анализируются результаты экспериментальных и теоретических исследований напряженно-деформированного состояния стандартных и улучшенных вагонных колес от действия внешних эксплуатационных нагрузок, полученные методом фотоупругости и теоретически с помощью МКЭ.

Методом фотоупругости на объемных моделях выполнены сравнительные испытания колес, отличающихся геометрией приободной зоны — колеса с более развитой приободной зоной, присущей колесам первых стандартов (ГОСТ 9036-58 и ГОСТ 10830-64) и колеса с уменьшенными уклонами на внутренних поверхностях обода (ГОСТ 9036-76 и ГОСТ 9036-88). Методика проведения испытаний изложена в предыдущей главе. Расчетные сечения принимались на расстоянии 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 325, 350, 375, 400 мм. от оси вращения колеса. В этих сечениях дисков и переходных зон колес на их поверхности и в двух — восьми внутренних точках (в зависимости от толщины диска в этом сечении) определялись оптические параметры и геометрические размеры среза и субсреза модели. По ним далее рассчитывались нормальные радиальные σ_r , окружные σ_θ и осевые σ_z напряжения, а также касательные напряжения в плоскости $\rho\theta$ и в плоскости θz .

Испытания проводились при номинальной и минимально допускаемой в эксплуатации толщине ободьев колес от действия вертикальной и боковой нагрузок с наружной и внутренней стороны. Поскольку они носили сравнительный характер, в каждой модели колесной пары монтировались колеса двух разных конструкций. Таким образом, обе сравниваемые конструкции испытывались в одинаковых условиях, что повышало достоверность экспериментов. Положение колес относительно головки рельса контролировалось специальным шупом.

По результатам исследования выполнен анализ распределения напряжений как на поверхности дисков колес, так и во внутренних точках выбранных программой эксперимента сечений, установлены закономерности напряженного и деформированного состояния дисков колес. Установлено соотношение составляющих напряженного состояния дисков в различных зонах при номинальной и минимально допустимой в эксплуатации толщине обода. Выполнены численные эксперименты по расчету влияния нормальных осевых напряжений σ_z в различных зонах на уровень эквивалентных напряжений, вычисляемых с учетом осевых нормальных напряжений (по трехосной схеме) и без их учета (по двухосной схеме). Установлено, что неучет осевых напряжений при оценке напряженного состояния по эквивалентным напряжениям существенно завышает последние.

В работе показано, что анализ отдельных составляющих напряженного состояния позволяет оценить характер напряженного состояния дисков, что не получается при применении эквивалент-

НТБ
ДНУЖТ

ных, октаэдрических, прибеженных напряжений. Кроме того, непосредственно из эксперимента фотоупругости получены во всех экспериментальных точках направления главных напряжений, позволившие углубить исследование характера напряженного состояния дисков колес.

В связи с применением для расчета НДС колес улучшенной конструкции (наряду со стандартными) МКЭ, применяющего разложение элементов решения (напряжений и перемещений) в тригонометрические ряды, в работе выполнено исследование задачи о разложении в ряды Фурье сосредоточенно приложенных к колесу нагрузок. По результатам расчета на ЭВМ установлено, что сосредоточенные нагрузки хорошо представляются несколькими членами тригонометрического ряда далее $\pm 30^\circ$ от плоскости приложения нагрузки, плохо сходятся в окрестности до $+ 30^\circ$ от этой плоскости. В работе показано, что в плоскости приложения нагрузки P на радиусе колеса R ряд расходится, для этой плоскости получено аналитическое выражение для распределенной нагрузки P_x в зависимости от количества удерживаемых членов ряда n

$$P_x = \frac{P}{2\pi R} (1 + 2^n), \quad (8)$$

Известно, что именно эта плоскость представляет наибольший интерес при исследовании НДС колес на внешние нагрузки.

Работами, выполненными на кафедре "Вагоны и вагонное хозяйство" ДГТУЖДТ под руководством проф. Савчука О.М., показано, что тригонометрические ряды разложения элементов решения сходятся в плоскости приложения нагрузок.

Расчеты напряженного состояния колеса улучшенной конструкции МКЭ производилось по вычислительной программе, составленной в ДГТУЖДТ. По рекомендациям и опыту авторов программы колесо разбивалось на 227 кольцевых треугольных элементов, по тем же рекомендациям принималась и густота разбивки. Следует отметить, что количество расчетных точек в сечении колеса было близким количеству экспериментальных точек в модели колеса по методу фотоупругости. Применялось разложение элементов решения в тригонометрические ряды, при расчетах учитывалось семь составляющих ряда. Расчеты выполнены для колеса с номинальной толщиной обода при приложении к колесу вертикальной и боковой нагрузок. Расчетами определены все шесть компонентов напряженного и деформированного состояния.

Сравнение полученных МКЭ результатов расчета напряженного состояния улучшенного и стандартного колес показало, что несмотря на меньшую массу, улучшенное колесо имеет в основных зонах, в том числе в приободной, значительно (на 20 - 30 проц.) меньшие напряжения, чем стандартное, и, кроме того, более благоприятное распределение напряжений по сечению диска, что свидетельствует об эффективности спрямления диска колеса.

НТБ
ДНУЖТ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для оценки качества конструкций вагонных колес по их конструктивным и геометрическим параметрам (размерам и геометрическим характеристикам) разработан метод поискового конструирования, базирующийся на геометрическом моделировании. Он включает геометрические схемы элементов колес, алгоритмы, пакеты вычислительных программ диалогового построения аналитических (точных) математических моделей профиля колес и программы автоматического расчета геометрических характеристик колес.

2. Качественный и количественный анализ эволюции конструкций стандартных отечественных вагонных колес показал, что изменениям подверглись все зоны колес. Большинство размеров подверглось небольшим изменениям (до 3 процентов). Наибольшим изменениям подверглись: диск (он удлинился на 12 мм.—8 процентов) и геометрия приободной зоны (ее площадь уменьшилась на 20 процентов).

3. Во всех отечественных стандартных колесах выявлены концентраторы напряжений в виде невыявляемых по чертежам всех колес локальных уменьшений и увеличений толщины диска в приступичной и приободной зонах глубиной до 1,5–2 мм. и длиной до 20–25 мм. Характерно, что именно в этих зонах происходят усталостные разрушения колес в эксплуатации.

4. Анализ математических моделей профиля колес выявил также ошибки в системе обмера колес. Нормативная толщина диска в приступичной зоне относится к измерительной плоскости, не фиксируемой дискомерами, кронциркулями. Поэтому выполняемые измерения толщины будут относиться к плоскости, отстоящей от заданной чертежом измерительной плоскости более чем на 13 мм., где толщина диска меньше регламентируемой на 0,75 мм. В процессе эволюции конструкции колес почти на 9 мм. уменьшена толщина обода, что сократило срок службы колеса на 6,5 месяцев и увеличило расходы на поставку транспорту новых колес на 5 процентов.

5. Применение математических моделей профиля колес позволяет выполнить с высокой точностью расчеты металлоемкости, массы, площади боковой поверхности колес, их моментов инерции при любых сочетаниях размеров с учетом допусков, а также задавать точную конфигурацию профиля при выполнении теоретических расчетов напряженно-деформируемого состояния, конструировании мерительного инструмента колес и составлении управляющих программ для станков с ЧПУ при обработке колес.

НТБ
ДНУЖТ

6. Предложена улучшенная за счет спрямления диска конструкция колеса, свободная от местных уменьшений и увеличений толщины дисков, обладающая повышенной по сравнению со стандартными колесами усталостной прочностью.

7. Для углубленных экспериментальных исследований напряженного состояния колес методом фотоупругости как на поверхности колес, так и во внутренних их точках с учетом составляющих трехосного напряженного состояния разработаны оснастка для изготовления моделей колес, нагрузочное приспособление, методика проведения экспериментов, технология резки моделей на срезы и суперсрезы и измерения их геометрических и оптических параметров. При этом обеспечивается передача нагрузки от колеса к рельсу с сохранением геометрического подобия очертания головки рельса и профиля колеса.

8. Разработан алгоритм и вычислительная программа автоматизированной обработки результатов исследований моделей колес методом фотоупругости, автоматизирующий громоздкие вычислительные операции. ЭВМ выполняет помимо этого ряд рутинных операций и анализ результатов расчета.

9. Полученные методом фотоупругости результаты исследования напряженного состояния колес от действия внешних нагрузок свидетельствуют о том, что:

- при вертикальной и боковых нагрузках нормальные радиальные σ_r и нормальные окружные напряжения σ_θ в дисках колес одного порядка (до 50-60 МПа от вертикальной и до 200-220 МПа от боковых нагрузок), на порядок ниже их нормальные осевые напряжения σ_x ; касательные напряжения τ_{zx} соизмеримы с σ_x а $\tau_{\theta x}$ незначительны по величине;

- распределение по толщине дисков всех трех нормальных напряжений σ_r , σ_θ , σ_x как при вертикальной, так и при боковых нагрузках близко к линейному и имеет в большинстве зон изгибный характер;

- при номинальной толщине ободьев напряженно-деформированное состояние дисков стандартных колес неблагоприятное - диск изгибается у обода и ступицы в разных направлениях, то есть по косинусоиде: напряжения у обода и ступицы с каждой стороны колес разные по знаку, а в средней части проходят через нуль;

- при минимальной толщине ободьев диск изгибается по дуге, на каждой стороне диска напряжения не меняются по знаку, что более благоприятно для напряженно-деформированного состояния диска колеса;

- изменение профиля приободной зоны при внедрении колес по ГОСТ 9036-76 и ГОСТ 9036-88 по сравнению с ГОСТ 10830-64 привело к повышению напряжений в приободной зоне и в значительной

НТБ
ДНУЖТ

части диска, прилегающей к приободной зоне. Это увеличение напряжений незначительно для колес с номинальной толщиной обода (не более 2 %), и существенно больше при минимальной толщине обода (до 20 - 30 %):

- расчет эквивалентных напряжений с учетом значений напряжений σ_z и σ_θ , как это делается при испытаниях колес методом электротензометрии, ведет к завышению значений эквивалентных напряжений на 20-30 % по сравнению эквивалентными напряжениями, определенными с учетом всех трех напряжений σ_z , σ_θ , σ_r ; наибольшее завышение имеет место в приступичной зоне;

10. Методом фотоупругости и МКЭ показано, что спрямление проф.ля диска изменяет характер напряженно-деформированного состояния диска улучшенного колеса по сравнению со стандартными колесами:

- в спрямленном диске улучшенного колеса наблюдаются изгибные напряжения на всем протяжении диска, нейтральная ось близка срединной линии диска, напряжения на наружной и внутренней стороне диска близки по величине, но противоположны по знаку, напряжения на каждой стороне не меняют знак, что более благоприятно для работы диска;

- напряжения в присободной зоне колес улучшенной конструкции меньше напряжений в той же зоне стандартного колеса на 12 %, а в приступичной - на 20 % при меньшей на 42 кг. массе колеса за счет уменьшения толщины диска в средней части.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Шевченко П.В., Гребенкин Н.К. К исследованию напряженно-го состояния дисков цельнокатаных вагонных колес. В сб.: Совершенствование конструкции и ремонта вагонов. // Тр. БелИИЖТ. 1977. Вып.154. - с. 17-20.

2. Шевченко П.В., Волькович И.Б., Гребенкин Н.К. Расчет на ЭВМ "Наири-2" напряжений в дисках цельнокатаных вагонных колес от вертикальной нагрузки. // Методические указания к курсовому и дипломному проектированию. /ХИИТ. Кафедра "Вагоны и вагонное хозяйство". - Харьков. 1978. - 12 с.

3. Шевченко П.В., Волькович И.Б., Гребенкин Н.К. Вычислительная программа для определения напряжений в дисках цельнокатаных вагонных колес поляризационно-оптическим методом на ЭВМ "Наири-2". // В сб.: Совершенствование технического обслуживания и ремонта вагонов. / БелИИЖТ. Гомель. 1979. - с. 79-88.

4. Шевченко П.В., Гребенкин Н.К. Расчет на ЭВМ "Наири-2" напряжений в дисках цельнокатаных вагонных колес от горизонтальной нагрузки. // Методические указания к курсовому и дипломному проектированию. / ХИИТ. Кафедра "Вагоны и вагонное хозяйство". Харьков. 1979. 19 с.

5. Шевченко П.В., Гребенкин Н.К. Оценка напряженно-деформ-

НТБ
ДНУЖТ

мируемого состояния дисков вагонных колес в зоне технологических отверстий. - В сб.: Совершенствование организации ремонта вагонов и их технического обслуживания: Межвузовский сборник научных статей. БелИИЖТ. Гомель. 1983. с.44-49.

6. Гребенкин Н.К. К представлению сосредоточенных внешних нагрузок, действующих на вагонное колесо, с помощью тригонометрических рядов. В сб.: Повышение надежности и совершенствование технического обслуживания и ремонта вагонов: Межвузовский тематический сборник научных трудов. Труды УЭИИТа, выпуск 72, Свердловск, 1984, с.85-88.

7. Гребенкин Н.К. Анализ конструкций отечественных стандартных цельнокатаных вагонных колес. Рукопись деп. в ЦНИИТЭИ МПС 20.06.1984 г., N 318/жд-85Деп.

8. Гребенкин Н.К. Анализ развития конструкций и параметров отечественных стандартных цельнокатаных вагонных колес и пути совершенствования их геометрии. В сб.: Метрополитен и планировка крупнейшего города, Харьков, 1986, с.16.

9. Гребенкин Н.К., Новопашина В.С. Анализ конструкций и параметров зарубежных вагонных колес. В сб.: Метрополитен и планировка крупнейшего города. Харьков, 1986, с.16-17.

10. Гребенкин Н.К. Автоматизация расчета матрических параметров вагонных колес по их математическим моделям. В сб.: Тезисы докладов 53-й научно-технической конференции кафедр института и специалистов железнодорожного транспорта (19-21 ноября 1991 г.). Харьковский институт инженеров жел.-дор. транспорта имени С.М.Кирова. Харьков. 1991, - с.11-12.

11. Гребенкин Н.К. Автоматизация расчета параметров соприкасаемых элементов выкружек вагонных колес. (Межвуз. сб. науч. тр.). ХИИТ. - Вып.16. - с.99-104.

12. Гребенкин Н.К. Эволюция конструкций отечественных стандартных вагонных колес. Тезисы докладов конференции (Днепропетровск, май 1992г.). 8-я конференция. Проблемы механики железнодорожного транспорта. Динамика, прочность и надежность подвижного состава. ДИИТ, 1992. - с. 51.

13. Гребенкин Н.К. Аналитическое построение математической модели вагонного колеса. (Межвуз. сб. науч. тр.) ХИИТ, 1992. - Вып. 20. - с 70-76.

14. Гребенкин М.К. Автоматизация розрахунків математичних моделей поверхні катання коліс вагонів. В сб.: Тези доповідей 55-ї науково-технічної конференції кафедр інституту та спеціалістів залізничного транспорту (23-25 листопада 1993 року). ХІІТ. Харків. - с.8.

15. Молдавський А.А., Гребенкін М.К. Автоматизація побудови математичних моделей ободів та ступиць коліс вагонів. В сб.: Тези доповідей 55-ї науково-технічної конференції кафедр інституту та спеціалістів залізничного транспорту (23-25 листопада 1993 року). ХІІТ. Харків. с 8-9.

НТБ
ДНУЖТ

16. Молдавський А. А., Гребенкін М. К. Уточнення координат локальних зменшень товщини дисків коліс вагонів. В сб.: Тези доповідей 55-ої науково-технічної конференції кафедр інституту та спеціалістів залізничного транспорту (23-25 листопада 1993 року). ХІІТ. Харків. 1993. - с. 46-47.

Гребенкін

Сканировала Камянская Н.А.

ГРЕБЕНКИН Николай Кириллович

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог и тяга поездов

Сделано в набор	25.05.1994г.	Л 22
Подписано к печати	12.05.1994г.	Объем 1,2 п. л.
Формат бумаги 60 x 90 1/16	Заказ 127	Тираж 100 экз.