

УДК 621.421.4

*М. С. ЗАСТОЛЬСКИЙ, А. В. ПУТЯТО, О. В. ПУТЯТО**Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **ОСОБЕННОСТИ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОЛЕСА МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА**

Выполнен анализ эксплуатационных неисправностей колесных пар тепловозов серий ЧМЭЗ и ТМЭ1 в части образования трещин в центрах и бандажах, а также конструктивных особенностей тележек, который показал, что возможной причиной неисправностей являются особенности экипажной части тепловозов. Установлено, что для ряда случаев (различных кривых и профилей бандажей) имеет место невыполнение условий геометрического вписывания в кривые малого радиуса. Полученные результаты свидетельствуют о наличии дополнительных боковых нагрузок на объект исследования. Для оценки прочности колеса разработана его конечно-элементная модель в программном комплексе ANSYS. Приведены стадии и особенности формирования конечно-элементных моделей колесного центра и бандажа. Выполнен тестовый расчет напряженно-деформированного состояния колеса и обозначены пути дальнейшего решения поставленной задачи.

Основными маневровыми тепловозами на Белорусской железной дороге являются тепловозы серий ЧМЭЗ, ЧМЭЗ<sup>T</sup> и ТМЭ1, ТМЭ2. Они имеют трехосные бесчелостные тележки с одноповодковым буксовым узлом и двухрядным сферическим подшипником качения. К одним из серьезных недостатков тепловозов указанных серий, с которыми приходится сталкиваться в эксплуатации, относятся неисправности колесных пар. Так в среднем в год выявляется около 20 случаев возникновения трещин бандажей колесных пар, а ежегодно при проведении полного и обыкновенного освидетельствования колесных пар выявляют значительное количество трещин в колесных центрах (рисунок 1).



Рисунок 1 – Разрушение бандажа и колесного центра колеса

Как правило, наличие трещин в бандажах связывают с некачественным изготовлением, нарушением химического состава при изготовлении загото-

вок бандажей, климатическими условиями эксплуатации, зарождением повреждений на поверхности катания и т.п. [1, 2], причем они выявляются на бандажах различных заводов-изготовителей. Кроме того, просматривается следующая закономерность: трещины возникают в бандажах 2-й и 5-й колесных пар тепловозов, обточенных по профилю ГОСТ 11018-2011 [3] (толщина гребня составляет 33 мм). Отметим, что аналогичные бандажи устанавливаются на колесных парах тепловозов других серий, для которых такой проблемы не наблюдается. Проблема образования трещин в центрах колесных пар также характерна только для маневровых тепловозов рассматриваемых серий. Учитывая вышесказанное можно сделать предположение, что рассмотренные неисправности колесных пар связаны с конструктивными особенностями экипажной части тепловозов серий ЧМЭЗ, ЧМЭЗ<sup>Т</sup> и ТМЭ1, ТМЭ2.

Для выявления причин возникновения неисправностей колесных пар и разработки технических решений, позволяющих снизить количество случаев излома центров и появления трещин бандажей колесных пар необходимо решить ряд задач, в том числе выполнить анализ прочности колеса при действии широкого спектра эксплуатационных нагрузок. Учитывая, что рассматриваемая конструкция спроектирована более чем 50 лет назад, на начальной стадии работы выполнен анализ возможности прохождения тепловоза кривых малого радиуса методом параболической диаграммы. Установлено, что для ряда случаев (различных кривых и профилей бандажей) имеет место невыполнение условий геометрического вписывания. Полученные результаты свидетельствуют о наличии дополнительных боковых нагрузок на объект исследования.

Ранее выполненные исследования нагруженности колесных пар локомотивов и вагонов были связаны главным образом с анализом контактного взаимодействия железнодорожного колеса и рельса [4]. Целью данной работы является разработка подхода, позволяющего учесть различные эксплуатационные нагрузки.

Для оценки прочности колеса разработана его конечноэлементная модель в программном комплексе ANSYS [5]. Процедура разработки конечноэлементной модели сложной конструкции, как правило, включает ряд этапов, необходимых для получения корректных результатов. Первая стадия – геометрическое моделирование, включает разработку пространственной модели конструкции с учетом всех тех ее параметров, которые могут оказать существенное влияние на результаты расчетов. На этой стадии, помимо ввода геометрических параметров конструкции, задаются свойства материалов, из которых она изготовлена. На этапе создания сетки конечных элементов выясняется целесообразность использования различных видов конечных элементов (оболочечных, балочных, пластин, объемных и т. д.) в рассматриваемой модели. На этой стадии выполняются мероприятия по созданию мак-

симально возможного количества областей с регулярной сеткой конечных элементов. В местах, где предполагаются большие градиенты напряжений, необходимо нанесение более мелкой сетки.

На стадии моделирования внешних связей следует учесть реальную работу конструкции с учетом различных вариантов нагружения. Количество уравнений связей должно быть достаточным, чтобы обеспечить построение кинематически неизменяемой модели. Приложение силовых факторов должно учитывать особенности реальной работы конструкции при рассматриваемых режимах эксплуатации. На этой стадии определяются законы распределения силовых факторов в объеме конструкции.

Геометрическая модель колеса разработана на основе комплекта чертежей и требований нормативной документации. На рисунке 2 приведен контур колесного центра и бандажа с ключевыми точками для построения.

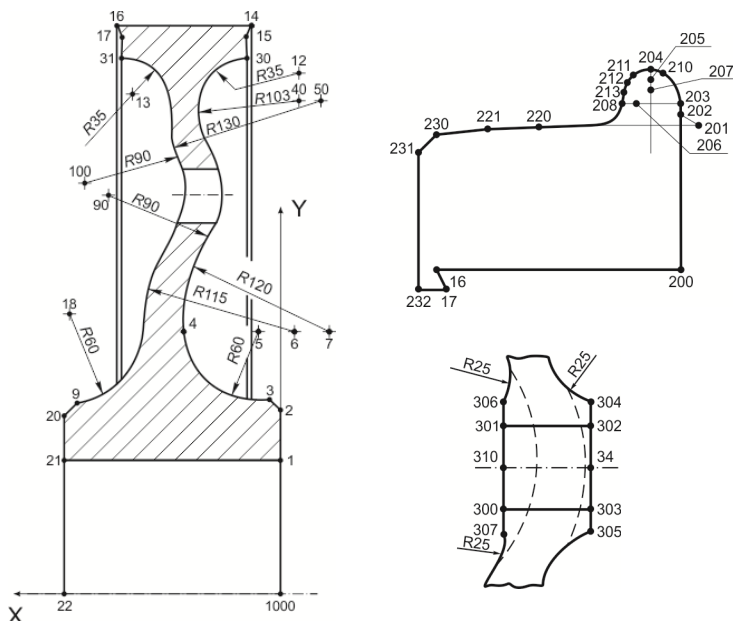


Рисунок 2 – Контур колесного центра и бандажа с ключевыми точками

Особенности разработки геометрической модели колеса локомотива и, как следствие, создания адекватной конечноэлементной сетки связаны со сложной его геометрией. Следует отметить, что учитывая симметричную конструкцию моделируемого объекта достаточно разработать модель его половины. На первом этапе выполнено построение части диаметрального поперечного сечения (без учета технологических отверстий на колесном центре), расположенного в плоскости  $XU$ .

Для построения ключевых точек, указанных на рисунке 2, использована опция **Main Menu** → **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Keypoints** → **In Active CS**. Построение прямых линий на основе введенных ключевых точек выполнено с использованием операции **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Line** → **Straight Line**.

Для построения переходных кривых, например со ступицы колеса на диск  $R60$ , вводим координаты точки 5 (0.027, 0.021, 0) и строим окружность радиусом 0,06, принимая эту точку за центр, командой **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Lines** → **Arcs**. Лишние участки затем удаляются операцией **Main Menu** → **Preprocessor** → **Modeling** → **Delete** → **Lines**.

Для образования места перехода и соединения кривой со ступицей колеса выполняем операцию «склеивания» линий **Main Menu** → **Preprocessor** → **Modeling** → **Operate** → **Booleans** → **Glue** → **Lines**.

Из рисунка 2 видно, что окружность  $R90$  с центром в точке 90 касается окружностей  $R120$  и  $R103$ . В то же время положение точки 90 из чертежа (см. рисунок 2) напрямую определить не представляется возможным. В связи с этим для определения координат точки 90 необходимо решить систему квадратных уравнений

$$\begin{cases} (R103 + R90)^2 = (x_{90} - x_{40})^2 + (y_{90} - y_{40})^2; \\ (R120 + R90)^2 = (x_{90} - x_7)^2 + (y_{90} - y_7)^2, \end{cases}$$

где  $x_{90}$ ,  $x_{40}$ ,  $x_7$  – координаты по оси  $X$  точек 90, 40 и 7, соответственно;  $y_{90}$ ,  $y_{40}$ ,  $y_7$  – координаты названных точек по оси  $Y$ .

Подставляя имеющиеся значения, и решая систему уравнений, определяем неизвестные координаты точки 90:

$$x_{90} = -\frac{129196011}{3872045000} \pm \frac{264\sqrt{4376433094}}{96801125} \Rightarrow x'_{90} \approx 0,147 \text{ м}, x''_{90} \approx 0,214 \text{ м}.$$

$$y_{90} = \frac{122923041}{387204500} \pm \frac{9\sqrt{0,5 \cdot 2188216547}}{484005625} \Rightarrow y'_{90} \approx 0,318 \text{ м}, y''_{90} \approx 0,317 \text{ м}.$$

Очевидно, что в нашем случае следует принять первые решения. Также отметим, что в программу целесообразно ввести формулу окончательного результата, а не округленный результат, с целью точного определения места расположения центра окружности. Для этого создаются параметры  $x_{90}$  и  $y_{90}$ , которые в дальнейшем используются при построении. Параметры вводятся в командной строке в следующем виде

```
*SET, x90, 264*sqrt(4376433094)/96801125-129196011/3872045000
*SET, y90, 9*sqrt(0.5*2188216547)/484005625+122923041/387204500
```

Введя координаты точки 90, строим окружность  $R90$ . Далее с использованием команды **Main Menu** → **Preprocessor** → **Modeling** → **Operate** → **Booleans** → **Overlap** → **Lines** определяем точки сопряжения окружностей.

Образованные лишние линии удаляем. Дальнейшее построение левой части колесного центра выполняется аналогично и в программу вводится выражение для точного определения места расположения центра окружности. Для этого создаются параметры  $x100$  и  $y100$ , которые вводятся в командной строке в следующем виде

```
*SET, x100, 88*sqrt(74156341)/4025125-258749/32201000
*SET, y100, 4517449/16100500+7*sqrt(74156341)/1610050
```

Введя координаты точки 100, строим окружность  $R90$  и с использованием команды **Main Menu** → **Preprocessor** → **Modeling** → **Operate** → **Booleans** → **Overlap** → **Lines** определяем места сопряжения окружностей. После удаления лишних линий получен контур колесного центра (рисунок 3).

На следующем этапе выполнено построение контура бандажа колеса по ГОСТ 11018-2011. Его контур с ключевыми точками полностью соответствует схеме, приведенной на рисунке 2.

Предварительно определив значения координат, создаем ключевые точки с использованием упомянутой ранее операции. Отметим, что отдельные координаты точек 202, 209, 210, 212, 213, 223 вводятся путем предварительного создания параметров  $y202$ ;  $y209$ ;  $x210$ ,  $y210$ ;  $x212$ ,  $y212$ ;  $x213$ ,  $y213$ ;  $x223$ . Это связано с необходимостью их вычисления путем решения геометрических задач. Таким образом, в командной строке программного комплекса введена следующая информация

```
*SET, y202, 0.525+0.00593*tan(4*atan(1)/6)
*SET, y209, 0.535+0.01876/tan(4*atan(1)/9)
*SET, x210, 0.03357-0.00893*(1/sqrt(0.00893*0.00893+0.011*0.011)) * (sqrt(0.00893*0.00893+0.011*0.011)+0.009)
*SET, y210, 0.535+0.011*(1/sqrt(0.00893*0.00893+0.011*0.011)) * (sqrt(0.00893*0.00893+0.011*0.011)+0.009)
*SET, x212, 0.0104+0.034*cos(4*atan(1)/6)
*SET, y212, y202+0.034*sin(4*atan(1)/6)
SET, x213, 0.00447+0.04*cos(4*atan(1)/9)
*SET, y213, 0.525+0.04*sin(4*atan(1)/9)
*SET, x223, 0.0434+(0.535-0.52)*tan((4*atan(1))/9)
```

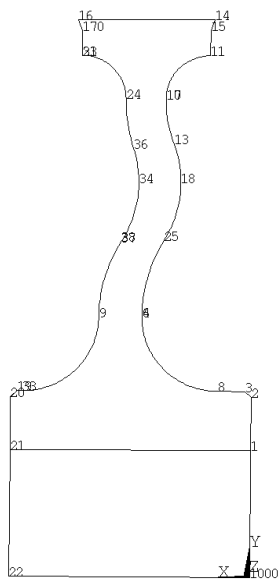


Рисунок 3 – Контур колесного центра

Опуская описание дальнейшего построения, которое выполняется аналогично вышеприведенному, получен контур бандажа (на рисунке 4 приведен совместно с колесным центром).

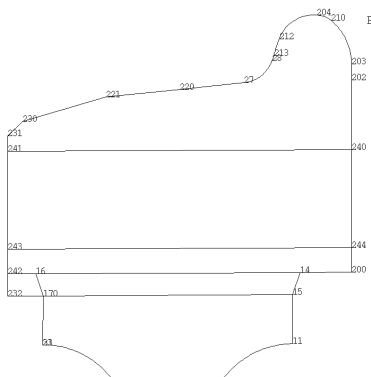


Рисунок 4 – Результат построения контура бандажа

Построение объемной геометрической модели  $\frac{1}{2}$  части колеса выполняется «выдавливанием», путем поворота площадей вокруг оси симметрии колеса. Аналогично выполняется построение технологического отверстия. «Выдавливание» осуществляется с использованием операции **Main Menu** → **Preprocessor** → **Modeling** → **Operate** → **Extrude** → **Areas** → **About Axis**.

Таким образом, в результате получена геометрическая модель половины колеса маневрового локомотива ЧМЭЗ, приведенная на рисунке 5.

В процессе конечноэлементного моделирования одним из важных этапов является создание сетки конечных элементов. Учитывая особенности нагруженности рассматриваемой конструкции, а также ее сложную геометрию, выбраны два типа конечных элементов SOLID185, который используется для создания регулярных сеток, и SOLID187, используемый для нерегулярного разбиения области технологического отверстия диска колесного центра. Элемент SOLID185 определен восемью узлами, имеющими три степени свободы каждый, обладает пластичностью, ползучестью, жесткостью, большими отклонениями и большими способностями к деформации, элемент SOLID187 отличается тетраэдральной формой и наличием 10 узлов, имеющими три степени свободы каждый.

На рисунке 6 приведена конечноэлементная модель, включающая 177126 конечных элементов и 207193 узлов. В качестве кинематических граничных условий учтена симметрия конструкции в плоскости осей  $XY$ , а также опора колеса на рельс по точке круга катания.

Учитывая возможное влияние технологических отверстий в диске колесного центра, далее, основываясь на описанных выше принципах, выполнено построение контуров отверстия и усиливающих элементов.

Для построения объемной модели, следуя технологии построения «снизу-вверх», на следующем этапе на основе построенных линий созданы поверхности (для дальнейшего регулярного разбиения на конечные элементы, при необходимости, создавались дополнительные линии) путем операции **Main Menu** → **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Areas** → **Arbitrary** → **By Lines**.

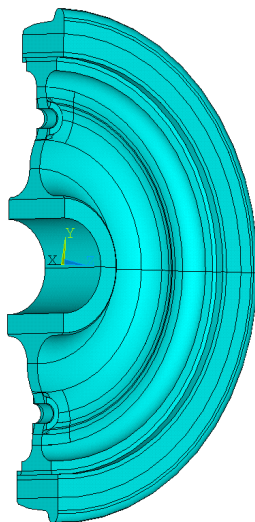


Рисунок 5 – Геометрическая модель половины колеса

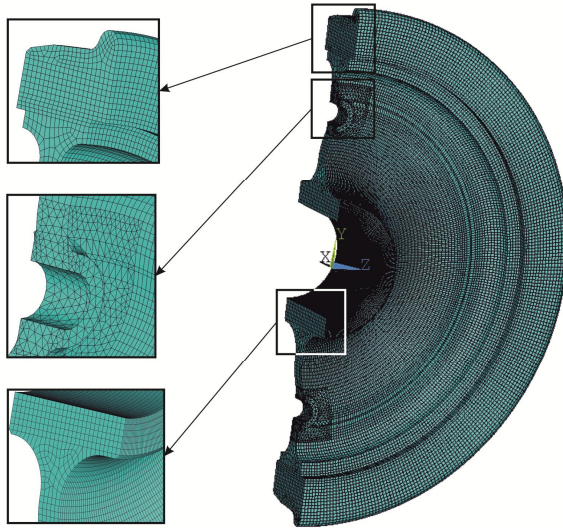


Рисунок 6 – Конечноэлементная модель ½ части колеса

Для предварительной оценки работоспособности модели выполнен тестовый расчет при действии вертикальной статической нагрузки брутто (нагрузка на ось 20,5 т). Приняты следующие, необходимые для расчета характеристики материала: модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , плотность  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup> [6].

На рисунке 7 приведена картина распределения эквивалентных напряжений в колесном центре для принятого режима нагружения.

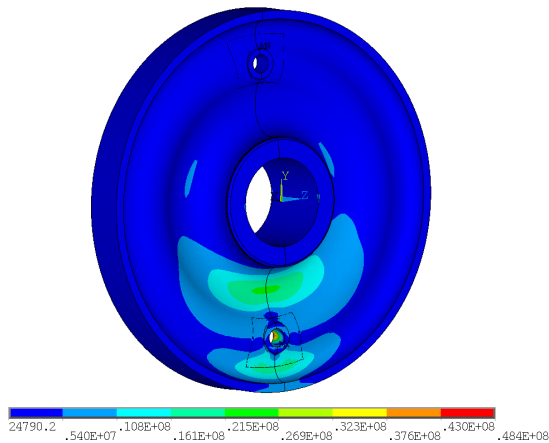


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений в колесном центре

Отметим, что для оценки напряженно-деформированного состояния колеса при действии нагрузок, близким к эксплуатационным, наряду с определением соответствующих внешних воздействий, необходимо развитие модели в части учета влияния прессовых соединений колесного центра с бандажом и осью колесной пары.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Григорьев, А. В.** Повреждения и ресурс колес локомотивов, эксплуатируемых в условиях севера / А. В. Григорьев, В. В. Лепов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 2. – С. 309–323.

2 **Сакало, В. И.** Контактные задачи железнодорожного транспорта / В. И. Сакало, В. С. Коссов. – М. : Машиностроение, 2004. – 496 с.

3 **Колесные пары** тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. ГОСТ 11018-2011. – М. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2012. – 32 с. (Межгосударственный стандарт).

4 **Шимановский, А. О.** Моделирование контактного взаимодействия колеса и рельса / А. О. Шимановский // 36. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків : УкрДАЗТ, 2008. – № 96. – С. 163–167.

5 **Каплун, А. Б.** ANSYS в руках инженера. Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

6 **Нормы** для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС колеи 1520 мм. – М. : ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.

*M. S. ZASTOLSKI, A. V. PUTSIATA, V. V. PUTSIATA*  
*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## FEATURES OF THE SHUNTING LOCOMOTIVE WHEEL FINITE-ELEMENT MODELING

The operational malfunctions analysis for the wheel pairs of ChME3 and TME1 diesel locomotives for the case of cracks formation in the centers and bandages. The similar analysis for car bogies was performed and it showed that the possible reason of the appearing malfunctions is the peculiarities of locomotive vehicle-part. It was established, that for a number of cases (for various curves and profiles of bandages) there is a nonperformance of geometrical entry in curves of small radius conditions. The received results demonstrate the presence of additional lateral loadings on the object of research. To estimate wheel strength there was created a finite-element model in ANSYS software complex. There are presented the formation stages and features of wheel center and bandage finite-element models. Test computation of the wheel stress-strain condition was executed and there were defined the ways of the further decision of the described problem.

Получено 27.02.2016