

Д.А. Чернигов¹, Е.А. Рожкова¹

¹ Забайкальский институт железнодорожного транспорта — филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕЛЬНОКАТАННОГО КОЛЕСА

Аннотация. Статья посвящена моделированию напряженно-деформированного состояния цельнокатанного колеса методом конечных элементов в 2 программах «КОМПАС-3D V18.1» и «Abaqus». Представлена методика создания 3D модели цельнокатанного колеса, способы закрепления и приложения нагрузок, выбор материала для расчета. Произведен расчет с учетом разной толщины обода: 22, 47 и 70 мм соответственно.

Ключевые слова: колеса, сталь, моделирование, напряженно-деформированное состояние.

D.A. Chernigov¹, E.A. Rozhkova¹

¹ Transbaikalian Institute of Railway Transport — a branch of Irkutsk State University of Railway Engineering, Chita, the Russian Federation

SIMULATION OF THE STRAIN-DEFORMED STATE OF A WHOLE-ROLLED WHEEL

Abstract. The article is devoted to modeling the stress-strain state of a solid-rolled wheel by the finite element method in 2 programs "KOMPAS-3D V18.1" and "Abaqus". The technique of creating a 3D model of a solid-rolled wheel, methods of fixing and applying loads, the choice of material for the calculation are presented. The calculation was made taking into account different rim thicknesses: 22, 47 and 70 mm, respectively.

Keywords: wheels, steel, modeling, stress-strain state.

Введение

Самыми нагруженными элементами железнодорожного транспорта являются железнодорожные колёса, в связи с тем, что на них действуют значительные статические и динамические нагрузки. Колёсная пара должна надёжно работать в сложнейших эксплуатационных условиях, от нее напрямую зависит безопасность движения. Нужно понимать, что во время эксплуатации на колёсную пару действуют различные силы: вертикальные и горизонтальные. Они меняющиеся во времени, и по величине, но при этом, основной составляющей сил является вертикальная нагрузка.

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации [1,2,3] до 2030 года предусматривает разработку специализированных вагонов для маршрутных поездов с осевыми нагрузками до 30 тс, увеличение наработки грузового вагона на отказ на 30...40%, а также увеличение осевых нагрузок локомотивов до 27...30 тс.

Методология

Математическую модель для определения напряжённно-деформированного состояния колеса (НДС колеса) строили с учётом действия на него вертикальных нагрузок. Основной методикой был выбран метод конечных элементов (МКЭ) [4,5,6]. Весь расчёт состоит из следующих основных этапов:

- 1) колесо необходимо поделить на определённое число i -ых элементов;
- 2) полученные элементы будут иметь общие узлы, но их перемещения нам неизвестны;
- 3) определяются функции, которые устанавливают зависимости перемещения узлов и передвижения точек внутри элементов;
- 4) по данным функциям определяем деформации внутри элементов.

В свою очередь, деформации, возникающие внутри элементов, с учётом механических характеристик, позволяют посчитать напряжённое состояние в каждом элементе и на его границах.

За основу мы приняли колесо с плоскоконическим диском по ГОСТ 10791- 2011.

Для определения НДС колеса необходимо построить 3D модель колеса. Расчет производили в 2 программах «КОМПАС-3D V18.1» и «Abaqus». Начнем с CAD-среды «КОМПАС-3D V18.1» со встроенной библиотекой АРМ FEM.

Расчет НДС в КОМПАС

Расчеты производили для колес с разной толщиной обода: 22, 47 и 70 мм [7,8,9]. Первым этапом будет построение эскиза. Входим во вкладку создания 3D моделей, выбираем необходимую плоскость (отображение плоскостей «изометрия»), входим в окно построения эскиза. Обращаемся к рисунку А.1 ГОСТ 10791- 2011 и вычерчиваем эскиз колеса (рис.1). Далее, для создания модели необходимо применить операцию вращения или выдавливания по траектории (для этого необходимо задать направляющую в другой плоскости). После выполнения этих шагов, мы получаем 3D модель цельнокатаного колеса (рис. 1).

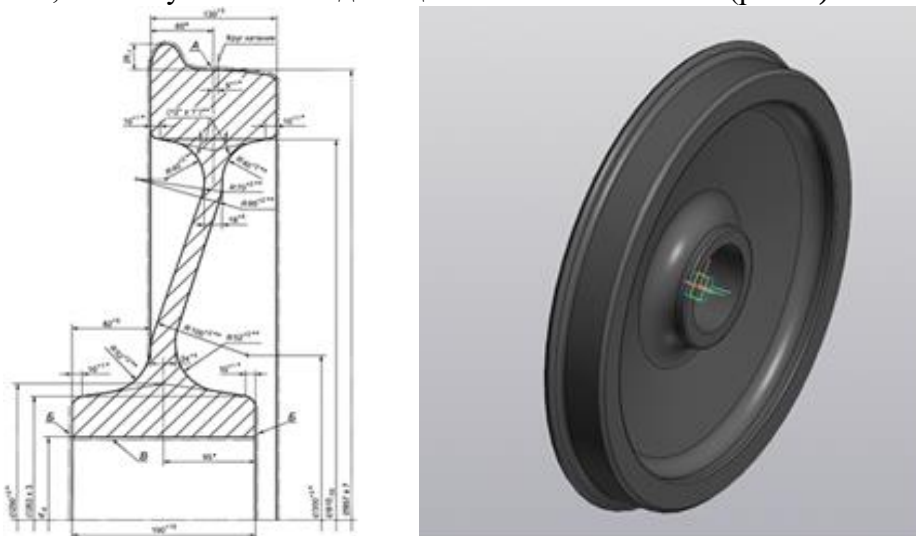


Рис. 1. Эскиз колеса по ГОСТ 10791-2011 (3D модель цельнокатаного колеса)

Чтобы начать расчет, необходимо задать параметры материала, приложить нагрузку и показать закрепления.

Выбор материала. Зададимся сталью 2. Перед расчетом, программе необходимо задать следующие параметры: удельная масса $\rho = 7,854 \text{ г/см}^3$; модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,28$.

В студенческой версии данная сталь не доступна, поэтому мы выберем ее аналог, сталь, максимально схожую по всем характеристикам – сталь 55 ГОСТ 1050-2013 (рис.2).

Название материала: **Сталь 55 ГОСТ 1050-2013**

Предел текучести [МПа]	380
Модуль упругости нормальный [МПа]	210000
Коэффициент Пуассона	0.3
Плотность [кг/м³]	7820
Температурный коэффициент линейного расширения [1/°C]	0.000011
Теплопроводность [Вт/(м·°C)]	55
Предел прочности при сжатии [МПа]	650
Предел выносливости при растяжении [МПа]	315
Предел выносливости при кручении [МПа]	163

Рис. 2. Характеристики стали 55 ГОСТ 1050-2013

Закрепление. Будем понимать, что колесо условно неподвижно и якобы закреплено на оси. Поэтому, накладываем ограничения на перемещения по всем осям («Создать закрепление») на поверхность ступицы колеса. На модели, в месте наложения ограничений, появились зеленые оси координат – значит программа приняла наше закрепление.

Приложение нагрузки. Так основной составляющей сил, действующих на колесо, является вертикальная нагрузка, приложим ее в i-ю часть поверхности диска. Для этого, необходимо создать площадку на поверхности обода. Создаем эскиз в виде сектора на профильной плоскости колеса. С помощью библиотеки «Каркасы и поверхности», разбиваем поверхность катания выбранным эскизом и получаем нужную i-ю площадку. Теперь необходимо приложить нагрузку. Зададимся максимальной нагрузкой 25 и 30 тс при самых неблагоприятных условиях. Выбираем вкладку «Давление», указываем необходимую поверхность, вводим величину силы в ньютонах. Над площадкой появляется группа красных векторов, сигнализирующих о приложенной нагрузке.

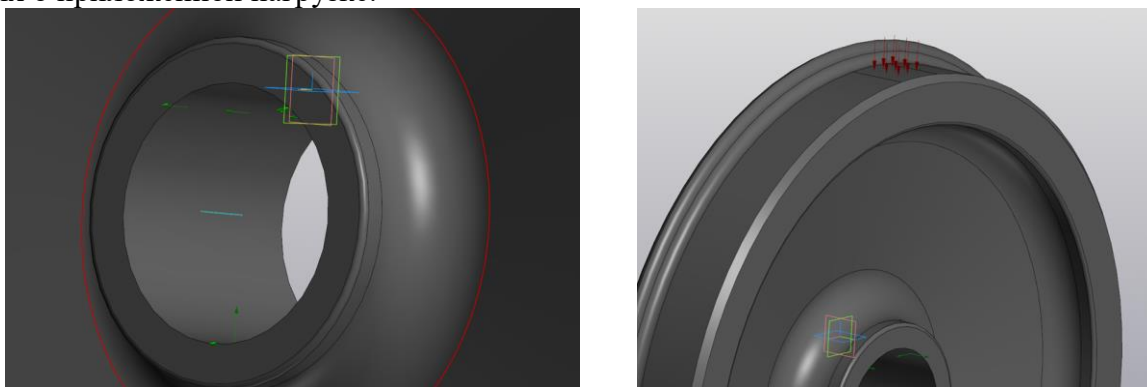


Рис. 3. Закрепление и приложенная нагрузка

Создание сетки конечных элементов. При создании сетки необходимо указать вид тетраэдров (4-х или 10-ти узловые), плотность распределения и максимальную длину стороны элемента. Запускаем расчет и получаем колесо, разбитое на конечные элементы. При расчете полагается, что каждый из элементов подвергается сложным нагрузкам по всем поверхностям, поэтому переходят к эквивалентным напряжениям по Мизесу, то есть сложнапряженное состояние элемента, заменяется простым напряжением растяжения-сжатия.

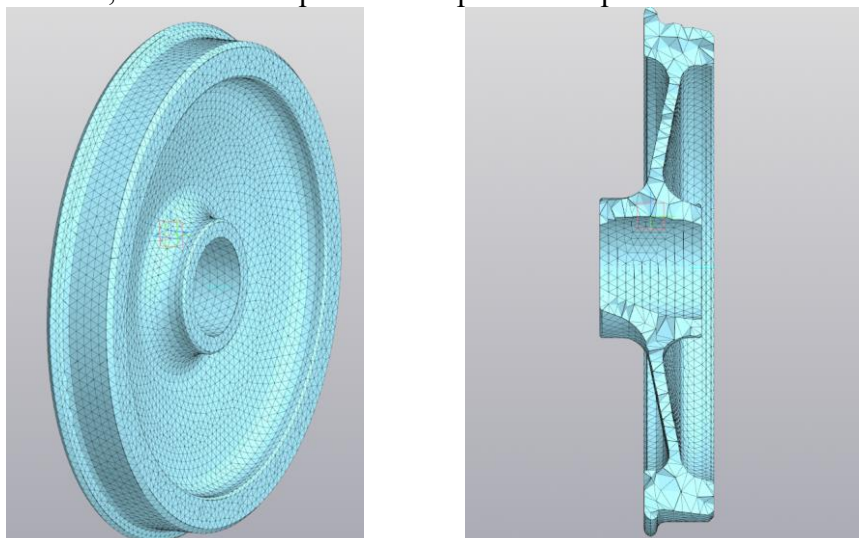


Рис. 4. Сетка конечных элементов

Карта результатов. Чтобы увидеть, где собраны максимальные нагрузки, необходимо выполнить статический расчет. На это потребуются определённое количество времени, которое зависит от мощности вашей вычислительной машины. По окончании, мы можем посмотреть карту результатов, где отражены следующие параметры: эквивалентные напряжения по Мизесу, суммарное линейное перемещение, коэффициент запаса по текучести, коэффициент

запаса по прочности (рисунк 5). Компас позволяет сформировать отчет в формате .html, что, конечно же, очень удобно.

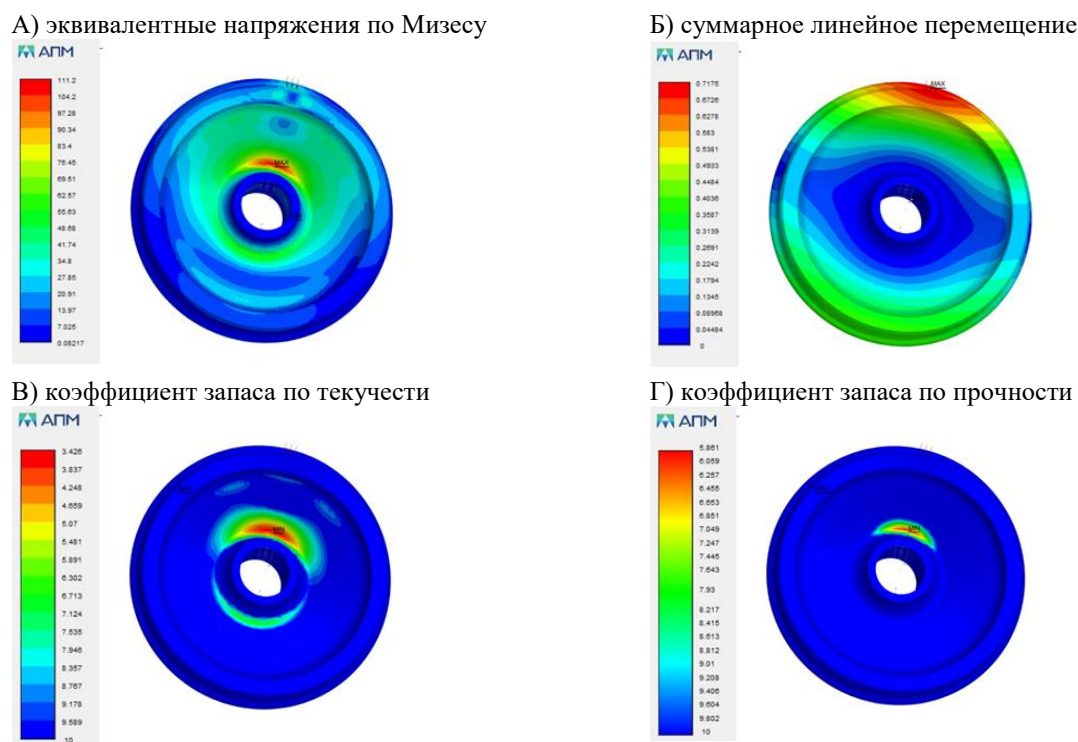


Рис. 5. Результаты расчетов

Расчет НДС в «Abaqus»

В данной программе методика определения НДС несколько отличается. Необходимо смоделировать колесо, задать материал, создать сетку конечных элементов, принять закрепление, приложить нагрузку и запустить расчет. Задаемся теми же параметрами, что и в предыдущем расчете: удельная масса $\rho = 7,854 \text{ г/см}^3$; модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,28$ [10]. В данном случае, мы приложили нагрузку по всей поверхности катания. В студенческой версии имеется ограничение на количество элементов КЭ сетки (1000 элементов), поэтому колесо получилось несовершенной формы.

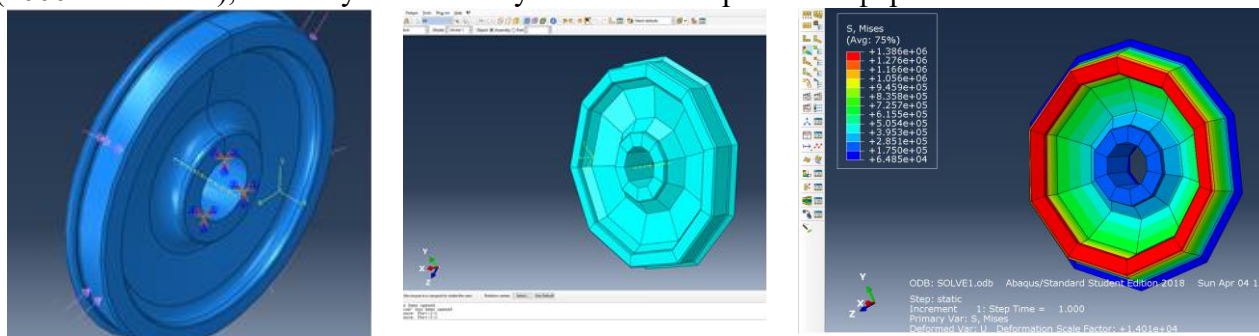


Рис. 6. Закрепление, приложенная нагрузка, сетка КЭ, карта результатов

По результатам расчетов в 2 программах, выявили, что основными местами, где концентрируются напряжения у колес с толщиной обода 47 и 70 мм являются предступичная часть колеса (103-111 МПа). У колес же, имеющих толщину обода 22 мм еще и в приободной части (130 МПа). Не трудно прийти к выводу, что чем меньше толщина обода, тем больше напряжения в опасном сечении при постоянной силе.

Заключение

В заключение необходимо сказать, что использование современного программного обеспечения необходимо при изучении таких дисциплин как «Конструирование и расчет ва-

гонов», «Основы механики подвижного состава». Это обуславливается наглядностью процесса и большим уровнем мотивации к обучению.

В статье приведена методика моделирования НДС колеса в 2 программах «КОМПАС-3D V18.1» и «Abaqus». От колеса напрямую зависит безопасность движения подвижного состава, поэтому необходимо уделять должное внимание этому элементу. Совершенствование конструкции колеса (разная форма дисков), локальная термообработка, может поспособствовать снижению возникающих напряжений, которые приводят к изломам, а значит увеличить срок службы колеса. Увеличение срока службы колеса, благоприятно скажется на экономике ОАО «РЖД».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ состояния безопасности движения на железных дорогах ОАО «РЖД» в 2009 году / ОАО «РЖД», Департамент безопасности движения. – М., 2010. (Утв. Вицепрезидентом ОАО «РЖД» А. Г. Тишаниным 25.02.10.)
2. Богданов А. Ф., Чурсин В. Г. Эксплуатация и ремонт колёсных пар вагонов [Текст]: М.: Транспорт, 1985. 270 с.
3. Ботвина Л. Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения [Текст] / Л. Р. Ботвина // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – №4, том 70. – С. 41-51.
4. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст]: М.: Транспорт, 1986, 559 с.
5. Кротов С. В. Основы теории несущей способности прессовых соединений колёсных пар железнодорожных вагонов [Текст]: монография / С. В. Кротов. – М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 152 с.
6. Annual report, Safety statistics [Электрон. ресурс] / Federal Railroad Administration. – USA. – 2004. – Режим доступа: <http://www.fra.dot.gov>.
7. Шадур Л.А., / Расчет вагонов на прочность / С.В. Вершинский, Е.Н. Никольский, Л.Н. Никольский, А.А. Попов, Л.А. Шадур // М.: Машиностроение, 1971. – 432 с.
8. Рожкова Е.А. Анализ напряженно-деформированного состояния взаимодействия деталей РК-3 профильного соединения с натягом методом конечных элементов (МКЭ)/ Е.А. Рожкова, В.А. Ильиных, В.Е. Ярилов // Вестник СамГУПС – Самара: СамГУПС. - №4 -2016.-С.35-41.
9. Нормы для расчета и проектирования вагонов, железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» – ГосНИИВ – ВНИИЖТ. – М., 1996. – 319 с
10. Котуранов В.Н. Нагруженность элементов вагонов. / Котуранов В.Н., Хусидов В.Д., Устич П.А., Быков А.И. // М.: Транспорт, 1991. – 232 с.

REFERENCES

1. Analiz sostoyaniya bezopasnosti dvizheniya na zheleznynh dorogah ОАО «RZHD» v 2009 godu / ОАО «RZHD», Departament bezopasnosti dvizheniya. – M., 2010. (Utv. Viceprezidentom ОАО «RZHD» A. G. Tishaniny 25.02.10.)
2. Bogdanov A. F., Chursin V. G. Ekspluatatsiya i remont kolyosnyh par vagonov [Tekst]: M.: Transport, 1985. 270 s.
3. Botvina L. R. Gigaciklovaya ustalost' – novaya problema fiziki i mekhaniki razrusheniya [Tekst] / L. R. Botvina // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. – 2004. – №4, tom 70. – S. 41-51.
4. Verigo M. F., Kogan A. YA. Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava [Tekst]: M.: Trans-port, 1986, 559 s.
5. Krotov S. V. Osnovy teorii nesushchej sposobnosti pressovyh soedinenij kolyosnyh par zheleznodorozhnyh vagonov [Tekst]: monografiya / S. V. Krotov. – M.: FGOU «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2011. – 152 s.

6. Annual report, Safety statistics [Электрон. ресурс] / Federal Railroad Administration. – USA. – 2004. – Режим доступа: <http://www.fra.dot.gov>.
7. SHadur L.A., / Raschet vagonov na prochnost' / S.V. Vershinskij, E.N. Nikol'skij, L.N. Nikol'skij, A.A. Popov, L.A. SHadur // M.: Mashinostroenie, 1971. – 432 s.
8. Rozhkova E.A. Analysis of the stress-strain state of interaction of parts PK-3 profile connection with interference by the finite element method (MEA)/E.A. Rozhkova, V.A. Ilyinykh, V.E. Yarov//Bulletin SamGUPS - Samara: Sam-GUPS. - No. 4 -2016.-C.35-41.
9. Norms for the calculation and design of wagons, railways MPS gauge 1520 mm (non-self-propelled) "- GosNIIV - VNIIZHT. - M., 1996. - 319 s
10. Koturanov V.N. Loading of car elements ./Koturanov V.N., Khusidov V.D., Ustich P.A., Bykov A.I./M.: Transport, 1991. - 232 s.

Информация об авторах

Чернигов Дмитрий Александрович – студент специальности «Подвижной состав железных дорог», Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита e-mail: dima.chernigov.1999@mail.ru

Рожкова Елена Александровна – к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита, e-mail: helenuys@mail.ru.

Authors

Dmitry Alexandrovich Chernigov – student of the specialty "Rolling stock of Railways - Cars", Transbaikal Institute of Railway Transport — a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: dima.chernigov.1999@mail.ru

Elena Alexandrovna Rozhkova – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor of Railway Rolling Stock Department, Transbaikal Institute of Railway Transport – a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: helenuys@mail.ru .

Для цитирования

Чернигов Д.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния цельнокатаного колеса [Электронный ресурс] / Д.А. Чернигов, Е.А. Рожкова // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021. – №1 (11). – Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/111-2021>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

For citation

Chernigov D.A., Rozhkova E.A. *Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya cel'nokatanogo kolesa* [Simulation of the strain-deformed state of a whole-rolled wheel]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021, no. 1 (11).