УДК 629.3.027:620.178.3

И.В. Демьянушко, МАДИ,
e-mail: demj-ir@mail.ru

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАСЧЕТНО-ПРОЕКТИРОВОЧНОГО АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОЛЕС АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация. В статье рассмотрены современные подходы, которые используются для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) колес автотранспортных средств, показано, что в основе расчетов, как усталостной прочности, так и сопротивления удару, лежит анализ НДС с использованием метода конечных элементов. Приведены примеры расчетов, выполненных в МАДИ.

Ключевые слова: транспортное средство, колесо автомобиля, усталость, удар, метод конечных элементов, моделирование, испытательный стенд, технология.

I.V. Demiyanushko, MADI,
e-mail: demj-ir@mail.ru

MODERN SITUATION WITH THE DESIGNING ANALYSIS OF DURABILITY AND RELIABILITY OF WHEELS OF VEHICLES

Abstract. In article modern approaches which are used for the stress-strain analysis of car wheels are considered, it is shown, that at the heart of calculations are both fatigue durability and dynamic impact effects, with use of final elements method, lays. Examples of the calculations executed in MADI are presented.

Key words: vehicle, car wheel, fatigue, impact, final elements method, modeling, the test bed, technology.

Введение

Прочность колес автотранспортных (АТС) средств во многом определяет их безопасность. Многочисленные случаи ДТП, техногенных

аварий с тяжелыми последствиями были вызваны разрушениями колес АТС. Известны случаи тяжелых аварий с выездом на встречную полосу и смертельными исходами из-за разрушений колес скоростных легковых автомобилей, из-за опрокидывания большегрузных карьерных самосвалов, опрокидываний и аварий автокранов. В связи с этим автомобильные колеса подвергаются обязательным сертификационным испытаниям при различных видах нагрузок, и их установка на транспортное средство требует обязательного получения сертификата соответствия. Источником разрушения всегда являются трещины, возникающие в колесе автомобиля и быстро развивающиеся при перегрузках. Трещины могут возникать из-за накопления усталостных повреждений и при воздействии ударных нагрузок. Таким образом, разрушение колеса происходит либо при исчерпании ресурса, либо при воздействии перегрузки. Поведение колеса при разных видах нагружения зависит от конструкции, материала и технологии изготовления колеса. Таким образом, при проектировании колес важно учитывать все эти факторы. Расчетный анализ является основным инструментом на этапе проектирования. Так как после изготовления колеса подвергаются стендовым испытаниям по программам и при условиях нагружения, соответствующим нормативным требованиям, то и расчетный анализ обычно проводится при так называемых стендовых условиях нагружения. Эти условия содержатся в различных нормативных документах, которые определяются в основном назначением колес, например [1–3] и др. Расчетный анализ служит для сравнения различных вариантов конструкций, выбора материалов и технологии на этапе проектирования.

Определение напряженно-деформированного состояния колес при статических нагрузках

До сравнительно недавнего времени, на транспортных средствах использовались стальные тонкостенные колеса. При расчетах напряженно-

деформированного состояния (НДС) таких колес обычно применялись методы теории тонких пластин и оболочек, как и для расчета шин (анизотропные оболочки), эти методы позволили получить соотношения для определения усилий, действующих со стороны шины на колесо, например, от давления в шине (работы В.Л. Бидермана, Э.И. Григолюка). В оболочечных расчетах колесо рассматривалось как составная конструкция, состоящая из колец и оболочек, с использованием метода начальных параметров или метода перемещений для решения задачи взаимодействия элементов колеса. Численные решения для системы оболочек были получены методами численного интегрирования с использованием разложения в ряды Фурье по окружной координате, сведением краевой задачи к задаче Коши и использованием метода ортогональной прогонки. Колесо рассматривалось как осесимметричная тонкостенная конструкция при неосесимметричном нагружении. И в настоящее время в ряде случаев для общей оценки уровня НДС при статическом нагружении колеса этот подход используется рядом исследователей [4, 5]. В МАДИ на основе теоретических разработок и программ расчета были проведены исследования ряда колес для легковых и грузовых автомобилей. Впервые были получены достоверные расчетные результаты, проверенные экспериментально методами тензометрии в стендовых и эксплуатационных условиях. На рисунке 1. показана одна из оболочечных схем для расчета стального колеса грузового автомобиля.

Рис. 1. Схема расчета стального грузового колеса как системы оболочек и распределение НДС в ободе колеса

Очевидно, что даже для тонкостенных стальных колес, осесимметричные оболочечные модели не вполне адекватно описывают особенности конструкции колес. Так, для грузовых колес попытки учесть отверстия в диске колеса методом «размазывания» приводили к значительным погрешностям, то же относится к попыткам учесть конструктивные особенности замковой части и мест крепления в рамках оболочечных моделей.

Появление алюминиевых литых колес со сложной конфигурацией, увеличение нагруженности и ресурса колес потребовало развития новых подходов к оценке их НДС, особенно в связи с необходимостью дальнейшего расчета усталостной прочности колеса. Развитие аппарата метода конечных элементов (МКЭ) позволило перейти на новый уровень расчетных моделей колеса.

Рис. 2. Литое алюминиевое колесо грузового автомобиля с шиной, при тензометрировании

Базой современной методологии расчетно-проектировочного анализа прочности колес автомобилей, развитой в МАДИ, явился большой практический опыт исследований прочности колес автомобилей, выпускавшихся автозаводами ЗИЛ, АЗЛК. АВТОВАЗ, КамАЗ, выполнялись совместные расчетно-экспериментальные исследования, и

производилось проектирование колес как грузовых, так и легковых автомобилей. В процессе этих работ выявлялись адекватные расчетные схемы нагружения колес, рациональные КЭ модели. Все создаваемые расчетные схемы проверялись экспериментально путем тензометрии в различных условиях нагружения. Наибольший вклад в этот период в исследования колес внесли сотрудники МАДИ – Н.И. Батрак, С.В. Никитин и др. На рисунке 2 показано алюминиевое литое колесо для грузового автомобиля с установленными тензодатчиками, подготовленное для тензометрического исследования на стенде в лаборатории кафедры строительной механики МАДИ. Эти работы позволили уточнить схемы приложения усилий при расчете диска колеса от воздействия шины.

Рис. 3. КЭ модель колеса, полученная с использованием оболочечных КЭ элементов; расчетная схема нагрузок и распределение расчетных и экспериментальных (по данным тензометрирования) значений окружных и меридиональных напряжений в ободе колеса легкового автомобиля

Первые конечно элементные модели (КЭ модели) для расчета колес появились примерно в 80-х годах (рис. 3–4), они также были оболочечными, что упрощало расчет пространственных осесимметричных конструкций, но не позволяло учитывать объемные участки и рассчитывать места крепления и контакта.

Анализ расчетных и экспериментальных результатов, выполненный для большого числа различных конструкций колес при различных видах нагружения показал, что для относительно тонких конструкций стальных колес общий характер НДС достаточно хорошо определяется в осесимметричных и оболочечных моделях МКЭ, как это видно на рис. 3.

На рисунке 4 для того же колеса (легковой автомобиль) приведены расчетные графики напряжений в различных точках галтели перехода от диска к ободу и данные тензометрии колеса в условиях стендового нагружения, где уже заметны недостатки оболочечной модели.

Рис. 4. Распределение напряжений в галтели перехода от диска к ободу (расчет и эксперимент)

Дальнейшее развитие расчетного анализа НДС в конструкциях колес было связано с разработкой колес из легких сплавов. Особые требования,

предъявляемые к расчетным схемам и методам, здесь определяются большей неоднородностью материала в конструкции, особенно для литых колес, относительно большей толщиной элементов колеса (обода и диска), более сложной конфигурацией колес и отсутствием осевой симметрии в дисковой части. Это потребовало разработки новых подходов к созданию типовых моделей МКЭ для описания геометрии колеса, соответствующих экспериментальных исследований по проверке адекватности этих моделей. Кроме того, в связи с большей чувствительностью этих материалов к концентрации напряжений и трещинам, потребовалось создание принципиально новых моделей нагружения колеса, соответствующих условиям эксплуатации. За рубежом такие исследования проводились в основном в Германии и также относятся к этому же периоду (расчетно-экспериментальные исследования V. Grubisic, G. Fischer, G. Woelke и др.).

а) б)

Рис. 5. Этапы создания КЭ модели для расчета литого алюминиевого колеса, содержащей 114 959 узлов и 204 471 элементов, а) – твердотельная модель, б) – КЭ модель

Использование современного программного комплекса МКЭ, развитого в МАДИ – «BASYS +», позволило уже в 90-х гг. начать расчетные исследования пространственного НДС в колесах, что было в первую очередь необходимым для анализа колес из легких сплавов. Уже в это время была сформирована последовательность расчета – построение

твердотельной модели колеса, разработка вариантов генерации КЭ сеток и расчет, как общего НДС, так и НДС в локальных зонах – местах концентрации напряжений. На рисунке 5 показаны этапы создания КЭ модели для расчета литого алюминиевого колеса сложной геометрии, выполненного Н.И. Батраком с использованием программного комплекса «BASYS +» с препост процессором «GNOM» [6].

На рисунке 6 показано распределение напряжений в КЭ модели колеса для одного из конструктивных вариантов при нагрузках, имитирующих нагружение на испытательном стенде по схеме «изгиб с вращением» в соответствии с ГОСТ Р 50511-93.

Рис. 6. Распределение главных напряжений при максимальной нагрузке на колесо по схеме стенда «изгиб с вращением»

Очевидно, что использование КЭ моделирования позволяет получить подробную картину НДС в конструкции с учетом всех особенностей геометрии колеса.

Использование КЭ моделирования для анализа усталостной прочности колес

Испытания колес на усталостную прочность, как уже говорилось выше, проводятся на специальных стендах при нагружении по схеме «изгиб с вращением». Обычно на колесо передается вращающийся изгибающий момент с помощью рычага, вращение осуществляется либо вращением самого колеса, либо вращением рычага («скалки»), что зависит от конструкции стенда. В результате в точках колеса возникает циклическое изменение НДС по симметричному циклу. Первые расчетные модели составлялись без учета жесткости узла соединения колеса со стендом. Как показал анализ, это приводит к некоторым погрешностям при определении НДС в цикле нагружения и не позволяет оценить адекватно НДС в местах крепления колеса к ступице. На рисунке 7 показана такая модель, разработанная Н.И. Батраком для колеса, показанного на рис. 5.

Рис. 7. КЭ модель колеса, разработанная для имитации условий нагружения на стенде «изгиб с вращением»

Дальнейшее развитие и возможности КЭ моделирования появились при использовании для КЭ расчетов программных инструментов MSC.Software. Использование пакетов Patran – Nastran для разработки КЭ

моделей колес позволило решить ряд задач анализа НДС в колесах различных конструкций с учетом технологических особенностей изготовления и разработать методику оценки их усталостной прочности (рис. 8).

На основе этого программного комплекса была разработана методика моделирования колеса для условий стендовых усталостных испытаний с учетом контактных напряжений в болтовых соединениях колеса со ступицей. Моделирование испытаний на стенде при изгибе с вращением дает возможность определить параметры цикла изменения НДС в любой точке колеса при вращении и воздействии изгибающего момента, что позволяет при наличии данных по усталостной прочности материала конструкции колеса рассчитать его усталостную долговечность.

Рис. 8. Схема стенда для усталостных испытаний колес на «изгиб с вращением» и соответствующая КЭ модель колеса с имитацией нагружения

Этот подход был успешно использован в частности для выявления причин возникновения трещин усталости в сварных швах сборных стальных колес большой размерности для сельхозмашин [7]. При решении этой практической задачи были выполнены многочисленные вариантные расчеты при различных значениях сборочного натяга между диском и ободом при наличии и отсутствии сварного шва. Пример КЭ модели приведен на рис. 9.

а) б)

Рис. 9. Распределение напряжений по Мизесу на поверхности обода в условиях натяга 0,4 мм (а) и 0,25 мм (б)

Далее полученные значения напряжений от натяга учитывались для оценки асимметрии циклов при усталостном нагружении путем добавления к значениям напряжений в симметричном цикле испытаний на изгиб с вращением. Таким образом, производилась оценка долговечности до образования трещин при различных значениях натяга [8].

Использование КЭ моделирования прочности колес при ударе

Исследования прочности колес при ударе особенно важны для колес из легких сплавов, в частности, литые алюминиевые колеса проходят обязательные испытания на удар, которые проводятся на специальных стендах [2, 3]. Учитывая, что стоимость таких испытаний достаточно велика, их целесообразно проводить на окончательной стадии изготовления колеса. На этапе проектирования важно иметь расчетный инструмент, позволяющий оценить поведение конструкции колеса при ударе. В.В. Мироновой была разработана инженерная методика расчетной оценки ударной прочности колес с использованием в основе расчета НДС в колесе при статическом нагружении [8, 9]. Расчетные нагрузки, действующие на колесо, принимались соответствующими стендовым ударным. Очевидно, что такую оценку целесообразно делать для типовых

условий стендовых сертификационных испытаний на удар. Следует отметить, что при ударе приложение нагрузки отличается от принятых при расчете на статическую прочность при качении колеса, оно соответствует по направлению и величине ударяющей массе. Полученное НДС будет являться результатом статического расчета при приложении к колесу нагрузки, соответствующей ударяющей массе по величине и направлению. Далее, оценка НДС в колесе при ударе производится с использованием коэффициента динамичности. Коэффициент динамичности было предложено определять на основе экспериментальных тензометрических исследований поведения колес при ударном воздействии в условиях стендовых испытаний. Расчетные исследования НДС алюминиевых литых колес также проводились МКЭ с использованием комплекса MSC.NASTRAN, причем расчетные модели тщательно верифицировались с использованием данных тензометрии.

а) б)

Рис. 10. КЭ модель литого алюминиевого колеса при статической нагрузке, имитирующей нагрузку на ударном стенде: а) – модель, б) – распределение деформаций в колесе – расчеты проведены Е.М. Логиновым

Как из результатов эксперимента, так и расчетным путем было установлено, что НДС колеса может определяться в упругой области. При статическом нагружении, имитирующем статическое приложение ударной нагрузки (массы ударяющего элемента) общее напряженно-

деформированное состояние в колесе – упругое. Пластические деформации могут возникнуть только в местах концентрации напряжений и практически не влияют на динамическое поведение всей конструкции при ударе. Далее величины НДС в основных элементах колеса (ободе, на спицах) умножаются на рекомендованную величину $К_{д\ ср}$. Исследования, подробно описанные в [9] показали, что для литых алюминиево-кремниевых сплавов, из которых в основном изготавливаются автомобильные колеса, коэффициент динамичности при ударе в условиях ударного стенда можно принять равным $К_{д\ ср.} = 10$.

Заключение

Развитие новых программных средств и новых подходов к моделированию НДС в колесах транспортных средств позволяют в настоящее время эффективно использовать расчетный анализ на этапах проектирования колес различной конструкции с учетом материалов и технологии изготовления. В основе оценки, как усталостной прочности колеса, так и его сопротивления ударному воздействию лежит расчет конечно элементный анализ НДС в колесе в условиях нагружения на стендах для соответствующих сертификационных испытаний, причем КЭ модели, как конструкции, так и нагрузок, должны учитывать особенности стендового нагружения и технологию изготовления колеса.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52390-2005. Транспортные средства. Колеса дисковые. Технические требования и методы испытаний. М.: Госстандарт, 2007. 30 с.

2. ГОСТ Р 50511-93. Колеса из легких сплавов для пневматических шин. Общие технические условия. М.: Госстандарт, 1993.

3. ЕК ООН. Правила 124. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения колес для легковых автомобилей и их прицепов (E/ECE/324, E/ECE/TRANS/505, Rev.2/Add.123).

4. Балабин И.В., Чабунин И.С., Фомичев Ю.И. Напряженно-деформированное состояние обода колеса для бескамерных шин грузовых автомобилей и автобусов и его зависимость от конструкции и установки диска // XXXIX международная науч.-техн. Конференция ААИ: тезисы докл. 2002. С. 5–6.

5. Карташов Н.С. Прочность и долговечность дисков колес из перспективных материалов современных легковых автомобилей и мотоциклов: дис. … канд. техн. наук. М., 2004.

6. Батрак Н.И. Создание математических моделей для анализа поведения конструкции колеса в условиях испытаний // Вопросы прочности, динамики и проектирования конструкций: сборник науч. трудов МАДИ. М., 2004. С. 13–23.

7. Демьянушко И.В., Логинов Е.М., Миронова В.В., Вахромеев А.М. Влияние технологии сборки штампованных колес большой размерности на усталостную прочность // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 12. С.42–49.

8. Demiyanushko I., MironovaV. Analysis of Dynamic Impact Effects for Light Alloy Car Wheels // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2010. Vol. 23. № 3. P. 53–55.

9. Миронова В.В. Исследования напряженно-деформированного состояния литых алюминиевых автомобильных колес при ударных нагрузках: дис. … канд. техн. наук. М., 2012.

References

1. GOST R 52390-2005.*Transportnie sredstva. Kolesa diskovie.Tekhnicheskie trebovaniya i metodi ispitaniy*, Moscow, Gosstandart, 2007, 30 p.

2. GOST R 50511-93. *Kolesa iz legkih splavov dlia pnevmaticheskih shin. Obschie tecknicheskie uslovia*, Moscow, Gosstandart, 1993.

3. EK OON. Pravila124. Edinoobraznie predpisaniya, kasaushiesya utvergdenia koles dliay legkovih avtomobiley i ih pricepov (E/ECE/324, E/ECE/TRANS/505, Rev.2/Add.123).

4. Balabin I.V., Chabunin I.S., FomichevU.I. *Napriyagenno-deformirovannoe sostoyanie oboda kolesa dlia beskamernih shin gruzovih avtomobiley I avtobusov i ego zavisimist ot konstruktsii I ustanovki diska* (Stress-strain state of the wheel rim for tubeless tires of trucks and buses, and its dependence on the construction and installation of the disc), XXXIX megdunarodna nauchna konferentsia ААИ, tezisis, 2002, С. 5–6.

5. Kartashov N.S. *Prochnost I dolgovechnost diskov koles iz perspektivnih materialovsovremennich legkovih avtomobiley i motociclov* (The strength and durability of the drive wheels of the most promising materials in modern passenger cars and motorcycles), diss. … k. t. n. Moscow, 2004.

6. Batrak N.I. *Sozdanie matematicheskih modeley dlya analisa povedeniya konstruktsii kolesa v usloviyah ispitaniy* (Creation of mathematical models for analyzing the behavior of the wheel structure under test conditions), Voprosy prochnosti, dinamiki i proectirovaniya konstruktsiy: sbornik MADI, Moscow, 2004, pp.13–23.

7. Demiyanushko I.V., Loginov E.M., Mironova V.V., Vachromeev A.M. *MGIU*, 2014, № 12, pp. 42–49.

8. Demiyanushko I., Mironova V. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, Vol. 23, № 3, p. 53–55.

9. Mironova V.V. *Issledovaniya napriagenno-deformirovannogo sostoyaniya litih aluminievich fvtomobilnich koles pri udarnich nagruzkah* (Research of stressed-strained state of cast aluminum road wheels to shock loads), diss. … k. t. n., Moscow, 2012.