
Современное состояние методов расчетного анализа прочности и надежности колес автотранспортных средств

Демьянушко И.В., Миронова В.В., Логинов Е.М.

МАДИ

+7 499 1550303, demj-ir@mail.ru

Аннотация. Выполнен обзор современных подходов к анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) колес автотранспортных средств, показано, что в основе расчетов, как усталостной прочности, так и сопротивления удару, лежит расчет НДС колеса в условиях стендового нагружения с использованием метода конечных элементов. Приведены примеры расчетов, выполненных в МАДИ.

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

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.

1. Определение напряженно-деформированного состояния колес при статических нагрузках

При расчетах напряженно-деформированного состояния (НДС) стальных тонкостенных колес обычно применялись методы теории тонких пластин и оболочек, как и для расчета шин (анизотропных оболочек), 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). Колесо рассматривается на основе этих предпосылок как осесимметричная тонкостенная конструкция при неосесимметричном нагружении (работы МАМИ – И.В. Балабин и др. [4, 5]) 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 [1 – 3] и служит для сравнения различных вариантов конструкций, выбора материалов и технологии на этапе проектирования.

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 (исследования 1980 – 1990 гг.).

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

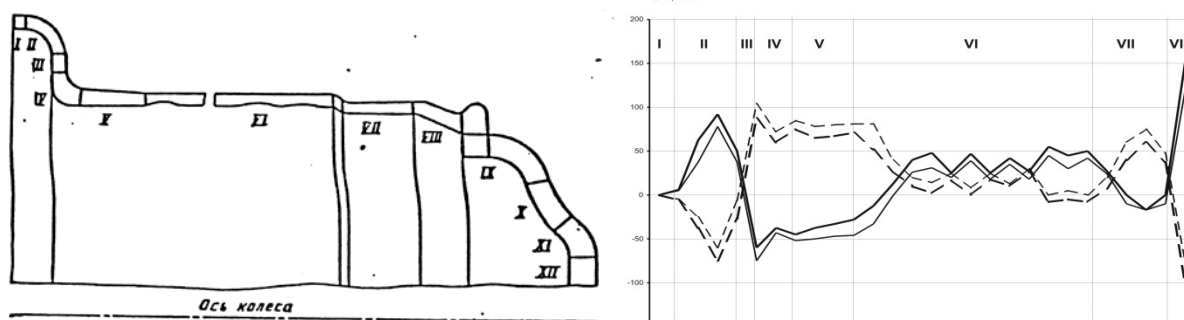


Рисунок 1. Схема расчета стального грузового колеса как системы оболочек и распределение НДС в ободе колеса

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.

Базой современной методологии расчетно-проектировочного анализа прочности колес автомобилей, развиваемой в МАДИ начиная с 1987г., 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. 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.

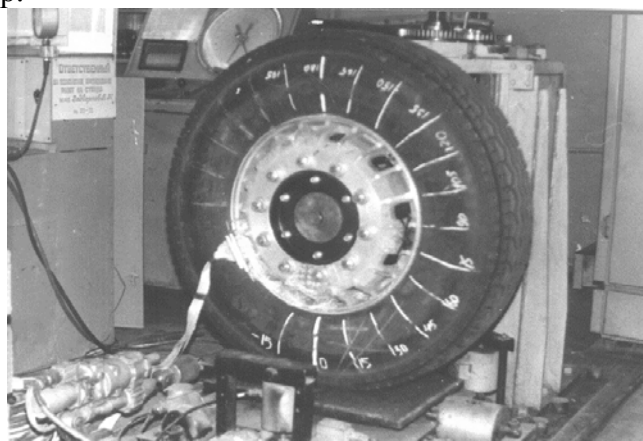


Рисунок 2. Литое алюминиевое колесо грузового автомобиля с шиной, при тензометрировании

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.

Первые конечно-элементные модели (КЭ модели) для расчета колес появились примерно в 80-х годах, они также были оболочечными, что упрощало расчет пространственных

осесимметричных конструкций, но не позволяло учитывать объемные участки и рассчитывать места крепления и контакта (пример на рисунках 3 и 4).

Распределение напряжений в ободе 79-16

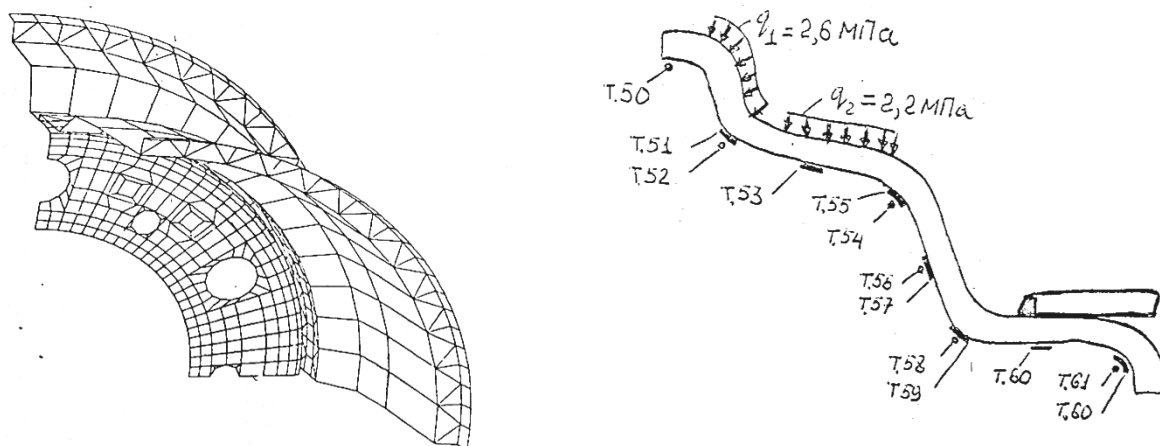


Рисунок 3. Расчетная схема нагрузок в ободе колеса легкового автомобиля

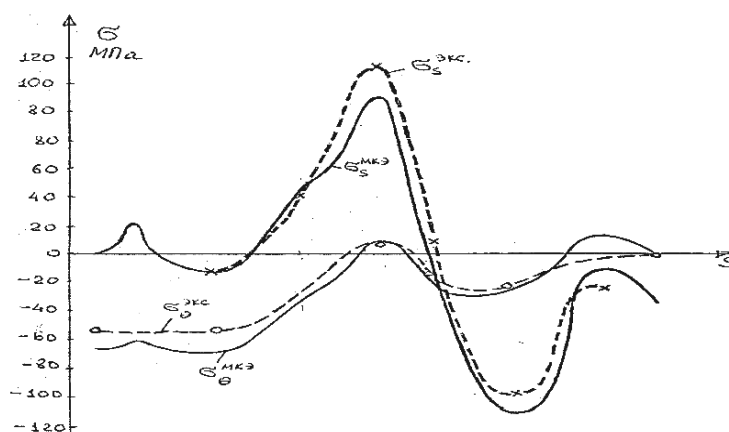


Рисунок 4 - распределение расчетных и экспериментальных (по данным тензометрирования) значений окружных и меридиональных напряжений



Рисунок 5. Этапы создания КЭ модели для расчета литого алюминиевого колеса сложной геометрии с использованием комплекса МКЭ «BASYS +» (слева вверху – твердотельная модель, справа - сетка МКЭ, внизу – распределение главных напряжений в колесе)

Использование современного программного комплекса МКЭ, развитого в МАДИ – «BASYS +», позволило уже в 90-х годах начать расчетные исследования пространственного НДС в колесах, что было в первую очередь необходимым для анализа колес из легких сплавов, которые обладают сложной пространственной конфигурацией, материал колес чувствителен к концентрации напряжений и неоднороден по всему колесу. За рубежом такие исследования проводились в основном в Германии и также относятся к этому же периоду (расчет-

но - экспериментальные исследования V.Grubisic, G.Fischer, G. Woelke и др.).

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.

Этапы создания КЭ модели для расчета литого алюминиевого колеса сложной геометрии (Н.И. Батрак и др.) с использованием программного комплекса «BASYS +» с препост-процессором «GNOM» [6] показаны ниже на рисунке 5.

В этих расчетах уже практиковалась имитация нагружения на испытательном стенде по схеме «изгиб с вращением» в соответствии с ГОСТ Р 50511-93 для оценки циклической долговечности колес.

2. Использование КЭ моделирования для анализа усталостной прочности колес

Испытания колес на усталостную прочность 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.

Развитие КЭ моделирования при использовании программных инструментов MSC.Software позволило решить ряд задач анализа НДС в колесах различных конструкций с учетом технологических особенностей изготовления и разработать методику оценки их усталостной прочности. 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. При вращении колеса на стенде с приложением поперечного усилия к рычагу в точках колеса напряжения в общем случае меняются по симметричному циклу. Однако для сборных колес усилия натяга при сборке создают дополнительные постоянные напряжения, таким образом суммарные напряжения в точках колеса меняются по асимметричному циклу. Этот факт надо учитывать как при разработке моделей, так и в расчетах выносливости по данным этих расчетов.

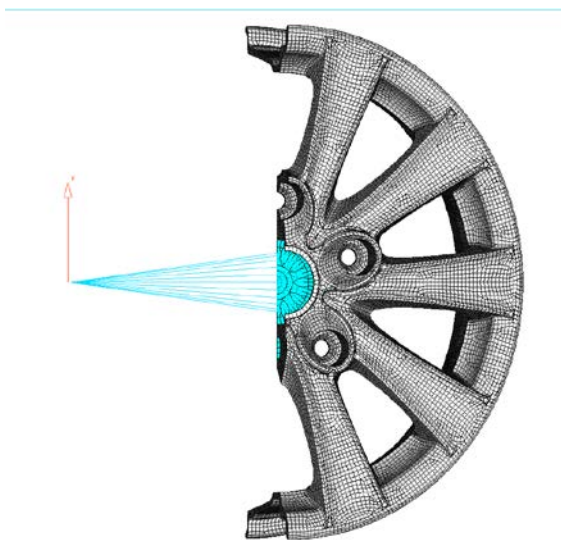


Рисунок 6. КЭ модель колеса, разработанная Н.И. Батраком, для расчета циклического нагружения

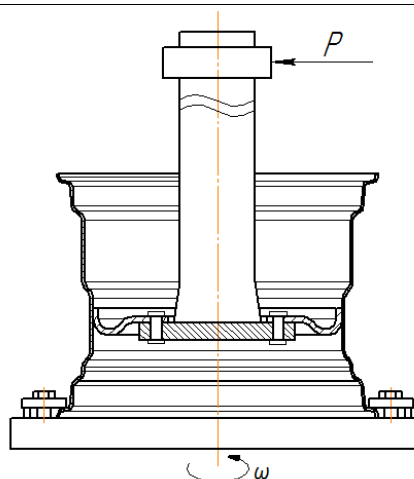
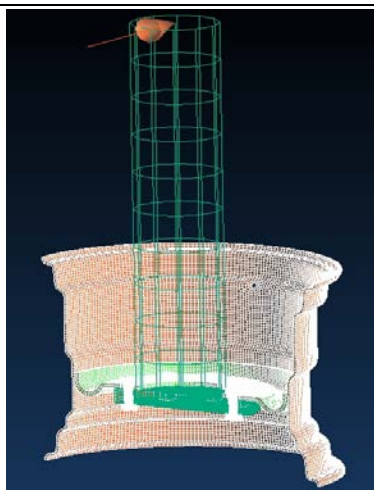
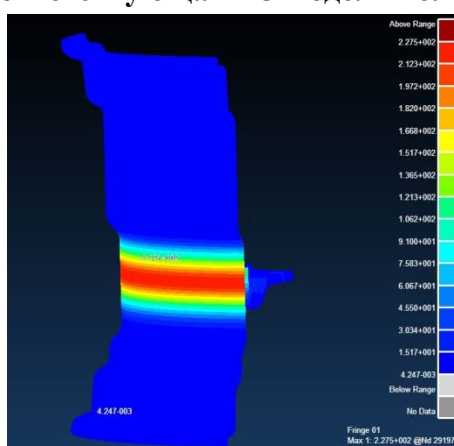
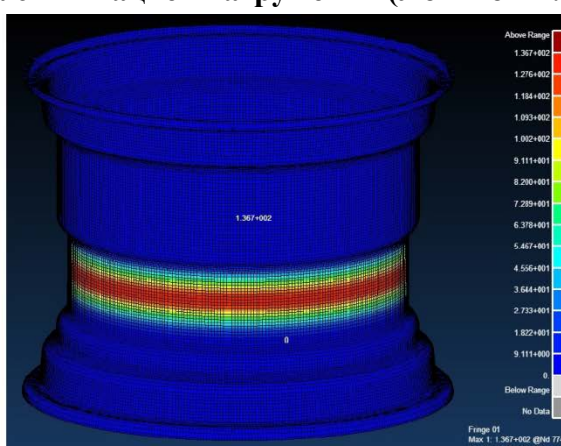


Рисунок 7. Схема стенда для усталостных испытаний колес на «изгиб с вращением» и соответствующая КЭ модель колеса с имитацией нагружения (Логинов Е.М.)



а)



б)

Рисунок 8. Распределение напряжений по Мизесу на поверхности обода в условиях натяга 0,4 мм (а) и 0,25 мм (б)

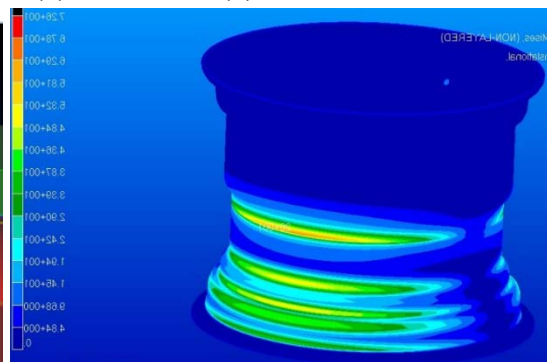
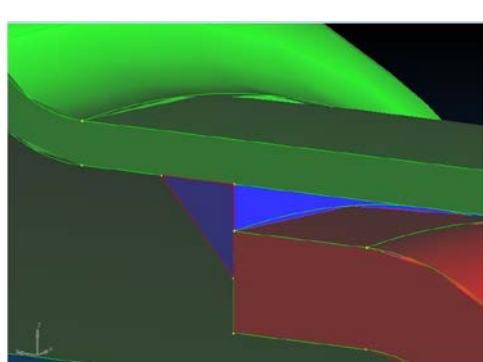


Рисунок 9. Твёрдотельная модель стыка обода с диском со сварным швом и распределение напряжений (по Мизесу) при нагружении симметричным циклом на стенде без натяга (плотный контакт)

Этот подход был успешно использован для выявления причин возникновения трещин усталости в сварных швах сборных стальных колес большой размерности для сельхозмашин (работа проводилась В.В. Мироновой, Е.М. Логиновым, А.М. Вахромеевым) [7]. Были выполнены многочисленные вариантные расчеты при различных значениях сборочного натяга между диском и ободом при наличии и отсутствии сварного шва, исследования позволили дать рекомендации по выбору оптимального натяга при сборке колеса с ободом. Для определения усталостных характеристик материала в конструкции с учетом технологии сварки бы-

ли изготовлены образцы – полосы (темплеты), вырезанные из готового колеса. 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 рисунке 8.

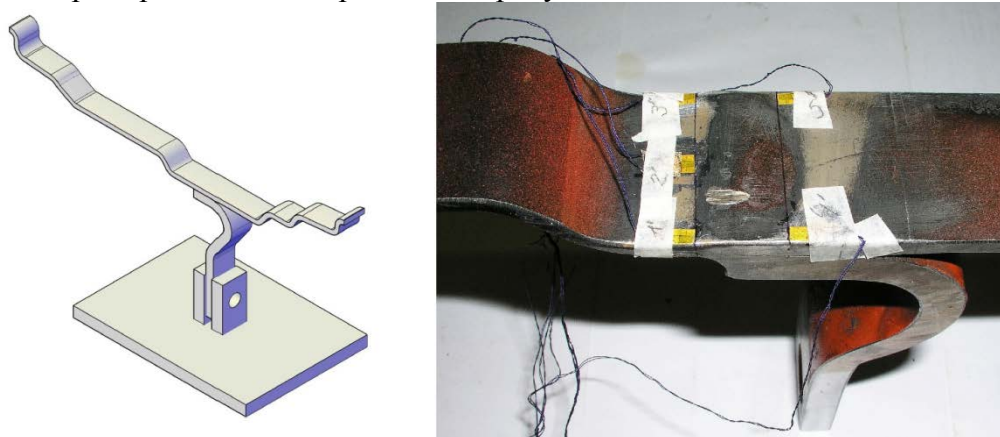


Рисунок 10. Вид темплета для определения усталостных характеристик материала колеса с учетом сварного шва

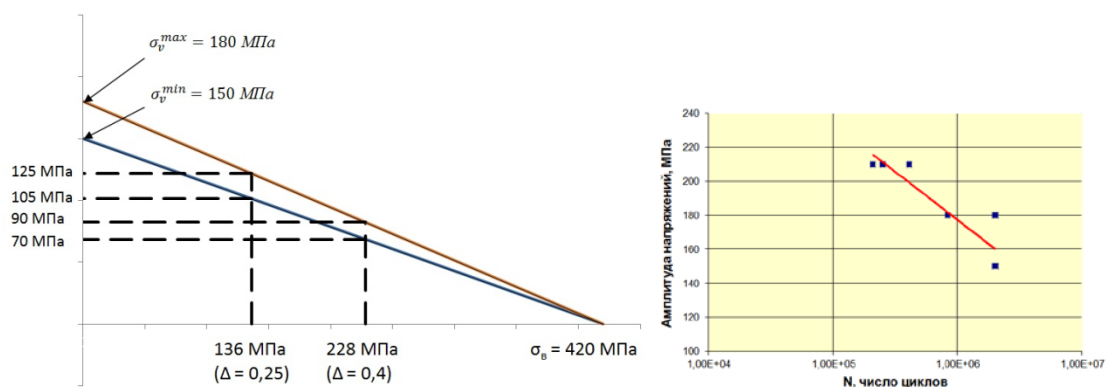


Рисунок 11. Справа – экспериментальная диаграмма усталости, слева – расчетная схематизация

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа усталостной прочности колеса

	Амплитуда напряжений σ_a	Среднее напряжение от натяга σ_m	Предел выносливости с учетом асимметрии цикла σ_{av}	Результат
Зазор между диском и ободом, контакт по сварному шву	172	0	150-180	Возможное разрушение в области шва
Натяг между диском и ободом $\Delta=0,25$	73	136	125-105	Запас по выносливости около 1,7
Натяг между диском и ободом $\Delta=0,4$	73	228	70-90	Возможное разрушение в области шва

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].

Ниже на рисунке 10 слева показан темплет, который испытывался на усталостном стенде для получения исходных усталостных характеристик колеса в месте сварного шва.

Таким образом, конечно-элементный анализ позволяет с достаточной точностью прогнозировать усталостную долговечность колес различной конфигурации на стадии проектирования.

3. 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. С этой целью была разработана инженерная методика расчетной оценки ударной прочности колес с использованием в основе расчета НДС в колесе при статическом нагружении (работа В.В. Мироновой, Е.М. Логинова) [8, 9].

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 (рисунок 12). 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.

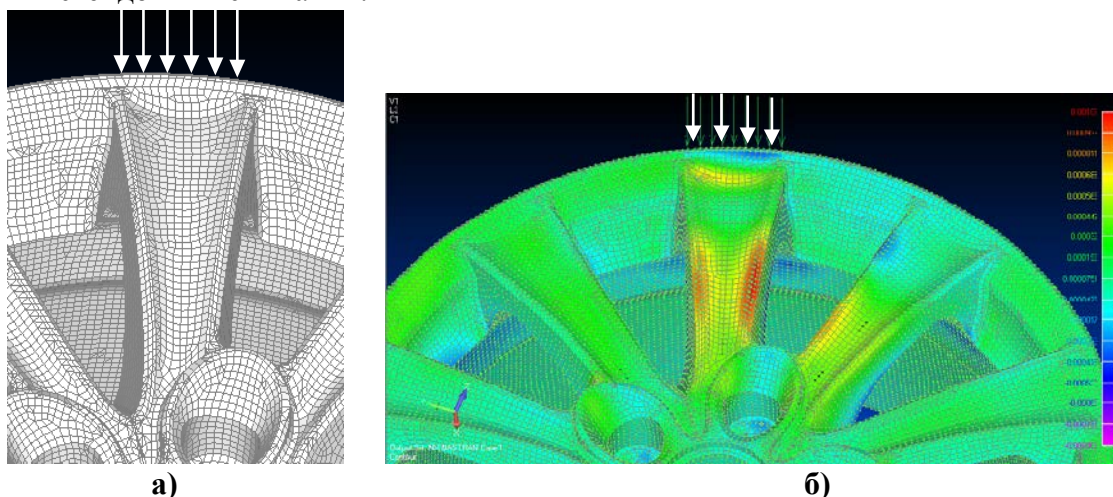


Рисунок 12. КЭ модель литого алюминиевого колеса при статической нагрузке, имитирующей нагрузку на ударном стенде, а) – модель, б) – распределение деформаций в колесе (расчеты проведены Е.М. Логиновым)

Расчетные исследования НДС алюминиевых литых колес также проводились МКЭ с использованием комплекса MSC.NASTRAN, причем расчетные модели тщательно верифицировались с использованием данных тензометрии (рисунок 13).

Было показано, что если приближенно считать систему стенд – колесо системой с одной степенью свободы (пренебрегая массой колеса по сравнению с грузом), то коэффициент поглощения можно определить как:

$$\varphi = 1 - e^{-2nT} \approx 2nT \approx 2\delta,$$

и логарифмический декремент затухания составляет для литого алюминиево-кремниевого сплава примерно:

$$\delta = \ln \frac{A_s}{A_{s+1}} \approx 0,3 - 0,35.$$

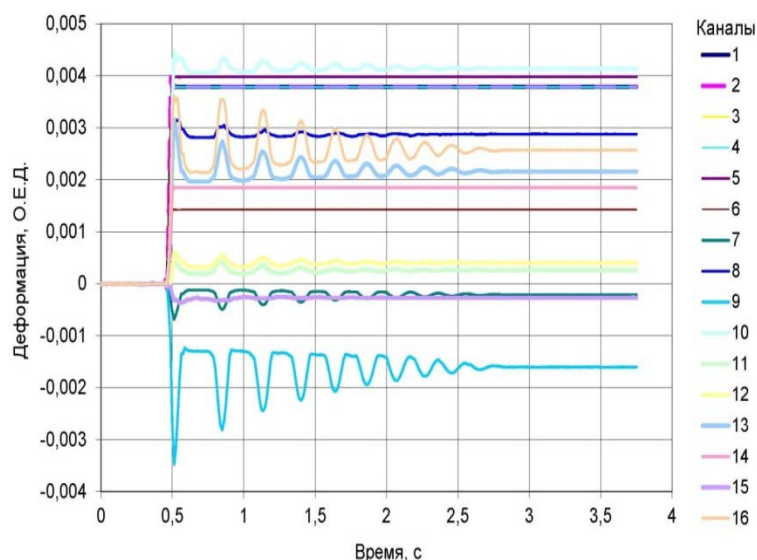


Рисунок 13. Результаты динамического тензометрирования колеса при ударе на ударном стенде (работа В.В. Мироновой)

Проведенные исследования позволили установить, что среднее значение динамического коэффициента при ударе в испытаниях на ударном стенде для литых колес практически не зависит от геометрии колеса и составляет $K_d = 10 - 11$, так что расчетное значение деформаций при ударе приближенно оценивается как:

$$\varepsilon_{уд.}^{расч.} = K_{д. ср.} \cdot \varepsilon_{стат.}^{расч.}$$

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 расчетный конечно-элементный анализ НДС в колесе в условиях стендового нагружения для соответствующих сертификационных испытаний, причем КЭ модели, как конструкции, так и нагрузок, должны учитывать как особенности стендового нагружения, так и технологию изготовления колеса.

Литература

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 (Е/ECE/324, Е/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. ... к.т.н. 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 / МГИУ. 2014. № 12. С. 42–49.
 8. Demiyanyushko I., Mironova V.. 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. ... к.т.н. М., 2012.