На правах рукописи

Логинов Евгений Михайлович

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОЛЕС АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в **Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»** на кафедре «Автомобили».

Научный руководитель:	Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор **Демьянушко Ирина Вадимовна**
Официальные оппоненты	**Русанов Олег Александрович** доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», профессор кафедры «Наземные транспортные средства»
	Карташов Александр Борисович кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет), доцент кафедры СМ-10 (Колесные машины)
Ведущая организация:	**ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»**

Защита диссертации состоится « 26 » июля 2017 г. в $13^{\underline{00}}$ часов на заседании диссертационного совета Д 217.014.01 при ФГУП «НАМИ» по адресу: 125438, г. Москва, ул. Автомоторная д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте www.nami.ru по ссылке: http://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу, ученому секретарю диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru

Автореферат разослан « 25 » мая 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Курмаев Ринат
Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Колеса являются основным видом движителя для автомобилей и наземных транспортных средств (ТС). Особенности конструкции колес оказывают влияние на параметры таких эксплуатационных свойств ТС, как тягово-скоростные, безопасность, плавность хода и топливная экономичность. От их надежности в значительной степени зависит безопасность пассажиров и общая безопасность на дорогах. Разрушение колеса (имеется в виду сама конструкция колеса без шины, часто называемая диском) обычно приводит к дорожно-транспортным происшествиям (ДТП), связанным с опрокидыванием автомобиля, потерей управления. Не менее важной проблемой является обеспечение прочности и долговечности колес машин сельскохозяйственного назначения (тракторов, комбайнов). В связи с этим, к прочности колес ТС, определяющей такие свойства надежности как безотказность и долговечность, предъявляются особые требования. Условием допуска готового изделия к установке на ТС и к дальнейшей эксплуатации является успешное прохождение обязательных сертификационных испытаний, определяемых нормативными документами. Цель испытаний заключается в проверке способности колеса выдержать без разрушения и (или) появления видимых трещин нагрузки, возникающие как при длительной эксплуатации при движении ТС по дороге, так и при нештатных ситуациях - при ударе, который может быть связан с ударом в бордюр, парапетное дорожное ограждение, при столкновении со встречным ТС.

Нагрузки, действующие на колесо в эксплуатации, зависят от множества параметров (характеристик автомобиля, параметров движения, характеристик дороги и т.д.) и носят стохастический характер. При сертификационных испытаниях нагрузки, реализуемые в условиях стендов, являются осредненными типовыми по отношению к эксплуатационным. В связи с этим принято проводить комплекс проектных расчетов при условиях нагружения, соответствующих нормативным сертификационным испытаниям на усталость и на удар. Этот подход позволяет использовать соответствующие расчеты также для сравнительного анализа конструкций, как при проектировании, так и при доводке изделий.

В настоящее время конструкции колес чрезвычайно многообразны. При их производстве применяются различные материалы и технологии. При этом особенности конструкций колес определяли и до настоящего времени определяют различные подходы к расчету колеса на прочность при различных условиях нагружения. Для оценки прочности, усталости, сопротивления удару колеса первоначально определяется его напряженно-деформированное состояние (НДС). До относительно недавнего времени при расчетах НДС колес использовались решения, основанные на теории тонкостенных оболочек в упругой области. Очевидно, что такой подход не дает возможность учесть все особенности конструкций колес и не позволяет адекватно оценить прочность колеса при различных условиях нагружения. Применение метода

конечных элементов (МКЭ) для расчета НДС колес до недавнего времени ограничивалось теми же оболочечными моделями, причем расчеты проводились на предметно-ориентированных программах, в упругой области и только при статическом нагружении. Работы по экспериментальной оценке НДС колес ТС показали, что эти исследования важны для принципиального понимания работы конструкции, особенно при ударных нагрузках. Однако для сравнения различных вариантов колеса при проектировании и доводке конструкции экспериментальный анализ является весьма трудоемким и затратным.

Интенсивное развитие компьютерной техники и необходимых в проектно-конструкторской деятельности IT-систем позволяет в настоящее время создавать математические модели изделий и моделировать происходящие с изделием процессы в течение его жизненного цикла. С помощью специальных универсальных инженерных программных комплексов, основанных на использовании МКЭ, стало возможным моделировать работу колеса ТС под действием всех возможных нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации или испытаний. Вместе с тем, комплексный метод расчетной оценки, позволяющий создавать расчетные модели колес различного типа и определять НДС изделий под действием различных нагрузок, а также производить оценку прочности и долговечности колеса на этой основе, в настоящее время отсутствует. Обоснованно разработанные конечно-элементные модели (КЭ-модели) различных конструкций колес могут позволить предприятиям-разработчикам сократить затраты на промежуточные испытания конструкций с целью их дальнейшей доводки и оптимизации. В связи с этим представляется актуальной разработка комплексного метода расчетной оценки НДС колес ТС различных конструкций и технологий изготовления, содержащего обоснованную последовательность методик расчетов, основанных на базе современных расчетных программных комплексов КЭ-анализа, формулировка адекватных рекомендаций по созданию КЭ-моделей колес различной конфигурации и по проведению расчетно–экспериментального анализа прочности и надежности (долговечности) колес ТС при разных видах нагружения.

Цель работы: разработка комплексного метода расчетной оценки НДС колес ТС под действием нагрузок, реализуемых при стендовых сертификационных испытаниях (циклическом усталостном и ударном нагружениях), на основе МКЭ с использованием современных универсальных программных комплексов инженерного анализа, а также сравнительного анализа прочности и долговечности колес различных конструкций, выполненных по наиболее широко применяющимся технологиям из разных материалов на основе результатов определения НДС. Методики, входящие в состав разработанного метода, должны дать возможность пользователям адаптировать их под конкретные условия испытаний (например, менять угол расположения колеса относительно горизонтальной поверхности при испытаниях литых колес на удар, учитывать использование стендов различной конструкции и т.п.) и применять к различным конструкциям колес ТС.

Задачи работы:

1. Разработка методики создания типовых КЭ-моделей для колес различной геометрической формы (в первую очередь - литых алюминиевых колес сложной геометрии, сборных колес);
2. Разработка методики расчетного исследования НДС различных конструкций колес под действием циклических нагрузок (усталостного нагружения) в условиях сертификационных испытаний с учетом упругопластического деформирования;
3. Разработка методики исследования НДС в колесе под действием ударных нагрузок, реализуемых на стенде, на котором проводятся сертификационные испытания;
4. Сопоставление результатов экспериментов, проведенных с объектами исследования, с данными расчета НДС их КЭ-моделей;
5. Разработка методик сравнительного анализа прочности и долговечности колес различных конструкций, выполненных по наиболее широко применяющимся технологиям и из разных материалов на основе результатов моделирования НДС.

Объект исследования. Типовые конструкции современных колес ТС - литое колесо из высокопрочного алюминиево-кремниевого сплава для легковых автомобилей, и стальное сборное штампованное колесо на примере колеса, предназначенного для эксплуатации на машинах сельскохозяйственного назначения.

Предмет исследования. Разработка комплексного метода расчетного анализа НДС различных типов колес ТС при различных типовых нагрузках, возникающих при движении ТС, с использованием современного аппарата численного анализа на основе МКЭ и использования с этой целью современных программных комплексов; оценка результатов с использованием экспериментальных данных и исследование прочности и долговечности колес на этой основе с целью повышения их надежности, выносливости, безопасности, а также снижения затрат предприятий на проектирование и доводку конструкции.

Методы исследования. Применяются положения теории автомобиля, разделов механики деформируемого твердого тела (сопротивление материалов, строительная механика, теория конструкционной прочности, теория механических колебаний и удара). Основной расчетный инструмент: метод конечных элементов (МКЭ) с использованием лицензионного программного МКЭ-комплекса инженерного анализа MSC.Patran в совокупности с решателями MSC.Nastran и MSC.Fatigue, а также решателя LS-Dyna. Экспериментальная база: методы и результаты испытаний образцов из материалов колес для получения данных об их физико-механических свойствах, а также испытаний рассмотренных конструкций колес на усталость и ударную прочность на аккредитованных сертификационных стендах лаборатории МАДИ.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечена применением широко апробированного лицензионного программного комплекса МКЭ MSC.Patran с решателями MSC.Nastran и MSC.Fatigue, решателя LS-Dyna, специального аккредитованного испытательного оборудования при проведении экспериментов, тщательным контролем условий проведения испытаний и сопоставлением результатов экспериментальных исследований с данными проведенных расчетов.

Научная новизна:

1. Разработана методика создания адекватных, экспериментально апробированных КЭ-моделей конструкций автомобильных колес сложной геометрической формы для расчета на ударные нагрузки. Приведены требования к качеству конечных элементов, разработан алгоритм создания сеток КЭ.
2. Разработана методика исследования НДС колес с учетом упругопластического деформирования и оценки на этой основе усталостной прочности и долговечности для литых алюминиевых и стальных, в том числе, сборных штампованных колес с учетом технологии изготовления.
3. Предложена и подтверждена целесообразность КЭ-моделирования поведения колес при условиях стендовых испытаний в сборе с основными элементами испытательного стенда. Сформулирован основной критерий включения элементов стенда в основу расчетной схемы.
4. Разработана методика численного моделирования НДС литого алюминиевого колеса с использованием аппарата МКЭ под действием ударных нагрузок.

Практическая значимость. Применение разработанного комплексного метода позволит предприятиям сократить затраты на промежуточные испытания конструкций с целью их дальнейшей доводки и оптимизации. На стадии проектирования обеспечивается более точная оценка долговечности и ударной прочности конструкции в течение жизненного цикла. Особенно важно, что рекомендации по составлению КЭ-моделей и расчетам МКЭ могут быть легко использованы при применении любых известных универсальных инженерных комплексов МКЭ (ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS и др.).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования были использованы для развития методик испытаний сертификационным предприятием ООО «ИЛКА-МАДИ», внедрены в ПАО «Кременчугский колесный завод» для расчетов на усталостную прочность и долговечность штампованных колес, а также в процессы анализа прочности литых колес на производственном предприятии ООО «ПРОМА колеса из легких сплавов». Разработанные модели и методики активно используются в учебном процессе кафедры «Строительная механика» и кафедры

«Автомобили» ФГБОУ ВО МАДИ и в работе «Центра компетенции MSC.Software – MADI».

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика создания типовых конечно-элементных моделей колес ТС сложной геометрической формы;
2. Методика формулировки граничных условий и приложения нагрузки к КЭ-модели исследуемого объекта в различных условиях нагружения колеса;
3. Методика моделирования нагружающих элементов испытательных стендов (для испытаний по схеме "изгиб с вращением" и для испытаний на удар);
4. Методика расчетного анализа прочности колеса при ударном воздействии МКЭ с использованием разработанных моделей и ее экспериментальное обоснование;
5. Методика сравнительной оценки прочности и долговечности колес на основе расчетного анализа МКЭ;
6. Обоснование эффективности предложенного метода расчетной оценки прочности и надежности колес автотранспортных средств.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены и обсуждены на Международных конференциях молодых ученых МИКМУС-2011 и МИКМУС-2014 (Москва, ИМАШ РАН, декабрь 2011 и 2014 гг.), на ежегодных научных конференциях ФГБОУ ВО МАДИ (Москва, 2009-2017 гг.), «Международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России» (Москва, МГМУ (МАМИ), март 2012 г.) и на Международной конференции по теории механизмов и машин IFToMM-2014 (г. Тяньцзинь, КНР, 2014 г.). Работа по исследованию усталостной прочности штампованных колес докладывалась на 14-м Мировом конгрессе по теории механизмов и машин IFToMM (г. Тайпей, Тайвань, 2015 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 4 статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, списка использованной литературы (115 наименований) и 1 приложения. Текст изложен на 134 страницах машинописного текста, содержит 9 таблиц и 62 иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальные проблемы анализа прочности колес автотранспортных средств. Показано, что анализ НДС колес ТС и оценка их прочности и долговечности являются частью общей системы обеспечения полного жизненного цикла колеса и надежности ТС. Сформулированы цели и задачи исследования. Приведены аргументы в пользу актуальности темы и рассмотрена новизна и практическая значимость результатов работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ существующих конструкций колес ТС, рассмотрены основные нагрузки, применяемые материалы, технологии изготовления и стандартные методы испытаний, регламентирующие прочность и долговечность колес ТС. Изложен анализ работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных оценке НДС колес. Рассмотрены публикации И.В. Балабина, Н.И. Батрака, А.И. Белова, Г.И. Белякова, В.Л. Бидермана, А.М. Вахромеева, Э.И. Григолюка, И.В. Демьянушко, В.В. Зорина, Н.А. Зубарева, Н.С. Карташова, В.В. Мироновой, В.А. Путина, И.С. Чабунина, H. Arldt, M. Billal, C. Chang, R.A.C. Fosberry, P. Glance, V. Grubisic, G. Himmler, H. Konishi, I. Korchiro, M. Polzin, A. Rupp, R. Ridder, M. Riesner, R. DeVries и других авторов.

Первые труды, посвященные проблемам прочности колес ТС, стали появляться в 40х-50х годах XX в. Рассмотрено развитие исследований, как отдельных ученых, так и научных школ и промышленных предприятий, таких как: МАДИ, МАМИ, НАМИ, ОАО «АвтоВАЗ», Ford Motor Company, Fraunhofer Institut fuer Betriebsfestigkeit и ряда других.

К первым отечественным работам, посвященным исследованию прочности колес, относятся работы В.Л. Бидермана, которым была предложена до настоящего времени использующаяся формула определения давления, действующего на бортовую закраину колеса от взаимодействия с шиной, И.В. Балабина, где впервые были экспериментально определены нагрузки, действующие на колеса в эксплуатации. В совместных работах И.В. Балабина, Э.И. Григолюка с соавторами были рассмотрены первые оболочечные расчетные схемы колес.

Кратко изложено описание широко использовавшихся ранее методов расчета, основанных на теории тонких пластин и оболочек и применяемых, преимущественно, к расчету тонкостенных штампованных колес. Необходимость дальнейшего усовершенствования методов расчета НДС колеса обусловлена появлением в автомобилестроении колес сложной геометрической формы, в частности, выполненных методом литья из высокопрочных алюминиевых сплавов. Применение оболочечных расчетных схем к таким конструкциям приводит к значительным погрешностям. Проектирование и доводка таких колес без предварительного расчетного анализа является затратным и длительным процессом, не всегда приводящим к оптимальному результату.

Широко развиваемый для расчета конструкций сложной формы метод конечных элементов (МКЭ) оказался эффективным расчетным инструментом для анализа НДС в колесе. Показано, что модели колес с использованием МКЭ постепенно развивались от традиционных оболочечных до объемных трехмерных. Однако, все рассмотренные исследования, как зарубежные, так и отечественные, посвящены в основном частным вопросам, касающимся конкретной конструкции и одного вида нагружения. Мало работ по экспериментальной оценке адекватности расчетных результатов.

Анализ показал, что, несмотря на значительное количество опубликованных работ, в настоящий момент отсутствует комплексный метод

расчетного анализа колес ТС, содержащий обоснованную последовательность методик расчетов, основанных на определении НДС в колесе на основе современного аппарата моделирования МКЭ, позволяющих с максимальной точностью учесть характер геометрического профиля исследуемых колес, учитывать технологию их изготовления и комплексно решать задачи анализа НДС колес в условиях ударного нагружения в динамической постановке и оценки усталостной циклической долговечности с учетом упругопластического деформирования на различных стадиях их жизненного цикла.

Приводится характеристика колес-объектов исследования: литого из алюминиево-кремниевого сплава типа 7Jx16” (рисунок 1, а) и сборного стального тракторного типа DW20-26 (рисунок 1, б).

(а) (б)

Рисунок 1 – литое колесо легкового автомобиля из алюминиевого сплава (а), колесо стальное тракторное, сборной конструкции (б)

Вторая глава посвящена разработке методики создания расчетных схем колес (КЭ-моделей) для получения адекватных решений задач на основе МКЭ с использованием современного аппарата компьютерных программных комплексов. Разработка адекватной расчетной схемы является одним из важнейших разделов комплексного метода, от ее качества зависит весь результат анализа. КЭ-модели создаются с использованием аппарата универсального программного комплекса инженерного анализа МКЭ MSC.Software Patran[1], однако, как показывает наш опыт, эти разработки с успехом могут быть использованы и в других известных универсальных программных комплексах.

Поскольку достоверность расчетов и скорость их выполнения в значительной степени зависят от выбранного типа элементов и их качества, решению этой проблемы уделено особое внимание. Перед описанием разработанной технологии создания КЭ-сетки рассмотрены основные типы конечных элементов, возможные области их применения, сформулированы критерии качества конечных элементов, постоянный контроль которых позволяет обеспечить необходимую точность расчета, что особенно важно в расчетах на удар. Необходимость и достаточность данных критериев, а также их предельных значений, проверена эмпирическим путем на примере

[1] www.mscsoftware.ru/products/patran

выполнения расчета на сопротивление удару литого алюминиевого колеса. Приводятся рекомендации по выбору размера конечного элемента.

Создание КЭ-сетки автоматическими инструментами в настоящее время возможно только с использованием тетраэдральных элементов. Создание КЭ-модели колеса, состоящей, преимущественно (или исключительно), из 6-ти узловых призматических и 8-ми узловых гексагональных элементов, выполняется в полуавтоматическом или ручном режиме, в зависимости от сложности объекта. Геометрия моделей простой геометрической формы, к которым относятся штампованные колеса, позволяет создавать элементы, не придерживаясь строгого алгоритма и, при необходимости, возвращаться на несколько шагов назад для изменения параметров сетки при незначительном изменении трудозатрат. Геометрия же литого алюминиевого колеса характеризуется множеством поверхностей различного порядка, имеющих довольно сложный профиль линий пересечения, и задача создания КЭ-массива с применением преимущественно 8-ми узловых гексагональных элементов требует бóльших трудозатрат. Исправление ошибок, особенно допущенных на начальном этапе генерации элементов, значительно увеличивает длительность создания модели. В связи с этим, предложена методика создания КЭ-сетки, представляющая собой процесс, состоящий из 4х последовательных этапов (рисунок 2).

Рисунок 2 - Процесс создания КЭ-модели из 6-ти узловых призматических и 8-ми узловых гексагональных элементов на верхнем уровне

В рамках первого этапа рассматриваются процедуры и возможные техники некоторого упрощения геометрии, как подготовительного шага перед созданием КЭ-сетки. Уделяется внимание вопросу конгруэнтности первичной геометрии. Второй этап - планирование, который сводится к разработке последовательности действий по созданию КЭ-массива и выбору адекватных данной последовательности инструментов генерации элементов. В случае с телами простого профиля, к которым относятся стальные колеса сборной конструкции, стадия планирования выражена в неявном виде и в большинстве случаев выполняется одновременно с созданием КЭ-сетки. Данный этап наиболее важен при полуавтоматической и ручной генерации КЭ-модели для конструкций литых колес сложной геометрии. В этом случае особенно важен сбор данных о тех результатах, которые необходимо проанализировать по завершении расчета (напряжения, перемещения, деформации, ускорения, их отдельные компоненты и т.д.). Установлено, что создание такой модели целесообразно начинать с наиболее сложных участков, далее перемещаясь к участкам, подлежащим полуавтоматической разбивке. Начальным участком выбирается обычно ступичная зона, концентрирующая одновременно

поверхности слияния со спицей, декоративные фаски крепежных отверстий, поверхности центрального и крепежных отверстий и вентиляционные колодцы. С целью обеспечения оптимального размера элемента используются техника сгущения или укрупнения сетки. В созданной по разработанной методике типовой конечно-элементной схеме исследуемого литого алюминиевого колеса (рисунок 3), количество узлов в 4,6 раз меньше, а количество элементов – более чем на порядок меньше по сравнению с моделью, созданной стандартно доступными инструментами автоматического создания КЭ-массива, который ранее использовался для расчета этого колеса.

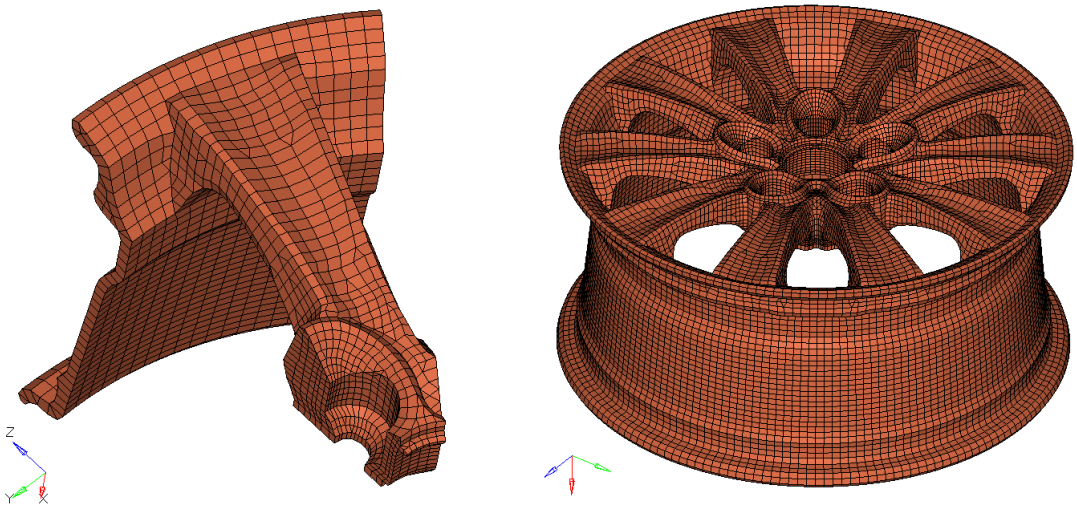
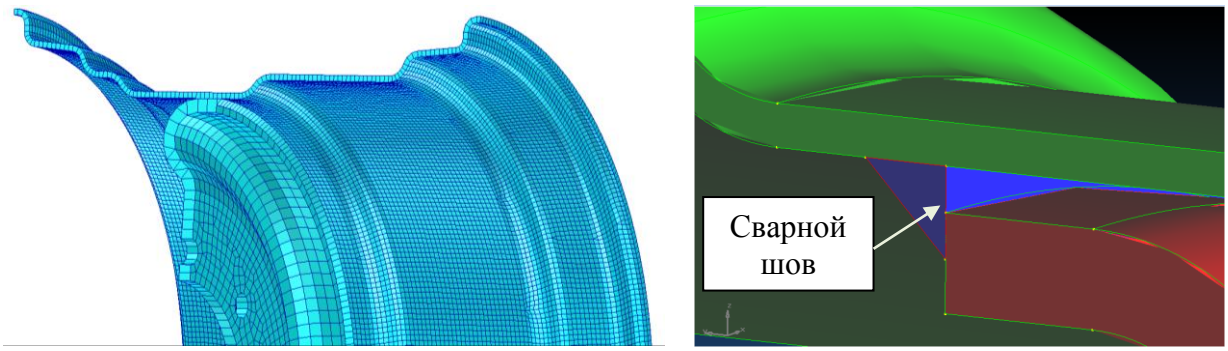


Рисунок 3 – Пример КЭ-массива расчетной модели литого алюминиевого колеса типа 7J x16”, созданной по разработанной методике

В работе также рассмотрен учет контактных взаимодействий в расчетных КЭ-моделях, необходимый в большинстве случаев (при расчете сборных конструкций колес, учете контактов на плоскостях крепления колеса к стенду, контактов в зонах ботовых креплений). Отметим, что создание КЭ-модели для колес сборной конструкции (рисунок 4) выполняется по номинальным размерам. Вариация натяга (зазора) реализуется за счет изменения параметров контакта, рассмотренных в данной главе.



(а) (б)

Рисунок 4 –КЭ-массив стального сборного колеса типа DW20-26 с возможностью варьирования параметров натяга/зазора (а), вид модели расположения сварного шва (б)

Особенно важно обеспечить корректное распознавание контакта между элементами сборки колеса и его сохранение в процессе деформации объектов. Разработаны рекомендации по пропорциям между размерами КЭ-сетки контактирующих тел. Уделяется внимание параметрам, характеризующим зону поиска контакта.

В третьей главе изложены результаты исследований и разработки методики расчетной оценки усталостной прочности и долговечности различных конструкций колес на основе анализа НДС колес с применением МКЭ. Схемы нагружения соответствуют условиям испытаний по схеме «изгиб с вращением», регламентированным стандартами ГОСТ Р 52390-2005 для колеса легкового автомобиля и EUWA 3.12 для тракторного колеса сборной конструкции.

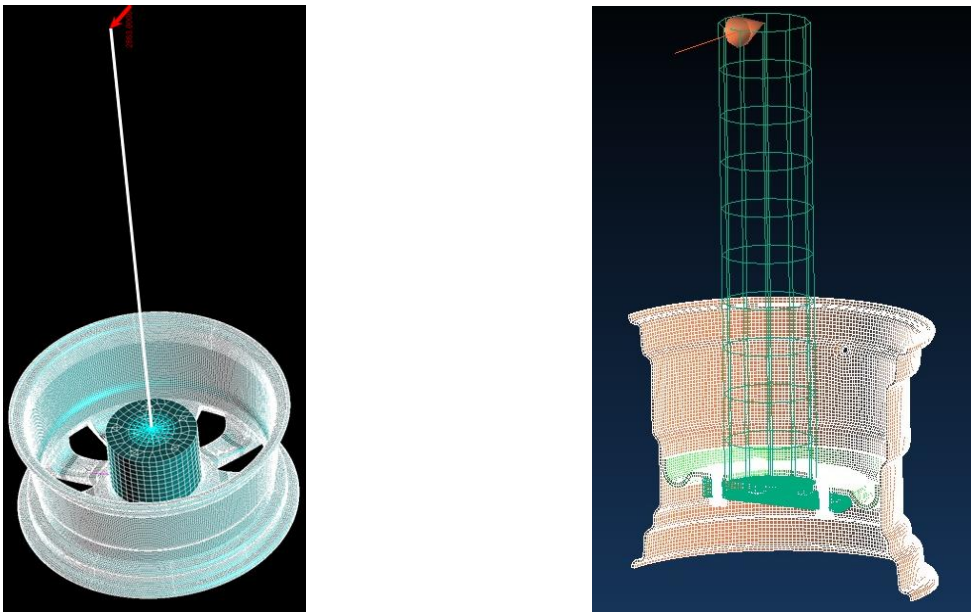
Расчет долговечности и усталостной прочности колес проводился с использованием расчетного комплекса MSC.Fatigue и путем аппроксимирующего расчета с использованием классической формулы Мэнсона (S.S. Manson), что, как показал анализ, дает близкие результаты.

Для сборной конструкции стального штампованного колеса в рамках созданной методики разработано решение технологической задачи, и даны рекомендации по определению рациональной величины натяга при посадке обода колеса на ступицу, что позволяет учесть большинство используемых в настоящее время конструктивных решений для сборных колес.

Исследования, проведенные для двух рассмотренных расчетных схем колес, показали, что адекватные результаты расчета могут быть получены только при включении в расчетную схему элементов конкретного испытательного стенда (рисунок 5) и моделирования фактического приложения нагрузок. Этот подход позволяет учесть полностью жесткость конструкции и обеспечить совпадение с экспериментальными результатами, что до настоящего времени в аналогичных известных исследованиях не делалось. Оценка НДС колес выполнялась при квазистатическом нагружении в упругопластической постановке методом переменных параметров упругости с применением решателя MSC.Nastran Sol400.

Для анализа НДС в литом колесе расчет выполняется для 20 вариантов нагружения (количество вариантов рекомендуется выбирать исходя из конфигурации колеса), в каждом из которых вектор действия нагрузки поворачивается последовательно на 18° относительно оси колеса, что позволяет имитировать в квазистатической постановке полный оборот колеса. В этом случае в опасных точках колеса практически имитируется симметричный цикл нагружения.

Расчет усталостной прочности и циклической долговечности для симметричного цикла нагружения выполнялся с использованием данных по экспериментально полученным характеристикам материала литого колеса – высокопрочного алюминиево-кремниевого сплава. На рисунке 6 показан вид одного из результатов расчета - распределение изолиний числа циклов до разрушения для окончательного варианта литого колеса, вычисленных в расчетном комплексе MSC.Fatigue.



(а) (б)

Рисунок 5 – КЭ-модели колес в сборе с элементами стендов, рекомендуемые для расчета усталостной прочности: литого (а) и сборного стального (б)

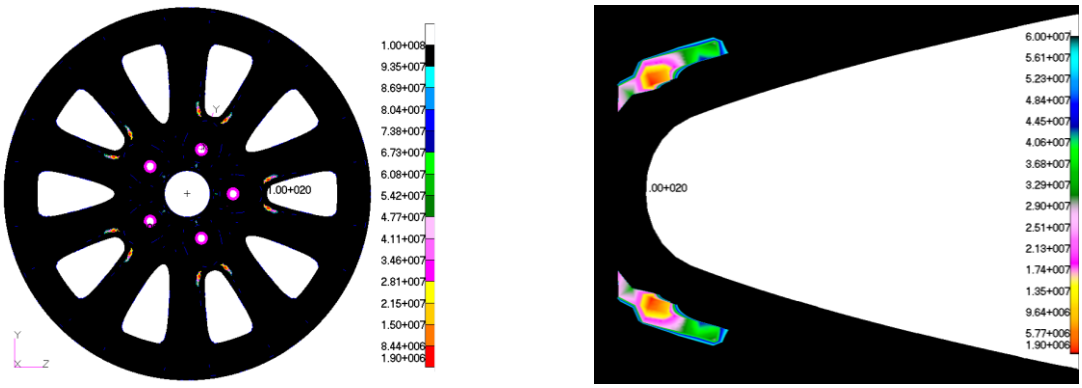


Рисунок 6 - Изолинии количества циклов до разрушения, распределенные по колесу – расчет литого алюминиевого колеса 7Jx16”

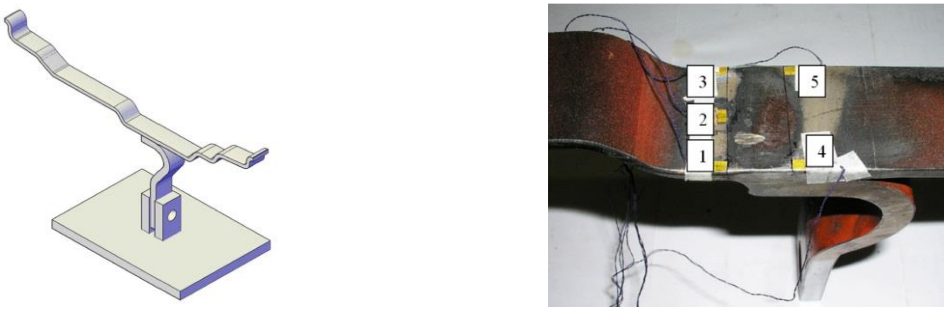
Окончательный вариант модели конструкции колеса был получен в результате доводки на предприятии–изготовителе по данным расчетов, проведенных в МАДИ, первоначально на комплексе BASYS+. Геометрия колеса в процессе доводки изменялась путем усиления в зоне концентрации напряжений, где в первом варианте конструкции при испытаниях были обнаружены усталостные трещины (рисунок 7).

Рисунок 7 – усталостные трещины в колесе и изменение геометрии (утолщение дано красным цветом) по результатам расчетов

Циклическая долговечность окончательной усиленной модели колеса превышает 10^7 циклов, что подтверждено результатами проведенных в МАДИ усталостных испытаний на изгиб с вращением и совпадает с результатами расчетов по предложенной методике.

Анализ НДС в сборном стальном колесе DW20-26 показал, что значения эквивалентных напряжений - интенсивности напряжений σ_i по Мизесу (R.V.Mises), определенные отдельно от технологического натяга и от нагрузки, находятся в упругой зоне, что позволяет рассматривать напряжения от натяга как среднее напряжение цикла нагружения σ_m, а напряжения от нагрузки при вращении, как амплитуду напряжений σ_a, соответственно.

Для определения усталостных характеристик материала проводились ускоренные усталостные испытания на вибраторе с применением нескольких образцов - темплетов (рисунок 8), вырезанных из колеса и ограниченных двумя параллельными сечениями перпендикулярно плоскости колеса с установленными тензорезисторами. Несмотря на то, что подобная конструкция образцов не учитывает окружную составляющую напряжений, она позволяет учесть в кривой усталости особенности технологии сварки и соответствующие изменения свойств материала и рассеяние характеристик. Испытания проводились по методу ступенчатого повышения нагрузки при различных значениях амплитуды возбуждения. Места установки тензорезисторов определялись путем расчета НДС темплета МКЭ при его свободных колебаниях.



(а) (б)

Рисунок 8 - Эскиз образцов для проведения испытаний на вибростенде (а). Схема установки тензорезисторов на образце (б)

По регистрации падения рабочей частоты наличие трещин выявлялось методом «проникающей краски». Полученные результаты использовались для построения диаграммы выносливости (рисунок 9). Показано, что при анализе усталостной прочности сборного колеса необходимо рассматривать все возможные варианты соединения диска с ободом: идеальная посадка при отсутствии натяга и зазора; посадка с зазором, и посадка с натягами различной величины. На рисунке 10 показано изменение пределов выносливости колеса в зависимости от перечисленных вариантов соединения. При этом за счет варьирования значений натяга в КЭ-схемах определяется оптимальный

диапазон значений натяга и, как следствие, определяется натяг, обеспечивающий максимальную долговечность колеса.

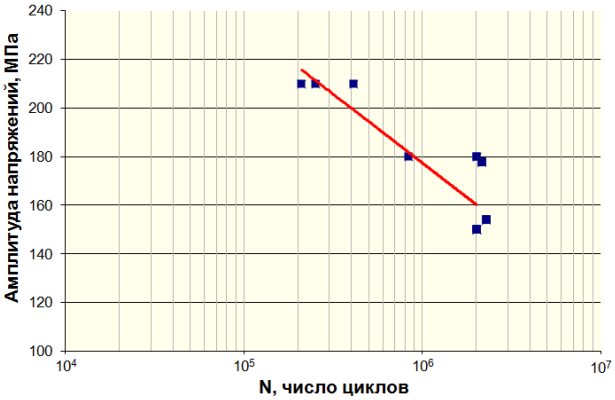


Рисунок 9 - Кривая усталости испытанных образцов-темплетов

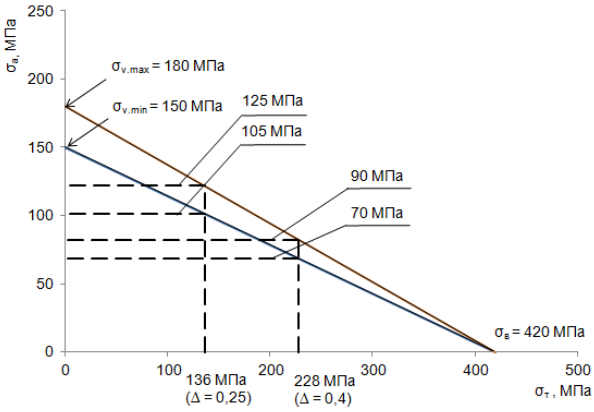


Рисунок 10 - Расчет пределов выносливости с учетом асимметрии цикла

Несмотря на некоторые отличия в фактически использованных подходах к двум объектам исследования, общий подход в решении задачи предложен единый: применение МКЭ для определения НДС конструкции в квазистатической упругопластической постановке. Полученные данные далее следует использовать для определения количества циклов до разрушения с применением теории усталостной прочности и экспериментальных данных по выносливости материала, для чего могут использоваться как инженерный подход, основанный на использовании расчетной формулы Мэнсона, так и программный комплекс усталостного расчета MSC.Fatigue. Если окончательные конструкционные параметры изделия зависят от условий сборки, то расчету подлежат все возможные сценарии сборки. По результатам анализа усталостной прочности сборного стального колеса DW20-26 даны рекомендации по технологии сборки.

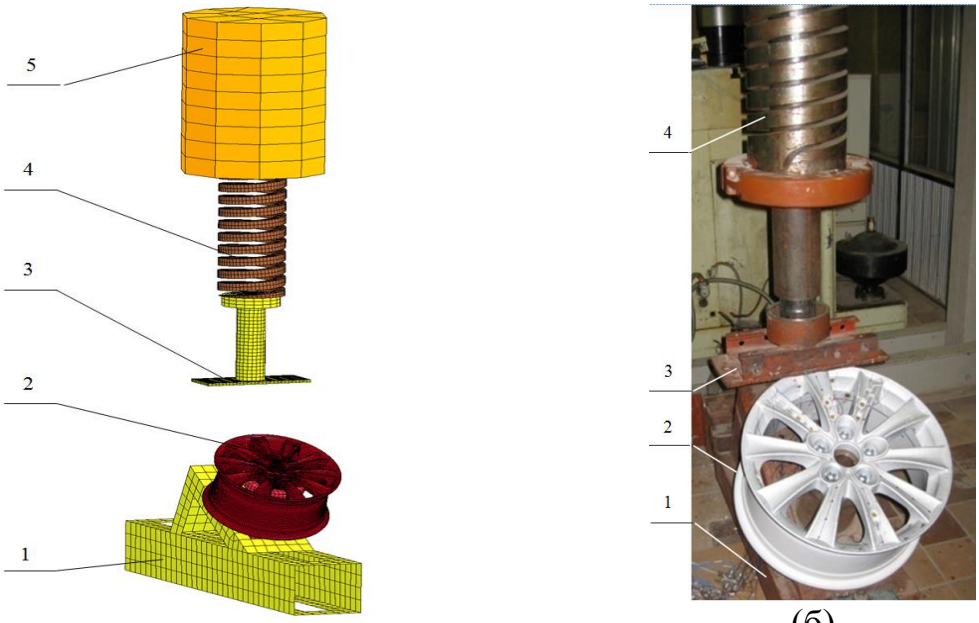
В четвертой главе изложена разработанная методика расчетного исследования прочности литых алюминиевых колес под действием ударных нагрузок. В структуре комплексного метода анализа прочности колеса данный вид расчета рекомендуется выполнять на завершающей стадии, когда по результатам предварительных статических расчетов и расчета на усталостную прочность уже выполнена основная доводка конструкции. До настоящего времени динамический расчет колеса при ударе в условиях стенда не проводился. В недавнем исследовании В.В. Мироновой для оценки прочности колеса при ударе рекомендовалось использовать коэффициент динамичности, полученный по экспериментальному тензометрическому анализу и результатам выполненного совместно с диссертантом статического расчета. Адекватность экспериментального единого коэффициента динамичности, хотя его использование и является передовым решением на сегодняшнем этапе, может вызывать сомнения при изменении геометрии или свойств материала колеса. Расчетный анализ рекомендуется проводить путем

моделирования условий ударного нагружения колеса без шины на стандартном стенде для сертификационных испытаний на удар. Влияние шины на деформированное состояние колеса при ударе вообще говоря различно для колес различного типа, зависит от стенда, угла установки колеса и характеристик шины. Отмечено рядом исследователей, что при испытаниях колес с установкой под 30° влияние шины не значительно. Так как экспериментальные исследования НДС проводились при ударе без шины, то и расчетный анализ в настоящем исследовании проведен без учета шины. Разработанная в данном исследовании методика расчета НДС колеса при ударном нагружении позволяет получать параметры НДС в любой точке конструкции при ударе и производить ее заключительную корректировку на расчетных моделях.

В качестве примера рассмотрено ударное нагружение литого алюминиевого колеса 7Jx16” в системе стенда для испытаний на удар под углом 30°. Этот пример выбран для демонстрации подхода к комплексному анализу прочности колес. Аналогичным образом могут быть проведены расчеты любой конструкции. Кроме того для данной конструкции в МАДИ В.В. Мироновой проведены экспериментальные исследования по динамическому тензометрированию при ударе, которые были использованы для верификации расчета. Эти исследования были проведены на стенде для сертификационных испытаний на удар под углом 30° путем динамического тензометрирования (рисунок 9, б) колеса без шины. Автор принимал участие в расчетах НДС при статическом нагружении и анализе результатов испытаний.

Рассматривается подробно КЭ модель колеса, которая, как и в случае расчета на усталость, должна включать элементы стенда и учитывать жесткость и расположение этих элементов. Учитываются контактные поверхности и усилия закрепления колеса на опоре стенда, схема нагружения приведена на рисунке 11 (а и б).

Расчет на удар проводился с использованием решателя LS-Dyna. Опора состоит из системы цилиндров, выполненных из 8-ми узловых гексагональных элементов, и швеллерной сварной конструкции, представленной на схеме 4-х узловыми оболочечными элементами. Ударный груз состоит из трех частей, выполненных с помощью 8-ми узловых гексагональных элементов. Связь колеса с площадкой стенда обеспечивается за счет моделирования болтового соединения путем приложения с двух сторон эквивалентной сжимающей силы к системе жестких балочных элементов, соединяющей колесо с опорой.



(а) (б)

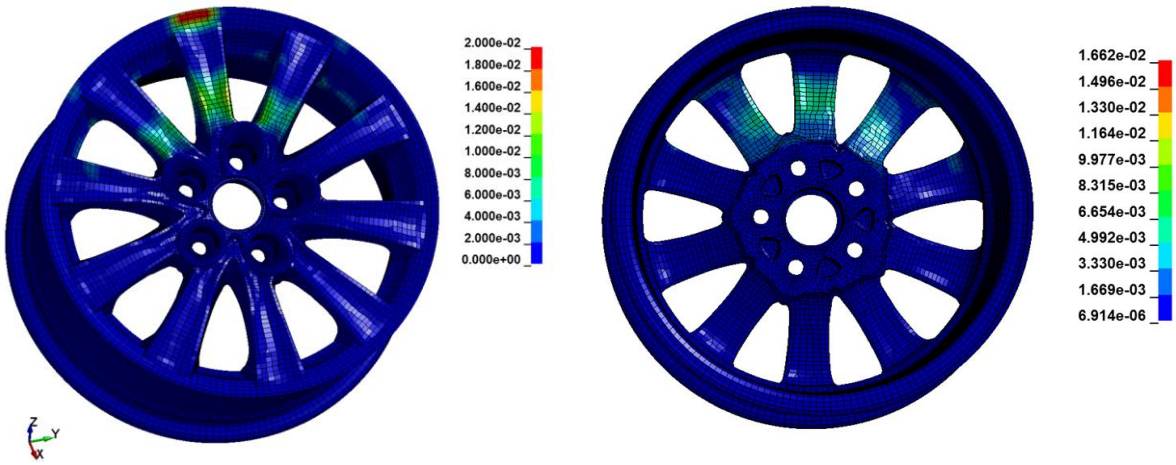
Рисунок 11 – Расчетная КЭ модель исследования НДС литого колеса 7Jx16” с элементами ударного стенда (а), вид испытательного стенда с установленным колесом (б)

Для учета влияния скорости деформации на форму и ключевые точки диаграммы деформирования материала колеса, в том числе, динамического предела текучести, в расчете используется условие упрочнения Купера-Саймондса (G.R.Cowper, P.S.Symonds). Также учитываются демпфирующие свойства материалов, поскольку потери энергии удара на внутренне трение в материалах колеса и ударной системы влияют на процесс затухания и логарифмический декремент затухания как величину, его характеризующую.

В расчетной схеме на колесо действуют постоянные нагрузки, возникающие при затяжке болтов крепления, а также переменные нагрузки, которые являются следствием контактного взаимодействия с ударным элементом. Начиная с 1-го расчетного шага система ударного элемента, соединенного с основным грузом, получает равноускоренное движение с ускорением свободного падения. Высота падения груза определяется в соответствии с требованиями сертификационных испытаний. Компоненты НДС определяются на основе значений скорости деформации в каждом узле.

Описание движения элементов модели выполнено в лагранжевой постановке. Решение системы уравнений динамики и уравнений состояния выполняется комплексом LS-Dyna с использованием метода явного интегрирования.

На рисунке 12 приведены максимальные значения интенсивности деформаций, полученные при ударе. В этой схеме ударный элемент попадает по ободу и спице колеса.



(а) (б)

Рисунок 12 – Распределение интенсивности деформаций в колесе 7Jx16” при расчете по схеме «косой удар по спице» под углом 30°: внешняя сторона колеса (а), внутренняя сторона (б)

Сравнение результатов расчета с данными эксперимента (таблица 1) показывают, что среднее отклонение результатов расчета от данных эксперимента составляет 11%. Области возникновения максимальных деформаций идентичны тем, которые были получены во время расчета на статическое нагружение, и совпадают с зонами возникновения остаточных деформаций колеса, выявленными во время его осмотра после эксперимента. Среднее отношение расчетных деформаций при ударе к расчетным деформациям в аналогичных зонах при статическом нагружении составило $\varepsilon_{дин}$ / $\varepsilon_{ст}$ = 10,94 при стандартном отклонении 0,82, что, таким образом подтверждает вывод, выполненный в рамках диссертационного исследования В.В. Мироновой о возможности использовать средний коэффициент динамичности для приближенных оценок в практике предварительного инженерного анализа ударной прочности конструкции колеса.

Таблица 1. Сопоставление результатов эксперимента с расчетными значениями при ударе по спице

Тензо-резистор	Эксперимент $\varepsilon_{экс}$, %	Расчет при ударе $\varepsilon_{расч}$, %	Погрешность, %
1	0,3786	0,4478	18%
3	0,3785	0,4274	13%
4	0,3784	0,4203	11%
5	0,3978	0,4232	6%
6	0,3500	0,3875	11%
13	0,1973	0,2167	10%
14	0,1847	0,2003	8%
16	0,3544	0,3848	9%

Анализ волновых процессов выполнялся путем сравнения параметров, полученных при ударе в местах установки тензорезисторов в эксперименте и расчетом. На рисунке 13 приводится сопоставление значений деформации по трем датчикам (№ 5, 13 и 16), расположенным со стороны оси удара, по времени. Датчик № 5 размещен на спице, напротив которой приходится основное ударное воздействие, датчики № 13 и 16 - на ободе.

Различие между расчетными и экспериментально зарегистрированными значениями частоты колебаний, периода колебаний и логарифмического декремента затухания находятся в пределах 13%. Результаты сравнения для примера по двум датчикам даны в таблице 2.

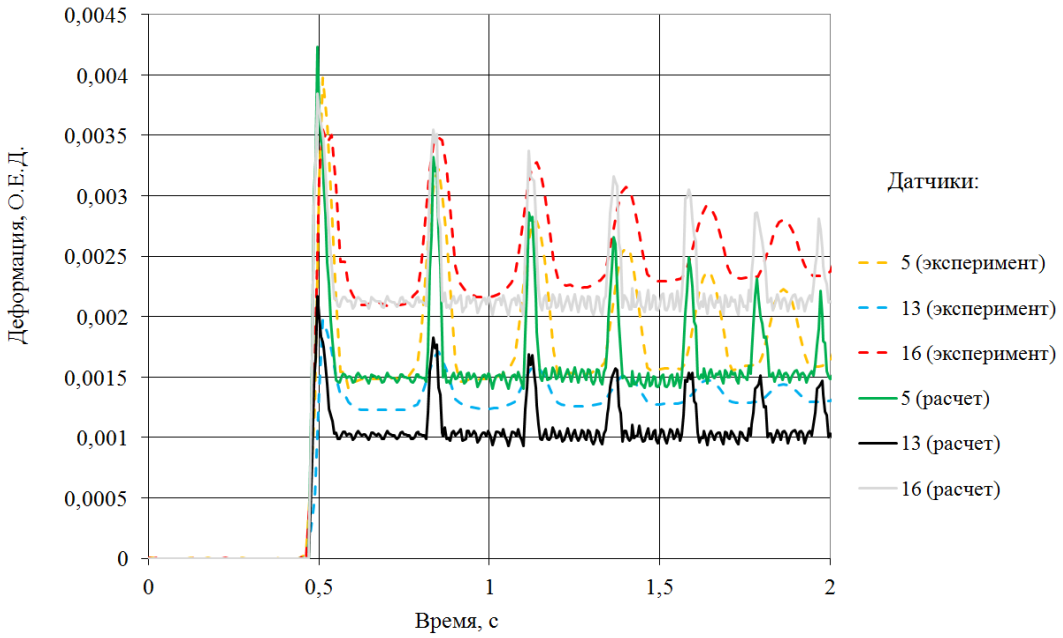


Рисунок 13 – Зависимость деформаций от времени при нагружении колеса по схеме «Косой удар по спице» под углом 30°

Таблица 2. Сопоставление основных параметров колебательного процесса по средним значениям показаний датчиков 5, 13 и 16

Параметр	Расчетная величина	Экспериментальная величина	Погрешность, %
Период колебаний T, с	0,246	0,260	5,4%
Частота колебаний ν, рад$^{-1}$	25,559	24,127	5,9%
Логарифмический декремент затухания	≈ 0,27	≈ 0,31	≈ 13%

Созданная расчетная схема используется и для определения НДС колеса при ударе в другой зоне - между спицами. Для получения результата (значения деформации приведены в таблице 3) был выполнен поворот колеса вокруг своей оси на 18°. Среднее значение коэффициента динамичности при подобном нагружении составило $\varepsilon_{дин} / \varepsilon_{ст} = 10{,}76$ при стандартном отклонении 0,96.

Таблица 3. Сопоставление результатов статического и динамического расчетов при нагружении между спицами

Тензо-резистор	Расчет статический $\varepsilon_{ст}$, %	Расчет при ударе $\varepsilon_{дин}$, %	$\varepsilon_{дин}$ / $\varepsilon_{ст}$
1	0,0549	0,6071	11,06
3	0,0165	0,1827	11,07
4	0,0449	0,4386	9,77
5	0,0449	0,4078	9,08
6	0,0182	0,2231	12,26
13	0,0104	0,1167	11,22
14	0,0314	0,3376	10,75
16	0,0296	0,3217	10,87

Отмечено, что на результаты расчета влияют характеристики и особенности конструкции ударного стенда, а также свойства материала колеса, особенно параметры демпфирования, который в принципе, меняется от обода к ступице. Однако полученные результаты показали, что предложенная методика позволяет выполнить оценку поведения колеса при ударе и произвести на этой основе необходимую коррекцию конструкции. Кроме того, полученные результаты подтвердили предложение о возможности использования приведенного коэффициента динамичности для приближенных инженерных оценок напряжений при ударе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан комплексный метод расчетного анализа НДС различных типов колес ТС при стандартных нормативных нагрузках с использованием современного аппарата численного анализа МКЭ и современных программных комплексов с оценкой результатов на основе экспериментальных данных, включающий последовательные методики создания расчетных схем и КЭ–моделей, методики расчета НДС и усталостной прочности при циклическом нагружении и методику расчета НДС при ударном нагружении колеса. Разработанный метод применим к анализу прочности различных типов колес ТС, т.к. позволяет учесть основные особенности конструкций: любую, в том числе, сложную геометрию и технологию для сборных конструкций колес.

2. Сформулирован единый общий подход к составлению КЭ - расчетных схем (моделей) колес, причем впервые показана необходимость учета контактирующих с колесом элементов испытательных стендов, влияющих на общую жесткость, а также элементов, непосредственно передающих нагрузку. Даны рекомендации по расчетным схемам для анализа усталостной прочности колес и оценки НДС колеса в условиях ударного нагружения.

3. При создании КЭ-расчетной схемы колеса, предназначенной для исследования НДС при ударе, сформулированы критерии качества КЭ-массива, оказывающие влияние на работоспособность результирующей модели и даны рекомендации по составлению моделей. Разработана и

рекомендована упорядоченная методика планирования дискретизации КЭ массива, позволяющая сократить трудозатраты на создание расчетной схемы.

4. Для оценки усталостной прочности колес разработана методика расчета, основанная на определении НДС в колесе при квазистатическом нагружении в условиях испытательного стенда при нормативных испытаниях при изгибе с вращением и использовании экспериментальных данных по выносливости материала; разработана методика учета вариантов сборки конструкции для выбора оптимальной технологии для колес сборной конструкции.

5. Показано, что при оценке усталостной прочности колеса обоснован выбор в качестве исходных данных усталостной кривой σ-N (s-N в расчетных КЭ комплексах) материала и критерия Дж. Гудмана для учета асимметрии цикла нагружения при наличии статической составляющей напряжений в сборных колесах. Вывод справедлив для всех типов конструкций колес.

6. Разработанная методика анализа НДС литых алюминиевых колес при ударе позволяет получить достоверные значения НДС на завершающей стадии проектирования колес, что позволяет также дать окончательную оценку несущей способности колеса до принятия решения об изготовлении, например до проектирования литейных форм, и выпуска первых образцов. Методика применима для моделирования виртуального эксперимента удара по колесу при установке с различными углами расположения колеса относительно горизонтальной плоскости (осевой удар, удар под углом 13°, под углом 30° и др.), отличия между расчетными схемами заключаются только в КЭ-моделях конструкций стендов при сохранении общей методики расчета.

7. По результатам анализа, проведенного при определении НДС колеса при действии ударных нагрузок в условиях сертификационных испытаний, дана рекомендация учесть в требованиях ГОСТ 52390-2005 дополнительные характеристики стенда, которые, как показали исследования, могут влиять на результаты испытаний (уточнить расстояние между основным и дополнительным грузами, устойчивость опоры колеса, равномерность уровня пола под испытательным стендом), что одновременно позволит ввести в расчетную схему более подробную модель испытательного стенда и повысить точность результатов расчета.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Демьянушко И.В. Исследование напряженно-деформированного состояния литых автомобильных колес при ударных нагрузках / Демьянушко И.В., Миронова В.В., Логинов Е.М. // Машиностроение и инж. образование. – 2012. – № 1(30). – С. 42-49.

2. Демьянушко И.В. Влияние технологии сборки штампованных колес большой размерности на усталостную прочность / Демьянушко И.В., Логинов Е.М., Миронова В.В., Вахромеев А.М. // Машиностроение и инж. образование. – 2014. – № 4(41). – С. 33-42.
3. Демьянушко И.В. Оценка влияния условий сборки тракторных колес на их усталостную прочность / Демьянушко И.В., Миронова В.В., Логинов Е.М., Вахромеев А.М. // Грузовик. – 2015. – № 6. – С. 4-6.
4. Демьянушко И.В. Современное состояние методов расчетного анализа прочности и надежности колес автотранспортных средств / Демьянушко И.В., Миронова В.В., Логинов Е.М. // Известия МГТУ «МАМИ». – 2015. – Т 4. – № 2(24). – С. 59-67.

Статьи в прочих научных изданиях

5. Демьянушко И.В. Моделирование колес автотранспортных средств в системах автоматизированного проектирования / Демьянушко И.В., Логинов Е.М. // Материалы 65-ой Междунар. науч.-техн. конф. Ассоц. автомобил. инженеров (ААИ) «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров», Междунар. науч. симпозиума «Автотракторостроение – 2009». – Москва, 2009. – Кн. 5. – С. 76-79.
6. Демьянушко И.В. Разработка механико-математических моделей для обеспечения автоматизированной поддержки жизненного цикла колес транспортных машин / Демьянушко И.В., Миронова В.В., Логинов Е.М. // Проблемы механики современных машин : материалы Четвертой Междунар. конф. / М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Российская акад. наук, Науч. совет РАН по проблемам машиноведения и технологических процессов [и др.] ; [редкол.: В.С. Балбаров (отв. ред.) и др.]. – Улан-Удэ, 2009. – Т.1. – С. 125-129.
7. Демьянушко И.В. Создание модели 3-х мерного изображения колеса с использованием САПР SOLIDWORKS 2009 / Демьянушко И.В., Миронова В.В., Логинов Е.М. // Труды Конгресса по интеллектуал. системам и информ. технологиями (IS&IT’11, Дивноморское, 2-9 сентября 2011 г.) : научн. изд. : в 4 т. – Москва, 2011. – Т. 2. – С. 148-152.
8. Демьянушко И.В. Моделирование и напряженно-деформированное состояние литых автомобильных колес при ударных нагрузках / Демьянушко И.В., Миронова В.В., Логинов Е.М. // Тез. докл. на XXIII Междунар. инновац.-ориентир. конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2011). – Москва, 2011. – С. 119.
9. Демьянушко И.В. Расчет и экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния автомобильных колес на статическую нагрузку / Демьянушко И.В., Логинов Е.М., Миронова В.В. – Москва : МАДИ, 2014. – 48 с.

10. Демьянушко И.В. Исследование вопросов усталостной прочности штампованных колес большой размерности / Демьянушко И.В., Логинов Е.М., Карпов И.А., Миронова В.В. // XXVI Междунар. инновац.-ориентир. конф. молодых ученых и студентов (МИКМУС-2014): труды конф. (Москва, 17-19 декабря 2014). – Москва, 2015. – С. 98-102.
11. Demiyanushko I. The Reliability of Assembly Steel Wheels With Using FEM Analysis / Demiyanushko I., Loginov E., Mironova V. // Proceedings of the 14th International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science (IFToMM) World Congress. – Taipei (Taiwan), 2015. – V. 1. – P. 543-549.