

На правах рукописи

Шеховцева Евгения Владимировна

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
СВОЙСТВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ
НАПРАВЛЕННОМ ФОРМИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» на кафедре «Инновационное машиностроение».

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор, **Безъязычный Вячеслав Феоктистович**.

Официальные оппоненты:

Чигиринский Юлий Львович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», заведующий кафедры «Технология машиностроения»;

Житников Юрий Захарович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», профессор кафедры «Технологии машиностроения»;

Азиков Николай Сергеевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)», главный научный сотрудник.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет».

Защита диссертации состоится «___» _____ 20__ г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: +7 (499) 263-66-33 доб.36-28

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь совета

канд. техн. наук, доцент



А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень разработанности темы исследования. В настоящее время зубчатые передачи (системы приводов) газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения работают в условиях крайне высоких силовых, температурных и вибрационных нагрузок. Срок службы системы приводов ГТД определяется механическими свойствами и контактной выносливостью рабочих поверхностей зубчатых колес, к которым предъявляют повышенные требования.

Для производства зубчатых колес необходимо решение сложных и трудоемких конструкторских и технологических задач. При этом контактная выносливость зубчатых колес и долговечность зубчатых передач напрямую зависят от разброса механических свойств материала исходных заготовок и технологии их обработки при изготовлении зубчатых колес.

Конструкторские вопросы проектирования зубчатых передач (системы приводов), их прочностной анализ и эксплуатационные свойства были рассмотрены в работах С.В. Серенсена, В.И. Гольдфарба, Jan Klingelberg, S. Beermann, U. Kissling, М.М. Кана, А.Э. Волкова, Д.Т. Бабичева, Э.Б. Вулгакова, Н.Н. Крылова, Ф.Л. Литвина, Е.С. Трубочева, Г.И. Шевелевой, К.В. Сызранцевой, В.П. Когаева, И.А. Биргера, Jiang Jie, Zhang Ruihua, Dietzel Renee, Gömmel Frank, Zhang Tiezhu, Г.К. Трубина, В.Е. Старжинского, Э.Б. Вулгакова, А.О. Горленко, Q.J. Wang, C. Baydu, R. Patel, P. Langlois, H. Bai, Y. Zhou, С.П. Руденко, А.Н. Михайлова, Н.П. Онишкова, А.М. Сулимы и других исследователей с учетом некоторых механических свойств (твердостью и модулем упругости), а также шероховатостью рабочей поверхности зубчатых колес.

Исследования взаимосвязи механических свойств различных материалов и эксплуатационными параметрами изготавливаемых из них изделий представлены в работах Е.Н. Каблова, В.К. Старкова, М.М. Кане, W. Wang, I. Boiadjev, J. Witing, T. Tobie, D. Palmer, F. Otto, P. Jurci, P. Stlar, J. Suchanek, С.А. Герасимова, Л.И. Куксеновой, С.И. Маркова, А.Г. Братухина, Н.Н. Крылова, Л.А. Сосновского, В.Е. Антонюка, С.Я. Пичхидзе и других ученых.

Однако данные о влиянии свойств сталей 16ХЗНВФМБ-Ш, 20ХЗМВФ-Ш и 18Х2Н4МА, широко используемым в настоящее время для серийного производства зубчатых колес, на их эксплуатационные свойства, отсутствуют.

Разработкой технологии изготовления зубчатых колес занимались И.А. Коганов, А.Л. Капелевич, Q.J. Wang, А.А. Маликов, Е.Н. Валиков, Е.С. Трубочева, В.Ф. Макаров, В.Н. Сызранцев, Е.И. Тескер, А.С. Калашников, С.И. Агапов, Б.Ф. Федотов, Ю.С. Елисеев, В.П. Смоленцев и другие ученые. Вопросам технологической наследственности при механической обработке посвящены работы А.М. Дальского, А.С. Васильева, А.Г. Сулова, М.Л. Хейфеца, Б.М. Базрова, А.Н. Михайлова, В.Ф. Безъязычного и других.

Таким образом, анализ используемых в настоящее время подходов к обеспечению эксплуатационных свойств зубчатых колес ГТД с учетом технологии их изготовления, а также справочной литературы и нормативной документации показал недостаточность сведений к назначению механических

свойств материалов зубчатых колес с учетом химико-термической обработки, влияющих на долговечность всей зубчатой передачи, использование ограниченного набора параметров механических свойств материалов для оценки долговечности зубчатой передачи, а также отсутствие комплексной научно-обоснованной методики определения работоспособного состояния зубчатых передач ГТД с учетом эксплуатационных свойств зубчатых колес.

В связи с этим одним из направлений повышения долговечности зубчатых передач ГТД является разработка методики интегрированной конструкторско-технологической подготовки производства для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств зубчатых колес с учетом стабилизации механических свойств материала исходных заготовок, технологии их обработки для направленного формирования механических свойств изготавливаемых изделий и жизненного цикла изделий, что является актуальным для двигателестроительной отрасли современного машиностроения.

Объект исследований – зубчатые колеса системы приводов ГТД.

Предмет исследования – технологическое обеспечение эксплуатационных свойств (контактной выносливости) рабочих поверхностей зубчатых колес системы приводов ГТД.

Цель диссертационной работы. Технологическое обеспечение требуемой контактной выносливости зубчатых колес газотурбинных двигателей при направленном формировании механических свойств материала деталей путем интегрированной конструкторско - технологической подготовки производства.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Установить особенности формирования механических свойств (*предел прочности, предел текучести, модуль упругости, твердость, относительное удлинение*) материала с учетом технологической наследственности производства зубчатых колес.

2. Выполнить исследования существующих методов химико-термической обработки рабочих поверхностей зубчатых колес с установлением их влияния, на контактную выносливость исходя из формирования механических свойств материала, в том числе и структурного состояния.

3. Разработать модель, описывающую влияние механических свойств материала, а также воздействие технологических и конструкторских факторов на эксплуатационные параметры зубчатых колес.

4. Разработать методику комплексного исследования эксплуатационных свойств (*контактной выносливости*) рабочих поверхностей зубчатого зацепления при имитационном моделировании процесса нагружения зубчатого колеса

5. Установить взаимосвязи между механическими свойствами материала, технологическими и конструктивными факторами относительно показателей контактной выносливости (*контактные напряжения*) зубчатых колес и предложить показатель параметрической чувствительности контактируемых поверхностей зубчатой передачи, отражающий технологические факторы стабильности качества обработки детали.

6. Разработать методику конструкторско-технологического обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес на основе направленного

формирования механических свойств материалов деталей и качества изготовления.

7. Разработать модель интегрированной конструкторско-технологической подготовки производства с обеспечением оценки пригодности зубчатой передачи для эксплуатации.

8. Предложить алгоритм повышения унификации и типизации изготовления зубчатых колес на основе управления механическими свойствами материалов и технологичностью деталей.

Научная новизна диссертационного исследования и результатов, полученных лично автором, заключаются в следующем:

1. Разработана модель направленного формирования механических свойств материалов, применяемых для зубчатых колес ГТД, с учетом влияния технологической и структурной наследственности на их эксплуатационные свойства. Выявлены особенности стабилизации разброса механических свойств материала с учетом структурных характеристик материала.

2. Разработана методика исследования эксплуатационных свойств (контактная выносливость) зубчатых колес по механическим свойствам материала с учетом технологического процесса изготовления деталей.

3. Разработан метод имитационного моделирования контактной выносливости, включающий особенности технологии изготовления зубчатых колес, и, описывающий процессы, протекающие в зубчатом зацеплении в процессе эксплуатации, исходя из динамических нагрузок и их концентрации. Показана корреляция результатов моделирования процесса нагружения в рамках имитационного подхода с результатами расчетов, выполненных при аналитическом подходе.

4. Разработаны регрессионные математические модели влияния механических свойств материала на контактные напряжения в зубчатом зацеплении, исходя из конструктивного облика передачи, параметров химико-термической обработки и материала детали.

Практическая значимость работы.

1. Доказана возможность направленной стабилизации разброса механических свойств и структурных характеристик материала с учетом технологической наследственности изготовления деталей применительно к упрочненному слою (*не менее 5 %*) и сердцевине (*не менее 4,8 %*) материала относительно состояния поставки сортового проката.

2. Выявлено снижение модуля упругости в готовом изделии по сравнению со справочными значениями для упрочненного слоя (от 5 до 27 ГПа) и сердцевины (от 16 до 33 ГПа), что благоприятно влияет на контактную выносливость при условии их близких значений. Это тем значительнее, чем ниже модуль упругости рабочих поверхностей и основного материала изделия. Наблюдается корреляция между снижением модуля упругости материала и ростом несущей способности деталей при циклических нагрузках.

3. Разработаны способ изготовления зубчатых колес и методика оценки эксплуатационных свойств зубчатой передачи, учитывающие комплекс механических свойств материала и их технологическую стабилизацию, принимая

во внимание послойную структуру материала зубчатого венца, распределение нагрузки, а также совмещая традиционные и современные методы расчета напряженно-деформированного состояния.

4. Разработаны практические рекомендации по технологическому обеспечению эксплуатационных свойств зубчатых колес (*цилиндрических и конических системы приводов ГТД*) при изготовлении в условиях современных технологических процессов (*нитроцементация / ионное азотирование; материалы 18Х2Н4МА, 20Х3МВФА-Ш и 16Х3НВФМБ-Ш*).

5. Разработана методика конструкторско-технологического обеспечения требуемых эксплуатационных свойств зубчатых колес с учетом механических свойств материала исходных заготовок, технологии их обработки для направленного формирования механических свойств изготавливаемых изделий и жизненного цикла изделий.

Результаты исследования **внедрены:**

- в конструкторско-технологическую деятельность ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск;
- в технологическую деятельность УП «Минотор-Сервис», г. Минск;
- в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», г. Рыбинск;
- в учебный процесс ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург;

Внедрение предложенных в диссертации научно-практических решений позволило расширить возможности управления проектированием, подготовкой производства и изготовлением деталей системы приводов газотурбинных двигателей в условиях современных технологических процессов и многофункциональных платформ.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования осуществлялись на основании: общенаучного анализа; систематизации современных позиций и принципов механизма контакта сопрягаемых поверхностей и их повреждаемости; технологии машиностроения, материаловедения, процессов металло- и химико-термической обработок; статистических исследований и технологии проведения экспериментов; моделированием процессов эксплуатации. Экспериментальные исследования выполнялись на основе управления опытными работами производственных исследований с применением современного технологического процесса, оборудования и материала, а также лабораторных исследований с использованием контрольных приборов, специальных моделирующих установок и стендов, а также программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методология обеспечения направленного формирования механических свойств материала, основанная на явлении технологической и структурной наследственности, при задании эксплуатационных (прочностных) свойств зубчатых колес.

2. Методология многофакторного определения контактной выносливости (контактных напряжений) боковой поверхности зуба зубчатой

передачи исходя из структурного строения зубчатого венца, основанная на анализе статистической обработки экспериментальных данных и требованиях нормативных документов.

3. Результаты математического моделирования процесса контактного взаимодействия при передаче крутящего момента в зубчатом зацеплении с учетом справочной и фактической информации по механическим свойствам материала зубчатых колес.

4. Установленные зависимости контактных напряжений зубьев от механических свойств материала, в том числе с учетом коэффициентов чувствительности сопрягаемых поверхностей.

5. Структурно-функциональная модель конструкторско-технологического обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес в совокупности с методикой определения контактной выносливости, основанной на стабилизации механических свойств материалов, качества обработки, жизненном цикле изделия и интегрированной конструкторско-технологической подготовки производства.

Степень достоверности результатов исследований, научных гипотез и заключений подтверждается: удовлетворительным согласованием расчетов и экспериментальных данных; статистической оценкой результатов; моделированием инженерных конструкций с учетом действительных механических и физических процессов и их анализа; применением современных средств технологического, контрольного, лабораторного и программного обеспечения; а также положительными результатами их практического применения в производственных условиях.

Личный вклад автора при выполнении диссертационной работы заключается в определении научной проблемы, для решения которой сформулированы цели и задачи исследований, постановке технических требований и реализации экспериментов, обработке результатов и анализе фактических данных. Оформлены охранные документы, подготовлены публикации по направлению исследований. Обсуждения основных результатов проводилось совместно с соавторами работ. Сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна результатов исследований, заключение.

Апробация результатов. Основные положения настоящей работы представлялись на 22 конференциях, форумах и семинарах с 2009 по 2025 г., в том числе: 8-ая международная конференция «Авиация и космонавтика - 2009» (МАИ, Москва, 2009); International conference «Production and failures of gear wheels and gear boxes», Trnavská Univerzita v Trnave (Trnava, Slovak Republic, 2012); международная научная конференция «Современные проблемы формообразования сложных поверхностей деталей и сборки машин» (ТулГУ, Тула, 2016); научно-техническая конференция «Климовские чтения – 2019: перспективные направления развития авиадвигателестроения» (АО «Климов», Санкт-Петербург, 2019); III, IV, V всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли» (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, 2023, 2024, 2025); международная VI всероссийская научная конференция «Информационные

технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения» (Тольяттинский государственный университет, Тольятти, 2023); международная научно-техническая конференция «Машиностроительные технологические системы» (ДГТУ, Ростов-на-Дону, 2023); 15-я международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2023); национальная научно-техническая конференция с международным участием «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (ТулГУ, Тула, 2023); XXI всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» (СГТУ, Самара, 2024); XI всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения – 2024» (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, 2024), VII международная научно-практическая конференция «Машиностроение: Инновационные аспекты развития» (НИЦ МС, Санкт-Петербург, 2024), II международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии, оборудование и материалы машиностроительных производств (МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025).

Работа соответствует паспорту специальности 2.5.6. Технология машиностроения по пунктам: п. 2. Технологические процессы, операции, установовы, позиции, технологические переходы и рабочие хода, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости; п. 6. Технологическая наследственность в машиностроении; п. 7. Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин; п. 8. Проблемы управления технологическими процессами в машиностроении; п. 10. Цифровые технологические процессы и производства в машиностроении.

Публикации. По тематике работы опубликовано 70 работ, в том числе 21 публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 монография. Получено 6 патентов РФ на изобретение и 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованных источников из 216 наименований и четырех приложений. Основная часть работы изложена на 276 страницах машинописного текста, содержит 78 таблиц (из них 36 в приложении), 110 рисунков, библиографический список содержит 216 наименований. Общий объем работы 340 страниц, в том числе 64 страницы приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и сформулированы цели и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость исследований. Изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ современной научной литературы и производственного опыта по проблеме нестабильности механических свойств материалов деталей и их влияния на качество продукции и эксплуатационные свойства деталей ГТД, в частности, зубчатых колес.

В рамках исследования проблемы и методологических подходов обеспечения несущей способности зубчатых передач установлено, что предельными эксплуатационными свойствами зубчатых колес и передач, являются прочностные показатели, в особенности, контактная прочность, технологическое обеспечение, которых находятся в приоритете. Это обусловлено причиной выхода из строя зубчатых колес – усталостные явления (питтинг, микропиттинг) в результате чего происходит деградирование рабочих поверхностей. Поверхностный слой зубчатого венца и его взаимосвязь с сердцевиной в процессе эксплуатации являются наиболее слабыми звеньями, от которых зависит работоспособное состояние узла и изделия в целом. По назначению конструкционного материала в рамках даже одного класса имеются ограничения в результате значительного разброса (*нестабильности*) механических свойств материала.

Установлено, что свойства исходного материала (прутка) зубчатых колес (E , ρ , σ_b) в сочетании с параметрами упрочненного слоя (h , HRC/HV) и сердцевины (HB) рабочих поверхностей зубьев имеют особо значимое влияние на показатели их эксплуатационных свойств при условии неизменных конструкторских данных и масштабного фактора. Геометрические параметры (R_a , точность) качества рабочей поверхности оказывают первостепенное влияние на параметры нагрузочной способности и долговечности (по контактной выносливости) зубчатых колес.

В исследованиях по данным направлениям основополагающий вклад внесен учеными школы технологов-машиностроителей в работах В.К. Старкова, А.М. Дальского, А.С. Васильева, М.Л. Хейфеца, А.Г. Сулова, В.П. Когаева, И.А. Коганова, В.Ф. Безъязычного, А.А. Маликова, В.И. Гольдфарба, В.Е. Старжинского, А.С. Калашникова, С.В. Серенсена, Е.С. Трубачева, А.М. Сулимы, P. Jurci, P. Stlar, J. Suchanek, М.М. Кане, Jan Klingelberg и др. Продолжатели школ технологического обеспечения качества изготовления деталей вносят существенный вклад в развитие научно-прикладных разработок в области технологии машиностроения.

Современные тенденции проектирования и производства в результате применения информационных технологий создают возможность прогнозировать ресурс детали с учетом фактических значений механических свойств материала и физических проблем с рабочими поверхностями. Несмотря на это, вопросам взаимосвязи эксплуатационных показателей рабочих поверхностей зубчатых колес и механических свойств материала с учетом технологии изготовления детали уделено мало внимания. Стадия развития производственных и информационных технологий обеспечивает потенциальную возможность получать на стадии проектирования и уточнять в процессе изготовления детали оперативную информацию влияния механических свойств материала поверхностного слоя детали и сердцевины на эксплуатационные показатели. Проведенный анализ свидетельствует об актуальности проблемы управления стабильностью механических свойств конструкционных материалов для обеспечения несущей способности рабочих поверхностей в условиях взаимодействия на основе возможностей многофункциональных платформ.

Аналитические исследования показали, что требуются мероприятия по разработке методики управления эксплуатационными свойствами зубчатых колес при проектировании и изготовлении деталей двигателестроительного предприятия. Также на сегодняшний день актуальна объективная потребность в исследовании влияния механических свойств материала на эксплуатационные параметры детали. Необходима разработка математических моделей для установления взаимосвязи механических свойств материалов и эксплуатационных свойств изделия, определяющих долговечность деталей машин. На основе проведенного анализа установлено, что область исследования диссертационной работы соответствует современной тенденции развития технологии машиностроения.

Во второй главе разработано и методологически обосновано технологическое обеспечение стабильности разброса механических свойств материала детали. Установлена стабильность разброса механических свойств материала, подтверждающая необходимость использования явления технологической наследственности (таблицы 1 и 2). Потому что формирование эксплуатационных свойств деталей является результатом сложного взаимодействия всех технологических операций. Изолированное рассмотрение отдельных операций не позволяет оценить их вклад в формирование общих свойств.

Таблица 1 – Механические свойства стали 18Х2Н4МА для различных заготовок

Наименование операции		Механические свойства	
Заготовительная	Термическая	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Прутки сортовой	—	1002,3	1166
Поковка		1020,3	1181,9
Штамповка		1032,2	1199,6
Прутки сортовой	Нормализация, высокий отпуск	847,5	957
Поковка		897,3	1026,3
Штамповка		920,2	1045,6

Таблица 2 – Коэффициент наследования свойств стали 18Х2Н4МА после термообработки

Наименование операции		Коэффициент наследования K_{CB} по параметрам	
Заготовительная	Термическая	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Прутки сортовой	Нормализация, высокий отпуск	0,846	0,821
Поковка		0,879	0,868
Штамповка		0,891	0,872

Сформирована структурная модель жизненного цикла, которая предназначена для разработки, изготовления и эксплуатации зубчатых передач в условиях влияния механических свойств материала на эксплуатационные свойства зубчатых колес в составе узла (рисунок 1). Это обеспечивает единство формирования технологических свойств материалов и эксплуатационных свойств детали, образующихся по ходу технологического процесса изготовления, с учетом их стабилизации. Структурная модель жизненного цикла зубчатого зацепления

позволила учесть совокупность влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, определяющих работу зубчатого зацепления, механических свойств материала сердцевина и упрочненного слоя, которые формируются при изготовлении на основе явления технологической наследственности эксплуатационных свойств деталей.

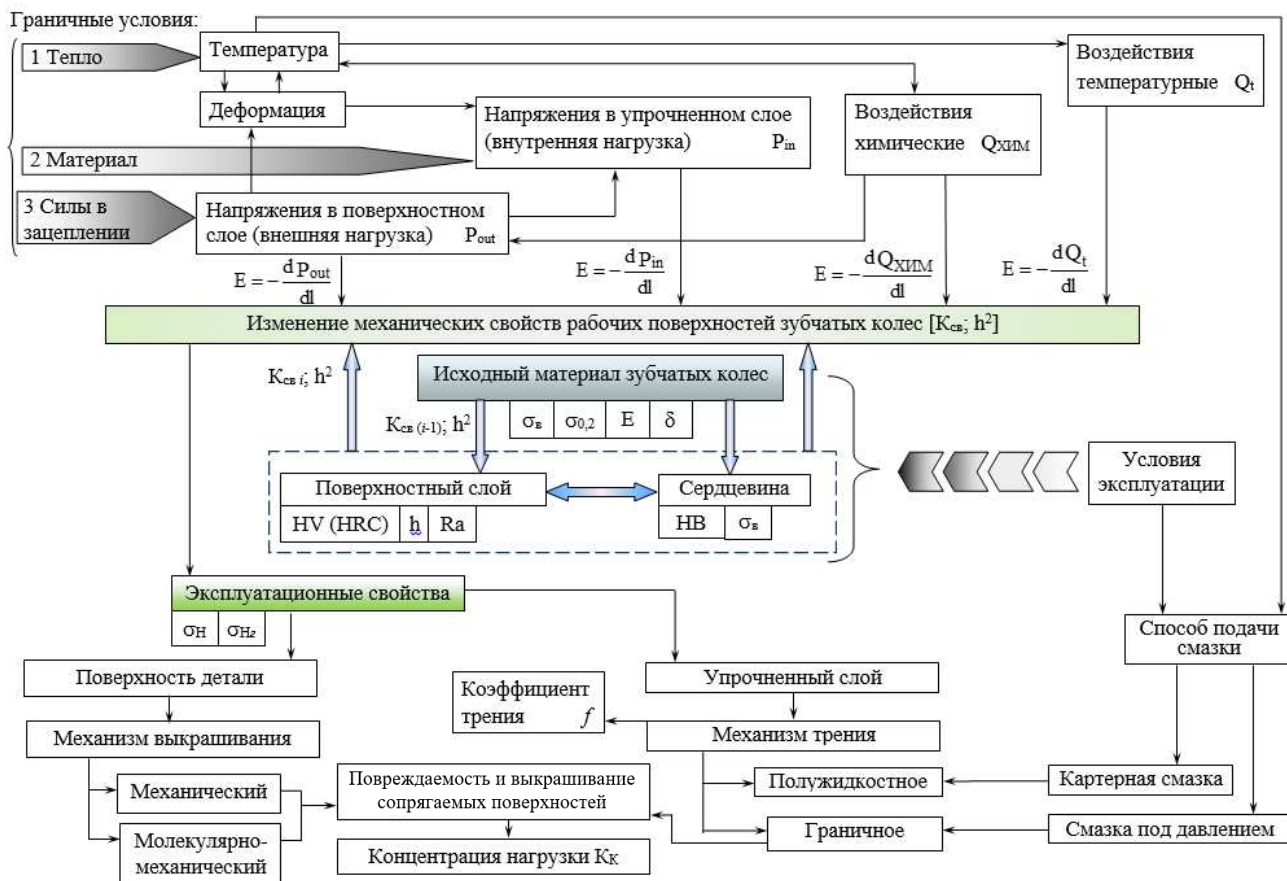


Рисунок 1 – Структурная модель жизненного цикла зубчатого зацепления

На основе авторских экспериментов по стабилизации свойств материалов и анализа фактора наследования разработана структурная модель взаимосвязи механических свойств материала и эксплуатационных свойств выпускаемой продукции. Подтверждено управление стабильностью механических свойств материала поверхностного упрочненного слоя и сердцевина материала детали.

В третьей главе выполнены исследования по одному из ключевых требований – стабильности механических свойств конструкционных материалов. Экспериментально установлена возможность стабилизации разброса механических свойств от поставочного состояния материала до готовой продукции по упрочнённому слою и сердцевине материала. При этом оценка нитроцементированного слоя выполняется совместно со шлифованием. Стабилизация разброса механических свойств по рабочим поверхностям (рисунок 2) и основному материалу составляет соответственно по:

- пределу текучести ($\sigma_{0,2}$) от 7,2 % до 26,7 % и от 6,8 % до 21,3 % (рисунок 3);
- пределу прочности (σ_B) от 10,7 % до 17,2% и от 7,5 % до 16 %;

- относительному удлинению (δ) от 5 % до 38,6 % и 4,8 % до 34,5 %;
- модулю упругости (E) от 5 до 27 ГПа и от 16 до 33 ГПа.

Сокращения, принятые на рисунках 2, 3 и далее в работе: ТО - термическая обработка, МО - механическая обработка, ХТО - химико- термическая обработка, У - упрочненный слой, НЦ - нитроцементация, А - ионное азотирование, С - сердцевина, ЭИ415-Ш - 20Х3МВФА-Ш, ВКС-5 - 16Х3НВФМБ-Ш.

Анализ экспериментальных данных по статистически обработанным значениям механических свойств показал, что операция обработки давлением положительно влияет на прирост по параметрам $\sigma_{0,2}$, σ_B , твердости (НВ) и δ при незначительном уменьшении модуля упругости (на 1 %).

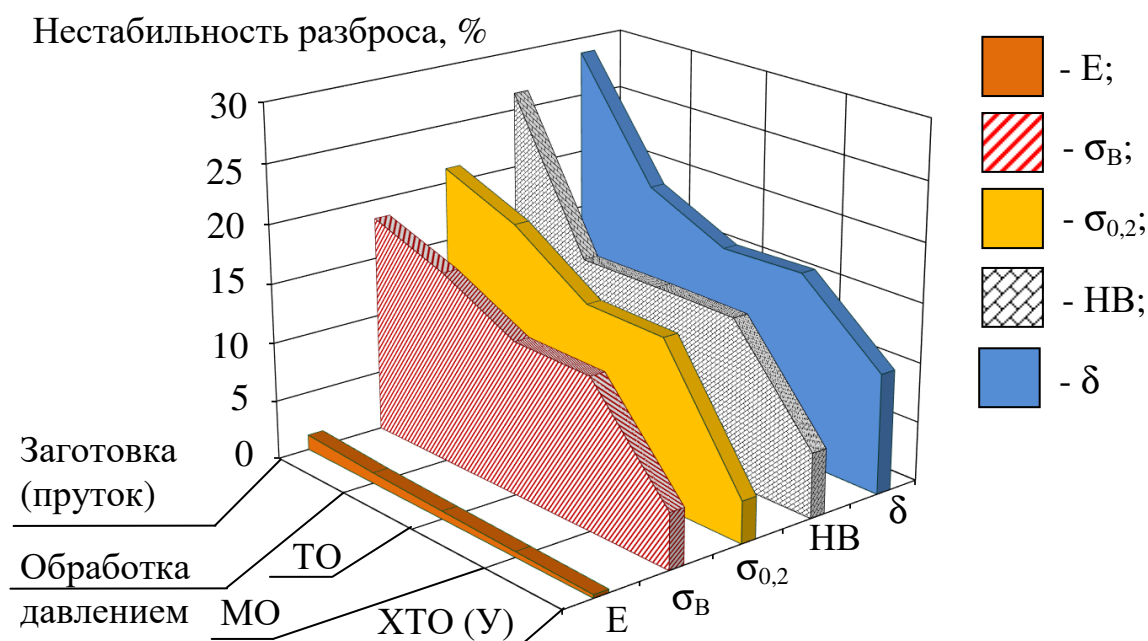


Рисунок 2 – Стабилизация разброса механических свойств по рабочим поверхностям деталей

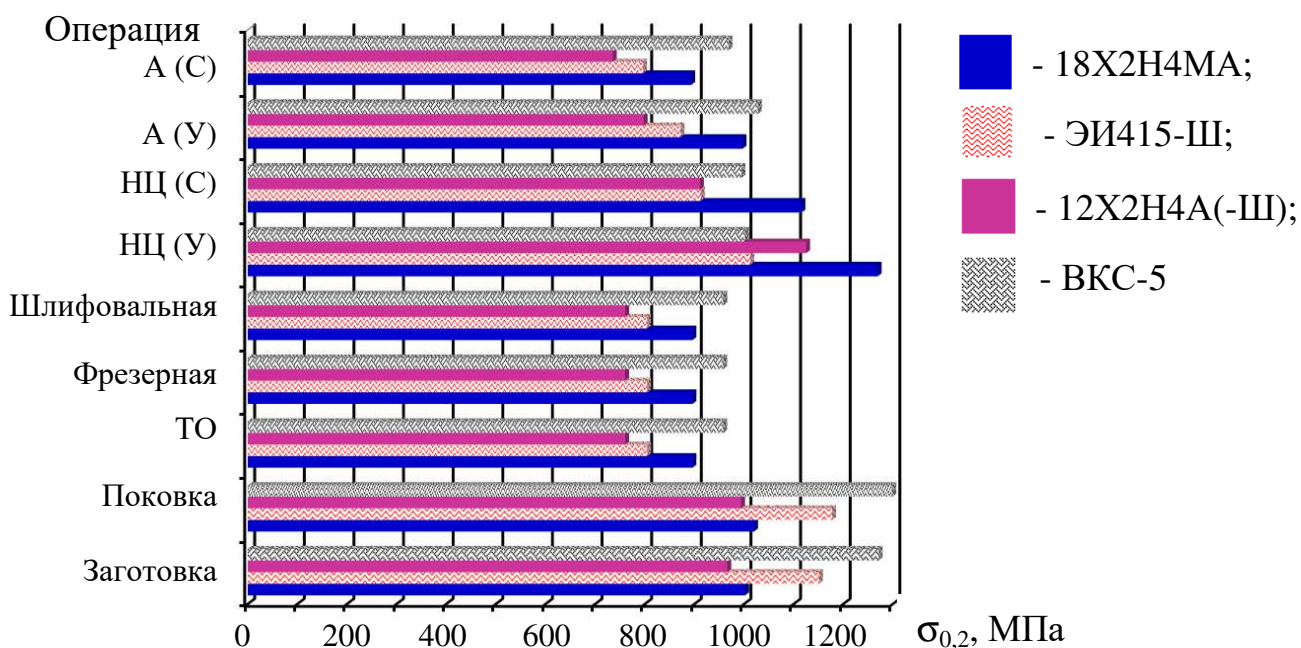


Рисунок 3 – Экспериментальные среднеарифметические значения предела текучести

Традиционные методы механической обработки: точение, фрезерование, шлифование, связанные с микрорельефом рабочих поверхностей, не оказывают существенного влияния на механические свойства материала. Однако термическая и химико-термическая обработки вносят значительный вклад в формирование необходимых для эксплуатации механических свойств. При этом наблюдается различие значений механических свойств в упрочненном слое и сердцевине материала с четким определением их величин. Анализ экспериментальных данных показал, что механические свойства материала изменяются после обработки давлением, термической и химико-термической обработки, при этом нестабильность свойств уменьшается. Стабилизация разброса механических свойств от состояния поставки сортового проката в процессе технологии изготовления для рабочих поверхностей в среднем по пределу прочности составляет более 13 %, по пределу текучести – не менее 17,5 % (для стали ВКС-5 около 7 %), по твердости – не менее 20 %, по относительному удлинению – не менее 21 % (для стали ВКС-5 около 5 %). Стабилизация разброса механических свойств от состояния поставки материала (сортовой прокат) по ходу технологического процесса для сердцевины в среднем по пределу прочности составляет не менее 12 %, по пределу текучести – не менее 21% (для стали ВКС-5 около 7 %), по твердости – не менее 12,5 %, по относительному удлинению – не менее 20 % (для стали ВКС-5 около 5 %).

Следует выделить особо механические свойства стали 16ХЗНВФМБ-Ш. Данная сталь относится к более новым разработкам и создавалась целенаправленно, как высокопрочная с высокими и более стабильными показателями свойств материала. Поэтому параметры колебания свойств материала уже в состоянии поставки (пруток) отличаются большей стабилизацией разброса. Данные результаты исследований для стали 16ХЗНВФМБ-Ш можно объяснить технологией получения материала (химический состав и метод).

Экспериментальное изучение модуля упругости материалов и последующее сопоставление справочных и фактических величин, представленных в таблице 3, демонстрирует, что величина модуля упругости в готовом изделии существенно отличается от справочных данных. Данное заключение подтверждается производственным опытом по другим деталям исследованиями ООО «ВТ-МЕТАЛЛ» (г. Москва).

Результаты изучения изменений механических свойств материалов зубчатых колес, проведенных более чем на 300 образцах, позволяют проследить структурные наследственные связи на основе обработки статистических данных в рамках комплексного анализа условий технологического процесса производства зубчатых колес (таблица 4). Коэффициент структурной наследственности количественно отражает степень влияния (положительная или отрицательная) каждой технологической операции на формирование механических свойств поверхностного слоя и сердцевины материала детали. Большие значения коэффициента свидетельствуют о значительной роли текущего этапа обработки в формировании механических свойств и, как следствие, эксплуатационных характеристик зубчатой передачи. Анализ коэффициентов структурной наследственности механических свойств, подтверждает технологическую

наследственность механических свойств в процессе изготовления образцов с упрочненным слоем и для сердцевина.

Таблица 3 – Соответствие экспериментальных и справочных значений модуля упругости

Материал	ХТО	Модуль упругости, ГПа			Расхождение между справочными и опытными значениями, %	
		Экспериментальный		Справочный		
		Упроч- ненный слой	Сердце- вина			
					Упрочнен- ный слой	Сердцевина
18Х2Н4МА	НЦ	195,01	182,00	211	8,20	15,93
	А	200,09	188,30		5,45	12,06
20Х3МВФА-Ш	НЦ	185,10	179,00	212	14,53	18,44
	А	206,76	186,09		2,53	13,92
12Х2Н4А(-Ш)	НЦ	195,07	176,97	200	2,53	13,01
	А	195,28	184,01		2,42	8,69
16Х3НВФМБ-Ш	НЦ	193,98	183,01	215	10,84	17,48
	А	197,97	187,02		8,60	14,96

Таблица 4 – Коэффициент структурной наследственности механических свойств

Наименование операции	Коэффициент (среднеарифметический) h^2 структурной наследственности механических свойств				
	$\sigma_{0,2}$	σ_B	Твердость	δ	E
Прутки	Исходное состояние				
Поковка	0,57	0,49	0,65	0,68	0,59
ТО	0,74	0,74	0,69	0,5	0,65
Фрезерование	0,51	0,5	0,5	0,53	0,55
Шлифование	0,50	0,51	0,51	0,41	0,60
НЦ (У)	0,87	0,76	0,99	0,76	0,43
НЦ (С)	0,78	0,66	0,62	0,66	0,50
A (У)	0,84	0,83	0,53	0,86	0,43
A (С)	0,79	0,86	0,87	0,69	0,39

Дополнительно были проведены исследования распределения твердости по глубине упрочненного слоя по поперечным микрошлифам, изготовленным из стали 20X3MBФ-III. Результаты измерений микротвердости на поверхности, сердцевине и глубины упрочненного слоя представлены на рисунках 4 и 5.

Анализ твердости материала упрочненного слоя, прилежащего к сердцевине, и самой сердцевине (таблица 5) показал, что переходная зона от упрочненного слоя к сердцевине обеспечивается более плавная при нитроцементации. Стабильность величин твердости упрочненного слоя вблизи сердцевине и твердости сердцевине при нитроцементации в шесть раз выше, чем при ионном азотировании. Плавность перехода при нитроцементации обеспечивается за счет большей глубины нитроцементированного слоя.

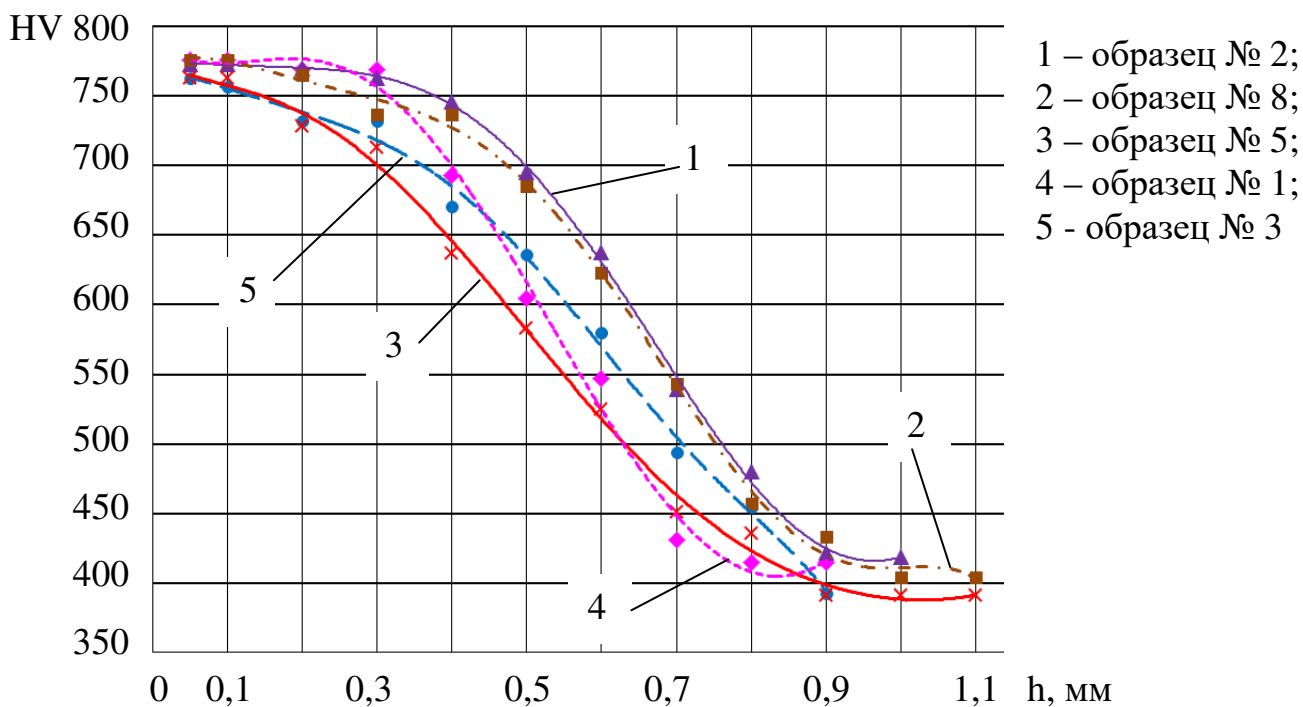


Рисунок 4 – Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя после нитроцементации

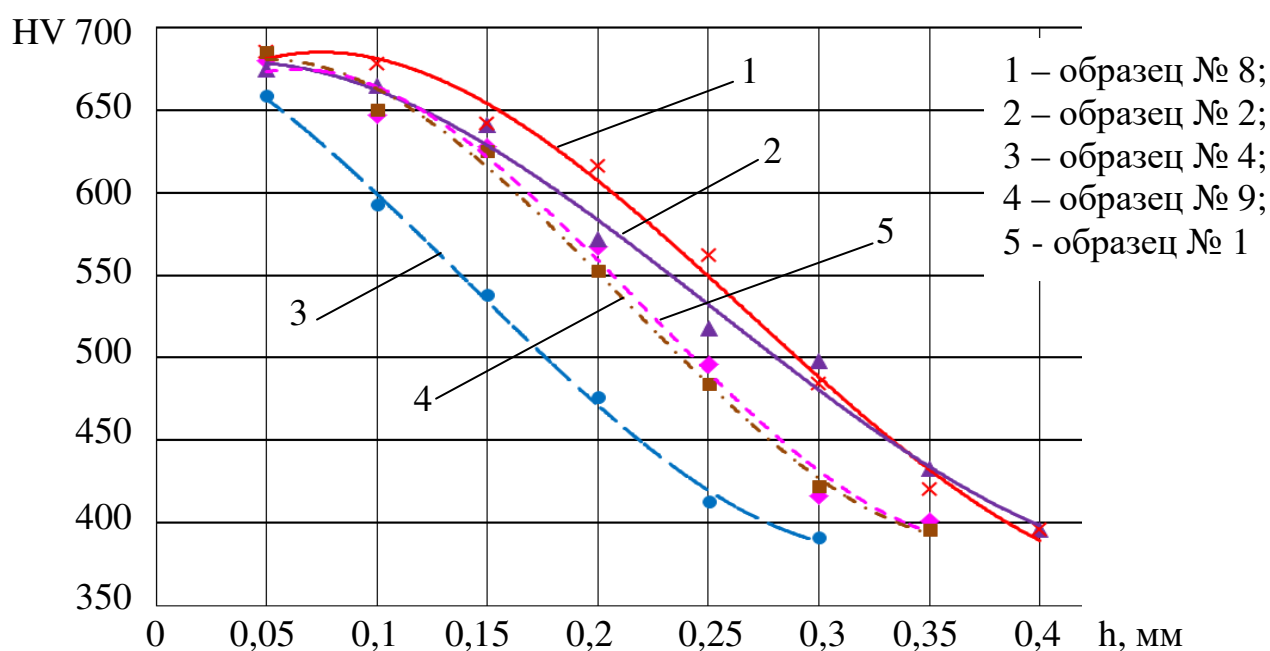


Рисунок 5 – Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя после ионного азотирования

Таким образом, обосновано структурное влияние материала, на стабилизацию разброса механических свойств (твердости) исходя из сложной объемной структуры зубчатого венца в результате плавности переходной зоны от упрочненного слоя к сердцевине. Выполненные исследования механических свойств в соответствии с их технологической наследственностью в процессе изготовления формируют предпосылки для решения актуальных научно-практических задач, представленных в диссертационной работе.

Таблица 5 – Сопоставление твердости упрочненного слоя, прилежащего к сердцевине, и сердцевины

№ образца	Твердость упрочненного слоя вблизи сердцевины, НВ (HV)	Твердость сердцевины, НВ	Расхождение по параметру НВ, %
после нитроцементации			
1	395,0 (415,0)	383,0	3,13
2	399,0 (419,0)	380,0	5,00
3	372,0 (393,0)	350,0	6,29
5	370,0 (391,0)	355,0	4,23
8	384,0 (404,0)	380,0	1,05
Среднее	384,0 (404,4)	369,6	3,94
после ионного азотирования			
1	474,0 (496,0)	380,0	24,74
2	477,0 (498,0)	375,0	27,20
4	452,0 (476,0)	370,0	22,16
8	459,0 (484,0)	375,0	22,40
9	459,0 (484,0)	375,0	22,40
Среднее	464,2 (487,6)	375,0	23,78

Исследования контактной выносливости проводились на роликовых образцах размером по диаметру 50 мм и шириной дорожки 10 мм при максимальной частоте вращения 2100 об/мин с маслом МС-8П на роликовой машине. Базовым числом циклов нагружений N_{Hlim} , соответствующим пределу контактной выносливости, является $(5 \cdot 10^7)$ циклов. Контактная выносливость через каждые 10^6 циклов нагружения оценивалась по целостности рабочих поверхностей визуально. Испытания роликов на контактную выносливость проводились в соответствии с ГОСТ 25.501-2018. Было испытано 7-8 комплектов роликов (по три пары в каждом) в соответствии с рекомендациями Р 50-54-30-78. Общее количество экспериментов более 170 испытаний, в том числе и на установке замкнутого контура двухсоосного редуктора, разработки ПАО «ОДК-Сатурн».

ГОСТ 21354–85 регламентирует предел контактной выносливости рабочих поверхностей зубчатых колес 1357 МПа при нитроцементации и 1050 МПа при ионном азотировании.

Представленные на рисунке 6 графики показывают, что предел выносливости образцов из сталей после нитроцементации выше, чем после ионного азотирования (исключение по 16ХЗНВФМБ-Ш). Установлено повышение показателей контактной выносливости образцов из стали 20ХЗМВФА-Ш после нитроцементации и стали 16ХЗНВФМБ-Ш при любом виде химико-термической обработки не менее чем на 12 % относительно образцов из стали 12Х2Н4А(-Ш) после нитроцементации. При этом контактные напряжения образцов из сталей 20ХЗМВФА-Ш после нитроцементации и 16ХЗНВФМБ-Ш после ионного азотирования находятся на одном уровне – расхождение менее 2 %.

Результаты исследований показали, что на характеристики предела выносливости исследуемых материалов можно воздействовать через изменение структуры упрочненного слоя в результате назначения химико-термической обработки в сочетании с оптимальным химическим составом материала.

Измельченное зерно и его четкие границы служат естественным препятствием для развития усталостных трещин.

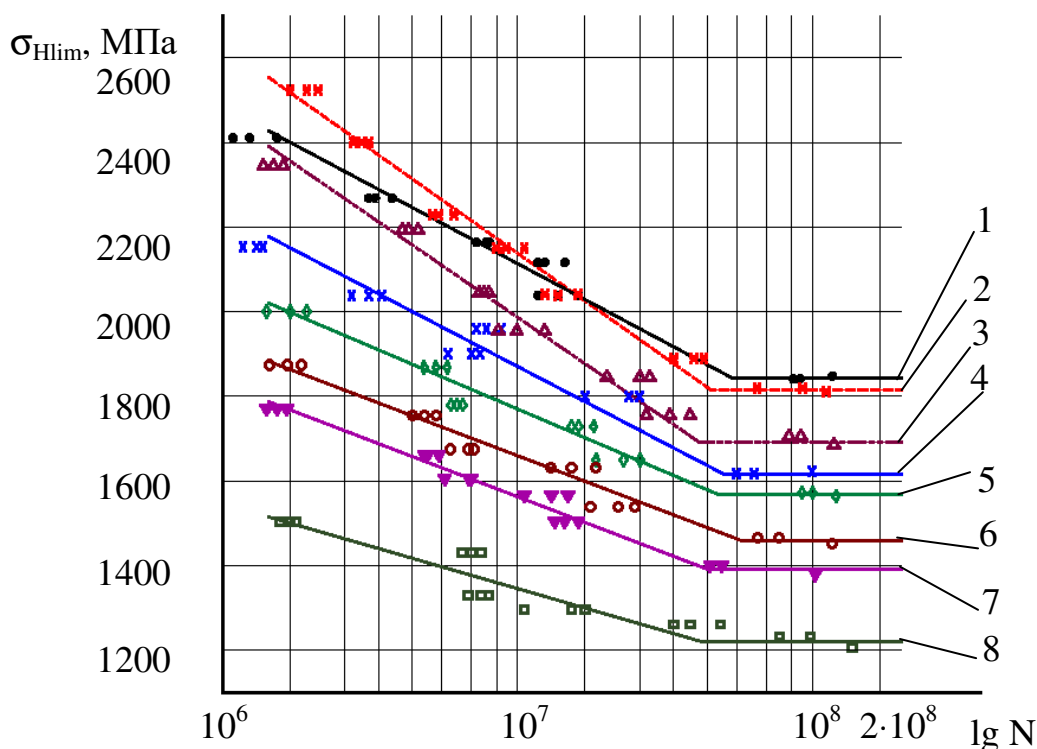


Рисунок 6 – Экспериментальный предел контактной выносливости образцов из сталей 20ХЗМВФА-Ш (1, 5), 16ХЗНВФМБ-Ш (2, 3), 18Х2Н4МА (4, 6), 12Х2Н4А(-Ш) (7, 8) после нитроцементации (1, 3, 4, 7) и ионного азотирования (2, 5, 6, 8)

Доказана возможность управления стабилизацией разброса механических свойств в соответствии с явлением технологической наследственности при изготовлении зубчатых колес. Подобный подход обуславливает универсальность разработанных моделей и методик управления стабильностью механических свойств материала детали на основе технологических процессов.

Четвертая глава посвящена разработке комплекса технологических мероприятий и методических рекомендаций по управлению эксплуатационными свойствами зубчатых колес. Он представлен в виде совокупности способа изготовления зубчатых колес (патент РФ № 2804265) и методики оценки эксплуатационных свойств (рисунок 7). Комплекс основан на определении несущей способности деталей и его приспособляемости к технологическому процессу и структуре материала детали.

Согласно этой схеме при обеспечении коэффициента запаса контактной прочности, в рамках инженерного анализа, выпускается конструкторская документация согласно электронной и расчетной моделей зацепления с последующим изготовлением зубчатого зацепления. Исходными данными для выполнения расчета методом конечных элементов служит трехмерная электронная модель зубчатого зацепления. Модель представляют в виде трехмерной конфигурации, с учетом всех конструктивно-технологических параметров, заложенных в аналитическом расчете.

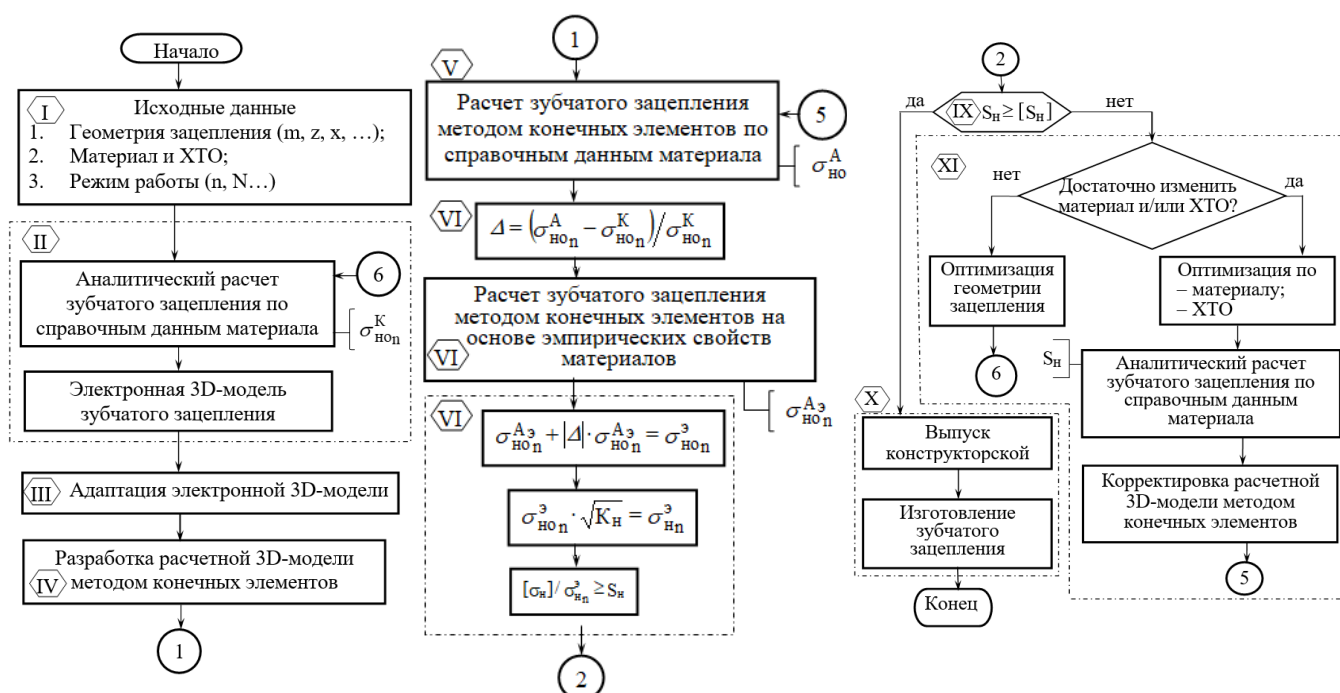


Рисунок 7 – Комплекс управления эксплуатационными свойствами зубчатой передачи

Затем объемную модель преобразуют в сектор зубчатого зацепления с обеспечением контакта по сопрягаемым поверхностям в начальной точке зацепления. Сектор зубчатого зацепления должен состоять минимум из одного зуба, включая впадины с обеих сторон зуба. Каждый венец зубчатого зацепления отражает реальное строение структуры детали и представляет собой соединение упрочненного слоя и сердцевины материала соответственно. Адаптация по преобразованию трехмерной модели зубчатого зацепления выполнена в NX.

Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data				
	A	B	C	
1	Contents of Engineering Data			
2	Material			
3	18X2H4MA_колесо			
4	18X2H4MA_колесо_упрочненный слой			
5	18X2H4MA_шестерня			
6	18X2H4MA_шестерня_упрочненный слой			

Properties of Outline Row 3: 18X2H4MA_колесо				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density		kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus		
6	Young's Modulus		MPa	
7	Poisson's Ratio			
8	Bulk Modulus		Pa	

Рисунок 8 – Фрагмент задания механических свойств материалов

На базе адаптированной трехмерной модели разрабатывается расчетная конечно-элементная объемная модель зубчатой передачи, на которую назначаются: материал для зубчатых колес с соответствующими механическими свойствами (рисунок 8); системы координат (декартовые и полярные); схема базирования; граничные условия, соответствующие режиму работы зацепления; сетка на каждый элемент; имитация пересопряжения зацепления по траектории движения общей точки контакта зубьев от момента касания профилей до выхода зубьев из зацепления (рисунок 9).

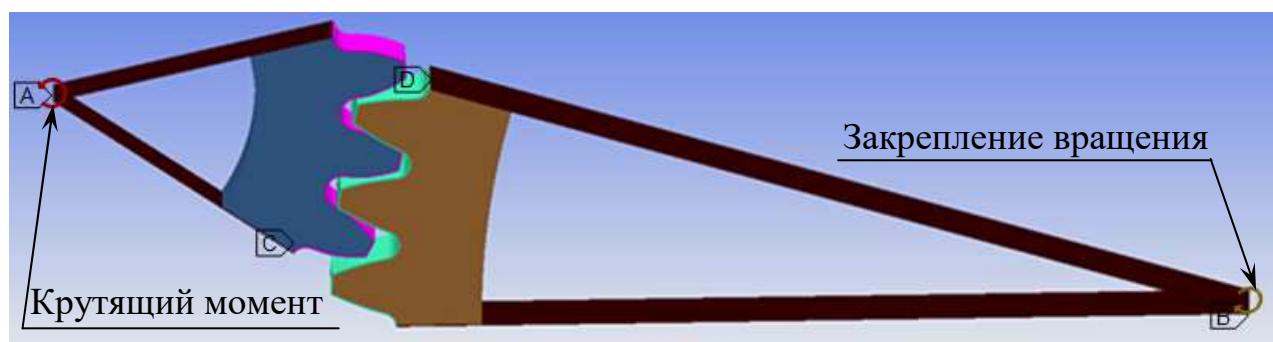


Рисунок 9 – Расчётная модель со схемой базирования и нагружения

Схема базирования реализуется тем, что для шестерни и колеса заданы ограничения перемещений, лишаящие детали пяти степеней свободы – запрет перемещений по нормали, боковым поверхностям – перемещение по осям X, Y, Z, вращение по осям X и Y. В модели обеспечено взаимное вращение деталей вокруг собственных осей с учетом контакта.

Граничными условиями расчетной модели являются крутящий момент, приложенный к радиальным поверхностям сектора венца шестерни в ее декартовой системе координат. На колесо назначено условие – вращение под действием крутящего момента, передаваемого от шестерни.

Благодаря применению методики оценки эксплуатационных свойств и способа изготовления зубчатого зацепления формируется достоверное моделирование условий эксплуатации зубчатого зацепления с высокой точностью, а именно: зубчатое зацепление при осуществлении вышеописанного способа испытывает как статические, так и динамические нагрузки. Статические нагрузки учитывают влияние механических свойств и упрочненного слоя зубчатого венца и сердцевины материала деталей. В модели реализован процесс вращательного движения зубчатых колес (рисунок 10). Данные мероприятия позволяют повысить долговечность зубчатого зацепления. Это достигается за счет учета фактических механических свойств материала зубчатых колес при расчете напряженно-деформированного состояния зубчатых передач.

Представлена оценка влияния механических свойств материала на напряжения в зоне контакта с учетом фактических данных свойств материала упрочненного слоя и сердцевины зубчатых колес на примере стали 20Х3МВФ-Ш (таблица 6) с учетом коэффициента сходимости $|\Delta|$ (этап VI рисунок 7) аналитического расчета и методики (АМ).

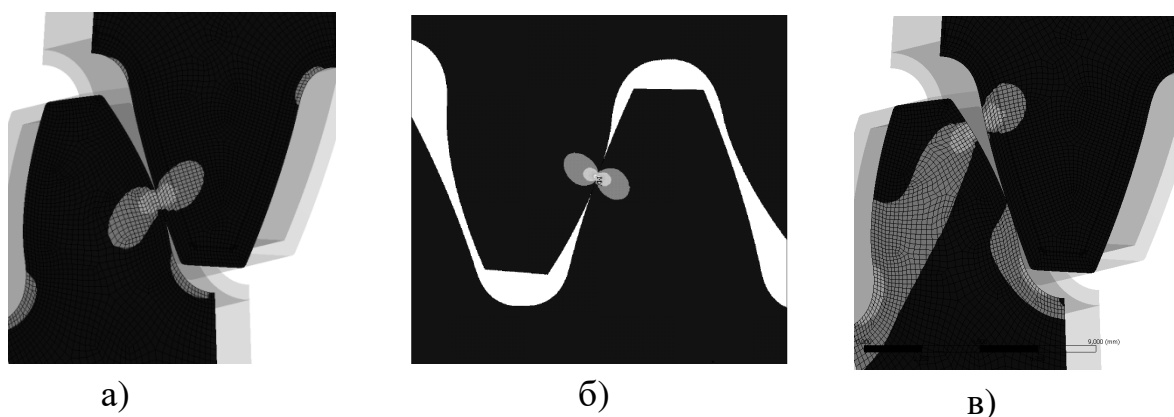


Рисунок 10 – Изменение напряженного состояния в зоне контакта с учетом вращения зацепления: а) до полюса; б) в полюсе; в) после полюса

Таблица 6 – Результаты расчета контактных напряжений по ГОСТ 21354-87 и предложенной методики на основе справочных и фактических механических свойства

Вид ХТО		Нитроцементация			Ионное азотирование		
Тип расчета / Коэффициент сходимости		ГОСТ	АМ	$ \Delta $	ГОСТ	АМ	$ \Delta $
Контактное напряжение σ_{H0} , МПа	по справочным данным	647,18	593	0,914	647,18	713	0,923
	по фактическим данным для упрочненного слоя	620,69	558	0,112	639,5	701,96	0,89
	по фактическим данным для упрочненного слоя и сердцевины	620,69	552	0,124	639,5	698,95	0,851

Таблица 7 – Соответствие расчетных значений контактных напряжений σ_{H0}

Марка материала	Значение контактного напряжения без учета дополнительных нагрузок σ_{H0} , МПа			Расхождение, %	
	ГОСТ	АМ и фактические данные*			
		НЦ	А	НЦ	А
18Х2Н4МА	645,65	658,82	650,48	2,00	0,742
20Х3МВФ-Ш	647,18	663,29	646,58	2,43	0,093
12Х2Н4А	628,60	629,74	623	0,18	0,899
16Х3НВФМБ-Ш	651,74	623,03	653,38	4,61	0,251
* согласно авторской методики					

В таблице 7 представлены расчетные контактные напряжения σ_{H0} по ГОСТ 21354-87 и разработанной методике, основанной на справочных и фактических механических свойствах материала. Анализ результатов сравнения расчетных величин контактных напряжений согласно ГОСТ 21354-87 и методике, основанной на справочных и фактических механических свойствах для различных марок материалов, демонстрирует удовлетворительную сходимость с

аппроксимацией не более 5 %. Это свидетельствует о возможности технологического обеспечения формирования оценки долговечности зубчатых колес, построенной на взаимосвязи конструкторско-технологических данных, учитывающих направленное изменение механических свойств и структурных характеристик материала и их стабильности.

Комплекс позволяет управлять качественным показателем долговечности зубчатой передачи в условиях напряженного состояния деталей, учитывая послойное строение структуры зубчатого венца, распределение нагрузки и условия стабильности механических свойств поверхностного упрочненного слоя и сердцевины материала деталей. Это создает возможность управления стабильностью механических свойств материалов обрабатываемых деталей на основе технологических методов обеспечения контактной прочности рабочих поверхностей зубчатых колес.

В пятой главе на основе исследований технологии обработки, учитывающей механические свойства конструкционных материалов и качество изготовления рабочих поверхностей венцов зубчатых колес ГТД, установлены модели оценки контактных напряжений, по которым определяется контактная выносливость (*эксплуатационное свойство*).

Анализ экспериментальных данных и их статистическая обработка, а также результаты испытаний и исследований материала поверхностных слоев с учетом сердцевины позволили разработать коэффициент совокупной чувствительности параметров упрочнения и геометрии рабочих поверхностей K^y и коэффициент чувствительности к свойствам материала Ω (формулы 1 и 2). Они формируют возможность параметрической оценки необходимых эксплуатационных свойств, опираясь на знание твердости и глубины упрочненного слоя в сочетании с конфигурацией сопрягаемых поверхностей и, особенно, механических свойств материала детали. Коэффициент чувствительности – это величина влияния параметров и их совокупности на эксплуатационные свойства объекта.

Коэффициент совокупной чувствительности параметров упрочнения и геометрии рабочих поверхностей:

$$K^y = \frac{HRC^y - HRC^c}{HRC^c} \cdot \frac{h}{s}, \quad (1)$$

где HRC^y – твердость упрочненного слоя; HRC^c – твердость сердцевины материала; h – глубина упрочненного слоя, мм, s – толщина материала в зоне контакта, мм.

Коэффициент чувствительности к свойствам материала:

$$\Omega = \frac{\sigma_B - \sigma_{0,2}}{\delta}, \quad (2)$$

где σ_B – предел прочности материала упрочненного слоя, МПа; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала упрочненного слоя, МПа; δ – относительное удлинение.

Оценка коэффициента качества обработки рабочих поверхностей (K_{Ra}) и коэффициента толщины материала (γ) в зоне контакта методом экспертных оценок представлены в таблицах 8 и 9 соответственно. Эмпирическая оценка

значений весовых коэффициентов (таблицы 8 и 9) сделана на базе широко применяемой номенклатуры изделий и серийного производства ПАО «ОДК-Сатурн».

Таблица 8 – Коэффициент качества обработки

Ra, мм	0,4	0,8	1,6
Степень точности по ГОСТ 1643-81 / ГОСТ 1758-81 / ОСТ 1 41671-91	5 и выше	6-7	8 и ниже
K _{Ra}	0,5	0,75	1

Таблица 9 – Геометрический коэффициент

s, мм	не более 3,5	от 3,5 до 5,5	свыше 5,5
γ	0,4	1	2

В результате статистических исследований для комплексной оценки контактной выносливости материала в зоне контакта были получены зависимости напряжений контакта без учета дополнительных нагрузок (σ_{H0}) для трех широко применяемых марок стали 16X3HВФМБ-Ш (ВКС-5), 20X3МВФ-Ш (ЭИ415-Ш) и 18X2H4МА от механических свойств материала (E , σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ), качества поверхностного слоя (HRC^y/HV^y , HRC^c/HV^c , h , Ra), геометрии сопрягаемых поверхностей (ρ , s) и действующих нагрузок (F_n) для исследуемых сталей с применением ПО STATISTICA 10 (формула 3 и таблица 7) на базе формулы Герца.

$$\sigma_{H0} = \left[K^y \cdot \frac{\Omega}{(0,2 \dots 0,3) \cdot \sigma_B \cdot \left(1 + \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} \right)} \right]^A \cdot K_{Ra} \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{F_n \cdot E}{\left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 \pm R_2} \right) \cdot b_w}}, \quad (3)$$

где K^y – коэффициент совокупной чувствительности параметров упрочнения и геометрии рабочих поверхностей; Ω – коэффициент чувствительности к свойствам материала, МПа; γ – коэффициент геометрии сопрягаемых поверхностей; K_{Ra} – коэффициент качества обработки; F_n – нормальная сила, Н; E – модуль упругости материала детали, МПа; R_1 , R_2 – радиус кривизны сопрягаемой поверхности шестерни и колеса, мм; b_w – ширина венца, мм; A – показатель степени (таблица 10).

Таблица 10 – Переменные параметры функции σ_{H0}

Марка материала	Вид ХТО	Переменный параметр
		Показатель степени А
18X2H4МА	Нитроцементация	0,085
	Ионное азотирование	0,119
20X3МВФ-Ш	Нитроцементация	0,130
	Ионное азотирование	0,157
16X3HВФМБ-Ш	Нитроцементация	0,181
	Ионное азотирование	0,125

Данная модель оценки контактных напряжений позволяет рассчитать несущую способность зубчатой передачи, учитывая фактическое изготовление деталей, позволяя достичь более высокой точности расчета, исходя из полученных изделий.

Дальнейший статистический анализ для стали 12Х2Н4А(-Ш) ввиду сравнительно невысоких показателей по контактным напряжениям (рисунок 6) с учетом тенденции развития современной техники нецелесообразен из-за отсутствия перспективы его применения.

В таблице 11 представлены величины контактных напряжений, без учета дополнительных нагрузок, определенные по авторской методике имитационного моделирования (таблица 7), согласно ГОСТ 21354-87 (таблица 7), а также расчетные значения контактных напряжений (σ_{H0}), без учета дополнительных нагрузок, определенные зависимостью (3) и таблицей 10. Из таблицы 11 следует, что величины контактных напряжений (σ_{H0}), вычисленные по предложенным зависимостям (3 и таблица 10), по величине близки к значениям напряжений, определенных по нормативной документации. Для различных марок стали демонстрируется приемлемая сходимость при погрешности расчета не более 7 %. Анализ величин контактных напряжений без учета дополнительных нагрузок по предложенным зависимостям (формула 3 и таблица 10) и определенных по ГОСТ 21354-87 также близки для различных марок стали. Характеризуются допустимой сходимостью при погрешности не более 4,5 %.

Таблица 11 – Соответствие методических и расчетных значений контактных напряжений

Марка материала	Вид ХТО	Величина контактных напряжений без учета дополнительных нагрузок σ_{H0} , МПа			
		расчетная		методика	
		min	max	АМ	ГОСТ
18Х2Н4МА	НЦ	638,68	654,75	658,82	645,65
	А	624,73	660,35	650,48	
20Х3МВФ-Ш	НЦ	635,59	660,21	663,29	647,18
	А	625,79	673,30	646,58	
16Х3НВФМБ-Ш	НЦ	622,52	657,44	623,03	628,60
	А	612,18	648,91	653,38	
Марка материала	Вид ХТО	Величина отклонения Δ , %			
		АМ		ГОСТ	
		min	max	min	max
18Х2Н4МА	НЦ	3,15	0,62	1,39	2,00
	А	4,12	1,49	2,23	0,74
20Х3МВФ-Ш	НЦ	4,36	0,47	1,97	2,42
	А	3,32	3,97	3,88	0,09
16Х3НВФМБ-Ш	НЦ	0,08	5,23	4,39	0,89
	А	6,73	0,69	3,13	3,79

Следовательно, зависимости (3) и таблица 10 могут быть использованы для материалов, упрочненных в процессе изготовления, или для материалов, у которых в правой части кривой усталости имеется горизонтальный участок, соответствующий $N \rightarrow \infty$. Также для зубчатых передач можно применять зависимости для различных материалов в сочетании с химико-термической обработкой. Это показывает, что предложенную методику анализа напряженного состояния зубчатой передачи можно рекомендовать для практического использования для повышения точности расчетов в условиях двигателестроения.

В шестой главе предложен порядок конструкторско-технологического обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес в рамках информационных технологий (рисунок 11). Предлагаемый порядок основан на знаниях стабильности механических свойств материалов и качества изготовления по параметру запаса прочности. Для обеспечения долговечности зубчатых колес в процессе всего жизненного цикла разработана методика приемлемости конструкции (рисунок 12) (патент РФ № 2850146). Она разработана исходя из условий эксплуатации и прочностных исследований, опирающихся на свойства материала и технологию производства.

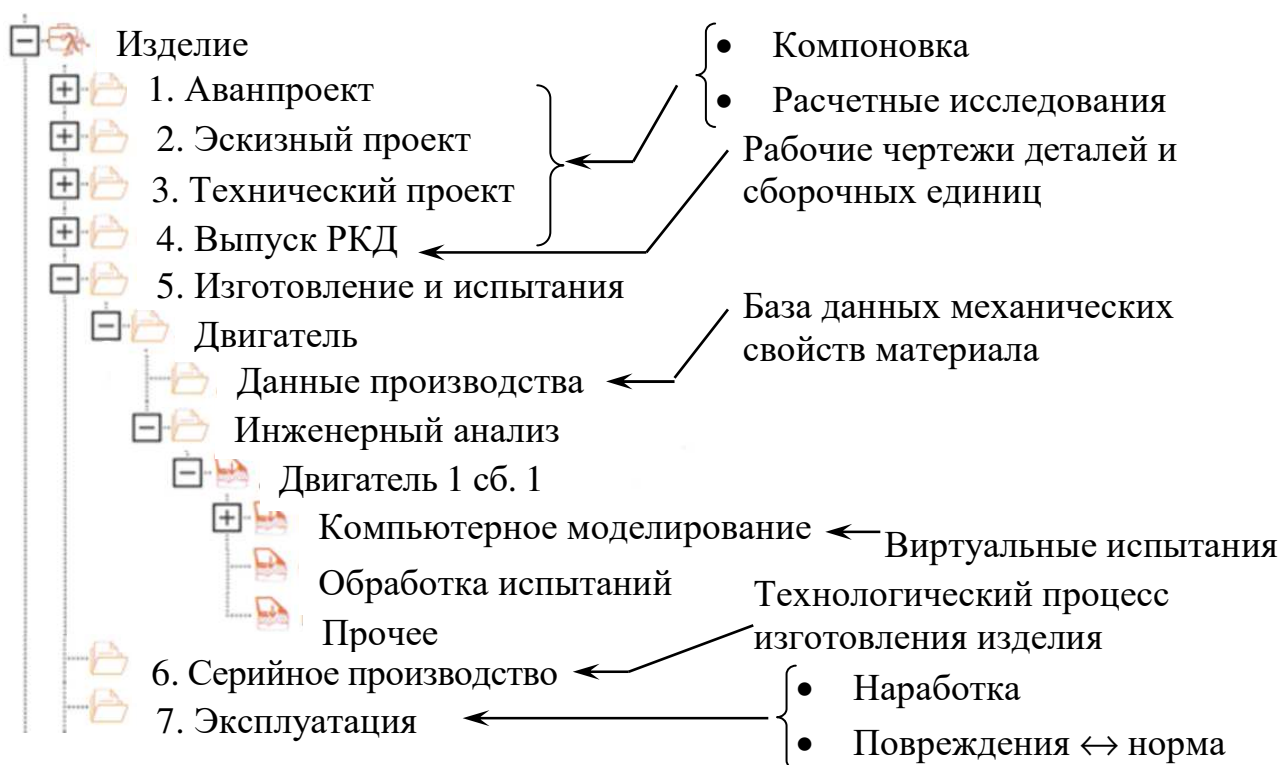


Рисунок 11 – Визуализация размещения данных в информационной среде

Предлагаемый порядок конструкторско-технологического обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес представляет собой последовательность технически обоснованных решений, которые улучшает возможность оценки долговечности зубчатых колес. Он обладает гибкостью и возможностью отработкой конструкции изделия в условиях развития технологии изготовления. Это позволяет ему существовать в двух сферах деятельности – конструкторской и технологической. Данная последовательность действий

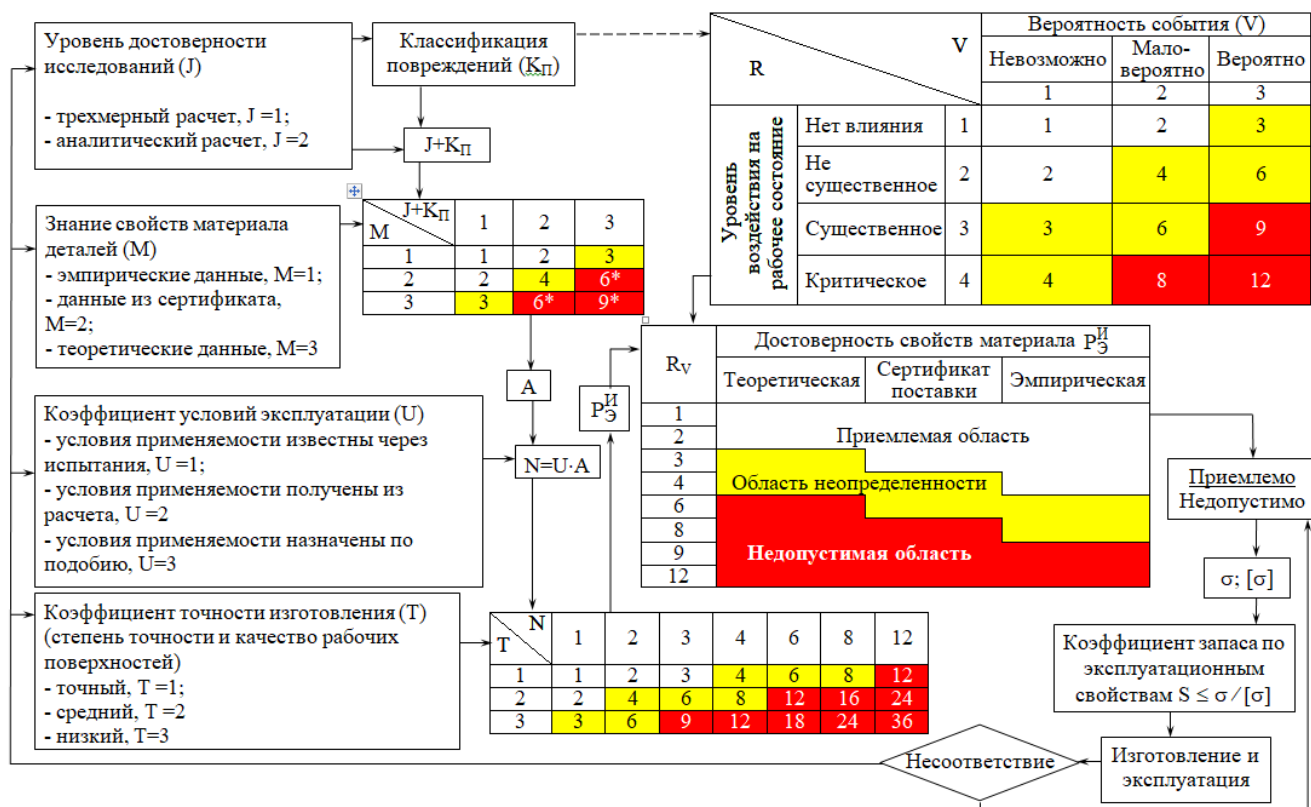


Рисунок 12 – Методика конструкторско-технологического обеспечения свойств зубчатых колес

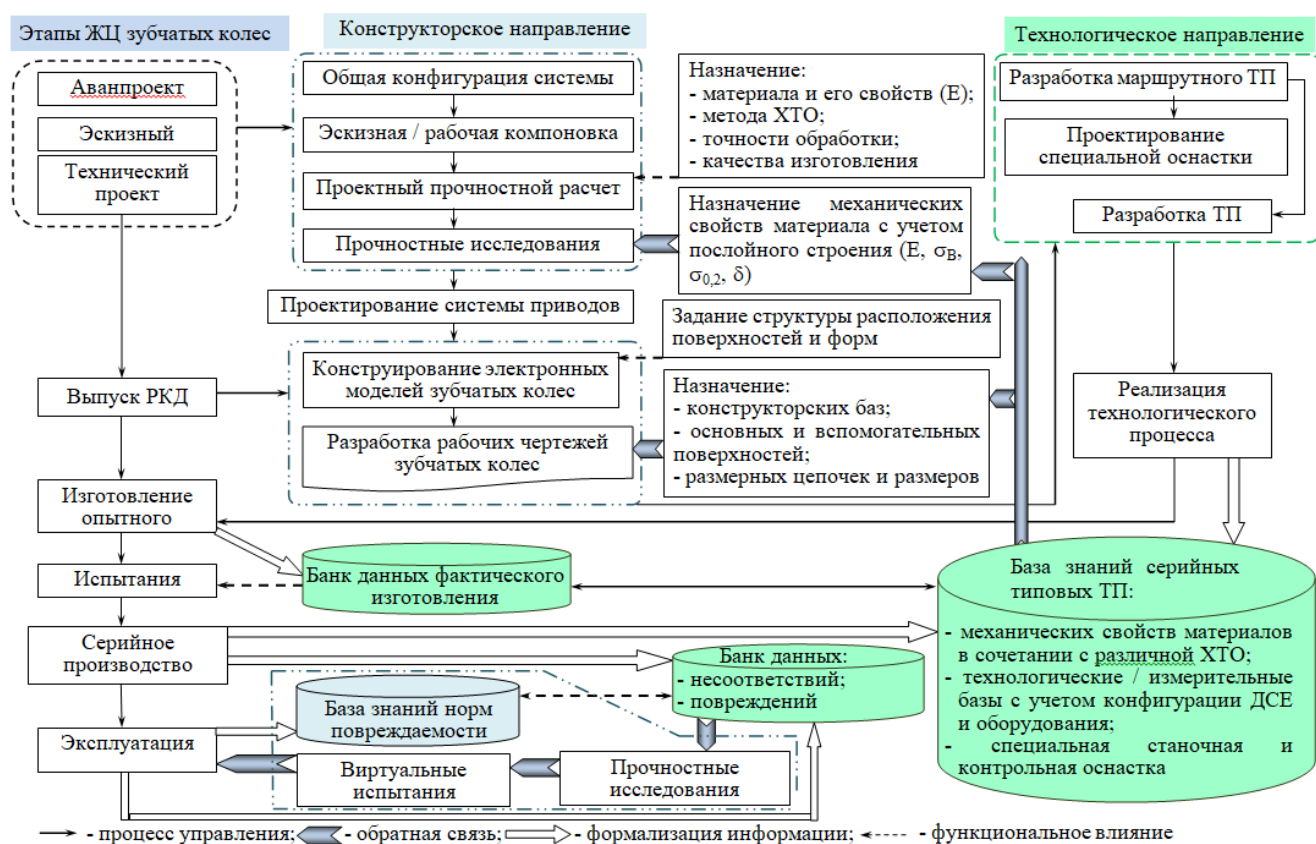


Рисунок 13 – Модель интегрированной конструкторско-технологической подготовки производства зубчатых колес

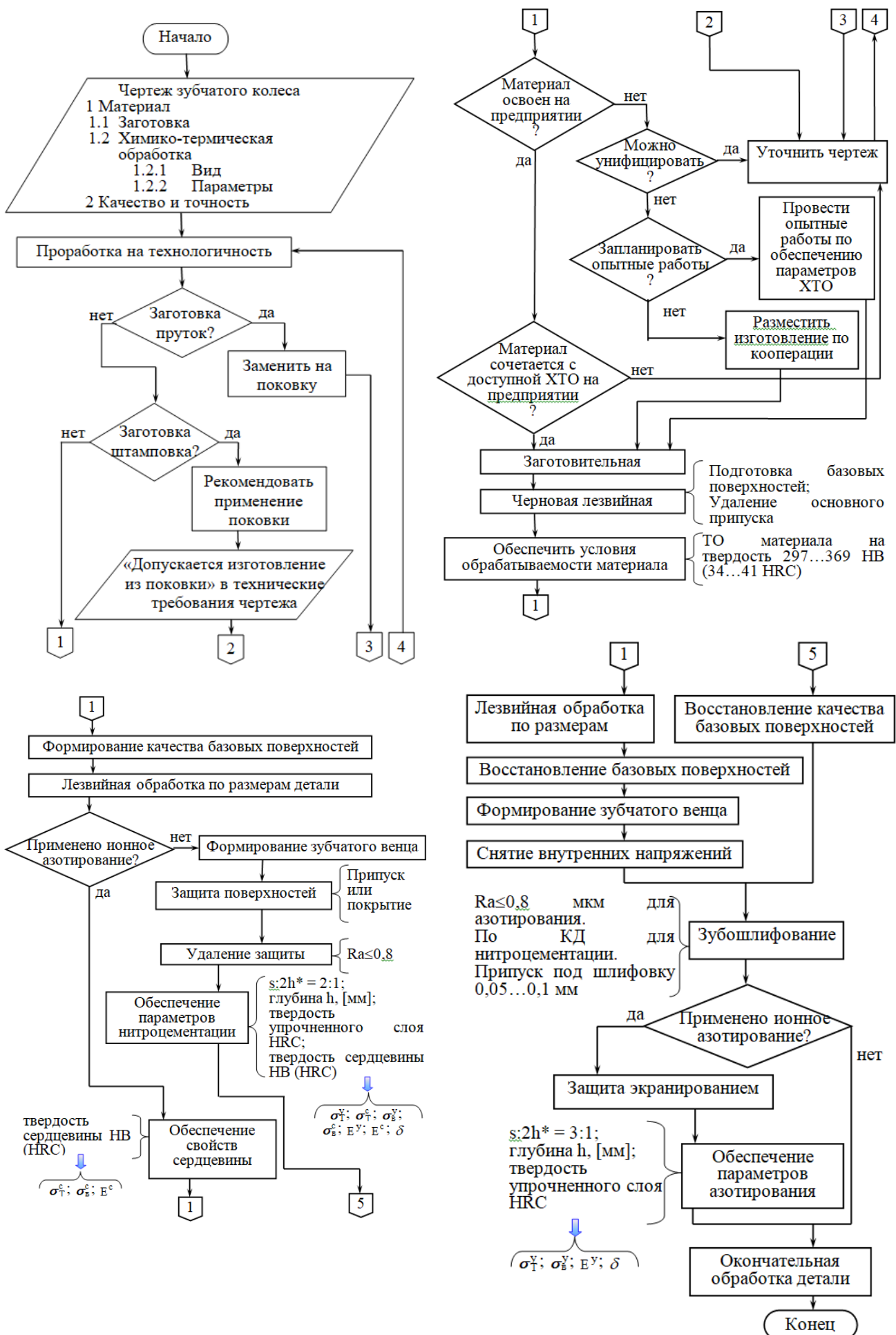


Рисунок 14 – Алгоритм формирования ТП изготовления зубчатых колес

является эффективной в виду целеориентирования, обоснованности и аргументирования технических решений в течение жизненного цикла. Также информация – знания, данные, нормы – является достоверной и постоянно обновляется, снабжена оперативным доступом к ней. Следовательно, это научный метод соотношения инженерии и науки в плане организации работ.

В основе порядка лежит модель интегрированной конструкторско-технологической подготовки производства с учетом действующих нормативных документов при ориентации на инженерно-технические знания. Это позволяет сформировать модель организации конструкторско-технологического обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес при интеграции процессов конструкторских и технологических подразделений с применением многофункциональных платформ.

Разработанная модель интегрированной конструкторско-технологической подготовки производства (рисунок 13) позволяет обеспечить прослеживаемость конструкции зубчатой передачи, фокусируясь на методике ее управления, при получении структурных знаний о стабильности свойств материала и качества продукции, основываясь на нормативных документах.

Седьмая глава посвящена разработке инженерного комплекса (алгоритм и методика), который позволяет управлять стабильностью механических свойств материалов обрабатываемых деталей, базируясь на технологических методах обеспечения контактной прочности. Выполнена его адаптация к использованию в производственных условиях. Он внедрен в технические подразделения промышленных предприятий.

Разработаны рекомендации по проектированию рабочих чертежей зубчатых колес путем взаимосвязи базовых поверхностей и геометрических характеристик различных типов зубчатых колес. Разработанный инженерный комплекс (рисунок 14) управления стабильностью механических свойств материалов ориентирован на проектно-конструкторско-технологическое понимание и знание производственной деятельности, что позволяет сформировать способность ситуационной осведомленности о технических условиях и технологичности конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе приведены научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на технологическое обеспечение требуемых эксплуатационных свойств зубчатых колес газотурбинных двигателей при направленном формировании механических свойств материала деталей путем интегрированной конструкторско - технологической подготовки производства, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие газотурбинного двигателестроения страны.

1. Установлено, что для технологического обеспечения требуемых эксплуатационных свойств (контактной выносливости) и долговечности зубчатых колес ГТД из сталей 20Х3МВФ-Ш, 18Х2Н4МА и 16Х3НВФМБ-Ш необходим комплексный учет механических свойств исходного материала заготовок (модуль упругости E , предел текучести $\sigma_{0,2}$ предел прочности σ_b , относительное удлинение

δ), параметров поверхностного упрочненного слоя (глубина слоя h , твердость HRC/HV) и сердцевины (твердость HB) рабочих поверхностей зубьев после химико-термической обработки, а также шероховатости поверхностного слоя (R_a).

2. В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что:

- нестабильность разброса механических свойств исходных заготовок из стали 18Х2Н4МА в виде проката в состоянии поставки: σ_b – более 18 %, $\sigma_{0,2}$ – более 21 %, твердость HB – более 38 %;

- снижение разброса механических свойств стали 18Х2Н4МА в результате последующей термической обработки поковок: σ_b – на 3%, $\sigma_{0,2}$ – на 5 %, твердость HB – на 8,5 %;

- снижение разброса механических свойств материала зубчатых колес в поверхностном слое и сердцевине после химико-термической обработки: предел текучести – до 26,7 % и до 21,3 %, предел прочности – до 17,2% и до 16 %, относительное удлинение – до 38,6 % и до 34,5 % соответственно;

- обеспечивается снижение неравномерности микротвердости поверхностного слоя с 37,1% до 12,9% (до 2,9 раза) и сердцевины с 36,7% до 10,7% (до 3,4 раза) при глубине диффузионного слоя h 0,6...1,2 мм при нитроцементации и h 0,2...0,4 мм при ионном азотировании;

- снижение величины модуля упругости готового изделия в поверхностном слое от 27 до 5 ГПа и сердцевине от 33 до 16 ГПа приводит к увеличению контактной выносливости зубчатых колес;

- для обеспечения заданной шероховатости $R_a = 0,4$ мм глубина зубошлифования не должна превышать 0,03 мм.

В совокупности это приводит к повышению контактной выносливости более чем на 12% для сталей 20Х3МВФ-Ш (при нитроцементации) и 16Х3НВФМБ-Ш (при нитроцементации и ионном азотировании) по сравнению со сталью 12Х2Н4А(-Ш) при нитроцементации.

3. Разработанная структурная модель жизненного цикла зубчатого зацепления ГТД позволяет определять необходимые технологические параметры с учетом механических свойств материала заготовки (E , $\sigma_{0,2}$, σ_b , δ), параметров поверхностного упрочненного слоя (h , HRC/HV) и сердцевины (HB) рабочих поверхностей зубьев после химико-термической обработки, а также шероховатости поверхностного слоя (R_a) зубьев после зубошлифования на основе явления технологической наследственности для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств (контактной выносливости) зубчатых колес.

4. Разработанная методика расчета эксплуатационных свойств (контактной выносливости) зубчатых колес (цилиндрических и конических) системы приводов газотурбинных двигателей (при частоте вращения ротора 7 500...20 000 об/мин ротора при ресурс 1 200...70 000 ч.; мощность общая суммарная на режиме запуска – 5...320 кВт / рабочем режиме – 2,5...122 кВт; передаточное число при режиме запуска – 0,354...0,839 / рабочем режиме – 0,15...0,92) с учетом механических свойств материала включает:

- аналитический расчет зубчатого зацепления с учетом справочных свойств материала зубчатых колес для определения контактных напряжений в зоне контакта;

- создание электронной модели зубчатого зацепления;

- разработка расчетной модели зубчатого зацепления с выделением упрочненного слоя и сердцевины материала;

- конечно-элементный расчет модели зубчатого зацепления с упрочненным слоем и сердцевиной для определения контактных напряжений с учетом имитации пересопряжения;

- применение фактических механических свойств материала упрочненного слоя и сердцевины;

- повторный конечно-элементный расчет модели зубчатого зацепления с упрочненным слоем и сердцевиной для определения контактных напряжений и коэффициента запаса прочности с учетом имитации пересопряжения;

- сравнение расчетного коэффициента запаса прочности с допустимым коэффициентом запаса по нормам прочности;

- выпуск конструкторской документации и изготовление зубчатых колес и зацепления

и позволяет обеспечивать требуемую контактную выносливость и долговечность зубчатого зацепления с учетом условий эксплуатации и возникающих контактных напряжений, а также с учетом формирования механических свойств зубчатых колес при их изготовлении.

5. Разработаны функциональные зависимости контактных напряжений сопрягаемых поверхностей зубчатых колес ГТД от:

- механических свойств (E , $\sigma_{0,2}$, σ_b , δ) сталей 20ХЗМВФ-Ш, 18Х2Н4МА и 16ХЗНВФМБ-Ш;

- параметров (HRC/HV , h , Ra) и геометрии (ρ , s , b_w) рабочих поверхностей после нитроцементации или ионного азотирования;

- коэффициента совокупной чувствительности параметров упрочнения и геометрии рабочих поверхностей (K^y) с учетом твердости упрочненного слоя (HRC^y/HV^y), твердости сердцевины материала (HRC^C/HV^C), глубины упрочненного слоя (h) и толщины зуба (s),

- коэффициента чувствительности к свойствам материала (Ω) с учетом предела текучести $\sigma_{0,2}$ предела прочности σ_b и относительного удлинения δ , обеспечивающие сходимость расчетных и экспериментальных значений контактных напряжений с расхождением не более 6%.

6. Разработанная методика конструкторско-технологического обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес на основе направленного формирования механических свойств материалов деталей и качества изготовления включает требования к механическим свойствам материала с учетом их направленного формирования, технологию изготовления профиля зубчатого колеса ГТД, условия эксплуатации с учетом повреждаемости сопрягаемых поверхностей и позволяет получить заключение о допустимости работы зубчатого зацепления в конкретных условиях эксплуатации.

7. Разработанная модель интегрированной конструкторско-технологической подготовки производства включает:

- объединение этапов жизненного цикла зубчатого зацепления ГТД по конструкторскому и технологическому направлению;

- назначение механических свойств материала зубчатых колес с учетом послойного строения (E , σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ) на этапе прочностного исследования;

- разработку технологического процесса с учетом направленного формирования механических свойств материалов в зависимости от вида заготовки и химико-термической обработки с последующим внедрением его в серийное производство через изготовление опытного образца и испытания;

- выполнение аналитического расчета и виртуальных испытаний исходя из информации по фактическому изготовлению и несоответствий в процессе эксплуатации с учетом норм повреждаемости

и позволяет выполнить технологическое обеспечение эксплуатационных свойств зубчатых колес ГТД на основе совокупности технологии изготовления, условий эксплуатации и расчетных исследований по методике обеспечения эксплуатационных свойств на всех этап жизненного цикла.

8. Разработанный инженерный комплекс (алгоритм и методика) направленного формирования механических свойств материала деталей базируется на технологических методах обеспечения контактной прочности с учетом технологичности конструкции, дополнительного контроля механических свойств упрочненного слоя и сердцевины материала (σ_T^y , σ_T^c , σ_b^y , σ_b^c , E^y , E^c , δ).

9. Внедрение предложенных конструкторско - технологических решений по направленному формированию механических свойств материалов деталей и качества изготовления, а также интегрированной подготовки производства и типизации изготовления зубчатых колес из стали 16X3HBFMB-III (вместо стали 18X2H4MA) в опытно-конструкторскую работу и серийное производство ПАО «ОДК-Сатурн» и серийное производство УП «Минотор-Сервис» позволило обеспечить требуемые эксплуатационные свойства зубчатых колес газотурбинных двигателей и получить ориентировочный экономический эффект более 600 000 руб.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шеховцева Е.В. Исследование контактной усталости цилиндрических зубчатых колес // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2009. №4. С. 35-38. (0,49 п.л.)

2. Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Контактная прочность зубьев зубчатых колес ГТД, изготовленных электроэрозионной обработкой с применением методов химико-термического упрочнения // Упрочняющие технологии и покрытия. М.: Инновационное машиностроение, 2009. №9 (57). С. 30-40. (1,23 п.л. / 1,0 п.л.)

3. Шеховцева, Е.В. Инновационный технологический процесс изготовления блока зубчатых колес двигателя // Электронный журнал «Труды МАИ», 2011. № 45. 19 с. (2,2 п.л.)

4. Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Технология изготовления закрытого венца блока зубчатых колес // Известия Тульского Государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Выпуск 8. С. 19-27. (1,3 п.л. / 1,0 п.л.)

5. Шеховцева Е.В. Изготовление профиля венца зубчатого колеса ГТД с применением контурной обработки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. Вып. 8. Ч. 2. С. 167-174. (1,3 п.л.)

6. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Упрочнение поверхностного слоя рабочих поверхностей зубчатых колес с помощью химико-термической обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. М.: Инновационное машиностроение, 2017. Том 13, №8 (152). С. 374 – 378. (0,58 п.л. / 0,45 п.л.)

7. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Методика проектирования планетарно-дифференциального редуктора // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел, ОГУ имени И.С. Тургенева, 2018. №2 (328). С. 59-69. (1,21 п.л. / 1,0 п.л.)

8. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Взаимосвязь физико-механических свойств материала, технологических условий обработки и эксплуатационных характеристик зубчатых колес // Вестник РГАТА имени П.А. Соловьева. Рыбинск, 2023. № 1 (64). С. 61-65. (0,58 п.л. / 0,4 п.л.)

9. Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов // Научные технологии в машиностроении – Брянск: Брянский государственный технический университет. 2023. № 8 (146). С. 35-42. (0,98 п.л. / 0,65 п.л.)

10. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Конструкторско-технологическая инженерия рабочих поверхностей зубчатых колес газотурбинных двигателей // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2023. Т. 26. № 3. С. 16-25. (1,16 п.л. / 0,86 п.л.)

11. Шеховцева Т.В., Шеховцева Е.В. Методология обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес на основе знаний механических свойств материала // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: ТулГУ, 2023. Выпуск 9. С. 31-34. (0,46 п.л. / 0,3 п.л.)

12. Шеховцева Е.В. Концепция технологического обеспечения эксплуатационных свойств на основе стабилизации механических свойств материалов зубчатых колес системы приводов газотурбинного двигателя // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2024. Т. 27. № 2. С. 15-24. (1,16 п.л.)

13. Шеховцева Е.В. Исследование микротвердости для обеспечения контактной выносливости конструкционных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. М.: Издательство «ТЕСТ-ЗЛ», 2024. Том 90. №9 С. 48-53. (0,74 п.л.)

14. Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Технологическое наследование механических свойств материала при его направленном формировании // iPolytech Journal, 2025. № 29(2). С. 160-169. (1,33 п.л. / 0,9 п.л.)

15. Шеховцева Е.В. Управление контактной прочностью зубчатых колес с поверхностным упрочнением на основании механических свойств материала // Вестник машиностроения, 2025. N/ 104. № 9 С. 766-771. (0,65 п.л.)

16. Shekhovtseva E.V. Control of the Contact Strength of Surface-Hardened Gears, Taking Account of Their Mechanical Properties // RUSSIAN ENGINEERING RESEARCH Vol. 45 No. 11 2025. P. 1545-1550. (0,65 п.л.)

17. Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Повышение прочности материала зубчатых колес путем электроэрозионной и химико-термической обработок // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. М.: Издательство «ТЕСТ-ЗЛ», 2017. Том 83. №6. С. 52-56. (0,61 п.л. / 0,5 п.л.)

18. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Особенности повреждения рабочих поверхностей зубчатых колес ГТД // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула, ТулГУ, 2019. Вып. 6. С. 406-416. (1,63 п.л. / 1,5 п.л.)

19. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Оценка контактных разрушений зубьев по боковым поверхностям // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», 2020. №4-2 (342). С. 103-111. (1,1 п.л. / 1,0 п.л.)

20. Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Обобщенный критерий технологичности деталей для их изготовления // Справочник. Инженерный журнал №11 (308). Приложение, 2022. С. 18-27. (1,24 п.л. / 0,5 п.л.)

21. Патент на изобретение РФ № 2403132. Способ электроэрозионной обработки закрытого венца цельного блока зубчатых колес / В.Ф. Безъязычный, Е.В. Шеховцева. опубл. 10.11.2010. Бюл. № 31.

22. Патент на изобретение РФ № 2528236. Планетарно-дифференциальный редуктор / В.А. Никифоров, Е.В. Шеховцева. опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.

23. Патент на изобретение РФ № 2532089. Дифференциальный редуктор турбовинтового двигателя / В.А. Никифоров, Е.В. Шеховцева. опубл. 27.10.2014, Бюл. № 30.

24. Патент на изобретение РФ № 2561649. Способ изготовления редуктора / Е.В. Шеховцева, В.А. Никифоров. опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24.

25. Патент на изобретение РФ № 2804265. Способ изготовления зубчатого зацепления / Е.В. Шеховцева, Д. А. Слободской. опубл. 26.09.2023, Бюл. № 27.

26. Патент на изобретение РФ № 2850146. Способ определения технического состояния зубчатого зацепления / Е.В. Шеховцева. опубл. 05.11.2025, Бюл. № 31.

27. Патент на полезную модель РФ № 140814. Планетарно-дифференциальный редуктор турбовинтового двигателя / В.А. Никифоров, Е.В. Шеховцева. опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.

28. Патент на полезную модель РФ № 145078. Планетарно-дифференциальный редуктор ТВД / В.А. Никифоров, Е.В. Шеховцева. опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.

Так же сопутствующие исследования в области проектирования ГТД и редукторных передач отражены в 27 охранных документах.

29. Bezieiazychnyi V.F., Shehovtseva E.V. Contact strength of gear teeth in a gas turbine engines using electroerosive machining with application of methods of

chemicothermal strengthening // Production and failures of gear wheels and gear boxes. Proceedings. Trnava, Slovak Republic, 2012. P. 71-79. (1,04 п.л. / 0,9 п.л.)

30. Шеховцева Е.В., Шеховцева, Т.В. Оценка распределения нагрузки вдоль контактной линии зубчатых колес // Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли: сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции памяти профессора А.В. Алиева. – Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. С. 46-50. (0,58 п.л. / 0,4 п.л.)

31. Шеховцева Е.В. Управление технологическими и эксплуатационными свойствами материала в условиях концепции цифрового двойника // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения. Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием. Тольятти, 2023. С. 136-143. (0,92 п.л.)

32. Шеховцева Е.В. Процедура автоматизированной оптимизации конфигурации и обработки зубчатого зацепления при инженерном анализе // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов Национальной научно-техн. конференции с международным участием: АПИР-28». Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. С. 91-95. (0,41 п.л.)

33. Шеховцева Е.В. Исследование структуры процесса усталостных разрушений зубчатых колес // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 10-12 апреля 2024 г. / Отв. ред. А.Р. Галлямов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2024. С. 136-140. (0,29 п.л.)

34. Шеховцева Е.В. Взаимосвязь технологии изготовления зубчатых колеси эксплуатационных параметров // Научоемкие технологии в машиностроении: XV Международная научно-техническая конференция (Москва, 1-3 ноября 2023 года); под общей редакцией В.Ю. Лавриненко. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. Т. 1. С. 375-377. (0,24 п.л.)

35. Шеховцева Е.В. Оценка функциональных способностей зубчатых колес исходя из стабильности производственного процесса / Е.В. Шеховцева, Т.В. Шеховцева // Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции памяти профессора А. В. Алиева. Ижевск, 2024. С. 90-93. (0,46 п.л. / 0,3 п.л.)

36. Шеховцева, Е.В., Шеховцева Т.В., Ерошков В.Ю. Проектирование редуктора планетарно-дифференциального // Машиностроение: инновационные аспекты развития: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2024. – № 7. – С. 9-17. (1,04 п.л. / 0,5 п.л.)

37. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Изучение механизма наследственности при изготовлении зубчатых колес ГТД // Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли: сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения профессора А. В. Алиева. Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2025. С. 35-36. (0,15 п.л. / 0,08 п.л.)

38. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Технологичность конструкции зубчатых колес ГТД: роль конструкторско-технологического сотрудничества и цифрового двойника // Инновационные технологии, оборудование и материалы машиностроительных производств (МашТех-2025): II Международная научно-техническая конференция / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»; под общ. Ред. В.Ю. Лаврененко. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. С. 137-142. (0,36 п.л. / 0,25 п.л.)

39. Шеховцева Е.В. Инженерия контактной прочности зубчатых колес: монография. Москва: ИНФРА-М, 2026. - 118 с.