

На правах рукописи



СТОЛЯРОВ ФЕДОР АЛЕКСЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ
НА ПРИМЕРЕ ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ ШАССИ**

Специальность 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гун Игорь Геннадьевич

Официальные оппоненты: **Панюков Дмитрий Иванович**,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра «Теоретическая и общая электротехника», профессор
Вдовин Денис Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра СМ-10 «Колесные машины», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск)

Защита состоится 9 июня 2026 г. в 15:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.324.03 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000 г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru/>.

Автореферат разослан « » апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Полякова Марина Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интеграция научных методов, методов управления качеством и стандартизации в процесс проектирования и непосредственно в производство позволяет не только повысить качество автомобильной продукции, но и сократить время ее запуска в серийное производство и издержки, а также увеличить прибыль.

Одним из способов решения задач управления и повышения качества продукции и развития производства является применение методов оценки и прогнозирования, а также методов стандартизации. Такие методы основаны как на теоретических, так и на экспериментальных исследованиях.

Одной из проблем является необходимость и сложность выбора и регламентации показателей качества автомобильных компонентов, отвечающих как за безопасную эксплуатацию транспортного средства, так и за долговечность работы узлов, работающих под нагрузкой и под воздействием факторов окружающей среды. Для такой комплексной оценки целесообразно применение методов системного анализа, функционально-целевого анализа, методов математического и физического моделирования, а также экспериментов. Данные методы целесообразно использовать на всех стадиях жизненного цикла продукции, в особенности на стадии проектирования и запуска в серийное производство. Однако они не могут в полной мере гарантировать соответствие продукции заданному уровню качества в условиях реальной эксплуатации.

В связи с этим, актуальность приобретают вопросы, связанные с проектированием продукции заданного уровня качества и его прогнозированием за счет комплексного подхода к проектированию конструкции и заданию требований, основанных на математической модели выбора предпочтительных показателей из таксонов классификации разрабатываемого вновь или существующего автомобильного компонента.

С практической точки зрения актуальность работы обусловлена проводимой политикой импортозамещения, ростом номенклатуры и объема производимых автомобильных компонентов на территории Российской Федерации и необходимостью обеспечения заданного уровня качества автомобильных компонентов с соблюдением сроков постановки на производство и серийных поставок.

Степень разработанности темы исследования.

Значительный вклад в развитие фундаментальных вопросов управления качеством внесли ученые: Э. Деминг, Дж. Джуран, П. Друкер, К. Исикава, Н. Кано, Р. Каплан, Ф. Котлер, Ф. Кросби, Г. Тагути, Н. Талеб, Ф. Тейлор, А. Фейгенбаум и В. Шухарт. В основу научно-практической базы работы легли изыскания следующих ключевых отечественных специалистов: Ю. П. Адлер, В. Н. Азаров, Г. Г. Азгальдов, И. З. Аронов, В. А. Барвинок, В. Я. Белобрагин, В. В. Бойцов, Б. В. Бойцов, В. А. Васильев, В. Г. Версан, Г. П. Воронин, А. В. Гличев, В. А. Лapidус, В. В. Окрепилов, И. И. Чайка и другие.

Существенный вклад в развитие научно-прикладных вопросов управления качеством автомобильных компонентов, а также вопросов разработки стандартов и выбора основных характеристик объекта стандартизации внесли отечественные ученые и специалисты: Д. В. Антипов, В. Ф. Безъязычный, С. А. Васин, В. Е. Годлевский, Э. М. Голубчик, О. А. Горленко, С. Я. Гродзенский, Г. С. Гун, Е. И. Гун, И. Г. Гун, В. П. Димитров, А. Я. Дмитриев, В. В. Ефимов, А. В. Зажигалкин, А. Г. Ивахненко, В. А. Качалов, В. Я. Кершенбаум, Ю. С. Ключков, В. Н. Клячкин, В. Н. Козловский, А. Г. Корчунов, П. А. Лонцих, И. Ю. Мезин, И. А. Михайловский, С. В. Мищенко, С. Н. Николаев, И. Н. Омельченко, Д. И. Панюков, К. Г. Пивоварова, Е. В. Плахотникова, М. А. Полякова, С. В. Пономарев, В. Б. Протасьев, С. В. Пугачев, М. И. Розно, Г. Ш. Рубин, Т. А. Салимова, Е. Г. Семенова,

Л. Е. Скрипко, А. Г. Суслов, Х. А. Фасхиев, А. И. Хаймович, И. Н. Хаймович, Ю. К. Чернов, А. Д. Шадрин, А. П. Шалаев, В. Л. Шпер, В. В. Щипанов, Г. Л. Юнак и другие.

Но несмотря на высокую степень изученности проблем оценки и прогнозирования качества автомобильных компонентов, существует необходимость разработки такого подхода для их проектирования, который позволил бы обеспечить качество в эксплуатации.

Область исследования соответствует паспорту специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства, а именно п.1. Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства, п. 2. Научно-практические основы технического регулирования, стандартизации, типизации, каталогизации, метрологического обеспечения, управления качеством и подтверждения соответствия, п. 9. Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов.

Объект исследования: виды деятельности по обеспечению качества автомобильных компонентов на этапах их конструирования и разработки технологии производства.

Предмет исследования: методы, методики, технологические решения производства автомобильных компонентов заданного уровня качества на примере шаровых шарниров шасси.

Цель: разработка комплекса технико-технологических решений для производства и обеспечения качества автокомпонентов с учетом их конструктивных особенностей и условий эксплуатации.

В работе были поставлены и решены следующие основные научные задачи:

1. Построение фасетной классификации шаровых шарниров шасси с использованием функциональных свойств и условий эксплуатации для систематизации знаний и накопленного опыта.

2. Разработка математической модели выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров шасси для их регламентации в конструкторской и технологической документации и повышения обоснованности принимаемых при проектировании решений.

3. Повышение качества шаровых шарниров шасси в эксплуатации за счет применения новой конструкции уплотнительной системы с отсекателем.

4. Совершенствование методики испытания шаровых шарниров шасси на герметичность.

5. Аprobация и внедрение разработанных научно-технических решений в производство автомобильных компонентов.

Научная новизна:

В результате проведенных исследований были получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые предложена фасетная классификация шаровых шарниров шасси, построенная на основе независимых таксонов конструктивных и эксплуатационных признаков, обеспечивающая систематизацию знаний о данном виде продукции и выявление факторов, определяющих его качество.

2. Разработана математическая модель выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров шасси на основе нечётких отношений предпочтения, обеспечивающая переход от субъективных экспертных оценок к формализованному количественному решению при регламентации требований в конструкторской и технологической документации.

3. Создана численная модель формирования бурта отсекателя методом холодной листовой штамповки с последующей раскаткой, отличающаяся применением вращающегося вокруг двух осей абсолютно жесткого инструмента, и позволяющая прогнозировать

вероятность возникновения дефектов типа несплошности по критерию FLD (Forming Limit Diagram).

4. Предложен комплексный подход к проектированию автокомпонентов заданного уровня качества, включающий фасетную классификацию, математическую модель выбора показателей и принципы функционально-ориентированных технологий, и обеспечивающий снижение рисков проектирования изделий ответственного назначения за счёт учёта конструктивных особенностей и условий эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость результатов:

1. Разработана конструкция уплотнительной системы шарового шарнира с отсекателем, обеспечивающая герметичность в течение всего срока службы изделия в сложных дорожных и климатических условиях, а также методические инструкции по ее проектированию.

2. Предложены режимы холодной листовой штамповки и раскатки бурта отсекателя, позволившие увеличить выход годной продукции с 85,3 % до 96,1 %.

3. Предложена усовершенствованная методика испытаний на герметичность шаровых шарниров шасси: снижена температура испытания (до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) и увеличены частоты качания/вращения пальца (до 2 Гц), что обеспечило валидацию конструкции в условиях, имитирующих условия реальной эксплуатации в РФ.

4. Разработан и внедрен шаровой шарнир передней подвески автомобиля LADA Largus, обеспечивший нулевую дефектность в поставках (0 ppm) и достижение целевых показателей качества в гарантийный период $3\text{MIS}=0$, $12\text{MIS}=1$, $24\text{MIS}=2$, $36\text{MIS}=5$ (MIS – month in service – количество дефектов на тысячу автомобилей за указанный в месяцах период эксплуатации).

Методология и методы исследования.

В работе использованы методы системного анализа, методы стандартизации, а именно кодирование и правила разработки нормативных документов, метод конечных элементов, метод классификации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров шасси.

2. Фасетная классификация шаровых шарниров шасси с учетом их конструктивных и эксплуатационных особенностей.

3. Численная модель процесса холодной листовой штамповки и раскатки бурта отсекателя.

4. Усовершенствованная методика испытаний шаровых шарниров шасси на герметичность.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждена соответствием результатов реализации методик и математических моделей с информацией о качестве продукции, а также положительными результатами промышленного внедрения. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на ряде научно-технических конференций: Международная научно-практическая конференции им. Д.И. Менделеева, посвященная 90-летию профессора Р.З. Магарила (Тюмень, 2021 г.); XV международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 2024 г.); 83-я международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы современной науки, техники и образования" (Магнитогорск, 2025 г.); 6-7th International Youth Scientific and Technical Conference «Magnitogorsk rolling practice» (Magnitogorsk, 2022, 2023 гг.).

Публикации.

Основное содержание работы отражено в 12 печатных работах, в том числе 5 статей опубликованы в журналах, включенных в Перечень ведущих российских рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ, получены 3 патента Российской Федерации на полезную модель.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа изложена на 132 листах машинописного текста, состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 51 рисунок, 10 таблиц, список литературы из 132 источников и 3 приложения на 4 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель, задачи исследований и методы их решения, сформулированы научная новизна, практическая значимость работы. Приведены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации и публикациях.

В первой главе проведен анализ существующих методов прогнозирования и обеспечения качества автомобильных компонентов, позволяющих гарантировать соответствие требованиям нормативной документации и долговечность в эксплуатации. Также рассмотрены вопросы, связанные с классификацией однородных объектов и выбором показателей качества продукции. Помимо этого, изучен вопрос создания функционально-ориентированных технологий (ФОТ) производства автомобильной продукции. Известные методы проектирования продукции и технологии ее производства, а также выбора показателей качества, регламентируемых в конструкторской и технологической документации, предложены в основном для метизной продукции и не учитывают особенностей эксплуатации в сложных дорожных и климатических условиях Российской Федерации.

Поэтому существует необходимость разработки такого подхода, который позволит учитывать не только конструктивные особенности сборочной единицы, но и принадлежность к определенной части системы анализируемого объекта и условия его использования. Это будет способствовать выбору такой стратегии проектирования продукта и технологии производства, которая обеспечит требуемый уровень качества изделия в эксплуатации.

Вторая глава посвящена разработке подхода к выбору основных показателей шаровых шарниров шасси на основе их классификационных признаков для последующей регламентации в конструкторской и технологической документации. Классификация конструктивных и эксплуатационных признаков изделия в данной работе основывается на двух методах:

1. Метод вариации эффектов при выявленных частных функциях. Такой подход позволяет декомпозировать узел и увидеть, какое место в системе автомобиля он занимает и какую конкретную функцию выполняет. Это, в частности, позволяет рассмотреть окружение узла на стадии проектирования для определения условий эксплуатации и специальных требований. Данный метод включает в себя три перехода: от частной задачи к частной функции, от частной функции к эффекту и от эффекта к узлу.

2. Системный анализ конструкции. С точки зрения проектирования конструкции системный анализ на стадии разработки позволяет комплексно понять принцип работы изделия, расположение структурных составляющих и взаимосвязь между компонентами, а также их отношение к деталям окружения. Такой подход необходим для корректной оценки при определении дефектов и отказов, которые могут возникнуть при

эксплуатации, разработки методов их устранения и формирования рекомендаций по совершенствованию конструкции в будущем.

Такие схемы хоть и систематизируют знание о шарнире, однако не дают рекомендаций по выбору стратегии проектирования.

На рисунке 1 представлена разработанная фасетная (независимая) классификация шаровых шарниров шасси автомобилей. Учтены следующие признаки:

1. Конструктивные признаки. Данные элементы классификации позволяют учесть особенности строения самого шарового шарнира и узла, частью которого он является. Это позволяет учитывать нюансы взаимодействия компонентов изделия с ответными деталями и деталями окружения.

2. Признаки расположения позволяют учесть расположение применяемого шарового шарнира в той или иной системе автомобиля и возможные особенности ее воздействия на проектируемое изделие.

3. Эксплуатационные признаки, которые позволяют разработчику конструкции или стандарта учитывать негативное влияние внешней среды на изделие, а именно воздействие твердых частиц, реагентов, влаги, температур и ультрафиолетового излучения.

Предложенная классификация дает разработчику конструкции наглядный инструмент выбора показателей продукции, на которые необходимо обратить внимание при проектировании, что в свою очередь позволит снизить риски появления отказов в эксплуатации. Впервые рассмотрены следующие классификационные признаки: тип крепления пальца к ответной детали, тип крепления корпуса к ответной детали, ориентация пальца, тип используемого вкладыша, по принадлежности к системе автомобиля и по типу воздействия окружающей среды.

Однако из представленной классификации неясно, какой из признаков необходимо регламентировать в конструкторской и технологической документации. Для решения данной задачи использован математический аппарат нечетких отношений предпочтения.

Задано множество показателей (альтернатив) $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ и нечеткое отношение нестрогого предпочтения (НОНП) R на множестве U с функцией предпочтения $\mu_R(u_i, u_j) \in [0, 1]$ – любое рефлексивное нечеткое отношение на множестве U . При этом выполняется условие $\mu_R(u_i, u_i) = 1, u_i \in U$. В данной работе НОНП задается лицом, принимающим решение (ЛПР).

Пусть НОНП имеет границы от 0 до 1. Будем определять для любой пары альтернатив $u_i, u_j \in U$ значение $\mu_R(u_i, u_j)$ как степень предпочтения « u_i не хуже u_j », что в записи будет обозначать $u_i \geq u_j$. Под равенством $\mu_R(u_i, u_j) = 0$ будем понимать $\mu_R(u_i, u_j) \rightarrow 0$, что означает «признаки несравнимы».

Строим нечеткое отношение строгого предпочтения (НОСП) R^S , ассоциированное с R , которое определяется функцией принадлежности

$$\mu_R^S(u_i, u_j) = \begin{cases} \mu_R(u_i, u_j) - \mu_R(u_j, u_i), & \mu_R(u_i, u_j) > \mu_R(u_j, u_i) \\ 0, & \mu_R(u_i, u_j) \leq \mu_R(u_j, u_i) \end{cases}, \quad (1)$$

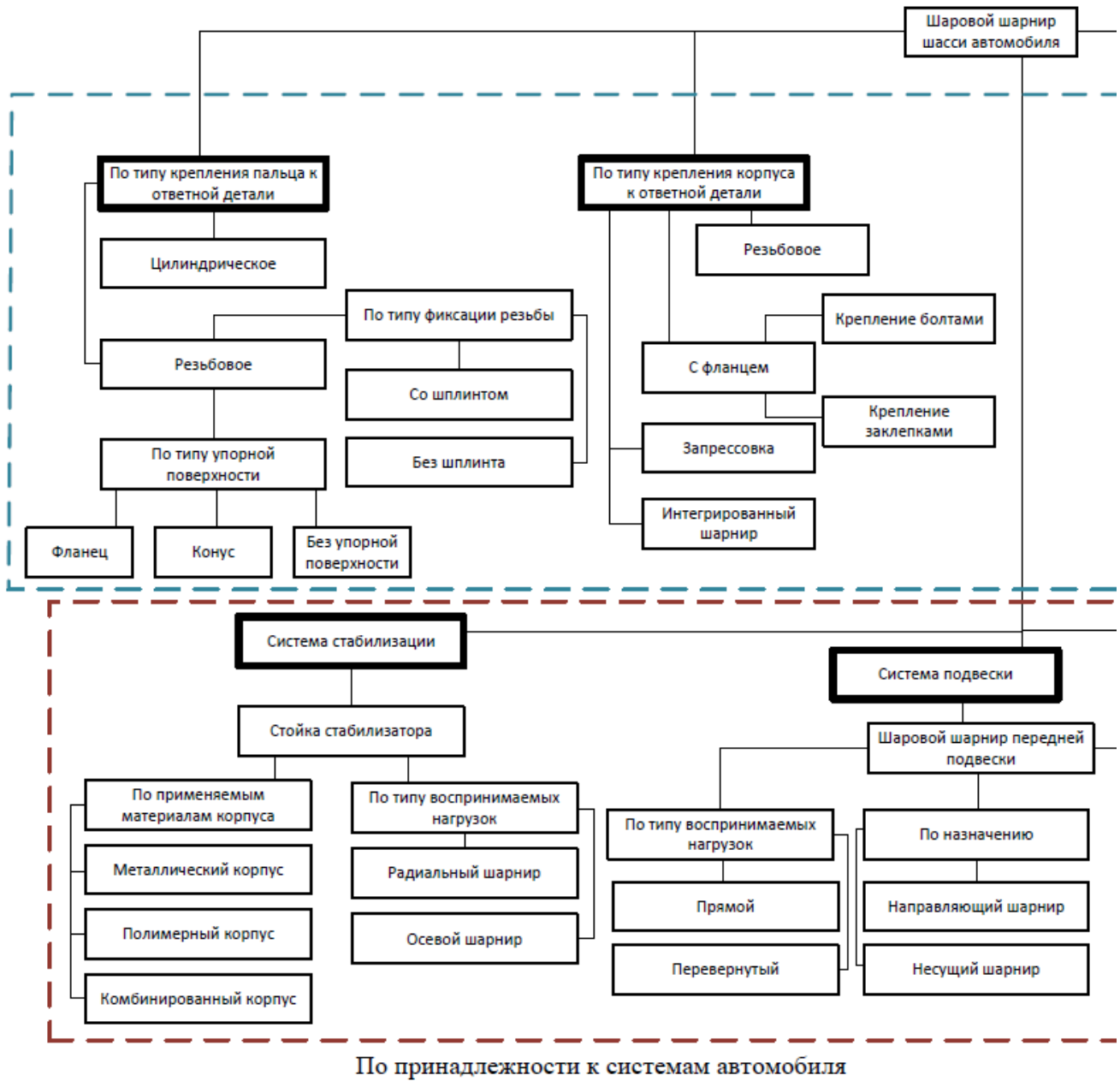
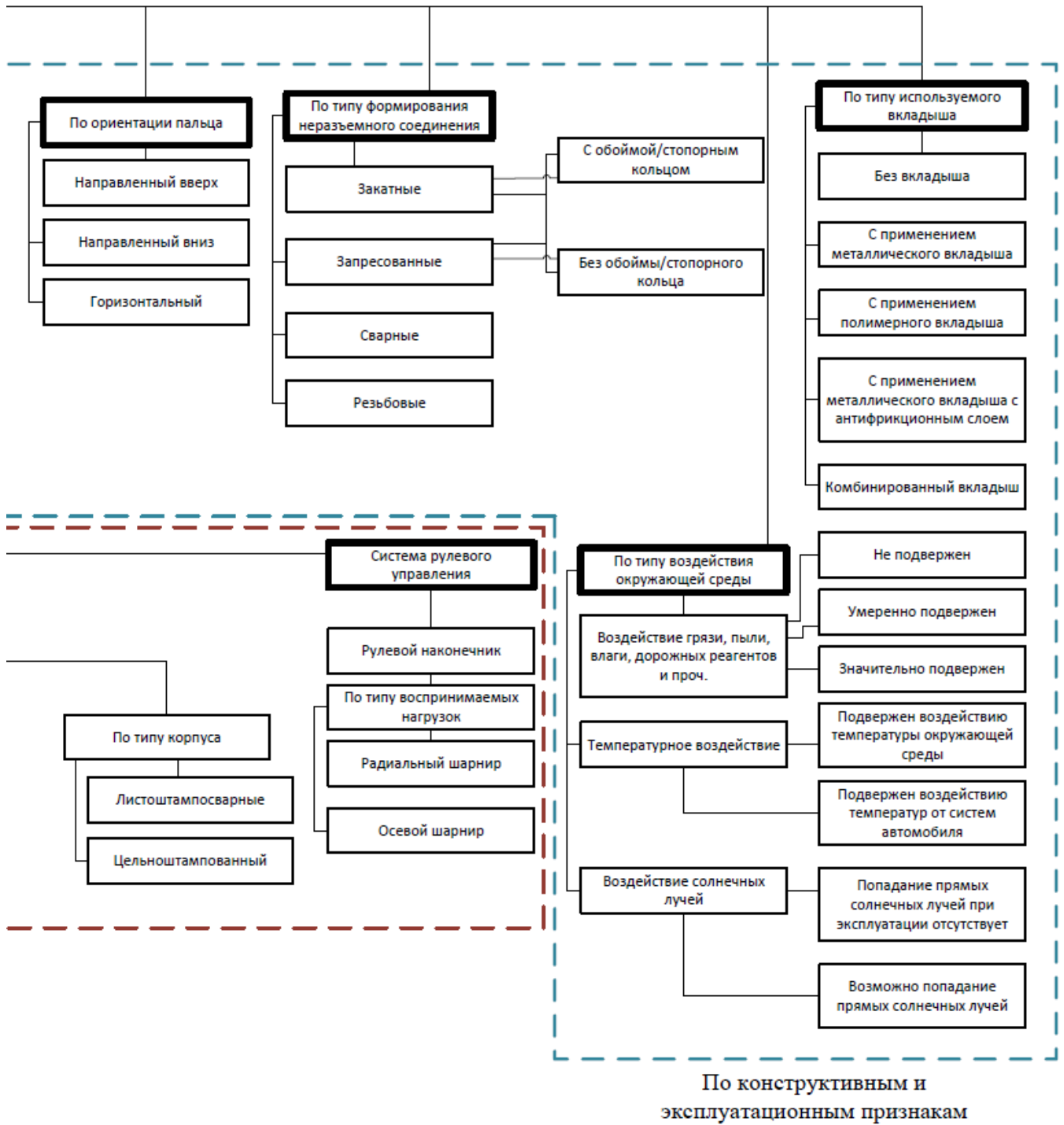


Рисунок 1 – Фасетная классификация



шаровых шарниров шасси

Затем строим нечеткое подмножество $U_R^{nd} \subset U$ недоминируемых показателей, ассоциированное с R . Иными словами, каждый показатель является равнозначным для исследуемого автомобильного компонента и не имеет какого-либо преимущества по отношению к другим показателям. Тогда данное нечеткое подмножество будет включать те показатели, которые не доминируются никакими другими и определяются функцией принадлежности

$$\mu_R^{nd}(u_i) = \min_{u_j \in U} \{1 - \mu_R^S(u_j, u_i)\} = 1 - \max_{u_j \in U} \{1 - \mu_R^S(u_j, u_i)\}, \quad u_i \in U, \quad (2)$$

Для любого показателя значение $\mu_R^{nd}(u_i)$ рассматривается как степень его недоминируемости, то есть степень, с которой u_i не доминируется ни одним показателем из множества возможных U . Это можно представить в следующем виде

$$\mu_R^{nd}(u_i) = \alpha, \quad (3)$$

где α - степень недоминируемости выбираемого показателя другими из множества равнозначных для анализируемого автомобильного компонента.

При этом $0 < \alpha < 1$, т.е. показатель может доминироваться другими, но со степенью не выше 1.

Рациональным будем считать выбор показателей, которые имеют по возможности большую степень принадлежности множеству U_R^{nd} .

Выбираем показатель, для которого

$$u^* = \operatorname{argmax}_{u_i \in U} \mu_R^{nd}(u_i), \quad (4)$$

Если выполняется это условие, то данный показатель следует выбрать для регламентации в конструкторской и технологической документации.

Оценка проведена по нескольким критериям: обеспечение безопасности транспортного средства, обеспечение основной функции изделия и уровень комфорта водителя и пассажиров. Признак, записанный в строке, сравнивали с признаком, записанным в столбце. Если признак, записанный в строке, имеет преимущество над признаком, записанным в столбце, тогда в соответствующую ячейку ставили знак «+». Если признак, записанный в строке, не имеет преимущества над признаком, записанным в столбце (т.е. это оценивается как недостаток), тогда в соответствующую ячейку ставили знак «-». Недостаток информации или невозможность сравнить признаки по предложенному критерию обозначали знаком «0». Затем качественная таблица сравнений была преобразована в соответствующую числовую таблицу: в ячейках с минусами и нулями записывается «0», в ячейках с плюсами – «1».

На основе полученной числовой таблицы сравнения признаков получена матрица M_R . Каждый из прямоугольников со сравнениями по трем критериям превращаем в строку матрицы. Каждый i -ый элемент строки – это сумма произведений трех элементов i -ой строки прямоугольника на их весовые коэффициенты. В рамках данного диссертационного исследования будем считать, что все критерии для каждого признака имеют одинаковый вес (важность) для лица, принимающего решение. То есть значение веса критериев будет следующее

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{3}. \quad (5)$$

Тогда, нечеткое отношение нестрогого предпочтения (НОНП) R определяется матрицей M_R , в результате транспонирования которой получаем матрицу M_R^T . Затем строим нечеткое отношение строгого предпочтения R^S , которое определяется матрицей M_R^S и вычисляемое путем урезанного вычитания матрицы M_R^T из матрицы M_R .

Затем находим максимальные численные значения элементов в столбцах матрицы M_R^S .

Множество U_R^{nd} , которое является нечетким множеством анализируемых признаков шарового шарнира, получено на основе матриц M_R и M_R^T и определяется вектором μ_R^{nd} , каждый элемент которого является результатом вычитания соответствующего элемента вектора v_R из единицы.

Таким образом, стратегии выбора значимых классификационных признаков шарового шарнира для последующей регламентации в конструкторской и технологической документации, соответствует максимальное значение вектора μ_R^{nd} . В данном расчетном случае определяющим признаком качества является тип воздействия окружающей среды. Также весомые значения имеют тип крепления пальца к ответной детали, тип крепления корпуса к ответной детали, ориентация пальца, система стабилизации, тип используемого вкладыша, тип формирования шарнирного соединения.

В результате проведенных исследований предложена математическая модель выбора предпочтительных показателей шарового шарнира шасси, основанная на разработанной фасетной классификации конструктивных и эксплуатационных признаков шаровых шарниров шасси, позволяющая обеспечить качество изделия в эксплуатации.

В третьей главе описан процесс проектирования конструкции шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus, основанный на предложенной методике выбора показателей, и технологии производства отсекаателя. Наряду с этим модернизирована методика испытания уплотнительной системы шаровых шарниров на герметичность.

По разработанной математической модели выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров шасси выявлено, что тип воздействия окружающей среды является ключевым для обеспечения качества шарового шарнира шасси в течение гарантийного периода эксплуатации. Исходя из этого, для шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus целесообразно применить гарантированные конструкторские решения для обеспечения герметичности в течение всего срока службы.

Поэтому была разработана конструкция уплотнительной системы с отсекателем. Данная конструкция защищена патентом РФ № 205156. На рисунке 2 представлено сравнение двух вариантов конструкций шаровых шарниров.

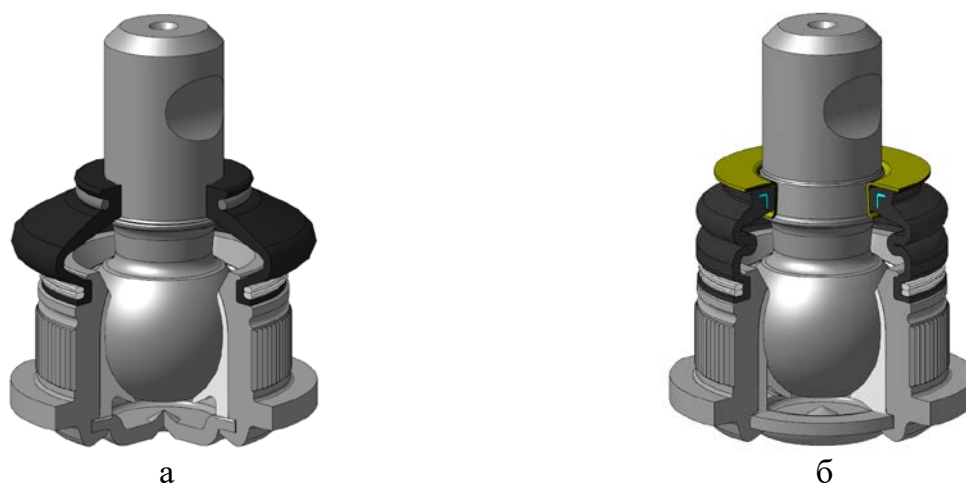


Рисунок 2 – Сравнение конструкций шаровых шарниров:

а – шаровой шарнир со старой уплотнительной системой; б – шаровой шарнир с уплотнительной системой с отсекателем

Более подробное описание предложенной конструкции уплотнительной системы представлено на рисунке 3. Также применено интегрированное цельноштампованное

уплотнительное кольцо L-образного сечения, обеспечивающее постоянную и равномерную каркасную жесткость, натяг и прилегание чехла на отсекателе при качании пальца.

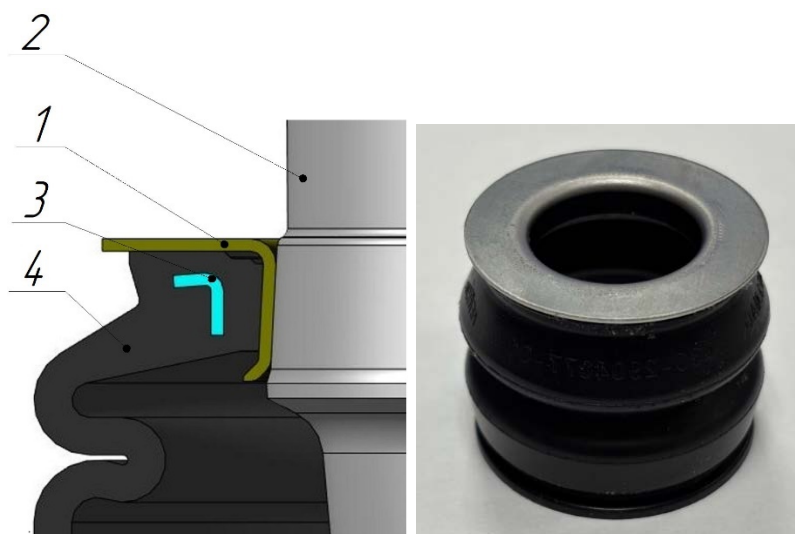


Рисунок 3 – Внешний вид уплотнительной системы шарового шарнира с отсекателем из нержавеющей стали: 1 – отсекатель; 2 – палец шаровой (с покрытием ZnNi); 3 – интегрированное кольцо; 4 – чехол защитный

В качестве технологии производства отсекателя выбрана технология холодной листовой штамповки. Данная технология выбрана как наиболее производительная и экономически оправданная. Сложность проектирования технологического процесса изготовления данной детали заключается в том, что толщина исходной ленты для отсекателя составляет всего 0,6 мм, а процент утонения доходит до 30%. Сам же отсекатель предлагается изготавливать из нержавеющей стали AISI 304 (08X18H10), что также сопряжено с повышенным риском возникновения дефектов по сравнению с классическими углеродистыми марками стали для штамповки (например, 08Ю, DC04 и др.).

Проведено моделирование процессов формирования бурта отсекателя штамповкой и раскаткой с целью выбора рациональной технологии производства данной детали. Внешний вид сеток конечно-элементных моделей представлен на рисунке 4.

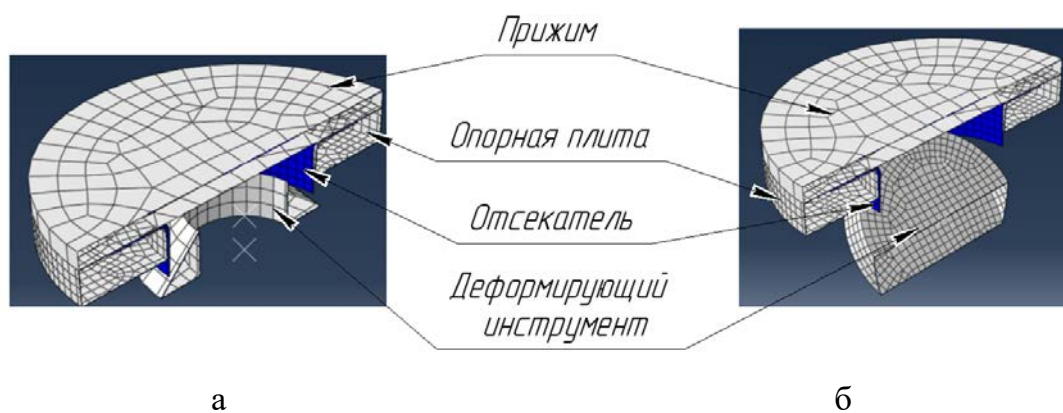


Рисунок 4 – Внешний вид сеток конечно-элементных моделей:
а – раздача штамповкой; б – раздача раскаткой

Для оценки вероятности возникновения дефекта воспользуемся критерием вероятности возникновения повреждения для FLD (Forming Limit Diagram), который задается следующим образом

$$\omega_{FLD} = \frac{\varepsilon_{major}}{\varepsilon_{major}^{FLD}(\varepsilon_{minor}, \theta, f_i)}, \quad (6)$$

где ε_{major} – главные деформации; ε_{minor} – второстепенные деформации; θ – температура; f_i – иные факторы (микроструктура, скорость деформации и др).

В исследуемом случае при прочих равных целесообразно учитывать только главные и второстепенные деформации для упрощения задания граничных условий и сокращения времени расчета. В этом случае критерий вероятности возникновения повреждений принимает вид

$$\omega_{FLD} = \frac{\varepsilon_{major}^A}{\varepsilon_{major}^B}, \quad (7)$$

где ε_{major}^A – главные деформации в конкретном элементе; ε_{major}^B – максимальная главная деформация на кривой FLC (Forming Limit Curve) с соответствующей второстепенные деформацией.

На рисунке 5 представлен внешний вид модели деформирования отсекателя с визуализированным критерием вероятности разрушения и график зависимости увеличения данного критерия от времени шага в двух наиболее деформированных элементах.

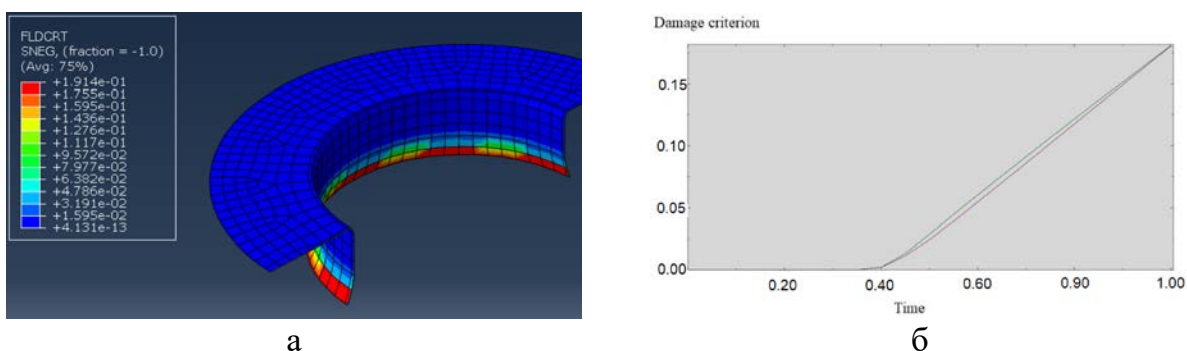


Рисунок 5 – Визуализация критерия вероятности возникновения разрушения для модели раздачи бурта штамповкой: а – распределение критерия по объему отсекателя; б – график зависимости критерия от времени шага

На рисунке 6 представлены аналогичные результаты для модели формирования бурта раскаткой.

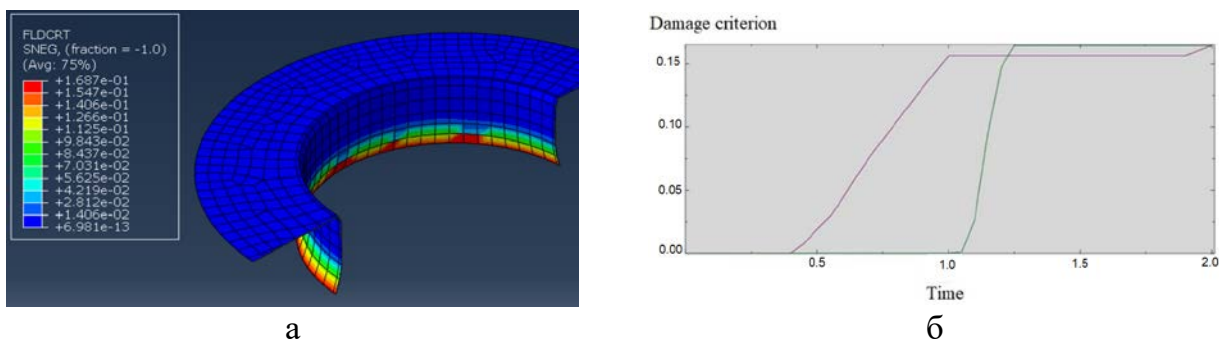


Рисунок 6 – Визуализация критерия вероятности возникновения разрушения для модели формирования бурта раскаткой: а – распределение критерия по объему отсекателя; б – график зависимости критерия от времени шага

Максимальное значение критерия FLD для процесса штамповки составляет 0,1805, а для процесса раскатки 0,160, что на 11,4 % ниже.

Как видно из полученных результатов, процесс раскатки является более предпочтительным с точки зрения минимизации риска возникновения дефектов типа несплошности по критерию FLD. Внешний вид отсекаателя, изготовленного по существующей и модернизированной схемам, представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Внешний вид отсекаателя, изготовленного по: а – существующей схеме переходов со штамповкой бурта (присутствуют нарушения сплошности на бурте); б) – модернизированной схеме деформирования с раскаткой бурта (дефекты отсутствуют)

Обеспечение герметичности является наиболее важным параметром с точки зрения обеспечения заданного уровня качества шаровых шарниров в эксплуатации при условии, что обеспечиваются их характеристики безопасности. Однако существующая методика испытания на герметичность шаровых шарниров не позволяет воспроизвести дефект в эксплуатации на стадии прототипирования. Поэтому необходимо изменить режимы испытания таким образом, чтобы они воспроизводили реальные условия эксплуатации в сложных дорожных и климатических условиях Российской Федерации. Доработка методики проводилась с учетом этих условий.

Модернизированы следующие режимы испытаний:

1. Отрицательная температура понижена до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. В таком случае снижаются упругие характеристики резины чехла, что может негативно отразиться на плотности прилегания горловин чехла в сопряжении с ответными деталями и привести к увеличению сопротивления упругой деформации гофры чехла.

2. Частота вращения пальца для стоек стабилизатора и частота качания пальца для шаровых шарниров передней подвески и рулевых наконечников при обеих температурах увеличена до 2 Гц. Как следствие наблюдается рост динамического модуля упругости резины и сокращается время на релаксацию резины чехла и возврат его формы к начальному положению. В этом случае повышается риск возникновения зазора между горловиной чехла и пальцем. Также при увеличении частоты движения и числа циклов повышается риск преждевременного износа горловины чехла.

Усовершенствованная методика испытания на герметичность представлена в таблице 1. Зеленым цветом выделены предложенные изменения.

Таблица 1 - Усовершенствованная методика испытания на герметичность

	Параметр	Погружение в воду	Погружение в раствор воды и этиленгликоля
	Температура жидкой среды, °С	+23	-20 (-15)
Качание	Угол качания пальца, град.	Индивидуально	Индивидуально
	Частота качания, Гц	2 (0,1)* 0,1**	2 (0,1)* 0,1**
	Количество циклов качания	200 000 (10 000)* 10 000**	50 000 (2 500)* 2 500**
Вращение	Угол вращения пальца, град.	Индивидуально	Индивидуально
	Частота вращения, Гц	0,4* 2 (0,4)**	0,4* 2 (0,4)**
	Количество циклов вращения	40 000* 200 000 (40 000)**	10 000* 50 000 (10 000)**

* - для шаровых шарниров передней подвески и рулевых наконечников

** - для шарниров стоек стабилизатора

в скобках приведены режимы испытаний до изменений

Помимо этого выбрана концентрация раствора воды и этиленгликоля (44 %), обеспечивающая его минимальную динамическую вязкость при минимальной температуре проведения испытаний.

Четвертая глава посвящена постановке разработанной продукции на производство.

Применение подхода проектирования технологического процесса, основанного на методе проектирования ФОТ, позволяет разработать рациональный процесс производства изделия. Тем не менее некорректно рассматривать процесс выпуска продукции только для технологии его производства, необходимо также учитывать иные стадии жизненного цикла продукции, а именно проектирование конструкции, валидацию и контроль в процессе производства, так как данные аспекты также оказывают значительное влияние на качество изделия и его функциональные характеристики. В связи с этим предлагается модернизированная схема синтеза ФОТ с учетом этих аспектов, представленная на рисунке 8. Двойной линией на рисунке указана предлагаемая модернизация.

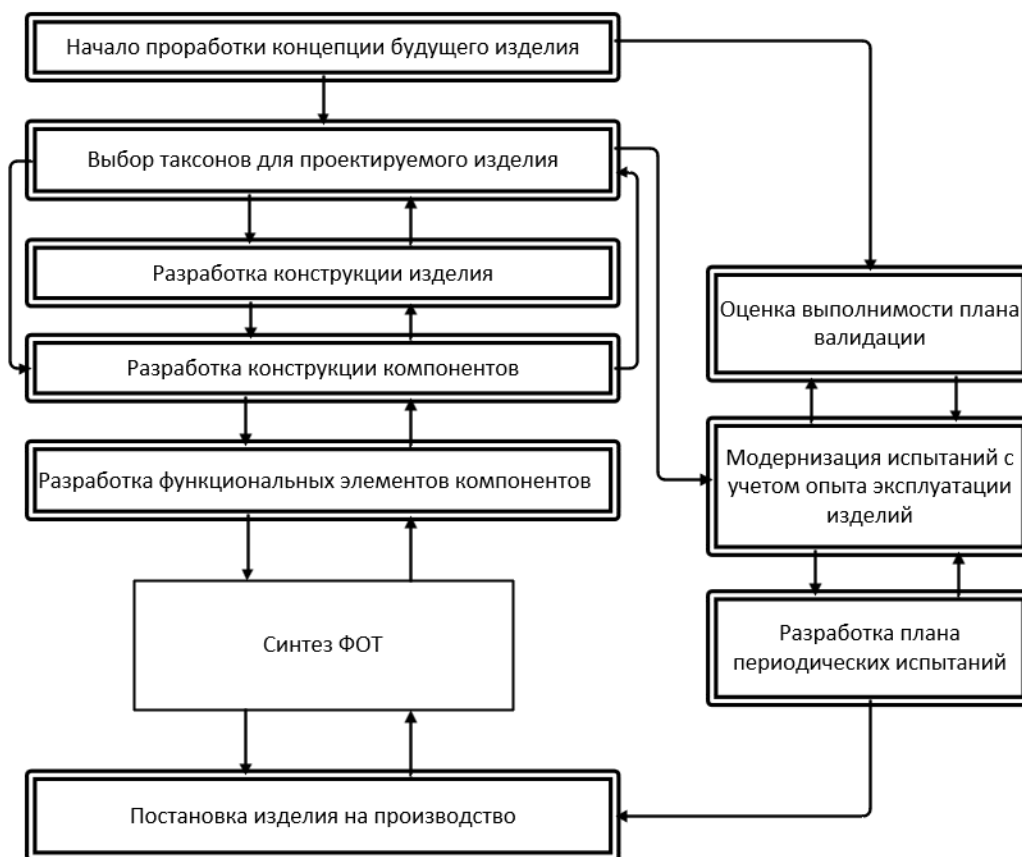


Рисунок 8 – Модернизированная схема синтеза ФОТ

Для процесса штамповки отсекателя спроектирован новый штамп и установлен в пресс в кривошипный пресс марки КД2128 с максимальным усилием 63 тонны. Для раскатки бурта отсекателя спроектировано и изготовлено специальное оборудование (рисунок 9).

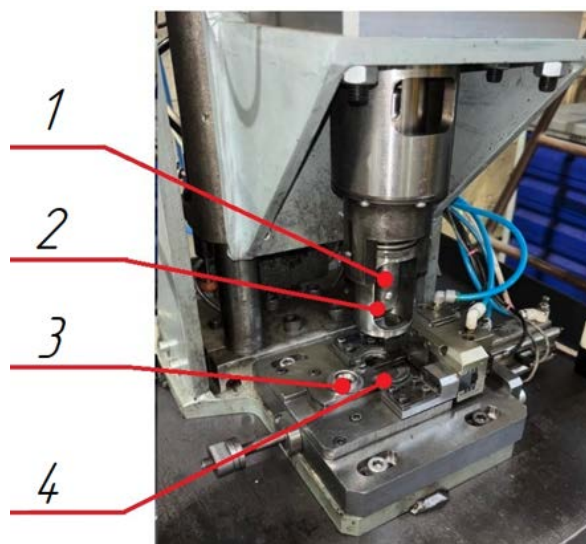


Рисунок 9 - Рабочая зона оборудования для раскатки бурта отсекателя: 1 – корпус раскатника; 2 – ролик; 3 – отсекатель; 4 – опорные губки

После производства образцов были проведены испытания по модернизированной методике. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты испытаний шаровых шарниров передней подвески автомобиля LADA Largus на герметичность

Критерий положительного результата	Результат	
	-20 °С	+23 °С
Отсутствие трещин и расслоений на защитном чехле	Отсутствуют	Отсутствуют
Износ защитного чехла в области прилегания к пальцу (отсекателю) на плоском участке $\leq 25\%$	0,4...3,7 %	0,3...0,9 %
Износ защитного чехла в области прилегания к корпусу $\leq 25\%$	1,3...2,5 %	1,8...3,6 %
Износ защитного чехла в области прилегания к шаровому пальцу (отсекателю) на цилиндрическом участке $\leq 30\%$	0,8...4,8 %	0,3...4,1 %
Отсутствие выступания смазки в сопряжении "корпус – чехол защитный шарового пальца"	Отсутствует	Отсутствует
Отсутствие коррозии пальца шарового в области контакта с защитным чехлом	Отсутствует	Отсутствует
Отсутствие воды во внутреннем объеме шарнира	Отсутствует	Отсутствует
Отсутствие воды на внутренней поверхности защитного чехла	Отсутствует	Отсутствует
Приrost содержания воды в смазке $\leq 0,6\%$	0,009...0,175 %	0,003...0,123 %

Разработанная продукция успешно прошла испытания на герметичность по модернизированной методике.

Уровень качества в эксплуатации соответствует заданному уровню со стороны заказчика (3MIS=0, 12MIS=1, 24MIS=2, 36MIS=5). Экономический эффект от внедрения результатов исследований составил 14,28 млн. рублей (в ценах 2025 года).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Предложено решение важной научно-технической задачи, направленной на совершенствование процесса и развитие выбора стратегии проектирования шаровых шарниров шасси и рулевого управления автомобилей. В ходе решения поставленных задач в диссертационной работе получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана математическая модель выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров шасси, которые имеют наибольшую значимость для принятия решений на этапах конструирования и проектирования. Представив множество показателей шарового шарнира шасси в виде нечеткого множества, а также используя метод решения через обратную матрицу, получили, что для разработки технико-технологических решений по совершенствованию конструкции шарового шарнира и производства его компонентов и обеспечения заданного уровня качества продукции в гарантийный период ключевой характеристикой является тип воздействия окружающей среды.

2. Конструирование является одним из первых этапов жизненного цикла продукции, на которых определяются те показатели качества изделия, которые будут определять работоспособность и надежность изделия в эксплуатации. Эффективным методом конструирования является метод вариации эффектов при выявленных частных функциях, который позволяет получить различные варианты конструкции узла или механизма. При проведении фасетной классификации разработаны классификационные схемы конструктивных элементов шарового шарнира передней подвески легкового автомобиля,

позволяющие проводить морфологический анализ существующих видов шаровых шарниров. Разработанный методический подход выбора конструктивных элементов использован при разработке новой конструкции шарового шарнира шасси с уплотнительной системой с отсекателем из нержавеющей стали (патент №205156).

3. Спроектирована технология производства компонентов уплотнительной системы шарнира. Разработан комбинированный процесс штамповки и раскатки отсекателя, обеспечивающий защиту верхней горловины чехла от попадания в сопряжение «чехол - ответная деталь» абразивных частиц из окружающей среды, и, таким образом, позволяющий минимизировать риск преждевременного износа защитного чехла и выхода из строя уплотнительной системы и всего шарнира. Внедрение разработанных технологических мероприятий по производству отсекателя шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus позволило увеличить выпуск годной продукции с 85,3 % до 96,1 %.

4. Усовершенствована методика испытания шаровых шарниров шасси на герметичность. Новая методика заключается в одновременном увеличении частот качания или вращения пальца шарового относительно корпуса и обеспечении пониженных температур при проведении испытания, что позволяет моделировать более жесткие условия эксплуатации и обеспечивает валидацию конструкции шаровых шарниров шасси с точки зрения ее соответствия требованиям по качеству в эксплуатации.

5. На основе принципов создания функционально-ориентированных технологий, таксонов разработанной фасетной классификации и разработанной математической модели выбора предпочтительных показателей качества спроектирована конструкция шарового шарнира шасси легкового автомобиля с заданным уровнем качества. В результате внедрения разработанных технико-технологических решений уровень дефектности данного вида продукции в поставках составляет 0 ppm, а в период гарантийной эксплуатации обеспечены заданные со стороны заказчика цели по качеству (3MIS=0, 12MIS=1, 24MIS=2, 36MIS=5). Экономический эффект от внедрения результатов исследований составил 14,28 млн. руб. (в ценах 2025 года).

Основные положения диссертации опубликованы в работах

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.5.22:

1. Столяров, Ф. А. Выбор предпочтительных показателей качества объекта стандартизации для их регламентации / Ф. А. Столяров, И. Г. Гун, М. А. Полякова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 9. – С. 39-48.

2. Столяров, Ф. А. Практическое применение методов опережающей стандартизации для снижения уровня дефектности в эксплуатации на примере шаровых шарниров / Ф. А. Столяров, И. Г. Гун, М. А. Полякова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2025. – № 4. – С. 139-146.

3. Столяров, Ф. А. Особенности организации процесса конструирования компонентов шасси с учетом квалификации поставщиков автокомпонентов / Ф. А. Столяров, М. А. Полякова, И. Г. Гун // Справочник. Инженерный журнал. – 2025. – № 1 (334). – С. 45-51.

4. Применение системного анализа технологии холодной листовой штамповки при взаимодействии предприятий-производителей автомобильных компонентов / М. А. Полякова, И. Г. Гун, Э. М. Голубчик, Ф. А. Столяров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 5 (367). – С. 71-80.

5. Столяров, Ф. А. Совершенствование процесса проектирования холодной листовой штамповки с учетом опыта взаимодействия с поставщиками автокомпонентов / Ф. А.

Столяров, И. Г. Гун, М. А. Полякова // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2024. – № 3. – С. 48-54.

Статьи в прочих научных изданиях:

6. Гун, И. Г. Выбор рациональной технологии производства кольца-отсекателя листовой штамповкой в условиях АО НПО «БелМаг» / И. Г. Гун, Ф. А. Столяров, А. В. Смирнов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2025. – № 2. – С. 66-70.

7. Столяров, Ф. А. Обеспечение заданного уровня качества шаровых шарниров посредством модернизации методик испытаний / Ф. А. Столяров, Л. И. Гун // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2025. – № 1. – С. 45-47.

8. Особенности проектирования технологического процесса холодной листовой штамповки для производства деталей шасси автомобилей / Ф. А. Столяров, И. Г. Гун, М. А. Полякова, А.Р. Вахитов, А.В. Смирнов // Научные технологии в машиностроении: материалы XV Международной научно-технической конференции. – Москва, 2024. – С. 214-215.

9. Определение граничных условий конечно-элементного моделирования процесса холодной листовой штамповки / Ф. А. Столяров, И. Г. Гун, А. Р. Вахитов, А.В. Смирнов, М.А. Полякова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – № 2. – С. 90-95.

10. Cold sheet stamping of automotive parts: analyzing the need for process design upgrade / F. A. Stolyarov, I. G. Gun, M. A. Polyakova, A.R. Vakhitov, A.V. Smirnov // Magnitogorsk Rolling Practice 2023 : proceedings of the VII International Youth Scientific and Technical Conference. – Magnitogorsk, 2023. – С. 9-10.

11. Optimized number of sheet metal forming operations in automobile components manufacturing / F. A. Stolyarov, I. G. Gun, M. A. Polyakova, I.A. Mikhaylovkiy, A.R. Vakhitov, A.V. Smirnov // Magnitogorsk Rolling Practice 2022 : proceedings of the VI International Youth Scientific and Technical Conference. – Magnitogorsk, 2022. – С. 84-85.

12. Столяров, Ф. А. Анализ современного состояния производства листоштампованных изделий и перспектив развития холодной штамповки автокомпонентов / Ф. А. Столяров, М. А. Полякова // Международная научно-практическая конференция им. Д. И. Менделеева, посвященная 90-летию профессора Р. З. Магарила. – Тюмень, 2021. – С. 159-161.

Патенты на полезные модели:

13. Пат. 237781 РФ, МПК F16C 11/06 (2006.01). Шаровой шарнир / И. Г. Гун, А. Р. Вахитов, Ф. А. Столяров, Ю.В. Калмыков, А.В. Смирнов. Заявл. 07.10.2024; опубл. 06.10.2025; Бюл. № 28.

14. Пат. 205156 РФ, МПК 16C 11/06 (2006.01). Шаровой шарнир / И. Г. Гун, Ю.В. Калмыков, А. Р. Вахитов, Е.И. Гун, Ф. А. Столяров, А.В. Смирнов. Заявл. 17.05.2021; опубл. 29.06.2021; Бюл. №19.

15. Пат. 2021104546 РФ, МПК B60G 21/02 (2006.01) F16C 11/06 (2006.01). Стойка стабилизатора поперечной устойчивости / И. Г. Гун, Ю.В. Калмыков, А. Р. Вахитов, Е.И. Гун, Ф. А. Столяров, А.В. Смирнов. Заявл. 24.02.2021; опубл. 14.05.2021; Бюл. №14.