

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»



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.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Гун Игорь Геннадьевич

Магнитогорск – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОСТИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА В ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ ШАССИ.....	11
1.1 Анализ существующих методик управления и обеспечения качества.....	11
1.2 Основы создания функционально-ориентированной технологии .....	14
1.3 Вопросы классификации однородных объектов.....	21
1.4 Требования к качеству шаровых шарниров шасси .....	26
1.5 Существующие проблемы с качеством шаровых шарниров шасси в эксплуатации.....	28
1.6 Выводы. Постановка цели и задач исследований.....	35
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ВЫБОРУ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ ШАССИ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ .....	37
2.1 Метод вариации эффектов при выявленных частных функциях .....	37
2.2 Системный анализ конструкции шарового шарнира передней подвески .....	40
2.3 Построение фасетной классификации шаровых шарниров шасси с использованием их функциональных свойств .....	44
2.4 Разработка математической модели выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров для их регламентации в конструкторской документации.....	59
2.5 Применение математической модели выбора регламентируемых показателей шарового шарнира шасси.....	64
2.6 Выводы по главе 2 .....	69
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ ШАССИ АВТОМОБИЛЕЙ С УЧЕТОМ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА .....	71

3.1 Разработка концепта конструкции шарового шарнира передней подвески .....	71
3.1.1 Конструкция пальца .....	74
3.1.2 Конструкция корпуса .....	75
3.1.3 Конструкция вкладыша и обоймы .....	77
3.2 Разработка уплотнительной системы .....	78
3.2.1 Разработка конструкции и технических требований к чехлу защитному .....	80
3.2.2 Разработка конструкции отсекаателя .....	81
3.3 Разработка технологии производства отсекаателя .....	83
3.4 Модернизация методик испытаний шаровых шарниров шасси .....	92
3.5 Выводы по главе 3 .....	99
ГЛАВА 4 ПОСТАНОВКА НА ПРОИЗВОДСТВО ПРОДУКЦИИ С ЗАДАННЫМ УРОВНЕМ КАЧЕСТВА .....	101
4.1 Синтез функционально-ориентированной технологии производства шаровых шарниров шасси .....	101
4.2 Технология производства шарового пальца .....	102
4.3 Процесс производства отсекаателя .....	105
4.4 Разработка процесса сборки шарового шарнира шасси с уплотнительной системой .....	107
4.5 Моделирование условий эксплуатации шаровых шарниров шасси .....	109
4.6 Выводы по главе 4 .....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	136

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы диссертации.**

Развитие науки и техники затрагивает все отрасли народного хозяйства, в особенности машиностроение и автомобилестроение. Интеграция научных методов, методов управления качеством и стандартизации в процесс проектирования и непосредственно в производство позволяет не только повысить качество продукции, но и сократить время ее запуска в серийное производство, а также сократить издержки и повысить прибыль. Развитие научных основ стандартизации позволяет систематизировать знания о качестве продукции и подходах к методам управления качеством.

Качество продукции может оцениваться как с точки зрения дифференцированного подхода, так и с точки зрения более современного и сложного комплексного, квалиметрического подхода. Одним из способов решения задач управления и повышения качества продукции и развития производства является применение методов оценки и прогнозирования качества продукции, а также методов стандартизации. Такие методы основаны как на теоретических, так и на экспериментальных исследованиях. Множество работ посвящено вопросу прогнозирования и оценки качества металлопродукции, а также применению методов стандартизации, однако освещены далеко не все вопросы, касающиеся той или иной области исследуемого объекта. Также развиваются методы выбора тех или иных характеристик объекта стандартизации, которые должны быть отражены в конструкторской и технологической документации. Одним из перспективных направлений в области планирования и прогнозирования качества является создание функционально-ориентированных технологий.

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 в эксплуатации и 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 связи с этим, актуальность приобретают вопросы, связанные с проектированием продукции заданного уровня качества и его прогнозированием за счет комплексного подхода к конструированию и разработки математической модели выбора предпочтительных показателей готовой продукции, основанной на классификации продукции по ключевым признакам. С практической точки зрения актуальность работы обусловлена проводимой политикой импортозамещения, ростом номенклатуры и объема производимых изделий 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. Клочков, В. Н. Клячкин, В. Н. Козловский, А. Г. Корчунов, П. А. Лончих, 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. Суслон, 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.

**Целью работы** является разработка комплекса технико-технологических решений для производства и обеспечения качества автокомпонентов с учетом их конструктивных особенностей и условий эксплуатации.

**Задачи исследований:**

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

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

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 отсекавателя 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** заключается в следующем:

1. Разработана конструкция уплотнительной системы шарового шарнира с отсекавателем, 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 отсекавателя, 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 °С) 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 отсекаателя.

4. Усовершенствованная методика испытаний шаровых шарниров шасси на герметичность.

**Степень достоверности и апробации результатов исследования** 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 «Научоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 2024 г.); 83-я международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы современной науки, техники и образования" (Магнитогорск, 2025 г.); 6-7<sup>th</sup> International Youth Scientific and Technical Conference «Magnitogorsk rolling practice» (Magnitogorsk, 2022, 2023 гг.).

**Внедрения результатов диссертационных исследований.** Результаты работы внедрены в АО НПО «БелМаг» (г. Магнитогорск, Российская Федерация) и в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**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.

**Личный вклад автора** заключается в выборе и обосновании актуальности темы исследования, постановке задач для реализации поставленной в работе цели, проведении анализа современных методов обеспечения качества шаровых шарниров шасси автомобилей, разработке математической модели выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров шасси для их регламентации в конструкторской и технологической документации, дополнении базы конструкторско-технологических решений проектирования шарового шарнира, создании алгоритма процесса проектирования уплотнительной системы, разработке математической модели процесса штамповки и раскатки отсекаателя, подготовке статей по теме диссертационного исследования.

**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.

## ГЛАВА 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОСТИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА В ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ ШАССИ

### 1.1 Анализ существующих методик управления и обеспечения качества

В условиях глобализации рынка и роста конкуренции между производителями особое значение приобретают вопросы, связанные с качеством производимой продукции. Однако нельзя не брать во внимание вопросы, связанные со стоимостью конечного продукта и со временем от получения задания на проектирование до постановки изделия на серийное производство. Помимо выполнения требований технического регламента, государственных и отраслевых стандартов и специальных требований заказчика для обеспечения качества готовой продукции необходимо внедрение в производственный процесс различных специальных методик для управления качеством продукции развитие системы менеджмента качества.

В настоящее время интенсивно развиваются направления, связанные с решением вопросов квалиметрии. Квалиметрия как научная дисциплина была предложена группой ученых во главе с Г.Г. Азгальдовым в 1967 году в СССР [1]. Однако ее становление началось немного раньше, и в 1967 году был предложен термин, который впоследствии был признан предпочтительным. Квалиметрия образовалась как следствие развития дифференцированного подхода к показателям качества. Такой подход предполагает оценку отдельных характеристик продукта и возможность изменения их номенклатуры. Квалиметрия в свою очередь предполагает применение методов комплексной оценки, в результате чего выводится общий показатель, однозначно свидетельствующий об уровне качества продукта. В целом такой подход основан на оценке отдельных характеристик продукта, определении их уровня значимости и выведении единого показателя качества продукта.

За длительное время развития в области оценки качества проделана большая работа: сформулирован предмет науки о качестве продукции, вышел государственный стандарт на основные термины в области качества продукции, подготовлено несколько терминологических стандартов по качеству, разработаны «Методические

указания по определению уровня качества промышленной продукции серийного производства», опубликованы статьи по оценке качества конкретных видов продукции [2-5]. В настоящее время квалиметрия достигла такой стадии развития, когда внутри нее явно начинают выделяться две ветви: теоретическая и прикладная. Теоретическая квалиметрия абстрагируется от конкретных объектов (предметов или процессов) и изучает только общие закономерности и математические модели, связанные с оценкой качества продукции или услуги. Объектом теоретической квалиметрии являются философские и методологические проблемы количественной оценки качества. Задача прикладной квалиметрии – разработка конкретных методик и математических моделей для оценки качества конкретных объектов разного вида и назначения. Также квалиметрический подход применяется в методиках типа FMEA (Failure Mode and Effects Analysis, анализ видов и последствий отказов) при проектировании продукции, где конкретной характеристике продукта присваивается ранг (вес) значимости.

Развивается методология адаптивного управления качеством металлопродукции, предложенная учеными ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» [6-8]. Данная методология основана на гибком подходе к управлению технологическим и производственным процессом, позволяющим обеспечивать соответствие показателей качества продукции нормируемым в различных стандартах. Известен подход, основанный на методе робастной оптимизации, предложенный К.Г. Пивоваровой, и позволяющий снизить время проектирования и обеспечить устойчивость технологического процесса производства метизов к возмущающим действиям [9-11].

С точки зрения управления качеством при производстве автомобильной продукции, в частности шаровых шарниров шасси, в настоящее время имеет место тенденция по разработке математических моделей для определения характеристик безопасности шарниров, а также совершенствование процессов оценки и прогнозирования качества. Кроме того, разработана методика для проведения комплексных испытаний шаровых шарниров [12]. Она позволяет выявить взаимосвязь между двумя показателями качества: циклической долговечностью шарнира и гарантийным

сроком эксплуатации. Это достигается за счёт оценки изменений в техническом состоянии узлов.

Создана модель, которая описывает формирование микронеровностей на неполной сферической поверхности головок шаровых пальцев при планетарной обкатке [13]. Эта модель помогает обеспечить необходимый уровень качества по характеристикам шероховатости. Выявлены зависимости, показывающие, как технологические параметры процессов поверхностного пластического деформирования обкаткой влияют на высотные параметры шероховатости неполной сферической поверхности основных компонентов шарниров — шаровых пальцев. Также разработана комплексная математическая модель для процесса запрессовки шарнира [14]. Она позволяет определить показатель качества «усилие выдавливания шарового пальца из корпуса».

Известен метод ФСА (Функционально-стоимостной анализ). Однако данный метод направлен в большей степени на оценку стоимости уже разработанного продукта с учетом затрачиваемых на производство ресурсов [15]. Г.Ш. Рубиным был предложен функционально-целевой анализ, в котором качество изделия понимается как степень выполнения трех его основных функций: транспортной, монтажной и эксплуатационной [16].

Широкую популярность на данный момент имеют методы управления качеством продукции и услуг, основанных на нечетких множествах и нечеткой логике. Данный подход был предложен в 1965 году математиком Лотфи Заде [17] как альтернатива детерминированному подходу определения принадлежности объектов тому или иному множеству. В основном их применяют для решения вопросов принятия решений в условиях неопределенности [18-20] или же для выбора необходимых показателей продукта или процесса. Например, метод анализа иерархий, метод функций желательности Харрингтона и иные [21- 23].

В своих работах А. Г. Корчунов [24-27] разработал метод управления качеством при производстве метизной продукции. Особенность разработанного подхода заключается в применении математических моделей с элементами нечёткой логики для формализации взаимосвязи между параметрами процесса управления.

Это позволяет более точно описать реальную ситуацию, учитывая неполноту и нечёткость исходной информации. Также предложены математические модели для управления качеством металлических изделий при обработке калиброванной стали, высокопрочной арматуры и железнодорожных пружинных клемм. Эти модели используют нечёткие и лингвистические переменные при формулировке условий и заключений в логических правилах управления вида «если... то». Это даёт возможность определять технологические режимы обработки, которые обеспечивают достижение заданного уровня качества готовой продукции.

В основном вышеописанные методы и подходы направлены на управление качеством стальных компонентов или на развитие систем менеджмента качества. Вопросы, связанные с качеством сборочных единиц, в частности таких автомобильных компонентов как шаровые шарниры шасси, в открытых источниках достаточно не описаны.

## **1.2 Основы создания функционально-ориентированной технологии**

В области проектирования технологий разделяют типы технологических процессов и различные подходы их проектирования, среди которых можно выделить [28, 29]:

- единичный технологический процесс;
- типовой технологический процесс;
- групповой технологический процесс;
- модульный технологический процесс.

Для разработки передовых технологических процессов в машиностроении традиционные методы проектирования оказываются неэффективными. На рисунке 1.1 представлены ключевые этапы создания функционально-ориентированных технологических процессов. Методика их проектирования не выступает как отдельный и самодостаточный этап, а является частью последовательной итеративной разработки технологического процесса [30-35]. При этом порядок и методология

основаны на замкнутой рекуррентной структуре. Основные этапы синтеза функционально-ориентированных технологических процессов включают:

1. Анализ особенностей эксплуатации изделия и составление структуры его эксплуатационных функций.
2. Разделение изделия на функциональные элементы по уровням «глубины технологии» и их классификация.
3. Разработка структуры или маршрута технологического процесса на основе специфических принципов ориентации.

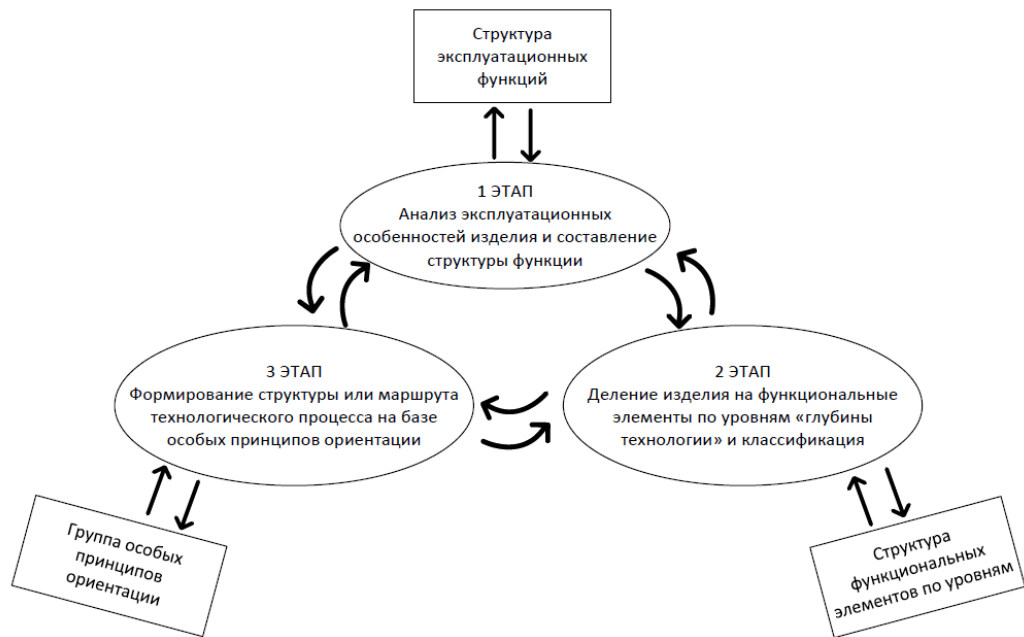


Рисунок 1.1 – Основные этапы синтеза функционально-ориентированных технологических процессов

При этом используются девять особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств функциональных элементов, что позволяет придать процессу проектирования замкнутую форму [34]:

- принцип абстрагирования;
- принцип ограничения доступа;
- принцип модульности;
- принцип иерархии;
- принцип типизации;
- принцип параллелизма;

- принцип устойчивости;
- принцип минимизации и развития технологий «вглубь»;
- принцип комплексности и развития технологий «вширь».

Замкнутая форма проектирования функционально-ориентированных технологий даёт возможность определять параметры технологических воздействий и свойства функциональных элементов изделия в зависимости от его эксплуатационных функций. Благодаря обратным связям, можно корректировать и уточнять эти параметры на разных уровнях глубины технологии [31, 33]. Ключевая особенность создания функционально-ориентированных технологий заключается в использовании рекуррентной последовательности методологии проектирования. Каждый этап этого процесса имеет свои уникальные характеристики при синтезе технологических процессов. Наличие обратных связей в предложенной методологии даёт возможность определять и формировать нужные технологические воздействия и свойства функциональных элементов, а также всего изделия в целом. Это происходит с учётом особенностей эксплуатации или заданного и требуемого или предельного эксплуатационного потенциала изделия. Разработка функционально-ориентированных процессов основывается на необходимом технологическом обеспечении и комплексной технологической подготовке производства.

Весь процесс проектирования функционально-ориентированной технологии объединяется общей моделью системы технологических преобразований и реализуется в двух направлениях:

- синтез типа «технологический процесс» (включает схемы технологического воздействия, операции, технологический процесс);
- синтез типа «технологическая система» (включает блоки технологического воздействия, технологические подсистемы для реализации операций, технологические системы для реализации всего технологического процесса).

Такой подход позволяет рассматривать технологическую проблему комплексно с позиций системного подхода и использовать методы автоматизированного проектирования. Модель системы технологических преобразований

объединяет все направления, этапы и уровни процесса проектирования, причём результаты предыдущих этапов служат основой для последующих.

Перед началом проектирования формулируется цель, которая определяет модель желаемого результата. Модель выхода должна включать:

- наименование целевого функционала, который служит обобщающим критерием качества создаваемой технологии;
- граничные (проверяемые) условия достижения цели, соответствующие требованиям к технологии;
- начальные (непроверяемые) условия, представленные в констатирующей или описательной форме.

Граничные условия представляют собой количественные ограничения, накладываемые на целевой функционал и выходные переменные, характеризующие функционально-ориентированную технологию (например, производительность, надежность, точность, стоимость, удобство эксплуатации, конкурентоспособность). Начальные условия являются фиксированными параметрами для процесса проектирования и включают технологические, организационно-экономические, эксплуатационные и другие факторы.

Процесс проектирования функционально-ориентированной технологии в направлении «технологический процесс» включает несколько уровней:

- выбор схемы технологического воздействия для каждого функционального элемента;
- реализация принципов ориентации технологических воздействий и свойств;
- формирование функционально-ориентированных операций для каждого элемента;
- составление маршрута технологического процесса для всех функциональных элементов изделия.

Выбор схемы технологического воздействия основывается на обеспечении необходимых эксплуатационных свойств изделия. Это определяется с помощью двух баз данных: вариантов свойств функциональных элементов и вариантов схем технологического воздействия.

Этап синтеза «технологический объект» для операции включает:

- синтез схемы средства технологического оснащения (СТО) для операции;
- синтез функциональной структуры СТО;
- структурный и параметрический синтез СТО;
- определение обобщённых показателей оценки СТО;
- выбор лучшего варианта СТО.

Проектирование всей технологической системы для изготовления изделия состоит из:

- синтеза схемы СТО для всего изделия;
- синтеза функциональной структуры СТО;
- структурного и параметрического синтеза СТО;
- определения обобщённых показателей оценки СТО.

Процесс проектирования функционально-ориентированных СТО детализируется по степени сложности и ведётся по четырём уровням:

- проектирование элементов блока технологического воздействия (БТВ);
- проектирование БТВ;
- проектирование СТО для операции;
- проектирование СТО для всех операций.

Система СТО для всех операций создаётся при возможности объединения её элементов и подсистем, находящихся в геометрических, кинематических, временных и других отношениях. Общая методика построения системы СТО объединяет все направления, этапы, уровни и подуровни процесса проектирования общей моделью системы технологических преобразований. Это позволяет использовать принципы системного подхода или объектно-ориентированного проектирования. Перед началом процесса проектирования проводится анализ изделия на технологическое совершенствование его конструкции для автоматизированного производства и определяется последовательность операций технологического процесса.

Алгоритм общей методики синтеза функционально-ориентированной технологии включает:

- ввод исходных данных (начальные и граничные условия);

- анализ эксплуатационных особенностей изделия;
- присвоение переменной функционального элемента изделия необходимого значения;
- деление изделия на функциональные элементы по уровням глубины технологии;
- присвоение значения переменной для проектирования схемы технологического воздействия, технологической операции или СТО;
- выбор схемы технологического воздействия для функционального элемента;
- реализация принципов ориентации технологических воздействий и свойств изделия;
- формирование функционально-ориентированной операции для функционального элемента;
- присвоение значения переменной для синтеза схемы СТО;
- синтез схемы СТО для технологической операции;
- синтез функциональной структуры СТО;
- структурный и параметрический синтез СТО;
- определение обобщённых показателей оценки СТО;
- выбор лучшего варианта СТО.

В случае большого количества технологически возможных вариантов рациональный, доминирующий или оптимальный вариант функционально-ориентированной технологии выбирается методом направленного поиска.

Представленный алгоритм синтеза функционально-ориентированной технологии (рисунок 1.2) позволяет обобщить комплекс процессов проектирования технологий, ориентированных на конечную цель создания функционально-ориентированных технологий. Он помогает инженерам видеть взаимосвязи, понимать и применять целостность как принцип проектирования, а также обеспечивать необходимый эксплуатационный потенциал изделия.

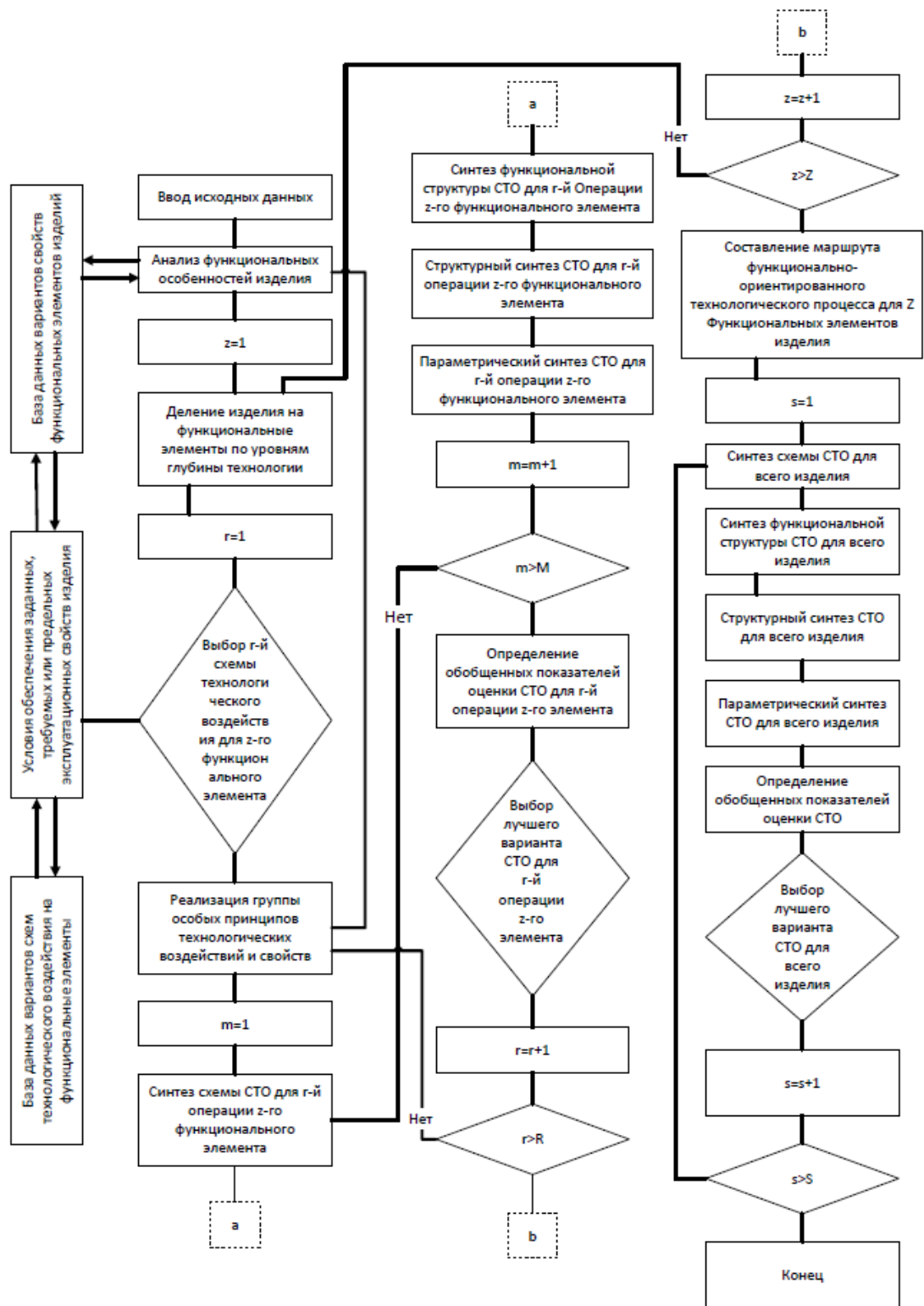


Рисунок 1.2 – Алгоритм синтеза функционально-ориентированной технологии

### 1.3 Вопросы классификации однородных объектов

Классификация – это деятельность по определению принадлежности какого-либо объекта к определенной категории в соответствии с характеристиками такого объекта. Учение о принципах и практике классификации называется таксономией. Результатом классификации является логически взаимоувязанный сложный многокомпонентный конструкт.

Классификация шаровых шарниров шасси автомобилей проводится для:

- систематизации и организации знаний о типах шаровых шарниров, условий их работы, назначении, представления знаний в надежном и удобном для обозрения, распознавания и сопоставления виде (системы классификации, разрабатываемые в научных целях), отражения или установления порядка вещей и так далее;
- представления систематизированного знания в виде наглядной схемы;
- использования систематизированного знания при конструировании новой продукции, а также для обучения новых сотрудников предприятия.

Если рассматривать существующий подход к классификации шаровых шарниров шасси, то в открытых источниках приводится разделение шарниров на прямой и перевернутый (по типу воспринимаемых нагрузок) [36, 51], обслуживаемые и необслуживаемые [37, 38], а также по типу конструкции корпуса шарового шарнира [39].

Шаровые шарниры шасси и рулевого управления являются однородными объектами, так как удовлетворяют следующим основным критериям однородности продукции [40-41]:

1. Род и вид товаров. Все шаровые шарниры можно отнести к классу 12 МКТУ.
2. Назначение товаров. Шаровые шарниры предназначены для сохранения взаимного расположения соединяемых частей транспортного средства и для передачи всех видов нагрузок от узла к узлу.
3. Вид материала, из которого изготовлены товары. Как правило для шаровых шарниров применяются стали и полимеры.

При классификации технико-экономической информации и выделении характерных признаков технических объектов используются, как правило, иерархический и фасетный методы. При иерархическом подходе к классификации разделение множества происходит по существенным признакам, которые в свою очередь также подразделяются на признаки, конкретизируя свойства объекта. Существенным недостатком данного подхода является необходимость такого разделения свойств объекта, при котором классификационные признаки не могут пересекаться и классифицируемый объект можно отнести только к одному таксону классификации. При фасетной классификации классифицируемое множество делится на подгруппы по различным признакам независимо. В таком случае классификационная группировка является набором фасетов. Также следует отметить, что существует два понятия, подразумевающих разделение объектов на группы или таксоны, а именно кластеризация и классификация. Иногда данные понятия используются как синонимы, а иногда их акцентированно разделяют. Под кластеризацией принято понимать задачу группировки и разделения имеющегося множества объектов (однородных или разнородных) на подмножества с выделением каких-либо существенных признаков. Классификацией же принято считать отнесение объекта к уже имеющемуся классу (таксону) по какому-либо выбранному признаку.

В литературе выделяют несколько видов классификации [42-45]:

1. Детерминированная классификация основывается на строгих правилах и критериях, которые позволяют однозначно отнести объект к определённому классу. Этот вид классификации часто используется в задачах, где требуется высокая точность и однозначность результатов.

2. Вероятностная классификация учитывает вероятность принадлежности объекта к каждому из классов на основе статистических данных. Это позволяет учитывать неопределённость и вариативность данных, что особенно важно в задачах с высоким уровнем шума или неопределённости.

3. Нечёткая классификация позволяет объекту одновременно принадлежать нескольким классам с различной степенью принадлежности. Это особенно полезно

в случаях, когда объекты могут иметь признаки, характерные для нескольких классов одновременно.

Выбор конкретного вида классификации зависит от специфики задачи, доступных данных и требований к результатам.

Существует множество методов классификации однородных объектов, которые можно разделить на две основные группы:

1. Методы обучающей выборки (supervised learning) требуют наличия размеченных данных, то есть объектов, для которых заранее известен класс. Эти методы позволяют моделировать зависимости между признаками объектов и их классами, что позволяет классифицировать новые объекты на основе полученных знаний. К таким методам относятся, например, метод k ближайших соседей, логистическая регрессия, метод опорных векторов.

2. Методы без обучающей выборки (unsupervised learning) не требуют размеченных данных и основаны на выявлении скрытых закономерностей в данных. Они позволяют выявлять структуры и группы в данных без предварительного знания классов. К ним относятся кластерный анализ, метод главных компонент, самоорганизующиеся карты Кохонена.

Выбор метода классификации зависит от специфики задачи, объёма и качества доступных данных, а также требований к точности и интерпретируемости результатов. Например, методы обучающей выборки могут быть более точными, но требуют наличия размеченных данных, в то время как методы без обучающей выборки могут быть полезны в случаях, когда размеченные данные недоступны или их получение затруднено. Для реализации методов классификации используются различные алгоритмы, которые различаются по своей сложности, эффективности и применимости к определённым типам данных.

Среди наиболее популярных алгоритмов можно выделить:

1. Алгоритмы кластерного анализа (k-means, DBSCAN, hierarchical clustering) применяются для группировки объектов на основе их сходства. Они позволяют выявлять естественные группы в данных, что может быть полезно для сегментации клиентов, анализа изображений и других задач.

2. Деревья решений позволяют классифицировать объекты на основе последовательного разделения данных по определённым признакам. Они обеспечивают хорошую интерпретируемость результатов и могут быть использованы для решения задач с большим количеством признаков.

3. Нейронные сети представляют собой математические модели, созданные по образу биологических нейронных сетей, и могут быть использованы для классификации объектов на основе обучения на больших объёмах данных. Они обладают высокой гибкостью и могут адаптироваться к сложным зависимостям в данных.

Кроме того, существуют и другие алгоритмы, такие как метод опорных векторов, наивный байесовский классификатор, алгоритмы случайного леса и градиентного бустинга, которые также широко используются для классификации однородных объектов.

В целом, использование классификационного кластерного анализа заключается в структурировании и последовательном прохождении определённых алгоритмических шагов [43, 46, 47]:

- подбор объектов, которые будут участвовать в кластеризации;
- определение набора показателей для оценки объектов в выборке;
- выбор метода для измерения расстояний (или степени сходства) между объектами и расчёт этих значений;
- применение алгоритма кластерного анализа для формирования групп кластеров;
- визуализация результатов анализа и их толкование.

Качество классификации оценивается с помощью различных метрик, которые позволяют измерить точность, полноту, F-меру и другие характеристики классификатора. Выбор метрики зависит от конкретной задачи и требований к результатам.

Среди наиболее распространённых метрик можно выделить:

1. Точность (precision) – доля правильно классифицированных объектов среди всех объектов, отнесённых к данному классу. Эта метрика важна в задачах, где необходимо минимизировать количество ложных положительных результатов.

2. Полнота (recall) – доля правильно классифицированных объектов среди всех объектов данного класса. Эта метрика важна в задачах, где необходимо максимизировать количество правильно классифицированных объектов.

3. F-мера (F-measure) – гармоническое среднее между точностью и полнотой. Эта метрика позволяет учитывать как точность, так и полноту классификации.

4. Также существуют и другие метрики, такие как площадь под ROC-кривой (AUC-ROC), средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратичная ошибка (MSE), которые могут быть полезны в зависимости от специфики задачи.

В работе [42] рассмотрены вопросы классификации объектов стандартизации, а именно самих стандартов. Исследователями рассмотрены различные методы классификации и сделан вывод о рациональном применении метода дерева принятия решений. Этот метод можно использовать для описания стандартизируемых объектов любого типа – количественных, качественных или смешанных. Он основан на иерархической структуре, что позволяет реализовывать наследование требований и обеспечивать однозначность классификации. Принцип максимального изменения энтропии при движении по дереву иерархии гарантирует максимальную информативность вопросов на каждом новом уровне классификации конкретных видов продукции. В своей следующей работе [43] исследователи построили деревья принятия решения, основанные на алгоритмах машинного обучения на примере классификации шариков. Классификация объектов стандартизации по данным алгоритмам была проведена для группы продукции «Изделия косметические гигиенические моющие».

Стоит отметить, что существующие подходы к классификации основаны на рассмотрении объекта в целом, без учета его конструктивных (и эксплуатационных) особенностей. Однако большинство деталей машин и механизмов, а также автомобильных компонентов имеют достаточно сложную форму и внутреннее строение. При этом возможно разделение изделий на отдельные части, каждая из которых выполняет определенные функции при использовании изделия как сборочной единицы и может иметь функциональную и технологическую завершенность. Такой подход к классификации довольно ограничен. Поэтому существует необходимость

разработки таких признаков классификации сложных объектов, которые позволят учитывать в том числе принадлежность к определенной части системы анализируемого объекта и условий его использования. Это будет способствовать выбору такой стратегии проектирования продукта и технологии производства, которая обеспечит требуемый уровень качества изделия в эксплуатации.

#### **1.4 Требования к качеству шаровых шарниров шасси**

В условиях повышенного спроса на автомобильную продукцию и снижения импорта вследствие введения санкций и заградительных пошлин перед OEM-производителями (original equipment manufacturer – «оригинальный производитель оборудования», в данном случае – производитель автомобилей) встает серьезная задача по расширению модельного ряда и увеличению объема производства автомобилей с сохранением гарантийных обязательств перед конечным потребителем. В связи с этим растет и нагрузка на поставщиков всех уровней, поскольку часть гарантийных обязательств возложена на поставщика первого уровня, и в случае недобросовестного исполнения своих обязательств предприятие поставщик может терпеть значительные финансовые убытки, вплоть до полного банкротства [48]. Помимо этого, соответствие заданному уровню качества и целевым ценам остается конкурентным преимуществом при проведении поиска и номинации поставщика на серийные поставки автомобильных компонентов.

Отмечено, что, основанные на принципах TQM, разработанные системы менеджмента качества (СМК) предприятий являются результативным инструментом при организации производства и производстве высококачественной продукции [49-52]. Данные принципы сформулированы в стандартах серии ISO 9000 и в отраслевом стандарте IATF 16949. В условиях повышенного санкционного давления и ухода из Российской Федерации международных организаций по сертификации, требования к системе менеджмента качества организации основаны на стандарте ГОСТ Р 58139-2018. Данный стандарт включает в себя требования серии стандартов ISO 9000, дополняя их специфическими для автомобильной отрасли

критериями. В стандартах серии ISO 9000 и ГОСТ Р 58139-2018 описаны общие рекомендации к организации системы менеджмента качества, основанные на процессном подходе, риск-ориентированном мышлении и цикле PDCA. Также в данных стандартах описаны более узконаправленные подходы к конкретным областям деятельности организации, например требования к «знаниям организации», процессу проектирования, требованиям к управлению поставщиками, документированной информации и так далее. Однако в данных стандартах не указаны четкие рекомендации для достижения заданного уровня качества той или иной продукции.

Если же рассматривать специфические требования непосредственно к шаровым шарнирам шасси автомобиля, то в Российской Федерации существуют обязательные требования согласно ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» и рекомендованные требования согласно ГОСТ Р 52433-2005 «Шарниры шаровые. Технические требования и методы испытаний». В данных документах приведен узкий набор требований к качеству шаровых шарниров. Например, требования к герметичности уплотнительной системы отсутствуют совсем.

Более детальные требования к качеству шаровых шарниров отражены в КД (конструкторской документации), которую заказчик OEM-уровня направляет поставщику первого уровня, а также в специальных документах-спецификациях, в которых сформулированы данные требования. Техническая спецификация заказчика OEM-уровня [53] является задокументированным комплексом методов испытаний и технических требований, которые поставщик обязан выполнить для получения технического одобрения продукта. Данный документ является обязательной частью согласованного между заказчиком и поставщиком габаритного чертежа. Техническая спецификация может содержать в себе ссылки на другие нормативные документы или другие спецификации. Подробно данный вопрос в своей работе раскрывает А.Р. Вахитов [53]. Он отмечает, что данные спецификации наиболее полно отражают современный технический уровень конкретной продукции.

Однако не всегда задаваемые требования к автомобильной продукции со стороны заказчика могут подтвердить, что она не выйдет из строя в гарантийный

период, ведь даже современный технический уровень ведущих мировых производителей может не соответствовать новым условиям эксплуатации продукта.

Поэтому производителю автомобильных компонентов целесообразно на основании собственного опыта и базы выученных уроков акцентировать внимание на наиболее существенных показателях продукта при его проектировании. С этой точки зрения актуальна задача разработки математической модели выбора предпочтительных показателей продукции для их регламентации в конструкторской и технологической документации.

### **1.5 Существующие проблемы с качеством шаровых шарниров шасси в эксплуатации**

Шаровые шарниры шасси в системе автомобиля представляют собой кинематическую пару третьего класса. Они позволяют обеспечить подвижность соединения деталей подвески или рулевого управления, позволяя им свободно двигаться по трём вращательным степеням свободы. Шаровые шарниры также передают нагрузки, которые возникают во время движения или при прохождении поворотов. На данный момент наиболее широкое применение находит конструкция шарового шарнира, состоящая из шарового пальца, корпуса шарнира, вкладыша, обоймы, уплотнительной системы и смазки [54]. Благодаря своей универсальности, шаровой шарнир в изделии может выполнять различные функции в зависимости от назначения этого изделия. Так, например, шаровой шарнир наружного рулевого наконечника предполагает в основном передачу радиальной нагрузки с внутреннего рулевого наконечника на поворотный кулак автомобиля. Шаровой шарнир подвески может быть несущим, например, когда пружина подвески опирается на рычаг, в котором закреплен шаровой шарнир передней подвески, или же направляющим, не воспринимающим таких нагрузок шарниром, что характерно для подвески типа МакФерсон [55]. В конструкциях с несущим шарниром, с точки зрения нагрузочной способности, особое внимание может уделяться типу закрепления шарнира подвески. Например, некоторые исследователи [54] выделяют шарниры подвески прямой и перевернутой конструкции. Шарниры прямой конструкции предполагают

восприятие значительной части осевой нагрузки, направленной в сторону обоймы или глухой части корпуса шарнира. В этом случае нагрузка на вкладыш распределена равномерно по половине (за исключением экватора) сферической поверхности. В случае же перевернутой конструкции значительная часть осевой нагрузки действует по направлению окна корпуса. При этом нагрузочная способность при прочих равных снижается, так как нагрузка действует на пояс сферы. В подвеске типа МакФерсон шаровой шарнир является направляющим, поэтому такая классификация к нему неприменима. Также данная классификация не применима к шарнирам, которые не рассчитаны на восприятие осевых нагрузок как основных. Шаровые шарниры стоек стабилизатора воспринимают только радиальные нагрузки и устанавливаются, как правило, перпендикулярно вертикальной оси в системе координат автомобиля [59]. Ориентацию шарового пальца рулевых наконечников и шаровых шарниров передней подвески относительно автомобиля определяет заказчик OEM-уровня. Как показал анализ открытых источников, шаровые шарниры шасси автомобиля не классифицируют по направлению оси пальца шарового в системе координат автомобиля.

Основным типом дефектов, связанным с шаровыми шарнирами шасси автомобиля, при котором конечный потребитель обращается в сервисный центр, является стук [38, 57]. Причинами стуков, согласно результатам исследований отечественных [57, 58] и зарубежных исследователей [59-61] могут быть следующие факторы:

- неверный выбор геометрии конструкции (шарнир не рассчитан на воспринимаемые нагрузки);
- неверный выбор материалов (предел текучести материала вкладыша недостаточен);
- негерметичность шарнира (попадание внутрь шарнира твердых абразивных частиц или влаги, вызывающей коррозию металлических частей и преждевременное истирание вкладыша).

В целом, преждевременного износа шарнира можно избежать, используя пару трения металл-металл. Однако, для легковых автомобилей такая конструкция не

применяется ввиду повышенного уровня шума и повышенного усилия на рулевом колесе (вследствие высоких моментов вращения и качания пальца в корпусе).

Дефекты в гарантии могут быть существенной финансовой нагрузкой на предприятие, которое поставляет изделия заказчику OEM-уровня. Ведь помимо замены самого изделия, часто приходится тратить ресурсы на определение дефекта, причины его возникновения, сортировку дефектной продукции, а также работы официального сервисного центра по замене дефектного изделия. В большинстве случаев стук шарового шарнира проявляется на третий год эксплуатации шарнира в весенние месяцы. Согласно результатам DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis, анализ видов и последствий отказов) [62, 63] дефекта стук в эксплуатации можно сказать, что основной причиной возникновения данного дефекта является именно потеря шарниром герметичности. Исходя из этого, исследователями предлагается внедрение новых конструкций защитных чехлов и уплотнительных систем [64-67], заключающемся в модернизации их форм и конфигураций.

Нужно отметить, что вопросами обеспечения безопасной эксплуатации шаровых шарниров шасси, качеством стальных компонентов, в частности шаровых пальцев и вопросами технологий их обработки, занимались ученые И.Г. Гун, И.А. Михайловский, В.В. Сальников, Д.С. Осипов [68-71]. Поэтому в данной работе эти вопросы не затрагиваются.

В открытых источниках отсутствует информация о том, влияет ли расположение шарового шарнира на риск возникновения дефекта типа «стук» вследствие потери шарниром герметичности. Однако порой сложно учесть все факторы, которые могут повлиять на потерю герметичности шарового шарнира в эксплуатации. Данный тезис подтверждается негативным опытом эксплуатации шаровых шарниров передней подвески автомобилей LADA Largus [72].

Платформа данного автомобиля, как и все ее составляющие, была унифицирована с платформой В0 концерна Renault, история которой начинается с 1998 года. На данный момент насчитывается более 25 моделей автомобилей, на которых была применена данная платформа. Общее число выпущенных автомобилей на данной платформе составляет более миллиона [73]. По результатам анализа открытых

источников выявлено, что лишь небольшое число потребителей сталкивалось с дефектами шаровых шарниров передней подвески при эксплуатации автомобилей на данной платформе. Стартом работы «АвтоВАЗ» и Renault принято считать 2008 год. В 2010 году была внедрена производственная система Renault. Первый автомобиль LADA Largus сошёл с конвейера «АвтоВАЗ» 17 июня 2011 года.

После начала эксплуатации в дорожной сети Российской Федерации у потребителей начали возникать проблемы с качеством шаровых шарниров передней подвески. Значительная доля всех шаровых шарниров передней подвески выходила из строя до истечения гарантийного срока, что влекло за собой значительные финансовые потери для производителя. Конструкция данного шарового шарнира предполагает его запрессовку в листоштампованный рычаг, и после выпрессовки дефектного шарнира, геометрия отверстия в рычаге не обеспечивает фиксацию нового шарнира с требуемым усилием. Вследствие этого помимо замены самого шарового шарнира необходимо возмещать стоимость самого рычага и входящих в его состав двух резинометаллических шарниров.

Неизвестно, что стало коренной причиной возникновения дефекта «негерметичность» на шаровых шарнирах передней подвески автомобиля LADA Largus старой конструкции. Но можно отметить, что производителем не были учтены климатические и дорожные условия эксплуатации автомобиля в Российской Федерации (пониженные температуры, дорожные реагенты и пр.). На рисунке 1.3 представлен внешний вид интегрированного в рычаг шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus, возвращенного из эксплуатации с заявленным дефектом «стук».



Рисунок 1.3 – Внешний вид возвращенного из эксплуатации шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus с дефектом «стук»

Стоит отметить, что немаловажное влияние на герметичность в данном случае оказывает конструкция и ориентация шарового пальца [74]. Существует два основных типа крепления шарового пальца к ответной детали: конусная посадка с фиксацией резьбы на пальце и фиксация цилиндрического участка пальца в ответной детали посредством стяжки клеммового соединения ответной детали крепежом (рисунок 1.4).

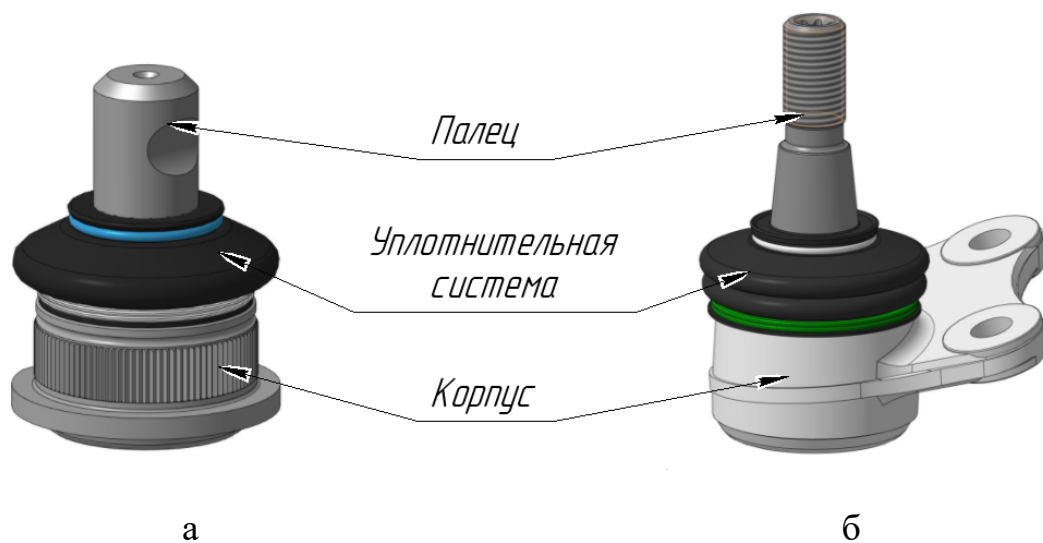


Рисунок 1.4 – Основные типы крепления шарового пальца к ответной детали: а – с фиксацией цилиндрического участка клеммой ответной детали; б – с конусной посадкой и фиксацией резьбы пальца гайкой

В первом случае контакт уплотнительной системы с ответной деталью равномерен по окружности, во втором случае имеет место появление несплошности в виде сквозной прорези клеммового зажима (рисунок 1.5). Наличие сквозной прорези создает неравномерность прилегания чехла защитного к ответной детали, что повышает износ, и, что более важно, аккумулирует поток продуктов внешней среды (грязь, влага, абразивы, продукты коррозии и т.д.) на систему уплотнения шарового шарнира. При этом уплотнительная система, не рассчитанная на такое воздействие, оказывается не способна исключать попадание внутрь шарнира влаги и абразивных частиц, что вызывает коррозию сферы пальца и повышенный износ вкладыша и соответственно, потерю функциональных характеристик самого шарнира. Для шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus данная проблема стала критичной по ряду следующих факторов:

- отсутствие покрытия кулака поворотного, в котором закреплен палец, что вызывает дополнительную нагрузку на уплотнительную систему из-за попадания на чехол продуктов коррозии кулака;

- использование автомобиля в качестве коммерческого транспорта и повышенная, в сравнении с другими моделями LADA, интенсивность эксплуатации.

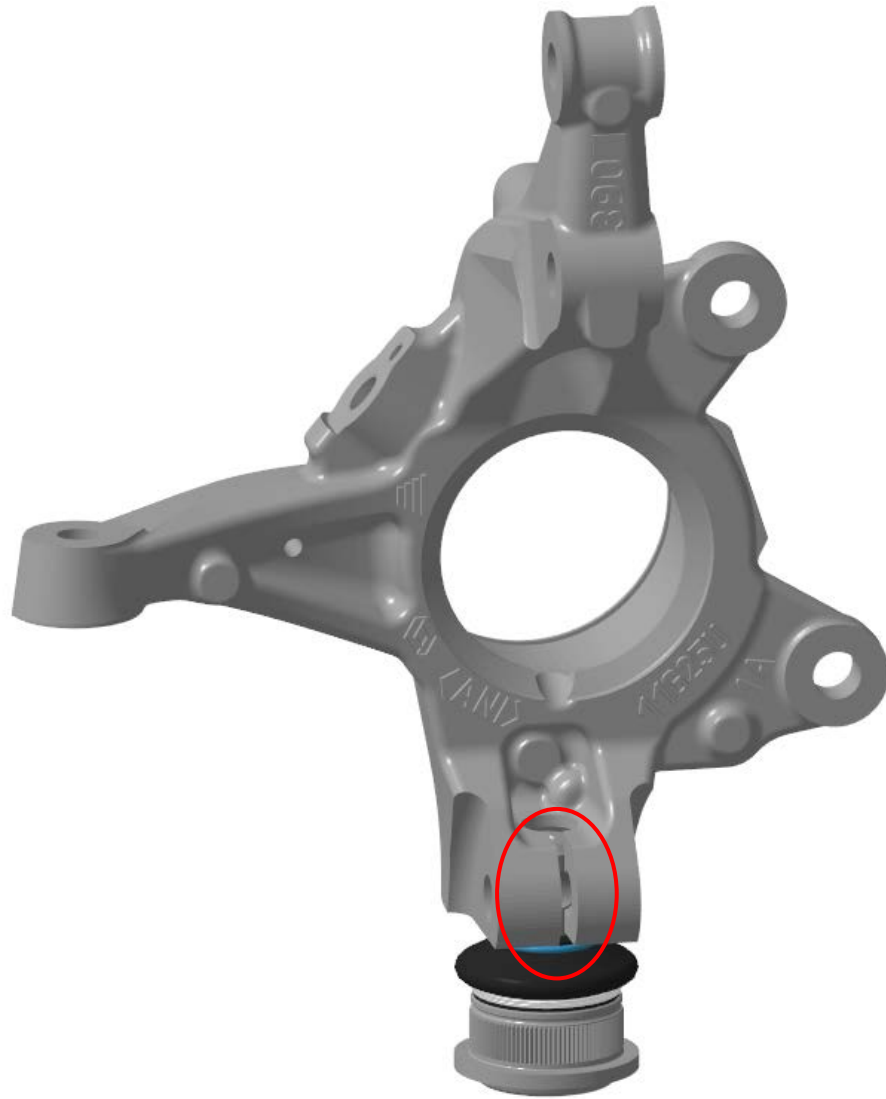


Рисунок 1.5 – Сквозная прорезь кулака поворотного

Помимо способа закрепления пальца в ответной детали и ориентации пальца относительно системы координат автомобиля немаловажное значение на «сложность» работы уплотнительной системы оказывает расположение шарнира. Так, например, дефектам уплотнительной системы автомобиля LADA Vesta менее всего подвержены шарниры внутреннего и наружного рулевых наконечников, так как они расположены выше допустимой глубины проходимого брода и защищены от интенсивного попадания грязи на уплотнительную систему элементами подвески и кузова автомобиля.

При анализе возвращенных из эксплуатации стоек стабилизатора поперечной устойчивости выявлено, что в большинстве случаев из строя выходит нижний

шарнир стойки, который расположен ближе к дорожному полотну, что подтверждает тезис о влиянии расположения шарнира на интенсивность воздействия факторов внешней среды на уплотнительную систему шарнира. В открытых источниках такая информация отсутствует. Проблемы с герметичностью являются основной корневой причиной выхода шарнира из строя и влекут необходимость его замены или замены узла в сборе. В связи с этим актуальна задача разработки конструкции шарового шарнира с такой уплотнительной системой, которая была бы пригодна для использования в условиях повышенного воздействия окружающей среды, а также технологии производства ее компонентов.

### **1.6 Выводы. Постановка цели и задач исследований**

По результатам проведенного анализа выявлено отсутствие строгих алгоритмов, позволяющих выбрать предпочтительные показатели шаровых шарниров шасси для их регламентации в конструкторской и технологической документации. Существующие работы по прогнозированию и обеспечению качества, а также по развитию научных основ стандартизации тесно связаны с продукцией металлургического производства. Для изделий в сборе, в частности для автомобильной продукции, обеспечивающей безопасную эксплуатацию транспортного средства, количество таких работ незначительно и в них не рассматриваются вопросы эксплуатации в сложных дорожно-климатических условиях Российской Федерации. Проанализированная методика создания функционально-ориентированных технологий позволяет ориентироваться на функцию готового изделия и с этой точки зрения проектировать деталь по уровням глубины технологии. Однако данная методика разработана для изделий машиностроения, в частности для валов и деталей машин. Изученные методы кластеризации и оценки качества классификации позволяют распределить по группам объекты стандартизации на основании их существенных признаков. Однако по большей части методы кластеризации направлены на анализ числовых данных и в меньшей степени могут быть использованы для объектов стандартизации.

Указанные выше методы не дают четких рекомендаций по выбору регламентируемых в конструкторской и технологической документации показателей продукции автомобилестроения. В связи с этим является актуальной задача по разработке математической модели выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров шасси, перечень которых представлен среди таксонов классификации.

**Целью работы** является разработка комплекса технико-технологических решений для производства и обеспечения качества автомобильных компонентов с учетом их конструктивных особенностей и условий эксплуатации.

**Задачи исследований:**

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

## ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ВЫБОРУ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ ШАССИ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ

### 2.1 Метод вариации эффектов при выявленных частных функциях

Заданный уровень качества готовой продукции начинает формироваться на этапе разработки конструкции. В частности, концепт конструкции шарового шарнира передней подвески и подвески в целом разрабатывается на OEM-заводе на основании предлагаемого дизайна и технических характеристик проектируемого автомобиля. Однако поставщик, в силу опыта и компетенций, может скорректировать разработанную конструкцию без изменения габаритных и присоединительных размеров. Понимание процесса конструирования узла и детали важно при проведении DFMEA (проводит поставщик первого уровня) для понимания функции детали в узле и ее окружения и для разработки технологического процесса.

Одним из методов, используемых при разработке конструкции автомобильных компонентов, является метод вариации эффектов при выявленных частных функциях. Для выявления эффектов, которые может обеспечить тот или иной тип узлов автомобиля, необходимо абстрагироваться от уже известных конструкций (рисунок 2.1). При расширении количества эффектов и их вариации возможно подбирать различные узлы для решения частной задачи [75]. Важнейшие частные задачи шарового шарнира можно сформулировать, наблюдая за медленным перемещением колеса, которое проезжает по неровностям и одновременно выполняет поворот. После такой декомпозиции узла видна его роль в кинематической схеме и конкретную функцию. В частности, такая декомпозиция 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.

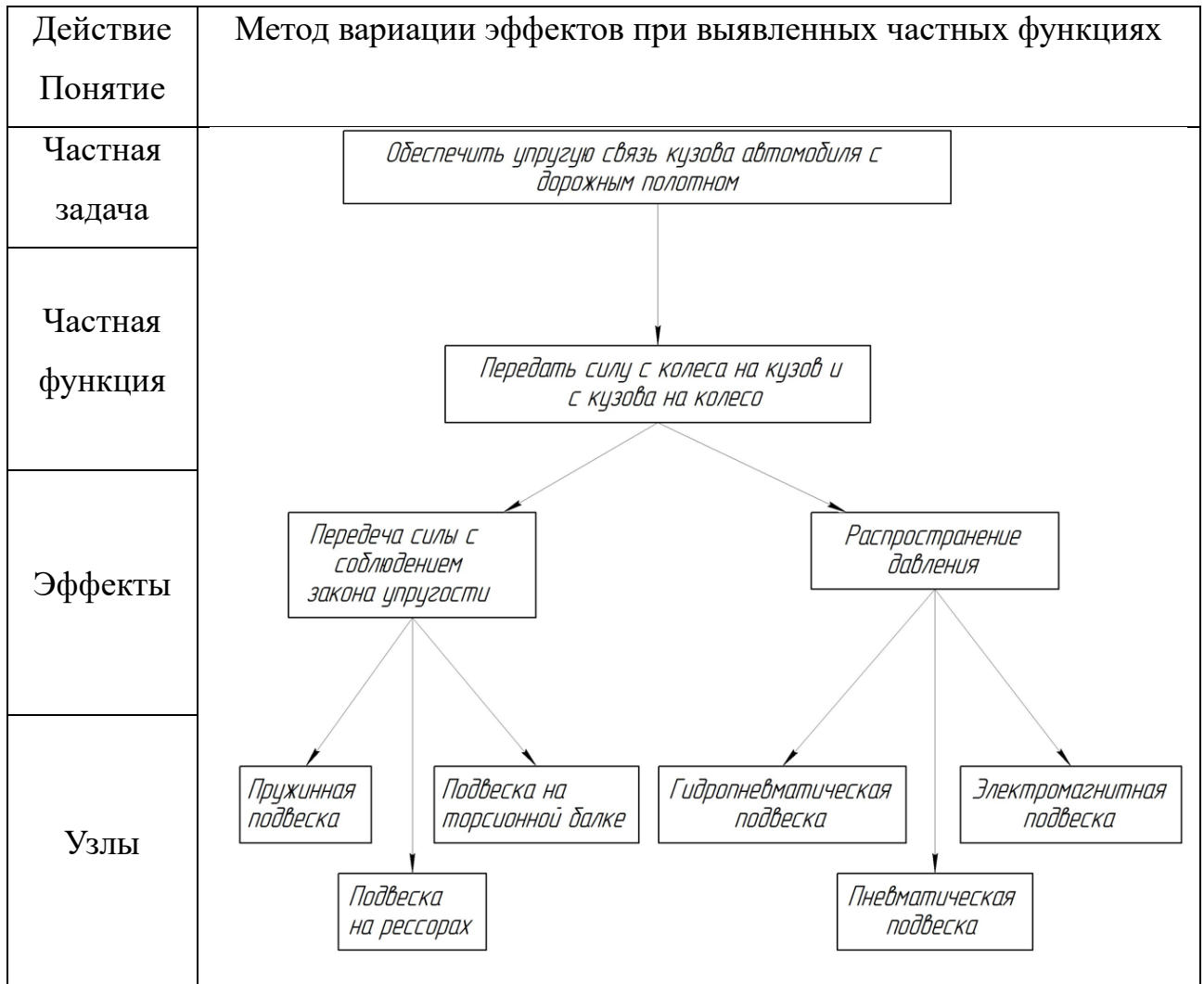


Рисунок 2.1 – Установление соответствия между известной частной задачей и выявленной в результате абстрагирования частной функцией

Шаровой шарнир передней подвески является лишь одним из элементов подвески типа МакФерсон. Поэтому первоначально перед разработчиком конструкции автомобиля встает задача о проектировании узла в целом. Применяя различные методы конструирования, можно получить функциональный и экономически эффективный узел. На рисунке 2.2 представлено разложение общей задачи, а именно обеспечение упругой связи кузова автомобиля с дорожным покрытием, на частные.

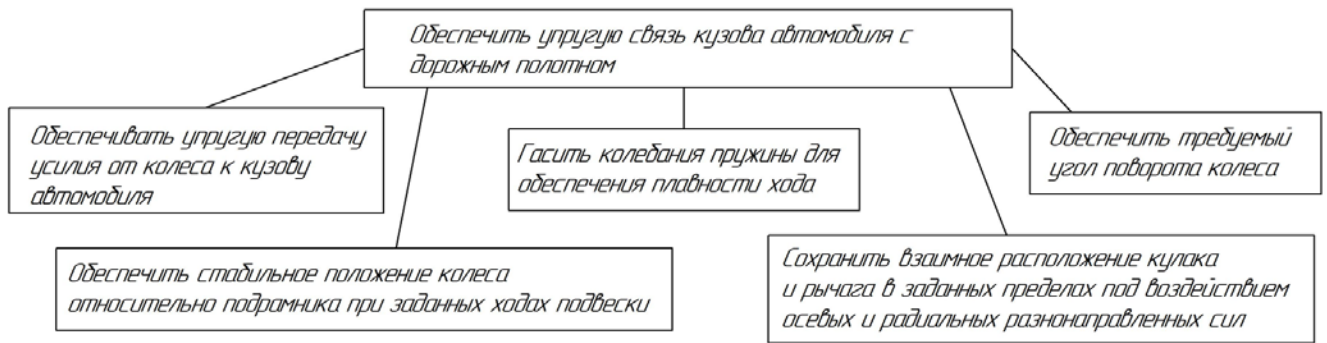


Рисунок 2.2 – Разложение общей задачи обеспечения упругой связи кузова автомобиля с дорожным полотном на частные

Далее рассмотрим непосредственно шаровой шарнир передней подвески. Основная функция шарового шарнира передней подвески – это сохранение взаимного расположения кулака и рычага в заданных пределах под воздействием осевых и радиальных разнонаправленных сил. В этом случае обеспечивается заданное плечо обката и угол развала управляемых колес. Данные параметры обеспечивают управляемость транспортного средства. Следовательно, шаровой шарнир должен иметь плавный ход и в то же время высокую жесткость. Разложим общую задачу на частные (рисунок 2.3).

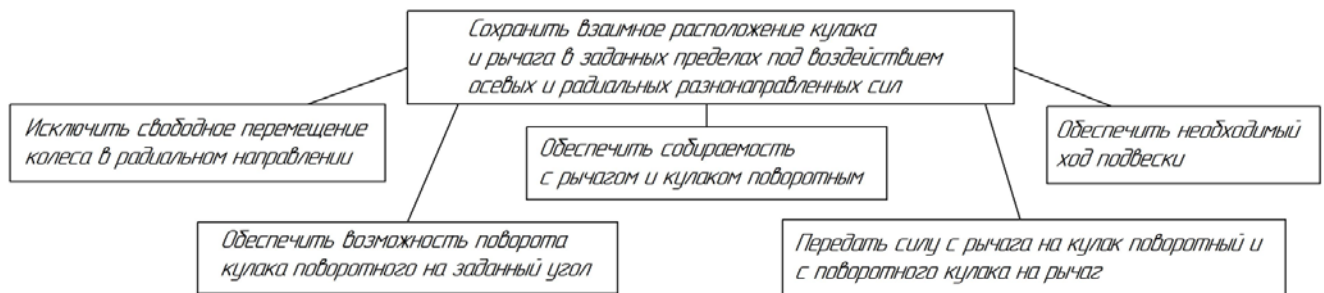


Рисунок 2.3 – Разложение общей задачи шарового шарнира на частные

Далее следует этап абстрагирования для установления соответствия между известной частной задачей и выявленной в результате абстрагирования частной функцией (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Установление соответствия между известной частной задачей и выявленной в результате абстрагирования частной функцией

В целом при разработке узла подвески автомобиля разработчик, иногда в уме, представляет схожую схему и проектирует узел исходя из его частных функций. Метод вариации эффектов при выявленных частных функциях порождает ряд однотипных решений.

## 2.2 Системный анализ конструкции шарового шарнира передней подвески

Системный анализ применяется при анализе искусственных систем и позволяет рассмотреть объект в единстве его составляющих и их взаимосвязей [76]. С точки зрения проектирования конструкций системный анализ на стадии разработки позволяет комплексно понять принцип работы спроектированного изделия, расположение структурных составляющих и взаимосвязь как между элементами системы, так и с деталями окружения. Это необходимо для корректной оценки при

определении отказов, которые могут возникнуть при эксплуатации, а также найти возможные пути решения возникающих проблем и помочь в формировании рекомендации для решения проблем в будущем. В данной работе рассматривается шаровой шарнир передней подвески автомобиля LADA Largus (рисунок 2.5).

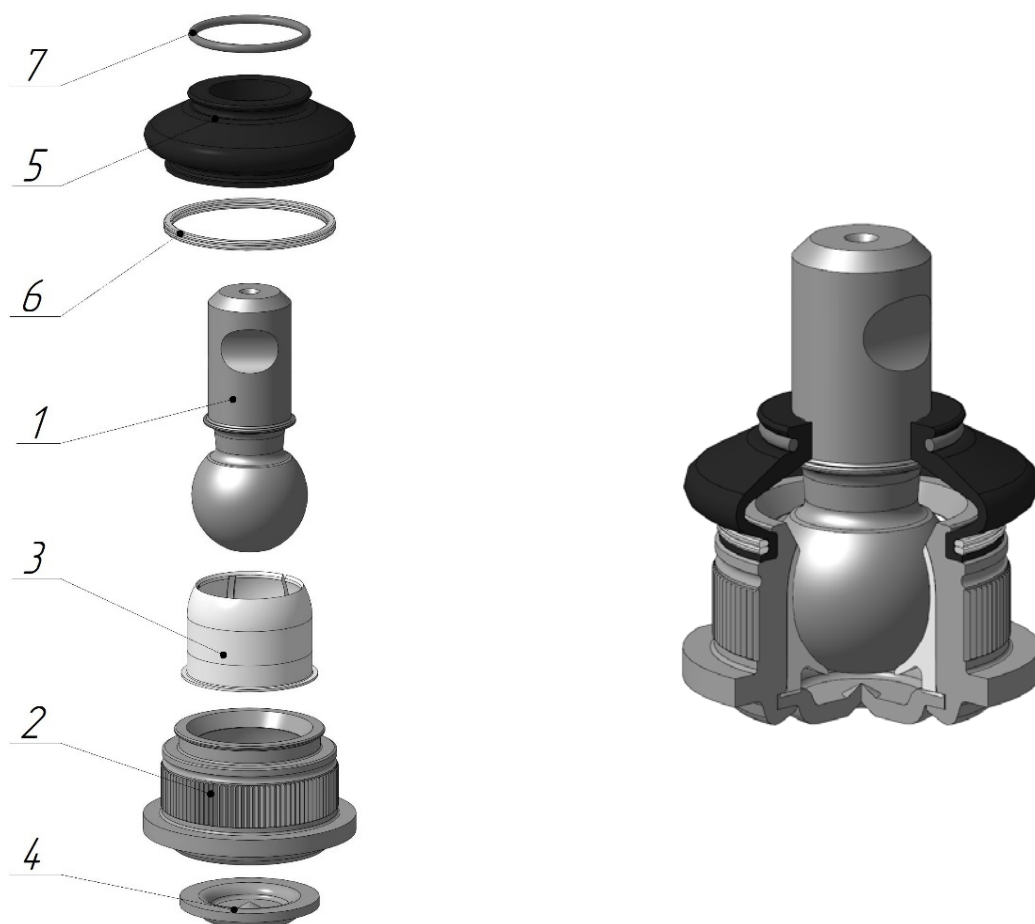


Рисунок 2.5 – Конструкция шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus: 1 – шаровой палец; 2 – корпус; 3 – вкладыш; 4 – обойма; 5 – чехол защитный; 6 – кольцо пружинное; 7 – кольцо уплотнительное

На рисунке 2.6 представлен системный анализ конструкции шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus.





### **2.3 Построение фасетной классификации шаровых шарниров шасси с использованием их функциональных свойств**

В квалиметрии качество объекта и свойств, которые его определяют, представляется в виде иерархической системы, так называемого дерева свойств. Сущность данного подхода заключается в представлении комплексных показателей качества (свойств) в виде ряда единичных показателей, которые можно измерять или оценивать соответствующими методами и средствами измерений [77, 78]. Кроме того, это позволяет сравнивать показатели качества (свойства) посредством весовых коэффициентов, которые, по сути, определяют значимость каждого отдельного показателя. Построение дерева свойств считается универсальным приемом и показало свою эффективность при решении ряда практических задач, связанных с совершенствованием технологических процессов производства изделий различного назначения [79].

В ряде работ приводится обоснование целесообразности деления свойств в зависимости от их физической природы: геометрические параметры, механические свойства, параметры микроструктуры и т.д. [80-84]. Однако использование такого подхода неизбежно приводит к тому, что в одну группу попадают показатели как исходного сырья и/или заготовки, так и готового изделия. Также это приводит к тому, что зависимые свойства попадают в одну группу с влияющими на них свойствами.

Следует отметить, что построение древовидной структуры свойств не учитывает их функциональную разнородность, что в ряде случаев затрудняет объективную оценку качества изделий, а также может являться сдерживающим фактором для разработки новых технических решений по совершенствованию конструкции выпускаемой продукции.

Принципиально новый подход к рассмотрению и структурированию свойств изделий предложен в работах [85-88]. В основу классификации положен функциональный принцип, согласно которому свойства объекта рассматриваются и классифицируются с точки зрения обеспечения эксплуатационных функций. В существующих методах функционального анализа термин «функция» интерпретируется по-

разному. Так, функционально-стоимостной анализ основан на стоимостных аспектах, обеспечиваемых функциями изделия, и предполагает рассмотрение потребительских функций на разных стадиях жизненного цикла продукции [15]. Физические связи между элементами системы исследуются методами функционально-физического анализа.

Таким образом, исследование взаимосвязи структуры свойств и выполняемых изделием функций является достаточно перспективным с точки зрения выбора показателей, которые определяются соответствующими свойствами, для их последующей регламентации в конструкторской и технологической документации. Иными словами, для обоснования выбора нормируемых показателей, прежде всего, необходимо определить, какие свойства они характеризуют, и, следовательно, для выполнения каких потребительских функций они предназначены.

Другим важным теоретическим аспектом является интерпретация понятия «функция». В работах, посвященных использованию функционального анализа [16, 89-91], предлагается рассматривать функцию как передачу действия, т.е. обеспечение взаимодействия или предотвращение взаимодействия. Рассматривая только физическое взаимодействие, данный подход предполагает рассмотрение взаимодействия двух объектов. Иными словами, выполнение конкретных функций зависит от особенностей взаимодействующих объектов. Следуя научным выкладкам авторов, трактовка понятия «функция» позволяет конкретизировать понятие «свойство» как способность обеспечивать некоторую функцию, т.е. способность передавать взаимодействие или препятствовать его передаче. Справедливость применения такой трактовки понятий «функция» и «свойство» убедительно показана на примере таких видов металлоизделий, как геофизический кабель [92], болт машиностроительный [93, 95], прокат арматурный для железобетонных шпал высокоскоростных магистралей [95]. Это позволило не только определить и уточнить функции данных видов изделий, но также разработать новую структуру для представления полезных функций, которая представляет не общепризнанный иерархический вид, а сетевую форму. Сетевой граф позволяет установить имеющие связи между единичными показателями с несколькими групповыми. С практической

точки зрения это может быть использовано при выборе единичных показателей, позволяющих корректно описать полезные функции изделия [96, 97].

Однако использование такого подхода показано лишь на примере металлоизделий, которые в целом выполняют определенные полезные функции, т.е. выполнение полезных функций возможно только целостной конструкцией изделия. Это в определенной степени упрощает использование функционального подхода для различных категорий металлоизделий. Так, в работах [85-93] на примере изделий машиностроения показано, что различные их конструктивные части могут выполнять различные функции. В связи с этим авторы решают свои задачи исследования, однако данный подход может быть успешно применен и для изделий в сборе, в частности для таких ответственных узлов автомобиля, как шаровые шарниры шасси и рулевого управления. Это позволит научно обосновать их конструктивные особенности, что может быть использовано в дальнейшем при выборе регламентируемых в конструкторской и технологической документации показателей.

Пример систематизации объекта по функциональным признакам с использованием гипотезы эволюционного ряда, отражающего его на разных иерархических уровнях, представлен в работе [98]. В основу классификации видов крепежа автор предлагает использовать следующую последовательность признаков, определяющих необходимость использования крепежа как конструктивного элемента машины или агрегата: *фиксирование* → *совмещение* → *сопряжение* → *сочленение* → *соединение* → *крепление*. Поскольку крепление предполагает наличие основного материала, который надо крепить, тогда на следующем уровне классификации следует учитывать и то, к чему крепят, и то, что крепят. Данный подход позволяет определить следующие классификационные признаки крепежа: *материал* → *средство* → *изделие* → *устройство* → *деталь* → *узел* и т.п. Исходя из этого, свойства крепежа можно разделить на конструктивные, например, форма головки, форма шлица и т.д., и специфические, например, высокопрочный крепеж, крепеж с антикоррозионным покрытием и т.д. (рисунок 2.8).

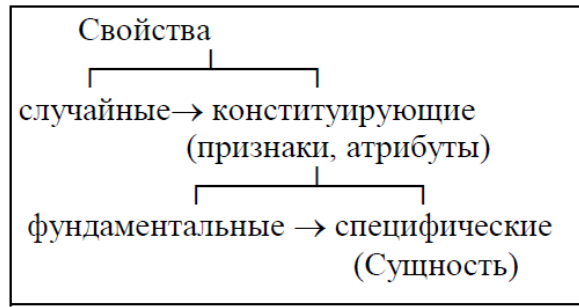


Рисунок 2.8 – Классификация свойств на примере крепежа

Используя данный подход, проведем функциональный анализ отдельных конструктивных частей шарового шарнира. В качестве примера рассмотрим шаровой шарнир передней подвески старой конструкции автомобиля LADA Largus (рисунок 2.5). Однако нельзя ограничивать классификацию шарового шарнира только его конструктивными элементами. Необходимо учитывать также эксплуатационные факторы, что соответствует принципу комплексной стандартизации. Как известно, полезные функции любого изделия определяются, основываясь на потребностях заказчика. Основным назначением шарового шарнира в автомобиле является обеспечение стабильности расположения соединяемых узлов посредством передачи нагрузок с сохранением заданной кинематической схемой движений. При рассмотрении основной функции шарового шарнира можно выявить необходимость соединения его конструктивных (функциональных) элементов с ответными деталями.

С точки зрения обеспечения безопасности транспортного средства палец шаровой является наиболее ответственной деталью. На рисунке 2.9 представлены виды крепления шарового пальца к ответной детали.

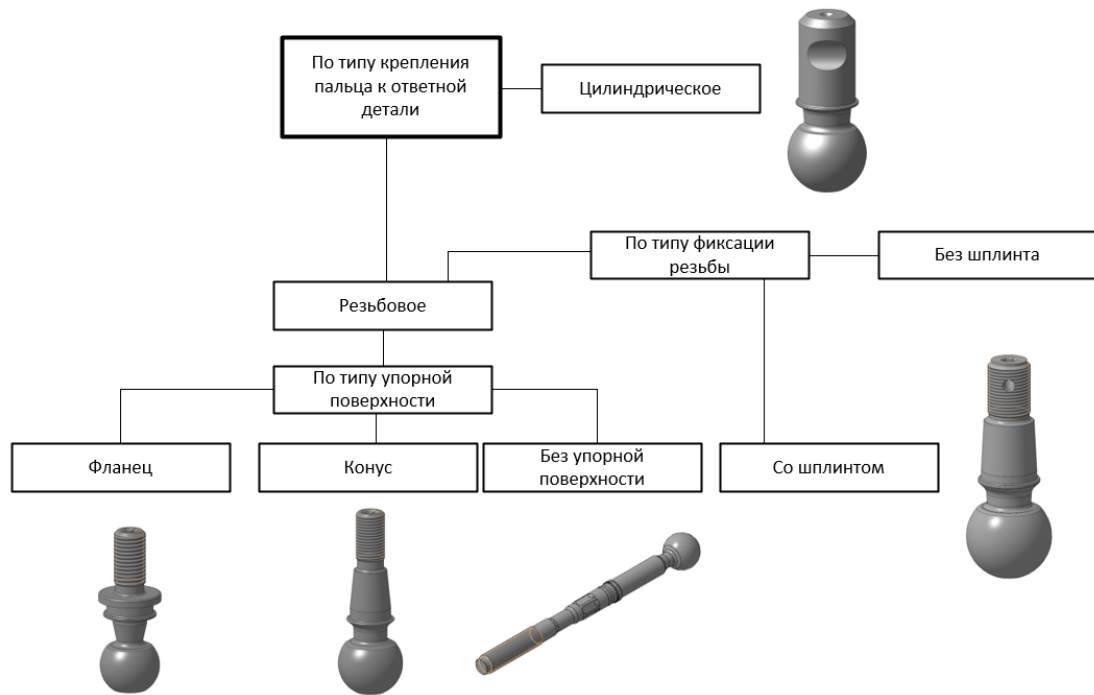


Рисунок 2.9 – Классификация по типу крепления пальца к ответной детали

Конструктивный элемент пальца, обеспечивающий сопряжение шарнира с ответной деталью, является функционально значимой частью, интегрированной в схему всего узла. Каждый тип крепления связан с выбором той или иной компоновки подвески, ее габаритов, прогнозируемой массы и применяемых материалов. Так, например, конусные элементы предназначены для крепления в таких ответных деталях, как рычаги, поворотные кулаки и др., твердость используемого материала которых, как правило, выше 160 НВ или в менее твердых деталях, но с использованием переходной втулки. Фланцевое крепление предназначено для сочленения пальцев с отверстиями в плоских ответных деталях, например, тягами стабилизатора или кронштейнами, толщина которых, как правило, составляет 3-8 мм. Также стоит разделять тип фиксации резьбы, а именно стопорение шплинтом, или без него, но с применением гаек специальной конструкции. Метод стопорения шплинтом применяется реже, так как это не только ослабляет конструкцию резьбы, но и увеличивает затраты на производство и дополнительные комплектующие. Тип крепления клеммовым зажимом может применяться для упрощения сборки на конвейере автопроизводителя при сложной компоновке подвески. В этом случае цилиндр пальца и отверстия в ответной детали совмещаются и ориентируются друг

относительно друга крепежным элементом (шпилькой или болтом) и этим же элементом происходит фиксация посредством упругой деформации ответной детали.

Помимо пальца к ответным деталям крепится также и корпус. На рисунке 2.10 представлены виды крепления корпуса к ответной детали.

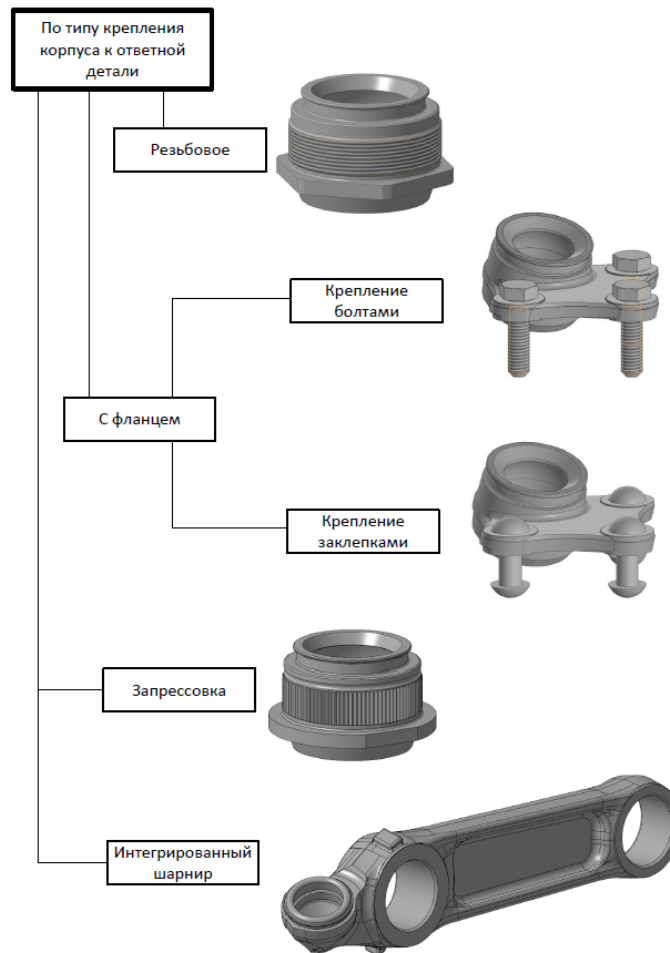


Рисунок 2.10 – Классификация по типу крепления корпуса к ответной детали

Тип крепления корпуса зависит от типа ответной детали (например, литой/кованый или листовой рычаг) и предполагаемого способа сборки на автомобильном заводе. Интегрированный шарнир применяется для автомобилей из премиального сегмента ввиду сложности изготовления и необходимости замены узла в сборе в случае выхода шарнира из строя. Наиболее рациональным является применение разъемных соединений, позволяющих произвести замену вышедшего из строя шарнира без нарушения целостности ответной детали и без ее демонтажа.

При проектировании шарового шарнира тип крепления корпуса и пальца накладывает ограничения не только на геометрию и свойства этих деталей, но и на геометрию остальных составных частей шарового шарнира. Например, при запрессовке корпуса в отверстие ответной детали необходимо обеспечить целостность чехла защитного.

Рассмотренные выше таксоны классификации накладывают непосредственные ограничения на геометрию изделия. Но помимо данных ограничений немаловажным является расположение изделия в системе автомобиля, его удаленность от дорожного полотна, пятна контакта колеса с дорожным полотном, двигателя и прочих систем автомобиля. С этой точки зрения приведена классификация шаровых шарниров шасси по системе автомобиля, а именно:

- система стабилизации (рисунок 2.11);
- система подвески (рисунок 2.12);
- система рулевого управления (рисунок 2.13).

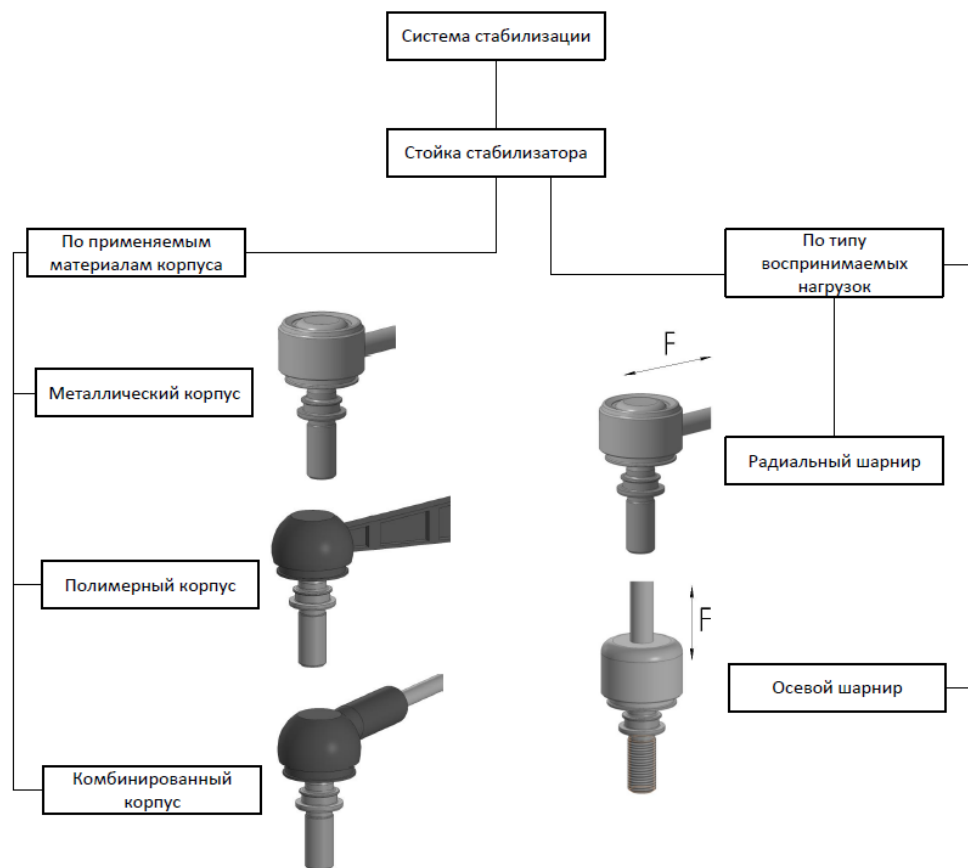


Рисунок 2.11 – Классификация по системе стабилизации автомобиля

В системе стабилизации автомобиля шаровой шарнир часто применяется для стоек стабилизатора. Корпуса стоек стабилизатора в основном изготавливаются из сталей, однако, имеет место применение полимерных и комбинированных корпусов (состоящих, например, из стального стержня и полимерных корпусов шарниров). Стоит отметить, что технологии производства полимерных и комбинированных корпусов сложны и не распространены на территории РФ. Радиальные и осевые шарниры для стоек применяются в зависимости от компоновки и малого свободного пространства для работы шарнира. Радиальный шарнир подразумевает передачу нагрузок перпендикулярно оси пальца, осевой – вдоль оси пальца. Для стоек стабилизатора радиальные шарниры встречаются чаще.

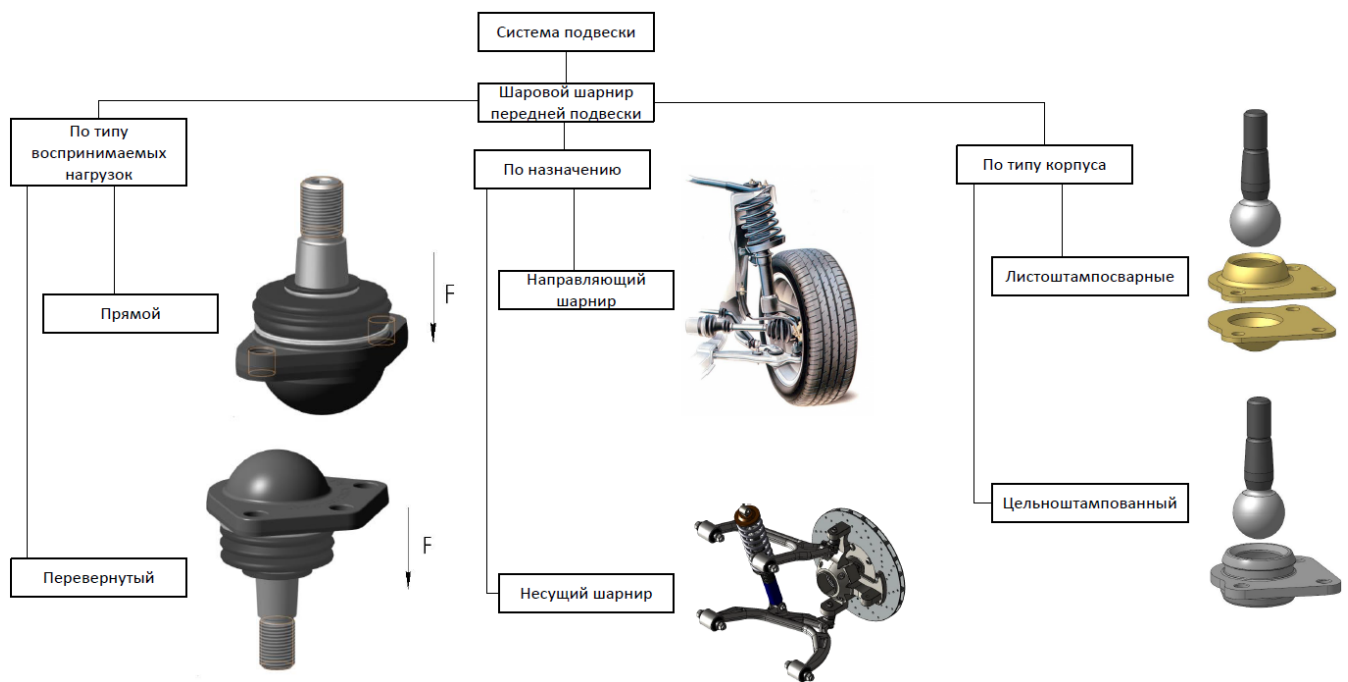


Рисунок 2.12 – Классификация по системе подвески автомобиля

Прямой шаровой шарнир воспринимает основную часть нагрузок, которые направлены в глухую часть шарнира. В данном случае нагрузка распределяется равномерно по полусфере. В перевернутом же шарнире нагрузка воспринимается в основном поясом сферы, то есть такой шарнир имеет меньшую несущую способность. Направляющий и несущий шарниры имеют одинаковую функцию, но

воспринимают различную по амплитуде и направлению нагрузку, так как несущий шарнир должен помимо сохранения взаимного расположения сопрягаемых частей воспринимать повышенные нагрузки в прямом и обратном направлениях. Направляющий же шарнир воспринимает повышенные нагрузки только в особых случаях, например, при прохождении поворота. На данный момент широко применяются цельноштампованные корпуса из-за их повышенной долговечности и несущей способности. Однако нельзя исключать из классификации предшествующий тип конструкции, основой которой был листоштампосварной корпус.

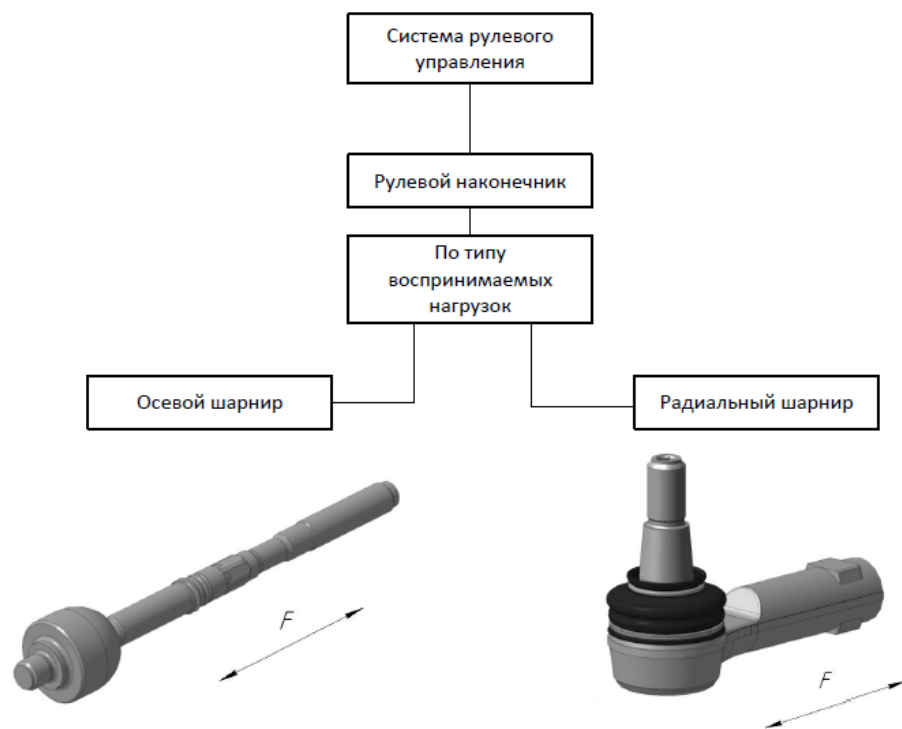


Рисунок 2.13 – Классификация по системе рулевого управления автомобиля

В системе рулевого управления шарниры можно разделить только на осевые и радиальные шарниры. При этом применяется осевой шарнир только для реечного рулевого управления, когда корпус внутреннего рулевого наконечника крепится непосредственно к рейке.

Помимо непосредственных геометрических и функциональных ограничений, заложенных со стороны автопроизводителя, необходимо также рассматривать шаровой шарнир с точки зрения ориентации в пространстве (рисунок 2.14). Данный

таксон классификации обусловлен тем, что при работе шарнира защитный чехол на корпусе должен быть неподвижен, а скольжение по пальцу должно происходить без скручивания. С этой точки зрения для пальца, направленного вверх, повышен риск износа горловины чехла в сопряжении с пальцем и ответной деталью вследствие возможного попадания на нее частиц внешней среды.

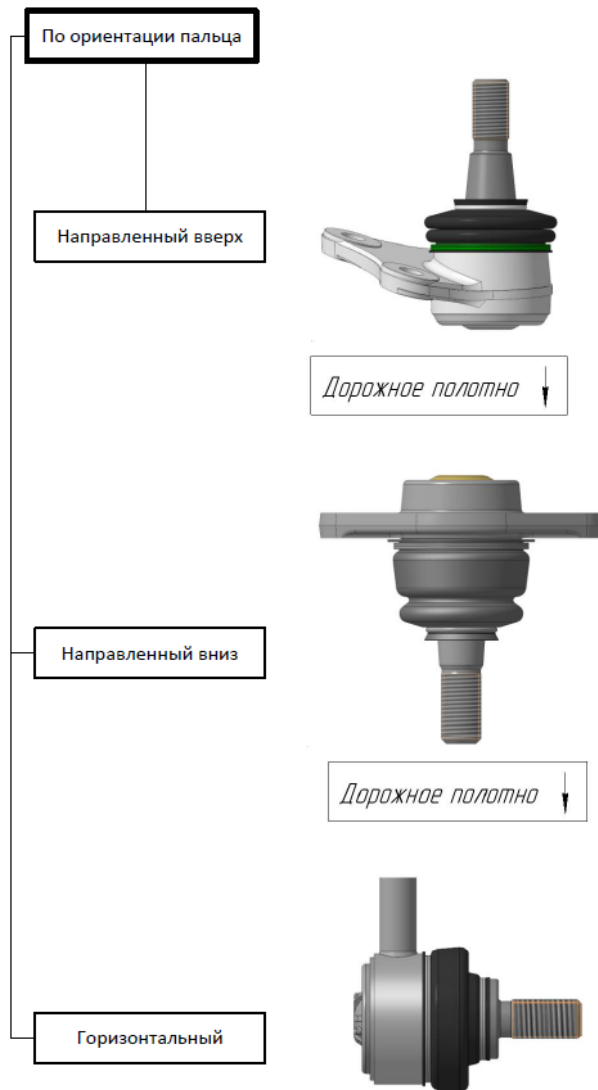


Рисунок 2.14 – Классификация по ориентации в пространстве

Направленный вверх шарнир подразумевает, что палец хвостовиком направлен в сторону от дорожного полотна. Направленный вниз шарнир значит, что палец хвостовиком направлен в сторону дорожного полотна. Данная ориентация характерна для шаровых шарниров передней подвески и наружных рулевых наконечников. Горизонтальная ориентация, когда ось пальца расположена параллельно

плоскости дорожного полотна, характерна для стоек стабилизатора и внутренних рулевых наконечников.

После учета ограничений геометрии и ориентации шарнира в пространстве, предъявляемых со стороны автопроизводителя, необходимо спроектировать конструкцию шарового шарнира. Помимо необходимости сохранять взаимное расположение узлов автомобиля, в шаровом шарнире не должно возникать чрезмерного сопротивления или же наоборот, пониженной жесткости, при выполнении своей основной функции. Помимо этого, необходимо, чтобы шаровой шарнир был бесшумным для водителя и пассажиров автомобиля. Для данной функции применяются различные вкладыши. На рисунке 2.15 представлена классификация шаровых шарниров по типу применяемого вкладыша.

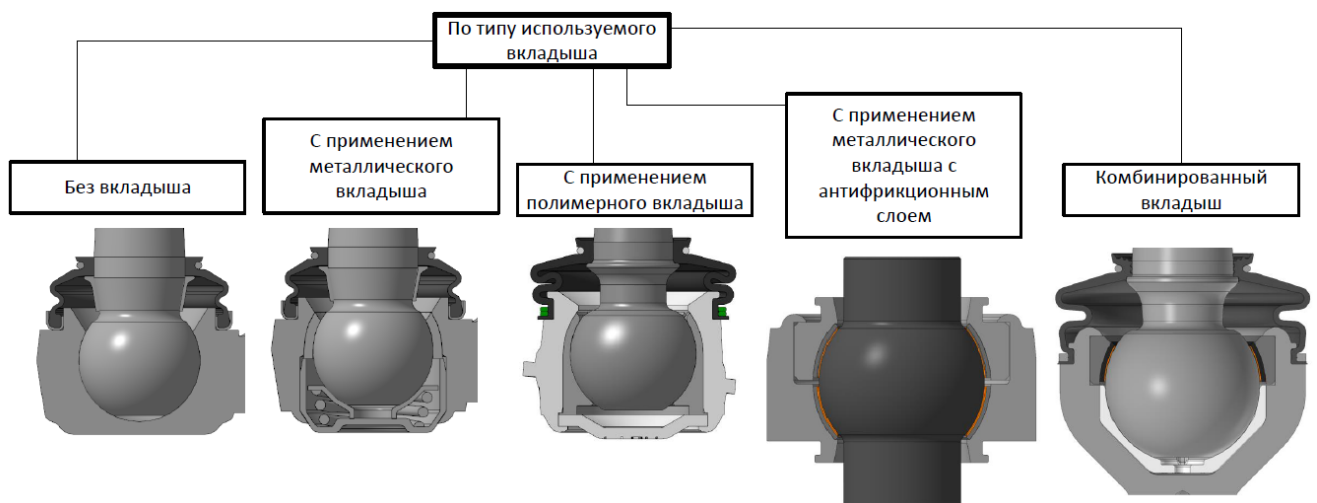


Рисунок 2.15 – Классификация по типу применяемого вкладыша

Пара трения «металл-металл», а именно отсутствие вкладыша или применение стального вкладыша характерна для грузовых автомобилей ввиду возникновения повышенных нагрузок на шарнир и отсутствия острой необходимости снижения общего уровня шума. Для легковых и легких коммерческих автомобилей на данный момент наиболее распространено применение полимерного вкладыша. Полимерные вкладыши характеризуются достаточной нагрузочной способностью, термостойкостью и стойкостью к воздействию применяемых смазок. Также они позволяют снизить уровень шума и обеспечить стабильность момента

сопротивления вращению шарнира и его жесткость в заданных пределах. Изготовление шарнира с полимерным вкладышем проще и дешевле с точки зрения соответствия заданным полям допусков для стальных компонентов и производства самих вкладышей. Для автомобилей класса люкс или при повышенных нагрузках и требованиях к низкому уровню шума применяются металлические вкладыши со слоем антифрикционного полимерного покрытия.

После выбора типа вкладыша необходимо назначить тип формирования шарнирного соединения (см. рисунок 2.16).

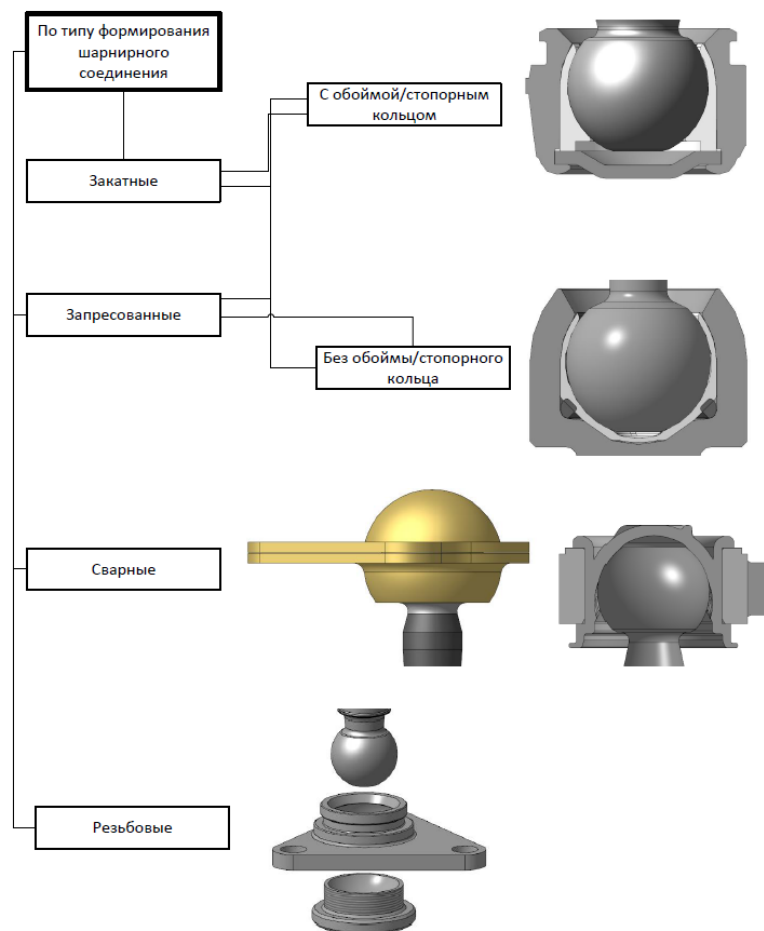


Рисунок 2.16 – Классификация по типу соединения

Для большинства шаровых шарниров со стальным цельноштампованным корпусом применяется способ формирования шарнирного соединения закаткой, который основан на сложном движении специальных роликов и формоизменении бурта корпуса посредством многократного качения по нему деформирующего

инструмента. При запрессовке применяется обжимная матрица, повторяющая геометрию заданной формы конечного бурта. В этом случае матрица перемещается только в вертикальном направлении без осуществления вращательного движения. Применение обоймы или стопорного кольца зависит от того, какого типа конструкция шарнира, и имеет ли место возникновение повышенных усилий в осевом направлении в сторону выдавливания. Конструкция, для которой применяется ультразвуковая сварка вкладыша с корпусом, используется для шарниров, воспринимающих малые осевые нагрузки, например для шарниров стоек стабилизатора [99]. Помимо рассмотренных выше конструктивных особенностей классификации шаровых шарниров, немаловажным аспектом при проектировании продукции с заданными показателями качества является необходимость рассмотрения окружения разрабатываемой продукции. Также стоит отметить, что рассмотрение внешнего воздействия в общей системе классификации шарниров может накладывать некоторые ограничения на применение той или иной конструкции и на выбор таксонов предложенной классификации. На рисунке 2.17 представлена классификация по типу воздействия окружающей среды.

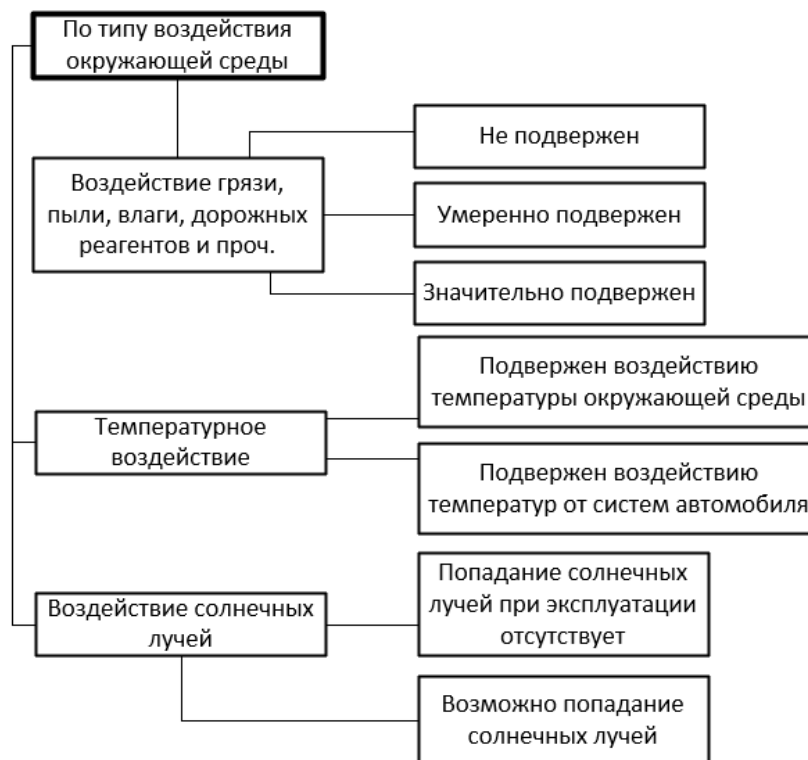


Рисунок 2.17 – Классификация по типу воздействия окружающей среды

Механическое и физическое воздействие частиц внешней среды оказывает непосредственное негативное влияние на чехол шарового шарнира, а при попадании внутрь может привести к выходу шарнира из строя вплоть до его разрушения. Именно поэтому необходимо рассматривать данный таксон предложенной классификации. Температура, в особенности ниже  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [100-102], оказывает негативное влияние на эластичные свойства резины чехла. При некорректном выборе материалов и типа конструкции может произойти нарушение герметичности шарнира. Воздействие прямых солнечных лучей не оказывает значительного влияния на свойства уплотнительной системы шарниров, так как попаданию ультрафиолетового излучения препятствуют элементы кузова и колеса автомобиля. Однако нельзя исключать кратковременного воздействия этого излучения на свойства чехлов [103]. Обобщенная фасетная классификация шаровых шарниров представлена на рисунке 2.18.

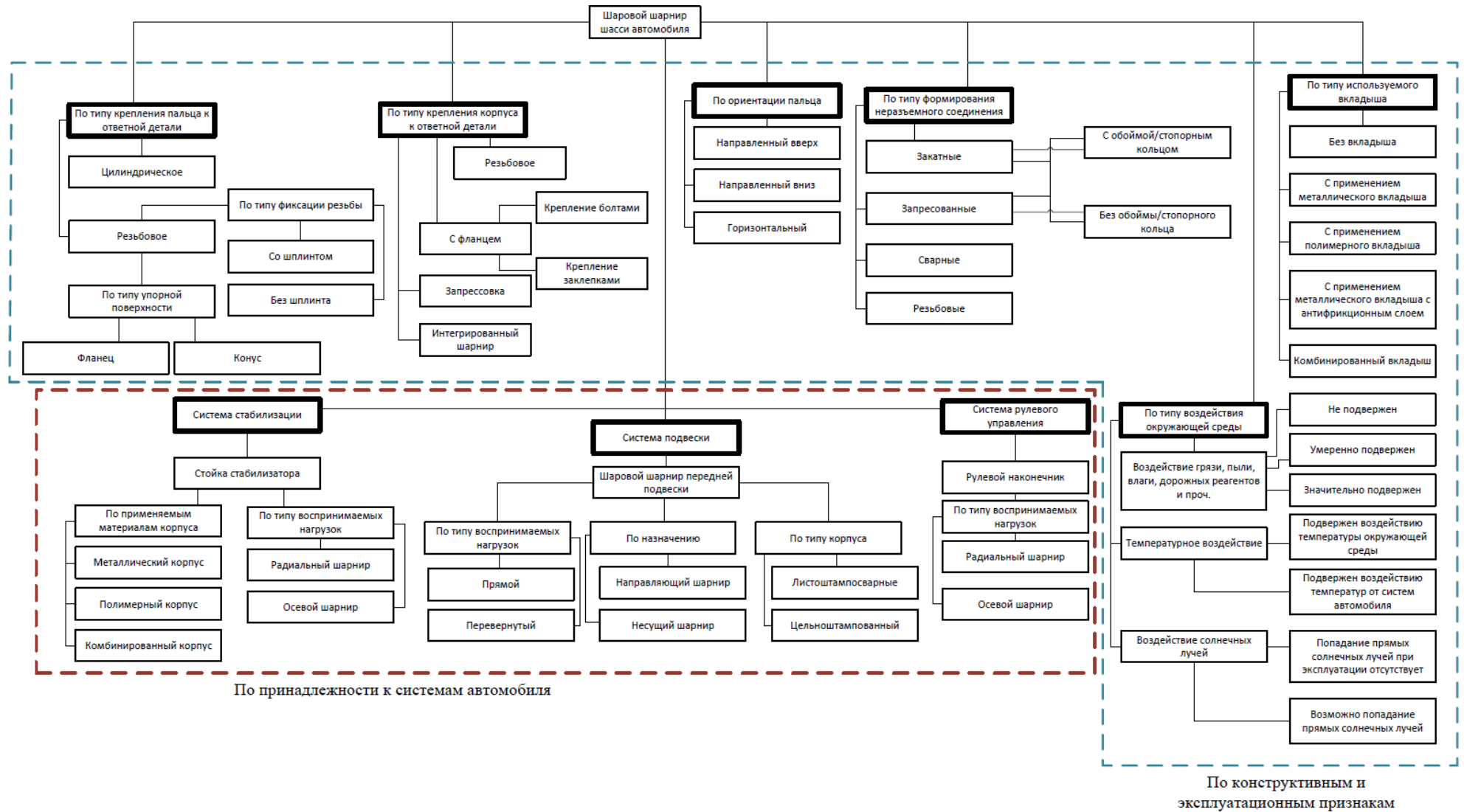


Рисунок 2.18 – Фасетная классификация шаровых шарниров шасси

Таким образом, проведенный функциональный анализ шарового шарнира свидетельствует о широком распространении различных типов шаровых шарниров и видов их исполнений. Шаровые шарниры подлежат обязательной сертификации в соответствии с Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» и должны соответствовать требованиям, предъявляемым со стороны заказчика. Достоинством рассматриваемой классификации является логичность ее построения, последовательность, а также возможность классификации существующих видов шаровых шарниров с учетом дальнейшего расширения их конструкций и номенклатуры. Предложенная классификация дает разработчику конструкции наглядный инструмент выбора показателей продукции, на которые необходимо обратить внимание при проектировании, что в свою очередь позволит снизить риски возникновения отказов в эксплуатации. Также стоит отметить, что впервые рассмотрены многие классификационные признаки, а именно: по типу крепления пальца к ответной детали, по типу крепления корпуса к ответной детали, по ориентации пальца, по типу используемого вкладыша, по системе автомобиля и по типу воздействия окружающей среды.

#### **2.4 Разработка математической модели выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров для их регламентации в конструкторской документации**

Качество продукции оценивается степенью соответствия показателей качества требованиям конструкторской и технологической документации. С этой точки зрения стандарты должны устанавливать такой уровень значений показателей качества продукции, который в максимальной степени будет способствовать удовлетворению требований потребителя. Кроме того, немаловажным фактором является выбор номенклатуры показателей из множества существующих.

Поскольку продукция имеет широкий спектр свойств (в том числе и потребительских), которые отражаются в виде показателей, одной из задач является выбор такого перечня показателей и их количества, которые, с одной стороны, адекватно отражают потребительские свойства продукции, с другой – могут быть обеспечены

в процессе производства данной продукции. Поэтому ранжирование показателей продукции является необходимым этапом разработки конструкторской и технологической документации. Как было отмечено в работе [104], эффективным инструментом преобразования потребительских свойств продукции в регламентируемые показатели ее качества является их структурное, а затем параметрическое согласование, что позволяет учитывать требования потребителя к свойствам изделия и возможности изготовителя их обеспечить в процессе производства. Тогда процесс разработки требований к продукции можно рассматривать как задачу оптимизации с целевой функцией комплексной оценки качества.

Как справедливо отмечено в работах [105, 106], типовую задачу стандартизации можно представить в виде обоснования возможного ряда решений А; Б; В; Г; Д; Е; Ж..., из которого затем на основе научного анализа отбирают (или создают) оптимальный, который и оформляют в виде требований к продукции. При этом следует учитывать, что некоторые решения могут либо повторяться (А; Б; В; Б; Г; Д; Б; Е; Ж; Б...), либо иметь различные варианты (А; Б<sub>1</sub>; В; Б<sub>2</sub>; Г; Д; Б<sub>3</sub>; Е; Ж; Б<sub>4</sub>...). Тогда в документации будут регламентированы показатели качества и их численные значения (Б<sub>1</sub>, Б<sub>2</sub>; Б<sub>3</sub>; Б<sub>4</sub>... > Б<sub>3</sub> = opt). На рисунке 2.19 показана последовательность решения типовой задачи стандартизации.

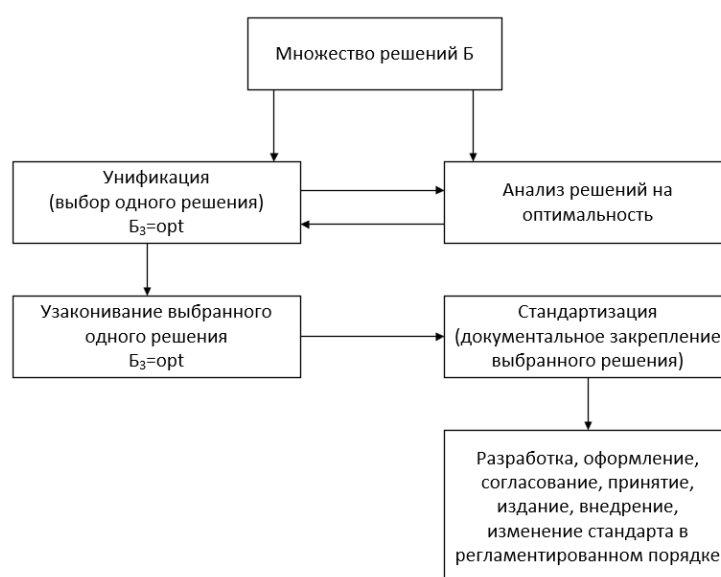


Рисунок 2.19 – Последовательность решения типовой задачи стандартизации

В организационном плане процедура разработки и утверждения конструкторской, технологической и другой документации регламентирована законами Российской Федерации, подзаконными актами, а также соответствующими документами предприятий и организаций. Кроме того, четко оговорен круг лиц, которые занимаются решением этих организационных вопросов. При этом вне рамок данных документов остаются ключевые моменты самого процесса согласования как перечня регламентируемых показателей, так и их значений. В настоящее время согласование происходит в процессе переговоров участвующих сторон, что приводит к значительным временным затратам, необходимым для разработки соответствующей конструкторской и/или технологической документации [107]. При этом, несмотря на имеющиеся математические модели [17, 88], их применение для оценки степени согласованности позиций заинтересованных сторон в некоторой степени затруднено ввиду сохраняющейся инерционности в данной области деятельности.

Исходя из вышеизложенного, данный подход целесообразно применить при разработке конструкции шарового шарнира и технологии производства отдельных его компонентов, что позволит выбрать те показатели изделия, которые целесообразно регламентировать в конструкторской и технологической документации для обеспечения в дальнейшем его функционирования при эксплуатации. В рамках данного диссертационного исследования на примере шарового шарнира рассмотрена возможность применения матричного подхода для выбора показателей.

Как показано в п. 2.3, шаровой шарнир имеет определенное множество классификационных признаков. Разработанная классификация основана на функционально-целевом анализе конструктивных элементов и условиях эксплуатации данного вида автомобильной продукции. При этом при разработке документации встает задача научного обоснования выбора тех классификационных признаков, которые являются значимыми для выполнения главной полезной функции – обеспечение подвижного шарнирного соединения узлов и целостности конструкции. В рамках данного исследования считаем понятия «классификационный признак» и «показатель» эквивалентными по смыслу. С этой точки зрения решение данной задачи может быть представлено в следующем виде.

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  $\mu_R(u_i, u_i) = 1, u_i \in U$ . НОНП обычно задается лицом, принимающим решение (ЛПР), в результате работы с экспертами, обладающими знаниями о содержании задачи, которые не были формализованы либо в силу чрезмерной сложности такой формализации, либо по каким-либо другим причинам. Данные показатели могут быть равнозначными для любого исследуемого автомобильного компонента. На основании этого считается, что множество показателей является нечетким. В рамках данного теоретического исследования под классификационным признаком будем понимать показатель, который целесообразно или нецелесообразно выбрать для регламентации в конструкторской и технологической документации. Иными словами, целью данного теоретического исследования является выбор таких показателей, которые предпочтительны среди множества возможных для использования в дальнейшем при разработке требований нормативного документа на данный вид продукции.

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». Рефлексивность НОНП означает, что никакой признак (альтернатива) не может быть хуже самого себя. Тогда процесс принятия решения о выборе предпочтительных показателей из множества возможных можно представить в виде следующей последовательности действий:

1. Поскольку результатом выбора показателей исследуемого автомобильного компонента является множество, содержащее ограниченное количество признаков, то для его получения строим нечеткое отношение строгого предпочтения (НОСП)  $R^S$ , ассоциированное с  $R$ , которое определяется функцией принадлежности

$$\mu_R^S(u_i, u_j) = \begin{cases} \mu_R(u_i, u_j) - \mu_R(u_j, u_i), & \mu_R(u_i, u_j) > \mu_R(u_j, u_i) \\ 0, & \mu_R(u_i, u_j) \leq \mu_R(u_j, u_i) \end{cases}, \quad (2.1)$$

Это выражение называется урезанным вычитанием матриц. Оно может быть представлено в виде  $R^S = R \setminus R^T$ , где  $R^T$  – обратное отношение, т.е. матрица получается путем транспонирования.

2. 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

$$\mu_R^{nd}(u_i) = \min_{u_j \in U} \{1 - \mu_R^S(u_j, u_i)\} = 1 - \max_{u_j \in U} \{1 - \mu_R^S(u_j, u_i)\}, \quad u_i \in U, \quad (2.2)$$

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

$$\mu_R^{nd}(u_i) = \alpha, \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  – степень недоминируемости выбираемого показателя другими из множества равнозначных для исследуемого 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  $U_R^{nd}$ .

3. Выбираем показатель, для которого

$$u^* = \operatorname{argmax}_{u_i \in U} \mu_R^{nd}(u_i), \quad (2.4)$$

Показатель, удовлетворяющий этому условию, подлежит обязательной регламентации в конструкторской и технологической документации. Если наибольшую степень недоминируемости имеет не один, а несколько показателей, то ЛПР может либо сам выбирать один из них, исходя из каких-либо дополнительных соображений, либо расширить круг экспертов при формировании исходных данных задачи и провести итерационное уточнение экспертных оценок.

## **2.5 Применение математической модели выбора регламентируемых показателей шарового шарнира шасси**

Как было показано в п. 2.3, с практической точки зрения для классификации различных видов шаровых шарниров следует использовать функционально-целевой анализ. Использование данного подхода позволяет не только учитывать функции различных конструктивных частей и условий эксплуатации данного вида автомобильной продукции, но также создавать на этой основе новые перспективные виды шаровых шарниров. Поскольку любой производственный и технологический процесс базируется на применении различных видов нормативной и технической документации, одной из научных задач является разработка математического аппарата, позволяющего формализовать и обосновать выбор классификационных признаков, которые оказывают наиболее значительное влияние на качество продукции в эксплуатации.

Рассмотрим применение разработанного алгоритма решения задачи принятия решения одним экспертом на примере выбора важных классификационных признаков шарового шарнира. В качестве допущения примем, что все классификационные признаки являются одинаково важными, поскольку каждый из них оказывает влияние на качество шаровых шарниров и могут быть регламентированы в конструкторской и технологической документации. Тогда задача сводится к выбору значимых признаков из набора конструктивных и эксплуатационных особенностей шарового шарнира автомобиля. Обозначим данные признаки следующим образом: «Крепление пальца к ответной детали» – КПОД, «Крепление корпуса к ответной детали» –

ККОД, «По ориентации пальца» – ОП, «Система стабилизации» – СС «Система подвески» – СП, «Система рулевого управления» – РУ, «По типу используемого вкладыша» – ТВ, «По типу формирования шарнирного соединения» – ТС, «По типу воздействия окружающей среды» – ТВОС. Для решения поставленной задачи запишем множество альтернатив

$$U = \{КПОД, ККОД, ОП, СС, СП, РУ, ТВ, ТС, ТВОС\}$$

Оценку будем проводить по нескольким критериям: обеспечение безопасности транспортного средства, обеспечение основной функции изделия и уровень комфорта водителя и пассажиров. В таблице 2.1 приведены результаты сравнения выбранных классификационных признаков между собой по данным критериям. В качестве допущения было принято, что каждый признак имеет три уровня значимости (каждый уровень значимости соответствует выбранному критерию оценки).

Сравнение проводили следующим образом [108]. 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 преимуществ 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 «0». Преобразуем качественную таблицу парных сравнений 2.1 в соответствующую числовую таблицу 2.2: в ячейках с минусами и нулями запишем «0», в ячейках с плюсами – «1».

Таблица 2.1 – Качественная таблица сравнений признаков

	КПОД			ККОД			ОП			СС			СП			РУ			ТВ			ТС			ТВОС		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
КПОД	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	0	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-
ККОД	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	0	0	+	-	-	+	-	-	+	-	-
ОП	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-
СС	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-
СП	0	0	0	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	0	0	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-
РУ	-	-	+	-	0	0	+	-	-	+	+	-	0	0	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-
ТВ	-	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-
ТС	-	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-
ТВОС	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+

Таблица 2.2 – Числовая таблица сравнений признаков

	КПОД			ККОД			ОП			СС			СП			РУ			ТВ			ТС			ТВОС		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
КПОД	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
ККОД	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
ОП	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0
СС	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
СП	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
РУ	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
ТВ	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
ТС	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0
ТВОС	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1

На основе полученной числовой таблицы 2.2 можно записать матрицу  $M_R$ . 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 (1)-(3) имеют одинаковый вес (важность) для эксперта, то есть значение веса критериев будет следующим

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{3}, \quad (2.5)$$

Таким образом

$$a_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 b_{ij}^{(k)}, \quad (2.6)$$

где  $a_{ij}$  – элементы результирующей матрицы НОНП;

$b_{ij}^{(k)}$  –  $k$ -ый элемент в  $i$ -ой строке  $j$ -ого прямоугольника.

Тогда, нечеткое отношение нестрогого предпочтения (НОНП)  $R$  определяется матрицей  $M_R$ .

$$M_R = \begin{pmatrix} 1,0 & 0,7 & 0,7 & 0,3 & 0,7 & 0,7 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0,3 & 1,0 & 0,3 & 0,7 & 0,7 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0,3 & 0,7 & 1,0 & 0,7 & 0,7 & 0,7 & 0,3 & 0,7 & 0,3 \\ 0,7 & 0,3 & 0,3 & 1,0 & 0,3 & 0,3 & 0,7 & 0,7 & 0,3 \\ 0,0 & 0,3 & 0,3 & 0,7 & 1,0 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0,3 & 0,0 & 0,3 & 0,7 & 0,0 & 1,0 & 0,3 & 0,0 & 0,3 \\ 0,7 & 0,7 & 0,7 & 0,3 & 0,7 & 0,7 & 1,0 & 0,7 & 0,3 \\ 0,7 & 0,7 & 0,3 & 0,3 & 0,7 & 1,0 & 0,3 & 1,0 & 0,3 \\ 0,7 & 0,7 & 0,7 & 0,7 & 0,7 & 0,7 & 0,7 & 0,7 & 1,0 \end{pmatrix}$$

После транспонирования матрицы  $M_R$  получаем

$$M_R^T = \begin{pmatrix} 1,0 & 0,3 & 0,3 & 0,7 & 0,0 & 0,3 & 0,7 & 0,7 & 0,7 \\ 0,7 & 1,0 & 0,7 & 0,3 & 0,3 & 0,0 & 0,7 & 0,7 & 0,7 \\ 0,7 & 0,3 & 1,0 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,7 & 0,3 & 0,7 \\ 0,3 & 0,7 & 0,7 & 1,0 & 0,7 & 0,7 & 0,3 & 0,3 & 0,7 \\ 0,7 & 0,7 & 0,7 & 0,3 & 1,0 & 0,0 & 0,7 & 0,7 & 0,7 \\ 0,7 & 0,3 & 0,7 & 0,3 & 0,3 & 1,0 & 0,7 & 1,0 & 0,7 \\ 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,7 & 0,3 & 0,3 & 1,0 & 0,3 & 0,7 \\ 0,3 & 0,3 & 0,7 & 0,7 & 0,3 & 0,0 & 0,7 & 1,0 & 0,7 \\ 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 1,0 \end{pmatrix}$$

Строим НОСП  $R^S$ , которое определяется матрицей  $M_R^S$  и вычисляемое путем урезанного вычитания матрицы  $M_R^T$  из матрицы  $M_R$

$$M_R^S = \begin{pmatrix} 0,0 & 0,3 & 0,3 & 0,0 & 0,7 & 0,3 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,3 & 0,0 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,0 & 0,3 & 0,0 \\ 0,3 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,3 & 0,3 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,3 & 0,0 & 0,3 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,3 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,0 & 0,3 & 0,3 & 0,0 & 0,3 & 0,0 \\ 0,3 & 0,3 & 0,0 & 0,0 & 0,3 & 1,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,0 \end{pmatrix}$$

Находим максимальные численные значения элементов в столбцах матрицы  $M_R^S$

$$v_R = (0,3; 0,3; 0,3; 0,3; 0,7; 1,0; 0,3; 0,3; 0,0)$$

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

$$\mu_R^{nd} = (0,7; 0,7; 0,7; 0,7; 0,3; 0,0; 0,7; 0,7; 1,0)$$

Таким образом, стратегии выбора значимых классификационных признаков шарового шарнира для последующей регламентации в конструкторской и технологической документации, соответствует альтернатива, имеющая максимальное значение вектора  $\mu_R^{nd}$ . 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.

## 2.6 Выводы по главе 2

1. Отмечается, что существующие подходы к классификации основаны, как правило, на использовании существенных признаков, характерных для объекта в целом. Существенным недостатком такого приема классификации является вероятность попадания в одну группу влияющих и зависимых свойств. На примере шарового шарнира шасси показано, что использование функционального подхода позволяет классифицировать объекты с учетом существующей взаимосвязи функций и свойств их обеспечивающих. Данный подход к классификации позволяет систематизировать имеющуюся техническую информацию о данном виде автомобильного компонента. Совершенствование фасетной классификации с использованием функций для построения фасет позволяет разрабатывать новые конструкции шаровых шарниров.

2. Показано, что каждый классификационный признак шарового шарнира может быть выбран в качестве объекта для разработки технико-технологических мероприятий по совершенствованию конструкции узла в целом либо отдельных его компонентов, а также разработки новых методов испытаний для определения эксплуатационных характеристик.

3. В качестве оценочных критериев качества шарового шарнира выбраны конструктивные признаки, признаки расположения и эксплуатационные признаки, которые, с одной стороны, отражают полезную функцию данного вида автомобильного компонента, а с другой – особенности его эксплуатации. Представив данные показатели в виде нечеткого множества, а также используя метод решения через обратную матрицу, получили, что для разработки технико-технологических решений по совершенствованию качества шаровых шарниров в эксплуатации следует выбрать следующие показатели: тип воздействия окружающей среды, тип крепления пальца к ответной детали, тип крепления

корпуса к ответной детали, ориентация пальца, система стабилизации, тип используемого вкладыша, тип формирования шарнирного соединения.

## **ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ ШАССИ АВТОМОБИЛЕЙ С УЧЕТОМ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

### **3.1 Разработка концепта конструкции шарового шарнира передней подвески**

Разработка конструкции шарового шарнира шасси начинается по одной из следующих причин:

- получение запроса от заказчика OEM-уровня;
- необходимость расширения номенклатуры продукции для реализации на вторичном рынке, проведение реверс-инжиниринга;
- подготовка предложения для подачи заказчику OEM-уровня с целью замещения действующего поставщика;
- возникновение (выявление) дефектов конструкции шарниров в эксплуатации.

В любом из перечисленных случаев перед разработчиком конструкции встает вопрос о разработке продукта с заданным уровнем качества, а перед технологом вопрос о возможной постановке данного продукта на производство.

В работе Вахитова А.Р. [53] рассмотрен подход к проектированию продукции для заказчиков OEM-уровня на основе методов стандартизации, в частности рассмотрен процесс проектирования рулевых наконечников реечного рулевого механизма на основании предъявляемых к продукции требований. В общем случае для современного шарового шарнира справедлива следующая схема разработки конструкции, представленная на рисунке 3.1.

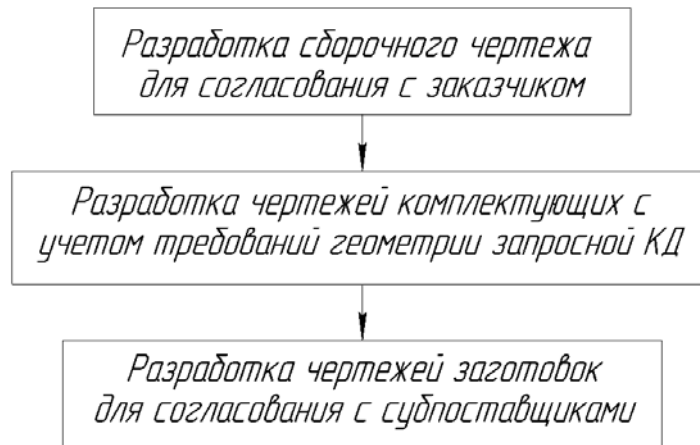


Рисунок 3.1 – Схема разработки конструкции шарового шарнира

Каждый пункт включает в себя множество подпунктов. Как было отмечено ранее, при эксплуатации шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus возникли системные отказы в эксплуатации, связанные с конструкцией. Именно поэтому в данной работе предлагается основываться на примере решения задачи исключения проблем в эксплуатации данного шарового шарнира. В соответствии с ранее предложенной классификацией шаровых шарниров шасси автомобилей определено, что шаровой шарнир передней подвески автомобиля LADA Largus является прямым направляющим шарниром с цельноштампованным корпусом, креплением корпуса запрессовкой, цилиндрическим креплением пальца, направленным вверх, закатной конструкции с полимерным вкладышем, подверженной значительному воздействию грязи, пыли, влаги, температуры окружающей среды и возможному кратковременному попаданию солнечных лучей.

По разработанной математической модели выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров шасси установлено, что тип воздействия окружающей среды является ключевым для обеспечения качества в гарантийный период эксплуатации. Исходя из этого, для шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus целесообразно применение гарантированных конструкторских решений, обладающих высокой надежностью, несмотря на их повышенную себестоимость для обеспечения герметичности в течение

всего срока службы. Поэтому была разработана конструкция уплотнительной системы с отсекателем. Внешний вид шарового шарнира с новой уплотнительной системой представлен на рисунке 3.2.

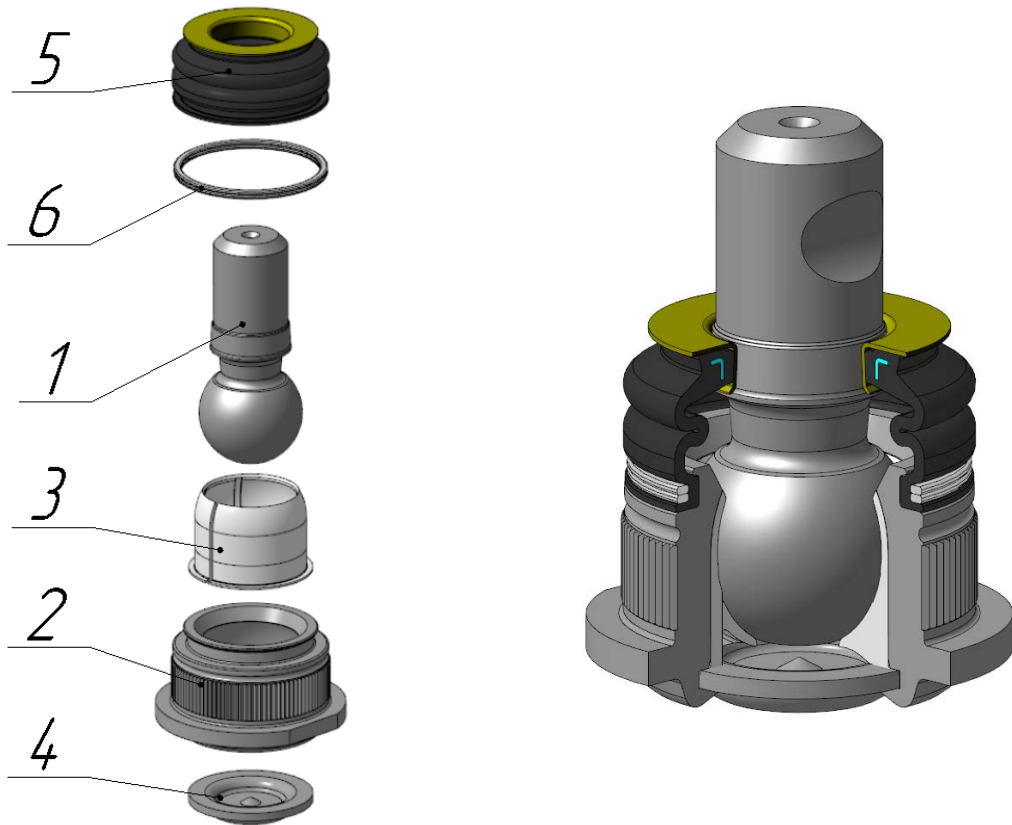


Рисунок 3.2 – Конструкция шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus: 1 – шаровой палец; 2 – корпус; 3 – вкладыш; 4 – обойма; 5 – чехол защитный с отсекателем; 6 – кольцо пружинное

Данная конструкция защищена патентом РФ [109]. Более подробно данная конструкция представлена на рисунке 3.3.

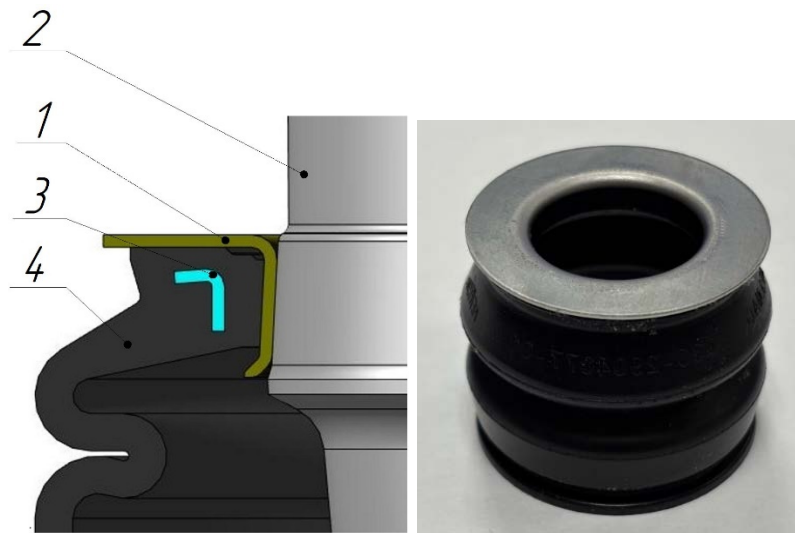


Рисунок 3.3 – Внешний вид уплотнительной системы шарового шарнира с отсекателем из нержавеющей стали: 1 – отсекатель; 2 – палец шаровой (с покрытием ZnNi); 3 – интегрированное кольцо; 4 – чехол защитный

Также применено интегрированное цельноштампованное уплотнительное кольцо L-образного сечения, обеспечивающее постоянную и равномерную каркасную жесткость, натяг и прилегание чехла на отсекателе при качании пальца. Место соединения чехла с корпусом спроектировано исходя из наработанного опыта и применено классическое пружинное кольцо. Помимо конструкции самой уплотнительной системы необходимо спроектировать весь шарнир таким образом, чтобы при его работе не возникало вредных контактов чехла с деталями окружения, а положение отсекателя на пальце не изменялось со временем.

### 3.1.1 Конструкция пальца

Разработка конструкции пальца начинается с определения компоновки присоединительных и габаритных размеров, указанных на чертеже OEM-заказчика. Также необходимо оценить соответствие конструкции признакам разработанной классификации для выбора стратегии проектирования. Для

шарового пальца шарового шарнира передней подвески автомобиля LADA Largus необходимо соблюдение размеров, представленных на рисунке 3.4.

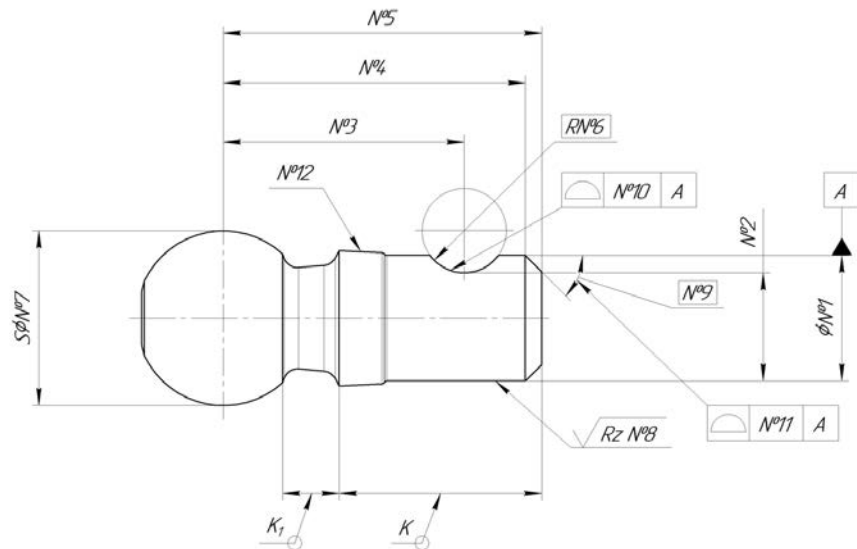


Рисунок 3.4 – Требования к геометрии шарового пальца

Помимо требований к геометрии со стороны заказчика OEM-уровня непосредственно к пальцу предъявляются требования к твердости, ударной и усталостной прочности. Также ограничением является кинематическая схема работы шарнира, в частности минимальный угол качания пальца относительно корпуса. В связи с этим проектируется специальная геометрия галтели пальца. Для обеспечения посадки отсекателя на палец была выбрана конусная посадка с конусностью 1:10. Конусный элемент обозначен №12 на рисунке 3.4. Также с целью обеспечения стабильного положения отсекателя на пальце после напрессовки задан диапазон шероховатости конусного участка в пределах Ra 8,0-12,0.

### 3.1.2 Конструкция корпуса

Конструкция корпуса аналогично конструкции пальца должна соответствовать требованиям по присоединительным и габаритным размерам, обозначенным в исходной КД заказчика (рисунок 3.5).

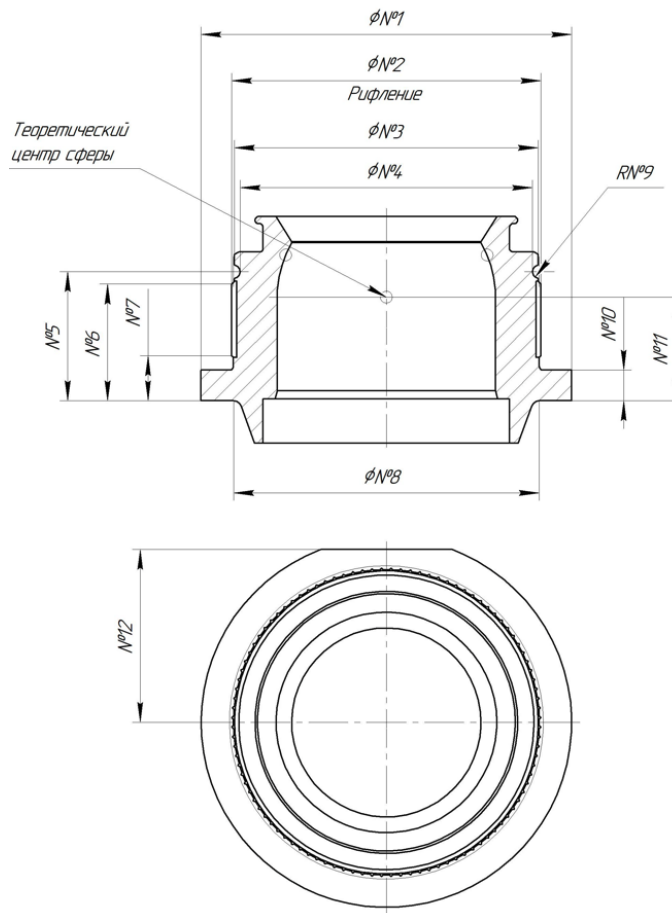


Рисунок 3.5 – Требования к геометрии корпуса.

Особенностью проектируемого шарового шарнира является тип фиксации корпуса в рычаге, а именно посредством запрессовки. В таком случае важно учитывать незначительные радиальные упругие деформации, оказывающие влияние на функциональные характеристики шарнира, в частности на момент сопротивления качанию и вращению пальца.

Также необходимо, чтобы материал корпуса совместно с геометрией обеспечивал безопасную эксплуатацию шарнира. Основным параметром безопасности является обеспечение заданного усилия вырыва пальца из корпуса. Также важно проектировать геометрию окна таким образом, чтобы помимо усилия вырыва обеспечивался минимальный угол качания пальца. Таким образом будет соблюдаться кинематическая схема работы подвески. Данный параметр следует проектировать итерационно и совместно с галтелью пальца.

### 3.1.3 Конструкция вкладыша и обоймы

Вкладыш распределяет и передает нагрузку с пальца на корпус и с корпуса на палец. Помимо своей основной функции для проектируемого шарнира вкладыш должен обеспечивать бесшумность и плавность работы шарнира посредством выбранных допусков и распределения смазки внутри шарнира. Через боковую стенку вкладыша по всей его высоте проходит единственная радиальная сквозная прорезь. С противоположной стороны от радиальной сквозной прорези в теле вкладыша выполнен сквозной паз через торцевой опорный элемент. Глубина сквозного паза частично пересекает переходный элемент в виде кольцевой канавки в области параллели сферы. При этом паз не выходит на наружную боковую поверхность вкладыша. На внутренней сферической поверхности вкладыша по всей её высоте выполнены радиальные углубления. Углубления огибают контур внутренней сферической поверхности и могут иметь меридиональное направление или вид винтового массива относительно оси вкладыша. Основные габаритные размеры вкладыша представлены на рисунке 3.6.

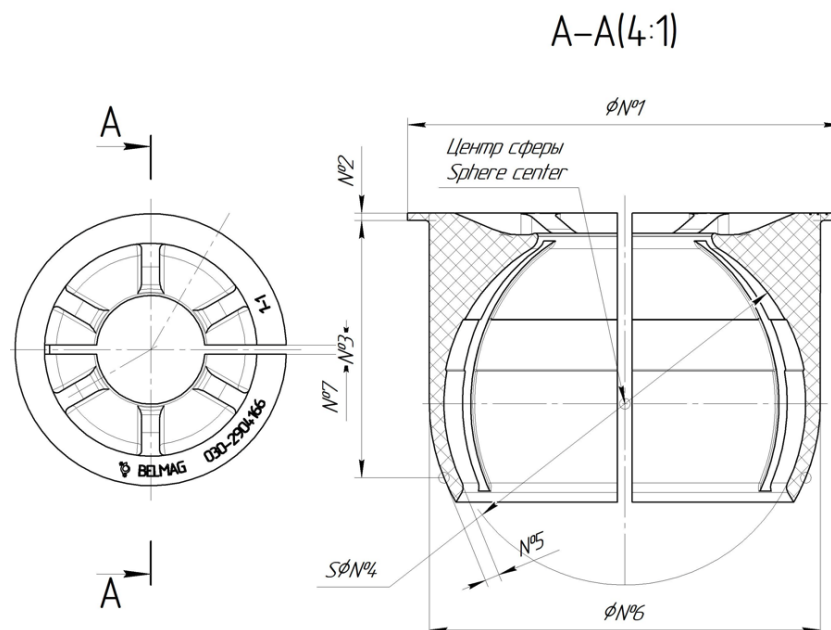


Рисунок 3.6 – Основные размеры вкладыша

Технические особенности данного типа конструкции вкладыша защищены несколькими патентами [110, 111] и широко применяются в конструкциях шаровых шарниров производства АО НПО «БелМаг». Данная конструкция, согласно проведенному DFMEA и накопленному опыту, является гарантированным конструкторским решением.

Последним элементом, обеспечивающим целостность шарнира, является обойма. Обойма изготавливается из листовой стали и фиксирует вкладыш в осевом направлении. Сама обойма фиксируется посредством формирования соединения с корпусом после его деформации в процессе закатки. Конструкция обоймы представлена на рисунке 3.7.

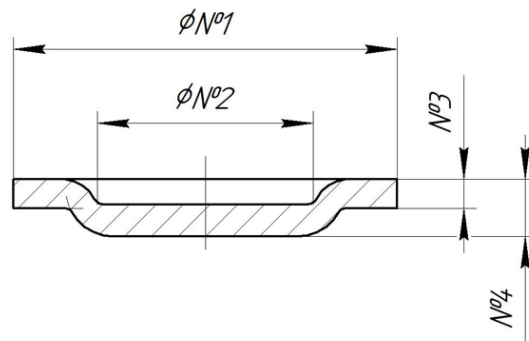


Рисунок 3.7 – Основные размеры обоймы

### 3.2 Разработка уплотнительной системы

Гарантийный период на изделие при условии его эксплуатации на территории Российской Федерации составляет 3 года или 100 тысяч километров. Такой срок связан с возрастающими требованиями конечных потребителей к сроку службы автомобиля. Сама эксплуатация сопряжена со сложными дорожно-климатическими условиями эксплуатации и рисками нарушения герметичности. Именно герметичность является узким местом с точки зрения обеспечения ресурса шарового шарнира автомобиля. Поскольку наиболее частой причиной выхода шарнира из строя является попадание в пару трения «вкладыш-палец» твердых абразивных частиц или возникновение коррозии на

сфере пальца, что приводит к повышенному износу вкладыша. Влияние герметичности также подтверждается и разработанной классификацией (таксон «по типу воздействия окружающей среды»), и построенной на ее основе моделью выбора предпочтительных показателей шаровых шарниров шасси.

Герметичность шарового шарнира является комплексным показателем качества, зависящим от множества факторов. Этими факторами являются геометрия чехла (геометрия гофры, длина образующей, форма горловин, форма заплечика), материал из которого он изготовлен (тип резиновой смеси) и способ его изготовления (литье под давлением, прессование). Помимо этого, важно учитывать применяемую в шарнире смазку и применяемые ответные детали, а именно пружинное и уплотнительное кольца. Геометрия посадочного места и микрорельеф поверхности на корпусе и пальце также оказывают влияние на величину износа в процессе эксплуатации.

Разработка уплотнительной системы, как было отмечено ранее, начинается с оценки классификации с целью выбора типа конструкции и параметров выбранной конструкции для обеспечения герметичности в эксплуатации. Ключевыми с этой точки зрения являются следующие ступени классификации:

1. По типу крепления корпуса к ответной детали: запрессовка. Данная ступень накладывает жесткие ограничения на габариты чехла, так как при запрессовке шарнир проходит через отверстие в рычаге и не должен быть поврежден в процессе сборки;

2. По типу крепления пальца к ответной детали: цилиндрическое. В данном случае необходимо учитывать наличие сквозной прорези на поворотном кулаке. Данная прорезь является концентратором потока продуктов внешней среды, которые попадают на верхнюю горловину чехла защитного;

3. По ориентации пальца: направленный вверх. В данном случае продукты внешней среды аккумулируются на верхней горловине чехла и имеется повышенный риск ее преждевременного износа;

4. По типу воздействия окружающей среды: значительно подвержен воздействию грязи, пыли, влаги, дорожных реагентов и прочего, подвержен

воздействию температуры от систем автомобиля, возможно попадание солнечных лучей.

Учитывая высокий риск потери герметичности в эксплуатации и серьезные массовые проблемы с данным шаровым шарниром у предыдущего поставщика, необходимо применить разработанную инновационную конструкцию уплотнительной системы шарового шарнира с отсекателем из нержавеющей стали [109].

### **3.2.1 Разработка конструкции и технических требований к чехлу защитному**

Разработка конструкции чехла защитного заключается в выборе геометрических параметров конструкции, материала чехла и типа его производства. Каждый из данных параметров оказывает влияние как на качество чехла, так и на его стоимость. Для автомобиля LADA Largus выбрана морозостойкая резина чехла на основе хлоропренового каучука. Данная резиновая смесь позволяет чехлу сохранять эластичность и упругие свойства даже при значительных отрицательных температурах, что позволяет сохранять форму чехла и достаточное прилегание верхней горловины к отсекателю.

Геометрию чехла можно разделить на три зоны: нижняя горловина, гофра, верхняя горловина. Горловины между собой можно разделить по типу уплотнения, а именно статическое и динамическое:

1. Статическое уплотнение характерно, если уплотнительная поверхность неподвижна. Данный тип уплотнения проще реализовать в силу отсутствия трения, износа и сопутствующего локального повышения температуры. В результате уплотнительная кромка может быть значительно растянута, за счет чего и будет обеспечиваться уплотнительный эффект.

2. Динамическое уплотнение имеет место, если уплотнение движется вместе с уплотняемым элементом. В этом случае если уплотнительная кромка

испытывает значительные напряжения, то увеличивается трение, износ и повреждение уплотнительной кромки.

Для обеспечения герметичности выбрана конструкция с внутренним интегрированным L-образным кольцом. Такой тип конструкции, по сравнению с классическим разрезным наружным O-образным кольцом обеспечивает равномерный натяг в сопряжении верхней горловины чехла с ответной деталью, а именно с отсекателем. Геометрия чехла представлена на рисунке 3.8.

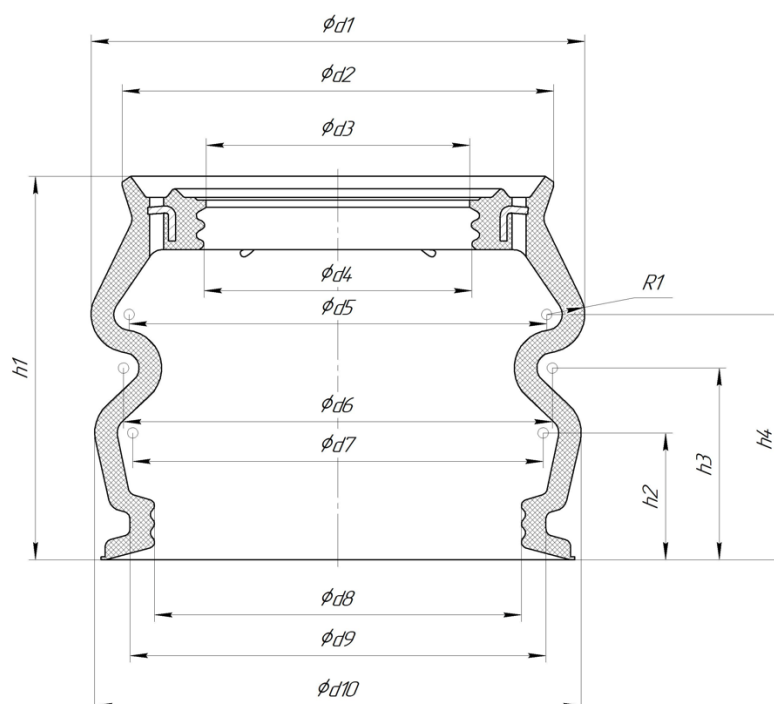


Рисунок 3.8 – Геометрия чехла защитного шарового шарнира передней подвески LADA Largus

### 3.2.2 Разработка конструкции отсекателя

Уплотнительная система шаровых шарниров шасси и рулевого управления является ответственным компонентом продукции с точки зрения обеспечения качества и долговечности готового изделия. С этой точки зрения в данной работе разработана инновационная конструкция уплотнительной системы с отсекателем из нержавеющей стали, напрессованным на палец шаровой, который обеспечивает защиту верхней горловины уплотнительного соединения

[109]. Известна похожая конструкция компонента уплотнительной системы, представленная в патенте [112]. Однако данная конструкция имеет недостатки в виде возможного повреждения и потери натяга между пальцем и предлагаемой деталью, изготовленной из полимерного материала.

Отсекатель представляет собой тонкостенную деталь типа тела вращения, изготовленную из нержавеющей стали с высоким классом чистоты поверхности. Втулка отсекателя имеет форму усечённого конуса, при этом углы, образующие внутреннюю и наружную поверхности втулки, равны и ориентированы по отношению к оси втулки. На меньшем диаметре втулки расположен фланец, торцевые поверхности которого перпендикулярны оси втулки. На большем диаметре втулка отсекателя оснащена буртом, углы которого, образующие внутреннюю и наружную поверхности, превышают углы наклона соответствующих поверхностей конической втулки к её оси, что формирует желоб для монтажа верхней горловины чехла со стороны шарового пальца. Отсекатель зафиксирован неподвижно и соосно с шаровым пальцем на наружной конической поверхности стержневой части шарового пальца. При этом угол наклона образующей стержневой части равен углу наклона внутренней сопряжённой поверхности конической втулки отсекателя относительно его оси. Между внутренней контактной поверхностью горловины защитного чехла и наружной поверхностью отсекателя размещена синтетическая смазка для минимизации коэффициента трения и снижения риска преждевременного износа. На рисунке 3.9 представлен эскиз отсекателя.

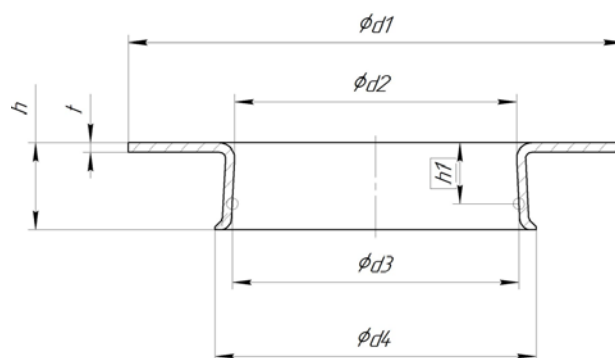


Рисунок 3.9 – Эскиз отсекателя

### 3.3 Разработка технологии производства отсекаателя

В качестве технологии производства отсекаателя выбрана технология холодной листовой штамповки. Данная технология выбрана как наиболее производительная и экономически оправданная [113]. Сложностью при проектировании процесса данного вида продукции является то, что толщина исходной ленты для отсекаателя составляет всего 0,6 мм, а утонение доходит до 30%. Сам же отсекаатель 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.) [114, 115]. Выбор именно нержавеющей стали обусловлен сложными условиями эксплуатации под воздействием влаги, абразивов, дорожных реагентов и продуктов коррозии от стальных и чугунных компонентов шасси без защитного покрытия.

В связи с этим целесообразно воспользоваться методом конечных элементов для рационального выбора переходов холодной листовой штамповки [116-120]. На рисунке 3.10 представлена схема переходов холодной листовой штамповки, разработанная в данной работе и реализованная в условиях АО НПО «БелМаг» на кривошипном прессе на одно- или двухручьевом многопозиционном штампе. Данная схема разработана с применением метода конечных элементов согласно методике, описанной в [116-120].

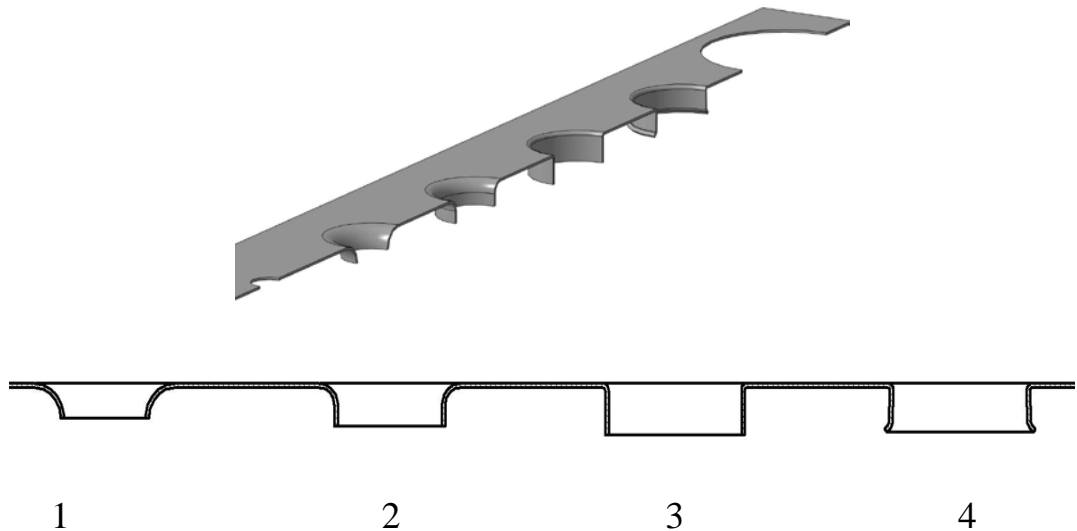


Рисунок 3.10 – Схема штамповки отсекаеля: 1, 2 – предварительная вытяжка; 3 – окончательная вытяжка; 4 – раздача конуса и формирование бурта

Наиболее критическим при производстве отсекаеля является последний переход, при котором формируется его бурт. Именно на данном переходе возникает наибольшее количество дефектов нарушения сплошности в виде трещин, разрывов, и как следствие, появление острых кромок, что негативно сказывается на работе всей уплотнительной системы и потенциально может привести к потере герметичности и выходу из строя всего шарового шарнира. Внешний вид возможных дефектов представлен на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Внешний вид отсекаеля с поверхностными дефектами

Повышенный риск возникновения дефектов на последнем переходе вынуждает искать альтернативные способы раздачи конусного участка и формирования бурта. Известен способ закатки шарнирных соединений [121-123]. При реализации данного способа очаг деформации локализован в зоне контакта инструмента (роликов) с заготовкой. Отмечается, что при раскатке наблюдается большая стойкость инструмента и повышенная энергоэффективность процесса по сравнению с запрессовкой, когда деформации подвергается весь деформируемый участок. В открытых источниках не приводится информация о раскатке торцов тонкостенных деталей. Проведем моделирование процессов раздачи и раскатки бурта отсекаателя с целью выбора рациональной технологии производства отсекаателя. В таблице 3.1 представлены граничные условия свойств материала AISI 304 [124], из которой изготавливается отсекаатель.

Таблица 3.1 – Характеристики стали AISI 304

Модуль Юнга, МПа	185433
Коэффициент Пуассона	0,3
Временное сопротивление, МПа	576,520
Предел текучести, МПа	259,250
Коэффициент упрочнения	1185,102
Экспонента упрочнения	0,353
Коэффициенты пластической анизотропии	
$r_{00}$	0,815
$r_{45}$	1,240
$r_{90}$	0,963

Основным критерием оценки вероятности возникновения дефектов выберем критерий, определяемый по кривой FLD (Forming Limit Diagram) [125]. Диаграмма предела формования (FLD) – концепция, введенная Килером и Баккоффеном в 1964 году для определения величины деформации, которую может выдержать материал до начала образования шейки (рисунок 3.12). Максимальные деформации, которые может выдержать листовый материал до начала образования шейки, называются предельными деформациями формования. FLD – это график предельных деформаций формования в плоскости главных логарифмических деформаций. Линия, соединяющая состояния, при которых деформация становится нестабильной, называется кривой предела формования (FLC – forming limit curve). FLC разграничивает области устойчивой деформации и зоны вероятного разрушения.

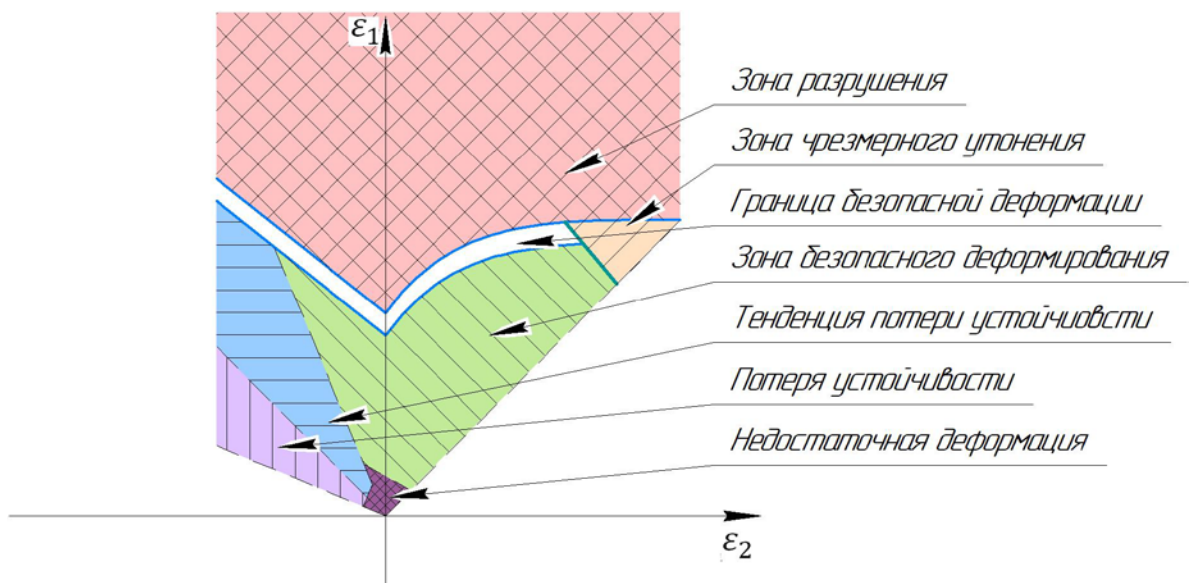


Рисунок 3.12 – Общий вид диаграммы критических деформаций при листовой штамповке

Данная кривая определяется на основании проведения большого числа экспериментов, что является экономически нецелесообразным. В работе [126] описывается способ определения кривых по эмпирическим формулам. Например, точка  $FLC_0$  (критическая деформация образования шейки при главной

деформации в поперечном направлении равной нулю), можно определить по формуле, предложенной Килером и Бразье

$$FLC_0 = \ln \left[ 1 + \left( \frac{13,3 + 14,13t}{100} \right) \frac{n}{0,21} \right] \quad \text{для } n \leq 0,21, \quad (3.1)$$

где  $t$  – толщина листа в мм;

$n$  – коэффициент деформационного упрочнения.

Применение формулы (3.1) для расчета  $FLC_0$  при  $n=0,35$  требует учета ограничений, наложенных авторами методики [126], на диапазон коэффициента деформационного упрочнения. В связи с этим расчетные значения верифицированы с использованием справочных данных по формуемости аустенитных сталей непосредственно в применяемом программном продукте.

Параметр  $FLC_0$  представлен в виде соотношения истинных деформаций. Левая и правая части диаграммы критических деформаций определяются исходя из критерия Хилла-Свифта. Для левой части – критерий Хилла. Для правой – критерий Свифта.

Критерий Свифта

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2n(2-\beta)(1-\beta+\beta^2)}{4-3\beta-3\beta^2+4\beta^3} \\ -\frac{2n(2-2\beta)(1-\beta+\beta^2)}{4-3\beta-3\beta^2+4\beta^3} \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

Критерий Хилла

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon_{UL}}{1+\alpha} \\ \frac{\varepsilon_{UL}\alpha}{1+\alpha} \end{pmatrix} \quad \text{для } \beta < 0, \quad (3.3)$$

где  $\varepsilon_1$  – главные деформации;

$\varepsilon_2$  – второстепенные деформации;

$n$  – коэффициент деформационного упрочнения;

$\beta$  – отношение минимального истинного напряжения ( $\sigma_{22}$ ) к большему истинному напряжению ( $\sigma_{11}$ );

$\varepsilon_{UL}$  – принимается равным  $n$ .

Данная кривая рассчитывается в программном продукте автоматически. Критерий возникновения повреждения FLD требует задания FLC в табличной форме путем задания главной основной деформации при возникновении повреждения как табличной функции второстепенной главной деформации. Критерий возникновения повреждения для FLD задается следующим условием

$$\omega_{FLD} = 1, \quad (3.4)$$

где  $\omega_{FLD}$  – переменная, являющаяся функцией текущего состояния деформации.

$$\omega_{FLD} = \frac{\varepsilon_{major}}{\varepsilon_{major}^{FLD}(\varepsilon_{minor}, \theta, f_i)}, \quad (3.5)$$

где  $\varepsilon_{major}$  – главные деформации,  $\varepsilon_{minor}$  – второстепенные деформации,  $\theta$  – 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 возникновения повреждений принимает вид

$$\omega_{FLD} = \frac{\varepsilon_{major}^A}{\varepsilon_{major}^B}, \quad (3.6)$$

где  $\varepsilon_{major}^A$  – главная деформация в конкретном элементе;

$\epsilon_{\text{major}}^B$  – главная деформация на кривой FLC с соответствующей второстепенной деформацией.

Визуализация конечно-элементных сеток моделей представлена на рисунке 3.13.

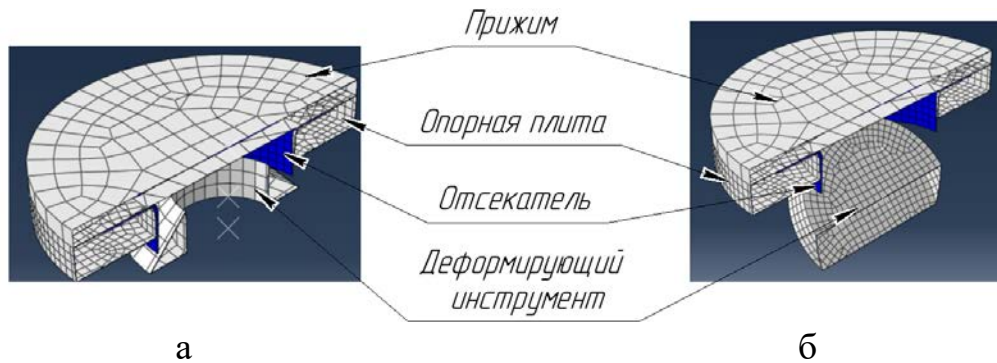


Рисунок 3.13 – Внешний вид конечно-элементных сеток моделей:

а – раздача штамповкой; б – раздача раскаткой

Напряженно-деформированное состояние отсекающего после формирования бурта посредством раздачи штамповкой представлено на рисунке 3.14.

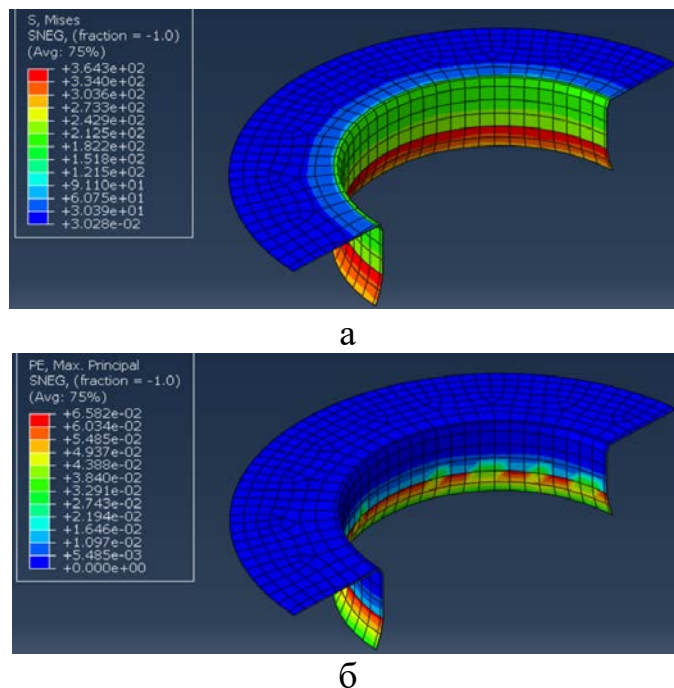
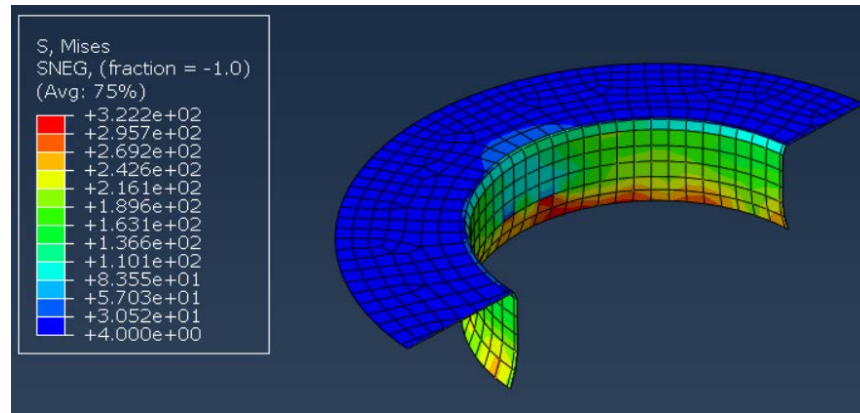


Рисунок 3.14 – Напряженно-деформированное состояние отсекающего после формирования бурта посредством раздачи штамповкой:

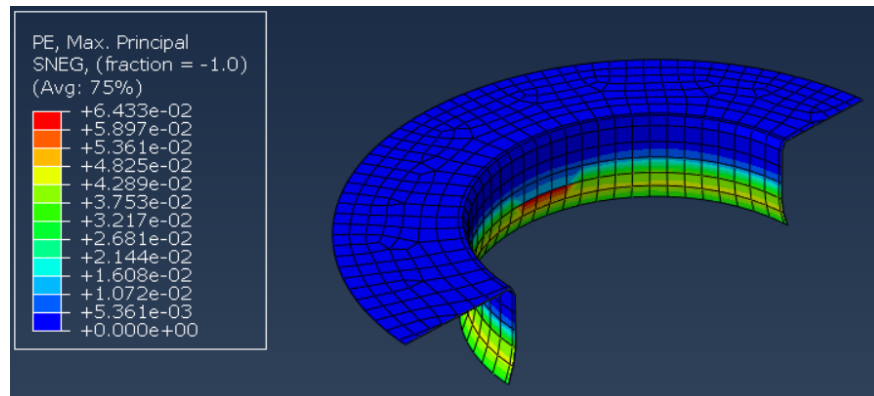
а – эквивалентные напряжения по Мизесу;

б – пластическая деформация

Напряженно-деформированное состояние отсекаателя после формирования бурта посредством раздачи раскаткой представлено на рисунке 3.15.



а



б

Рисунок 3.15 – Напряженно-деформированное состояние отсекаателя после формирования бурта раскаткой: а – эквивалентные напряжения по Мизесу; б – пластическая деформация

Далее оценим величину критерия вероятности разрушения в наиболее деформируемых элементах для каждого способа формирования бурта. На рисунке 3.16 представлен внешний вид деформированной модели с визуализированным критерием оценки вероятности разрушения и график зависимости увеличения данного критерия от времени шага в двух наиболее деформированных элементах.

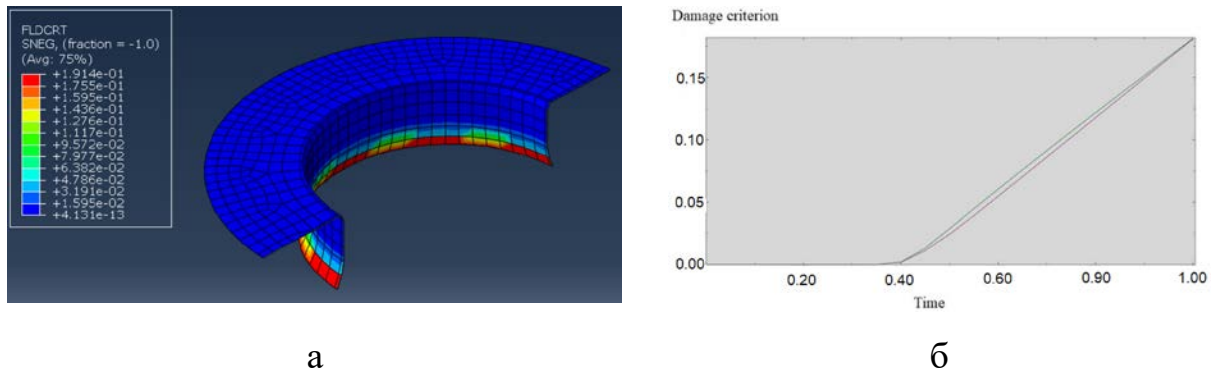


Рисунок 3.16 – Визуализация критерия вероятности возникновения разрушения для модели раздачи бурта штамповкой: а – распределение критерия по объему отсекателя; б – график зависимости критерия от времени шага

На рисунке 3.17 представлены аналогичные результаты для модели формирования бурта раскаткой.

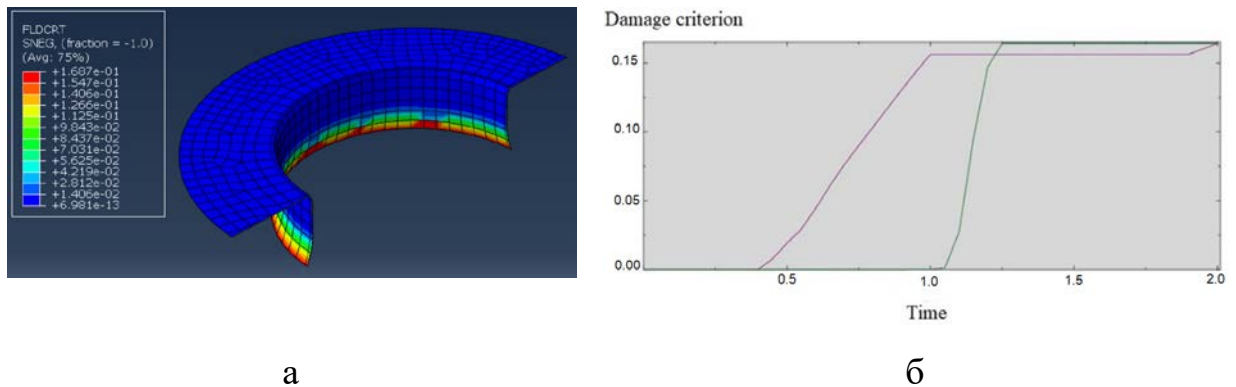


Рисунок 3.17 – Визуализация критерия вероятности возникновения разрушения для модели формирования бурта раскаткой: а – распределение критерия по объему отсекателя; б – график зависимости критерия от времени шага

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 рациональным с точки зрения вероятности возникновения дефектов нарушения сплошности по

FLD критерию. Внешний вид отсека еля, изготовленного по модернизированной схеме переходов и с раскаткой бурта, представлен на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Внешний вид отсека еля, изготовленного по модернизированной схеме переходов и с раскаткой бурта

Результаты моделирования коррелируют с реальными объектами, однако степень корреляции необходимо устанавливать дополнительными исследованиями, которые в рамках данной работы не проводились. Можно лишь сказать, что математическое моделирование посредством метода конечных элементов позволяет принципиально оценить возможность осуществления того или иного перехода холодной листовой штамповки для минимизации рисков возникновения дефектов.

### **3.4 Модернизация методик испытаний шаровых шарниров шасси**

Обеспечение герметичности является наиболее важным параметром с точки зрения обеспечения заданного уровня качества шаровых шарниров в эксплуатации при условии, что обеспечиваются их характеристики безопасности. Как было установлено ранее, герметичность шаровых шарниров является комплексным показателем, зависящим от сочетания множества факторов. Проверка герметичности продукции на различных стадиях проектирования

сводится, как правило, к нескольким коротким тестам (длительность менее 8 часов) и нескольким длинным тестам (длительность 8 часов и более) [53]. Короткие тесты позволяют выявить ошибки проектирования за небольшой промежуток времени и без значительных затрат на эксперимент, однако полное соответствие продукции критериям положительного результата не дает гарантии безотказной эксплуатации шарниров, в особенности в сложных дорожно-климатических условиях Российской Федерации. Длительные тесты с этой точки зрения позволяют с большей вероятностью судить о соответствии продукта заданному уровню качества в случае их успешного прохождения. Однако, большинство спецификаций заказчиков OEM-уровня, и как следствие, требований к герметичности, были разработаны европейскими или американскими компаниями для европейских и американских дорожно-климатических условий. Поэтому иногда при полном соответствии продукции заданным требованиям возникают серьезные проблемы в эксплуатации в сложных дорожно-климатических условиях.

В целом можно выделить два основных теста для комплексной оценки герметичности, а именно «SBFT» (Sealing below function test) и «EST» (Environmental sealing test). Методика проведения «SBFT» подразумевает полное погружение шарниров в жидкость и осуществление качания и вращения пальца относительно корпуса по режимам, указанным в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Стандартные режимы «SBFT»

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

Методика «EST» подразумевает проведение испытания в несколько циклов, при которых шарнир подвергается различным воздействиям, моделирующим реальную эксплуатацию:

1. Первый цикл состоит из качания и вращения пальца относительно корпуса при температуре  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  без воздействия внешней среды на уплотнительную систему. Длительность цикла составляет 23 часа.

2. Второй цикл состоит из качания и вращения пальца относительно корпуса при различных температурах, а именно:  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Также при температуре  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$  осуществляется полив уплотнительной системы шарниров водой под давлением 1 атм. Длительность цикла составляет 1 час.

3. Третий цикл является наиболее длительным и сочетает в себе комбинацию из качания и вращения пальца относительно корпуса, изменяющейся температуры и влажности, а также полива образцов (1 час при комнатной температуре и 1 час при заданной отрицательной температуре ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в течение 24-часового цикла) специальной смесью «Turkish grit» (суспензия, твердые

частицы которой состоят из оксидов алюминия, кремния, железа и других с размером частиц не более 0,2 мкм). Длительность цикла составляет 320 часов.

После осуществления трех циклов 4 из 6 испытываемых образцов передаются для анализа, 2 оставшихся подвергаются четвертому циклу испытания, который заключается в воздействии на уплотнительную систему шарнира струи воды под давлением 10 атм. После этого данные шарниры также передаются для анализа.

Для «SBFT» и для «EST» установлены аналогичные критерии положительного результата, а именно:

- отсутствие трещин и расслоений на защитном чехле;
- износ защитного чехла в различных зонах не более заданного значения;
- отсутствие выпуклостей смазки из-под чехла;
- отсутствие коррозии пальца шарового в области контакта с защитным чехлом;
- отсутствие свободной воды во внутреннем объеме шарнира;
- прирост содержания воды в смазке внутри шарнира и под чехлом не более 0,6 % (определяется титрованием по методу Карла-Фишера).

Данные методики предназначены для проведения испытаний всех шаровых шарниров шасси (шаровых шарниров подвески, рулевого управления и стоек стабилизатора). Однако использование этих методик для испытаний шарниров, подвергающихся эксплуатации в сложных дорожно-климатических условиях Российской Федерации показало необходимость их совершенствования. Они были применены для испытания шарниров стоек стабилизатора легковых автомобилей и были получены удовлетворительные результаты. Однако, при последующей эксплуатации в условиях Российской Федерации уровень дефектности в поставках составлял 131 дефект на тысячу автомобилей в течение трехлетнего периода, что не соответствовало установленным целевым показателям качества.

Исходя из этого было принято решение о доработке конструкции и ее валидации посредством проведения испытаний по модернизированным

режимам. Доработка методик проводилась с учетом условий эксплуатации шаровых шарниров. В результате были усовершенствованы обе методики комплексных испытаний на герметичность [127, 128].

Модернизированы следующие режимы испытаний:

1. Температура для «SBFT» при отрицательной температуре понижена до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а для третьего цикла «EST» минимальная температура понижена до  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 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. Для «SBFT» увеличена частота вращения пальца для стоек стабилизатора и частота качания пальца для шаровых шарниров передней подвески и рулевых наконечников при обеих температурах. Как следствие наблюдается рост динамического модуля упругости резины и сокращается время на релаксацию резины чехла и возврат его формы к начальному положению [129]. 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.

Модернизированная методика «SBFT» представлена в таблице 3.3. Зеленым цветом выделены предложенные изменения.

Таблица 3.3 – Модернизированная методика «SBFT»

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

\* – для шаровых шарниров передней подвески и рулевых наконечников

\*\* – для шарниров стоек стабилизатора

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

Для оценки точности и надежности проведенного опыта воспользуемся числовыми значениями прироста содержания воды в смазке. Для испытанных шарниров стоек стабилизатора по обновленной методике для 6 образцов значения прироста содержания воды в смазке приведен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Прирост содержания воды в смазке для шарниров стоек стабилизатора

№ образца	1	2	3	4	5	6
Прирост содержания воды в смазке, %	0,103	0,137	0,141	0,146	0,138	0,065

Необходимый объем выборки для статистической оценки определяется по формуле [130]

$$n_{min} \geq \left( \frac{\sigma t}{\bar{a} \cdot k_T} \right)^2, \quad (3.7)$$

где  $\bar{a}$  – среднее арифметическое;

$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение значений результатов испытаний;

$k_T$  -требуемая точность измерений в относительных единицах;

$t$  – критерий Стьюдента, выбираемый в зависимости от числа проведенных опытов или числа степеней свободы и заданной доверительной вероятности.

Для значений, указанных в таблице 3.4 минимальное число опытов составляет 1, то подтверждает репрезентативность выборки из 6 образцов и соответствует требованиям спецификаций заказчиков OEM-уровня.

По результатам испытаний была изменена конструкция шарового шарнира стойки стабилизатора и согласован запуск измененной продукции. По результатам 3-летней эксплуатации выявлено снижение уровня дефектности на 130,6 единиц до 0,4 дефекта на тысячу автомобилей, что соответствует целям по качеству. В таблице 3.5 представлены сравнительные результаты применения стандартной и модернизированной методики.

Таблица 3.5 – Сравнительные результаты применения стандартной и модернизированной методик испытаний

Тип методики испытания  Тип испытываемой конструкции	Стандартная методика	Модернизированная методика
Старая конструкция	Требование выполнено (высокая дефектность в эксплуатации)	Требование НЕ выполнено
Модернизированная конструкция	Требование выполнено	Требование выполнено (низкая дефектность в эксплуатации)

### 3.5 Выводы по главе 3

1. Разработана конструкция шарового шарнира с уплотнительной системой на основе предложенной классификации и применении алгоритма выбора регламентируемых показателей шарового шарнира. Стратегия проектирования разработанной конструкции выбрана таким образом, чтобы обеспечить максимальную защиту шарового шарнира от проникновения влаги, абразивов и иных продуктов внешней среды.

2. Разработана конструкция отсекающего элемента из нержавеющей стали. Данный элемент конструкции позволяет обеспечить защиту верхней горловины от попадания в сопряжение «чехол–ответная деталь» абразивных частиц и минимизировать риск преждевременного износа защитного чехла и выхода из строя уплотнительной системы и всего шарнира.

3. Разработана технология производства отсекаателя из нержавеющей стали, заключающаяся в комбинации операций холодной листовой штамповки втулки и раскатки бурта, позволяющая снизить риск нарушения сплошности на 11,4 %.

4. Проведена модернизация методики испытания на герметичность шаровых шарниров шасси посредством увеличения частот качания и вращения и снижения отрицательной температуры. По результатам 3-летней эксплуатации выявлено снижение уровня дефектности до 0,4 единиц продукции на тысячу автомобилей для шарниров стоек стабилизатора, что соответствует заданным целям по качеству.

5. Разработаны методические инструкции по проектированию уплотнительной системы шаровых шарниров с отсекаателем (см. Приложение 1).

## ГЛАВА 4 ПОСТАНОВКА НА ПРОИЗВОДСТВО ПРОДУКЦИИ С ЗАДАННЫМ УРОВНЕМ КАЧЕСТВА

### 4.1 Синтез функционально-ориентированной технологии производства шаровых шарниров шасси

Применение подхода проектирования технологического процесса, основанного на методе проектирования функционально-ориентированных технологий 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, 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 [53, 58, 60, 75]. В связи с этим предлагается модернизированная схема синтеза ФОТ с учетом этих аспектов, представленная на рисунке 4.1. Двойной линией на рисунке указана предлагаемая модернизация. Прямоугольник в центре «Синтез ФОТ» соответствует схеме, представленной на рисунке 1.2. Под разработкой конструкции и постановкой продукции на производство подразумевается сложный последовательный процесс, реализуемый согласно ANPQR, APQR или другим процедурам. С целью упрощения в предлагаемой схеме выделены лишь основные этапы данного процесса.

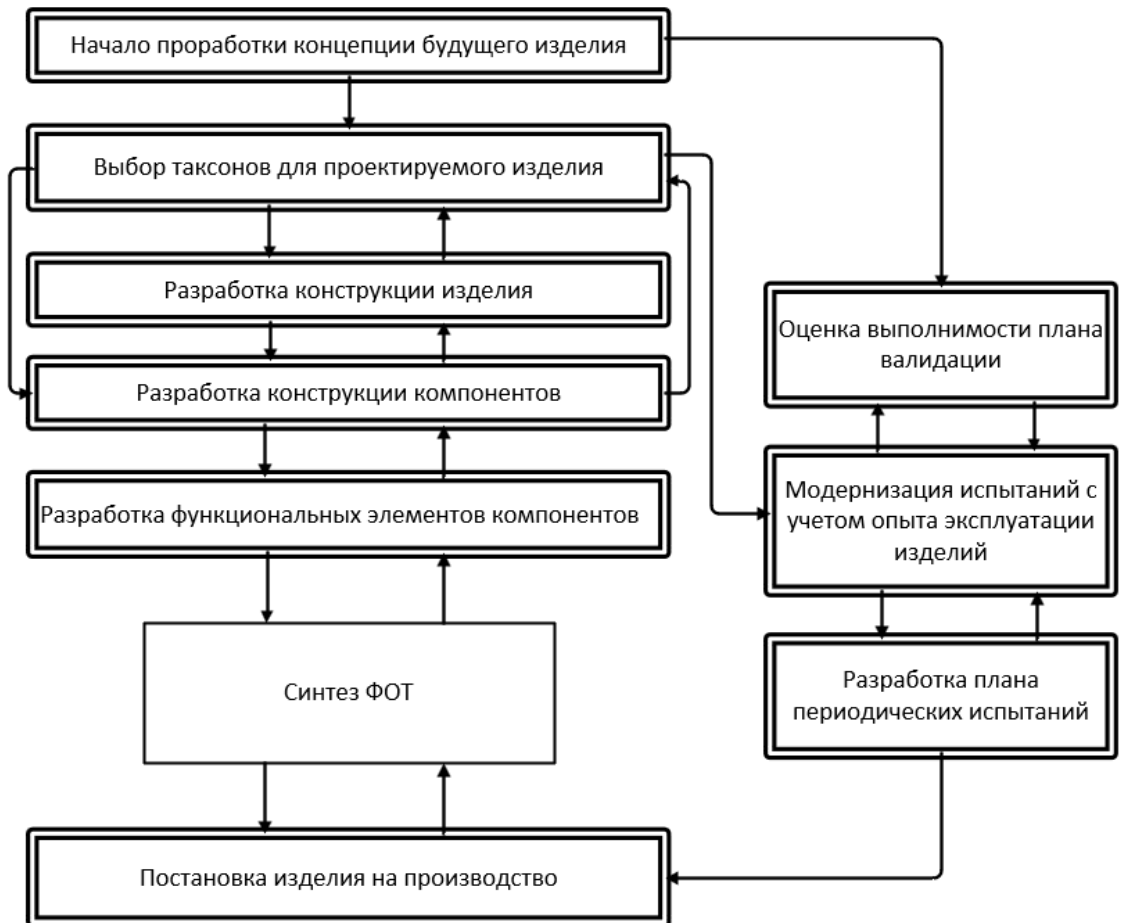


Рисунок 4.1 – Модернизированная схема синтеза ФОТ  
(двойной линией показана предлагаемая модернизация)

## 4.2 Технология производства шарового пальца

Как было отмечено ранее, с целью сохранения стабильного положения отсекаателя на пальце после напрессовки на шаровой палец был задан диапазон шероховатости конусного участка Ra 8,0-12,0. Токарная обработка стержня пальца из холодновысаженной заготовки осуществляется на токарном станке с ЧПУ (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Станок с ЧПУ для обработки контура пальца

С целью получения заданного диапазона шероховатости после операции нанесения покрытия опытным путем определены следующие режимы резания, указанные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Режимы резания контура шарового пальца

Частота вращения заготовки, об/мин	700
Подача инструмента, мм/об	0,4
Количество проходов	2
Глубина резания чистового прохода, мм	0,6

После осуществления токарной обработки производится измерение шероховатости конического участка на профилометре завода Протон марки 130. Внешний вид данного профилометра представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Профилометр Протон модели 130

В процессе производства регламентирован контроль одной детали в начале и в конце смены, а также после каждой смены рабочего инструмента. Выбранная периодичность контроля позволяет оценивать воспроизводимость измеряемых параметров. После токарной обработки контура следует операция нанесения покрытия. После нанесения покрытия также проверяется шероховатость конусного участка в количестве 3 деталей из партии, при объеме партии 501–1200 штук. Внешний вид конусного участка пальца шарового с заданным диапазоном шероховатости после токарной обработки контура и нанесения покрытия представлен на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Внешний вид конусного участка пальца шарового после токарной обработки контура и нанесения покрытия

Для осуществления стабильного процесса производства разработан пакет технологической документации, учитывающий конструктивные особенности шарового пальца.

### 4.3 Процесс производства отсекателя

Как было определено ранее в п. 3.3 для производства отсекателя выбран комбинированный технологический процесс штамповки и раскатки. Сначала осуществляется размотка ленты из рулона на специальном устройстве с шаговым двигателем. Штамповка отсекателя осуществляется в 5 переходов на одно- или двухручьевом многопозиционном штампе, который установлен в кривошипный пресс марки КД2128 с максимальным усилием 63 тонны. Внешний вид пресса и рабочей зоны представлен на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Внешний вид пресса и рабочей зоны штампа

Сам пресс также оснащен подающим устройством, позволяющим синхронизировать такт работы пресса и подачи ленты в рабочую зону. Для

обеспечения стабильности процесса, снижения нагрузки на деформирующий инструмент и более равномерного деформирования втулки отсекателя на рабочую зону стальной ленты подается масло. В процессе штамповки контролируются диаметры и высота отсекателя, а также визуально осуществляется контроль отсутствия поверхностных дефектов, таких как забоины, складки, заусенцы, замятия и порывы. После штамповки партия колец-отсекателей подвергается приемо-сдаточному контролю со стороны ОТК (отдел технического контроля) и в случае положительных результатов оценки внешнего вида и измерений основных параметров передается на следующую операцию. Данной операцией является раскатка бурта отсекателя. Процесс раскатки осуществляется в следующем порядке:

1. Установка заготовки отсекателя на основание узла подачи и зажима заготовки.

2. Раскатка в автоматическом режиме, которая включает в себя перемещение корпуса раскатника с одновременным вращением ролика вокруг оси раскатника. Ось ролика расположена под углом к оси раскатника.

3. Снятие отсекателя и перенос в тару.

Процесс раскатки осуществляется на специально спроектированном станке. Внешний вид станка для раскатки бурта отсекателя представлен на рисунке 4.6. После осуществления процесса раскатки контролируются диаметры и высота отсекателя, а также визуально оценивается наличие поверхностных дефектов.

В результате внедрения операции раскатки бурта вместо его штамповки выход годной продукции составил 96,1 % по сравнению с 85,3 % для процесса штамповки бурта.

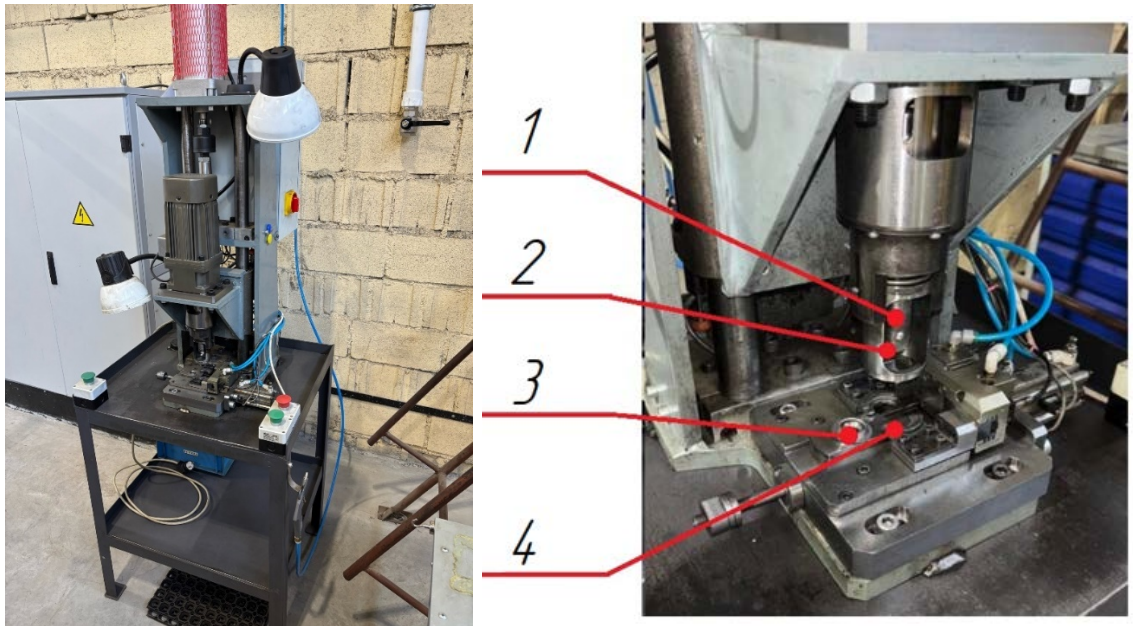


Рисунок 4.6 – Внешний вид станка для раскатки отсекаателя: 1 – корпус раскатника; 2 – ролик; 3 – отсекаатель; 4 – опорные губки

#### 4.4 Разработка процесса сборки шарового шарнира шасси с уплотнительной системой

Окончательным этапом технологии производства шарового шарнира является его сборка с уплотнительной системой. Однако перед этим необходимо собрать чехол защитный с отсекаателем. Такая сборка осуществляется вручную на специальном столе, который позволяет соосно расположить отсекаатель и чехол и объединить в сборочную единицу без нарушения сплошности чехла и значительных усилий. Также необходимо равномерно нанести смазку в сопряжение между верхней горловиной чехла и отсекаателем. Схема сборки отсекаателя с чехлом представлена на рисунке 4.7.

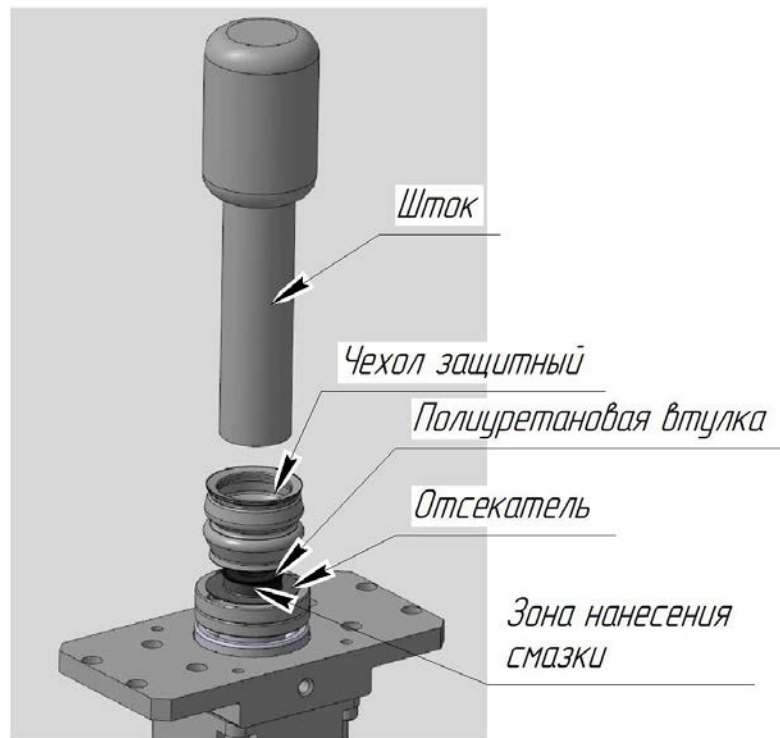


Рисунок 4.7 – Схема сборки чехла защитного с отсекателем

После этого полученная сборка передается на следующую операцию технологического процесса, а именно сборку шарнира с уплотнительной системой. Данный процесс состоит из следующих операций:

1. Нанесение смазки внутрь шарнира.
2. Ручная подсборка шарового шарнира с уплотнительной системой. Основным итогом этой операции является совмещение в осевом направлении нижней горловины и проточки корпуса.
3. Закрепление чехла защитного пружинным кольцом.
4. Установка полуфабриката в приспособление для напрессовки отсекателя, которое представляет собой опорную плиту и шток, приводимый в движение пневмоцилиндром с контролируемым максимальным давлением и поддержкой.
5. Напрессовка отсекателя на шаровой палец.

После осуществления вышеописанных операций готовое изделие передается на участок упаковки, где его собирают с защитным колпаком и упаковывают в согласованную с заказчиком тару для последующей отгрузки.

#### 4.5 Моделирование условий эксплуатации шаровых шарниров шасси

Окончательным этапом, предшествующим серийному запуску в производство, а также интегрированным в технологический процесс как один из методов контроля качества [131, 132], является проведение испытаний на проверку герметичности шарового шарнира в сборе с уплотнительной системой. В согласованном с заказчиком чертеже указано длительное испытание на герметичность при погружении в жидкую среду и относительном перемещении пальца. Данное испытание является аналогом «SBFT», модернизация которого описана в п. 3.4. Режимы проведения испытания приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Режимы испытания шаровых шарниров передней подвески LADA Largus на герметичность при погружении в жидкую среду и относительном перемещении пальца

	Параметр	Погружение в воду	Погружение в раствор этиленгликоля
	Температура жидкой среды, °С	+23±1	-20±1
Качание	Угол качания пальца, град.	±25	±25
	Частота качания, Гц	2	2
	Количество циклов качания	200 000	50 000
Вращение	Угол вращения пальца, град.	±41	±41
	Частота вращения, Гц	0,4	0,4
	Количество циклов вращения	40 000	10 000

Данное испытание проводится на специальном стенде, который позволяет осуществлять качание и вращение пальца шарового в корпусе с одновременным изменением температуры, влажности и условий полива или полного погружения шарниров в жидкость во время проведения испытания. Общий вид

стенда для комплексного испытания герметичности представлен на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 – Стенд для климатических испытаний шаровых шарниров шасси

Помимо описанных выше режимов испытания, необходимо также применять оригинальные ответные детали. В случае, если это невозможно, необходимо применять такие ответные детали, у которых геометрия, свойства, а также шероховатость сопрягаемых с компонентами шарнира поверхностей были идентичны оригинальным ответным деталям.

На рисунке 4.9 представлена схема установки шаровых шарниров передней подвески автомобиля LADA Largus в оснастке испытательного оборудования.



Рисунок 4.9 – Шаровые шарниры передней подвески автомобиля LADA Largus, установленные в испытательный стенд: а – рабочее положение образцов в камере; б – внешний вид оснастки для осуществления движений

В соответствии с методикой проведения испытаний были отобраны образцы, изготовленные на серийной технологической оснастке в условиях установившегося производства. Все изделия принадлежали к одной партии и успешно прошли предусмотренные стадии операционного и приемочного контроля. Результаты испытаний приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – 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
Прирост содержания воды в смазке $\leq 0,6\%$	0,009...0,175 %	0,003...0,123 %

Критерии положительного результата выполнены в полном объеме, что свидетельствует о полном соответствии продукции требованиям КД. По результатам однолетней эксплуатации уровень качества в эксплуатации составляет 0,91 дефекта на тысячу автомобилей, а также 0 ppm в процессе поставок, что соответствует заданным целям по качеству (3MIS=0, 12MIS=1, 24MIS=2, 36MIS=5). Экономический эффект от внедрения предложенных в работе решений составил 14,28 млн рублей (в ценах 2025 года).

Внедрение результатов диссертационной работы на АО НПО «БелМаг» подтверждено соответствующим Актом (см. Приложение 2). Теоретические и практические результаты используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» при подготовке студентов по направлениям 27.03.01 – Стандартизация и метрология (бакалавриат), 27.04.01 – Стандартизация и метрология (магистратура) и при подготовке кадров высшей квалификации по научной специальности

2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (см. Приложение 3).

#### 4.6 Выводы по главе 4

1. Методика создания функционально-ориентированных технологий предложена для деталей машин и не учитывает особенности проектирования сборочных единиц, эксплуатирующихся в сложных дорожно-климатических условиях РФ. Исходя из этого предложена усовершенствованная методика проектирования ФОТ на основе проведенного системного анализа шарового шарнира шасси. Это позволило спроектировать новую конструкцию шарового шарнира, а также технологию его производства и отдельных, входящих в его состав, компонентов. Экономический эффект от внедрения предложенных в работе решений составил 14,28 млн. руб. (в ценах 2025 года).

2. Разработана и внедрена технология механической обработки контура шарового пальца, в частности определены режимы резания конического участка для напрессовки отсекателя. Полученные режимы позволяют обеспечить шероховатость данного участка в диапазоне Ra 8,0-12,0 с параметрами стабильности и воспроизводимости процесса  $C_p = 1,07$ ,  $C_{pk} = 1,09$ .

3. Внедрен процесс производства отсекателя, состоящий из операций штамповки втулки и раскатки бурта, осуществляемом на вновь спроектированном и собранном оборудовании. Выпуск годной продукции увеличен до 96,1 % по сравнению с 85,3 % для процесса штамповки бурта.

4. Разработан и внедрен процесс сборки компонентов уплотнительной системы и шарнира с уплотнительной системой.

5. Проведены испытания на герметичность шаровых шарниров передней подвески автомобиля LADA Largus по модернизированной методике, и получены положительные результаты, что подтверждается положительным опытом реальной эксплуатации и соответствием заданным целям по качеству (3MIS=0, 12MIS=1, 24MIS=2, 36MIS=5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 отсекаателя, 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 отсекаателя 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).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азгальдов, Г. Г. Квалиметрия – наука об измерении качества продукции / Г. Г. Азгальдов, А. В. Гличев, Э. П. Райхман // Стандарты и качество. – 1968. – № 1. – С. 34-40.
2. Рубин, Г. Ш. Развитие научных основ стандартизации / Г. Ш. Рубин, М. А. Полякова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2014. – № 1 (45). – С. 97-101.
3. Гун, Г. С. Теория качества металлопродукции (научный обзор) / Г. С. Гун // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 4 (65). – С. 14-19.
4. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Г. С. Гун, И. Ю. Мезин, Г. Ш. Рубин, М.А. Минаев, А.Б. Назайбеков, Х. Дыя // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2014. – № 1 (45). – С. 92-96.
5. Гун, Г. С. Метод комплексной оценки качества металлопродукции // Известия вузов. Черная металлургия. – 1982. – №8. – С. 62-66.
6. Голубчик, Э. М. Развитие адаптивных принципов управления качеством металлопродукции / Э. М. Голубчик, М. А. Полякова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2024. – Т. 22. – № 2. – С. 145–152.
7. Современные подходы к адаптивному управлению качеством металлопродукции / Э. М. Голубчик, М. А. Полякова, Г. С. Гун, Г. Ш. Рубин // Производство проката. — 2019. — № 5. — С. 23-29.
8. Адаптивные подходы к конструированию технологических процессов и управлению качеством металлопродукции / М. В. Чукин, Э. М. Голубчик, А. Г. Корчунов, М.А. Полякова, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, Д.Г. Емалеева, А.Е. Гулин, Д.В. Константинов, А.С. Кузнецова. — М.: Питер, 2016. — 463 с.

9. Пивоварова, К. Г. Управление качеством метизной продукции на основе робастного параметрического проектирования / К. Г. Пивоварова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2021. – № 3. – С. 84-89.

10. Использование методов робастного проектирования при определении режимов механотермической обработки высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал / К. Г. Пивоварова, А. Г. Корчунов, Д. П. Канаев, А. Ю. Столяров // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2024. – № 2 (23). – С. 29-40.

11. Оптимизация технологических параметров производства калиброванного проката с использованием методологии робастного проектирования / К. Г. Пивоварова, Л. М. Тухветова, В. М. Тагирова, Н. С. Ясюкевич // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – № 5. – С. 224-228.

12. Гун, И. Г. Проведение испытаний шаровых шарниров передней подвески легковых автомобилей с целью определения эксплуатационного ресурса / И. Г. Гун, И. А. Михайловский, В. В. Лапчинский // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. докл. шестой рос. науч.-техн. конф. – Оренбург, 2003. – С. 75-78.

13. Совершенствование режимов планетарной обкатки головок шаровых пальцев на основе анализа микро топографии поверхности с целью повышения качества изделий / И. А. Михайловский, В. В. Сальников, Д. С. Осипов, И. Г. Гун // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – № 2-2 (30). – С. 10-13.

14. Калмыков, Ю. В. Параметры оптимизации процесса изготовления шаровых шарниров методом запрессовки / Ю. В. Калмыков, И. А. Михайловский // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2010. – Т. 1. – № 68. – С. 76-80.

15. Yoshikawa, T. Applying functional cost analysis in a manufacturing environment / T. Yoshikawa, J. Innes, F. Mitchell // International Journal of Production Economics. – 1994. – № 36 (1). – P. 53-64. DOI:10.1016/0925-5273(94)90148-1

16. Рубин, Г. Ш. Функционально-целевой анализ качества изделий / Г. Ш. Рубин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2011. – № 2 (34). – С. 29–30.
17. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Volume. 8. Iss. 3. – P. 338-353. DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X
18. Sekhari, A. A quality management system based on fuzzy quality pointers in ISO 9000 / A. Sekhari, M. Savino // Int. J. of Product Development. — 2009. – № 4. – P. 419-430. DOI:10.1504/IJPD.2009.025255
19. Толмачев, С. Г. Принятие проектных решений на основе нечеткого отношения предпочтения / С. Г. Толмачев // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 5. – С. 34-39.
20. Столбов, В. Ю. Управление процессом формирования качества продукции промышленного предприятия / В. Ю. Столбов, М. Б. Гитман, С. А. Федосеев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2016. – № 3. – С. 79-98.
21. Siwiec, D. Fuzzy Multi-criteria Decision Model to Support Product Quality Improvement / D. Siwiec, R. Gawlik, A. Pacana // Management and Production Engineering Review. – 2023. – №14 (2). – P. 134-149. DOI:10.24425/mper.2023.146030
22. Yaqiong, L. Fuzzy theory applied in quality management of distributed manufacturing system: A literature review and classification / L. Yaqiong, L. Ka Man, W. Zhang // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2011. – № 2. – P. 266-277. DOI:10.1016/j.engappai.2010.10.008
23. Крюкова, Е. С. Элементы вычисления нечетких отношений предпочтения и сравнения альтернатив в приложении к задачам синтеза системы показателей качества реализации поисковых запросов пользователей дата-центров и электронных библиотек / Е. С. Крюкова, И. Б. Парашук, Л. А. Саяркин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2024. – № 1. – С. 9-16.

24. Корчунов, А. Г. Математические модели управления показателями качества продукции в технологических процессах обработки / А. Г. Корчунов // *Качество в обработке материалов*. – 2015. – № 1 (3). – С. 62-67.
25. Пивоварова, К. Г. Методология управления показателями качества метизной продукции с элементами робастного проектирования / К. Г. Пивоварова, А. Г. Корчунов // *Черные металлы*. – 2020. – № 12. – С. 38-43.
26. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства / А. Г. Корчунов, М. В. Чукин, Г. С. Гун, М. А. Полякова. – М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2012. – 164 с.
27. Korchunov, A. Methodology of developing mathematical models with fuzzy logic elements for quality indices control / A. Korchunov, M. Chukin, A. Lysenin // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – № 436. – P. 374-381. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.436.374
28. Kuznetsov, A. P. Development of a classification and generation approach for innovative technologies / A. P. Kuznetsov, H. J. Koriath // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – № 21. – P. 798-805. DOI:10.1016/j.promfg.2018.02.186
29. De Vries, M. J. Technological Processes / M. J. de Vries // *Teaching about Technology. Contemporary Issues in Technology Education*. – Springer, Cham, 2016. – 145 p. DOI:10.1007/978-3-319-32945-1
30. Суслов, А. Г. Проектирование функционально ориентированных технологических процессов / А. Г. Суслов, О. Н. Федонин, Д. М. Медведев // *Вестник машиностроения*. – 2019. – № 9. – С. 66-71.
31. Пичко, А. П. Технологические особенности синтеза структуры процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными покрытиями / А. П. Пичко, Д. А. Михайлов, А. Н. Михайлов // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. – 2019. – № 4 (67). – С. 56–71.
32. Недашковский, А. П. Анализ и синтез технологических процессов обработки лопаток ГТД на основе функционально-ориентированного подхода

/ А. П. Недашковский, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов // Прогрессивные системы и технологии машиностроения. – 2009. – № 1 (37). – С. 159-167.

33. Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – № 1 (103). – С. 40-48.

34. Синтез схем технологического воздействия для функционально-ориентированных технологических процессов производства зубчатых колес / А. М. Лахин, А. Н. Михайлов, С. Зантур, А. С. Тарафа // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2009. – № 2 (38). – С. 127-132.

35. Function-oriented design: A novel strategy for advanced biomedical materials / Zhiyu Zhou [et al.] // Journal of Materials Science & Technology. – 2023. – № 145. – P. 197-209. DOI:10.1016/j.jmst.2022.09.066

36. Williams, B. Ball joint service and inspection / B. Williams // Brake & Front End. – 2003. – № 3. – P. 137-142.

37. Тебекин, М. Д. Повышение эффективности определения технического состояния шаровых шарниров подвески легкового автомобиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. Д. Тебекин; Орел, 2015. – 21 с.

38. Анализ видов повреждений шаровых шарниров / С. Ю. Радченко, А. Н. Новиков, А. А. Катунин, М. Д. Тебекин // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – № 1 (36). – С. 8-14.

39. Гун, И. Г. Совершенствование технологической системы изготовления шаровых шарниров / И. Г. Гун. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 360 с.

40. Ахмадимов, Р. М. Новый подход в конструировании шарового шарнира подвески автомобиля / Р. М. Ахмадимов, Н. М. Филькин // Современные научно-технические технологии. – 2009. – № 4. – С. 70-71.

41. Ossa, E. A. Failure analysis of a car suspension system ball joint / E. A. Ossa, C. C. Palacio, M. Paniagua // *Engineering Failure Analysis*. – 2011. – № 5. – P. 1388-1394. DOI:10.1016/j.engfailanal.2011.03.013
42. Модель и метод комплексной стандартизации сложных технических систем / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Е. М. Богоева, А.А Веселко, С.Ю. Сысуев // *Журнал технических исследований*. – 2022. – Т. 8, № 2. – С. 20-29.
43. Безруков, А. И. Использование математических методов для оценки качества классификации объектов стандартизации / А. И. Безруков, М. А. Жилина, А. М. Кац // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2011. – Т. 3. – №1 (57). – С. 182-188.
44. Безруков, А. И. Использование математических методов для систематизации классификаций объектов стандартизации / А. И. Безруков, В. Н. Гусятников, М. А. Жилина // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – Т. 4. – №1 (73). – С. 151-155.
45. Ştefan, R. M. A Comparison of Data Classification Methods / R. M. Ştefan // *Procedia Econ. Financ.* – 2012. – Volume 3. № 12. – P. 420-425. DOI:10.1016/S2212-5671(12)00174-8
46. Люнченко, С. Применение методов кластеризации для управления запасами товарно-материальных ценностей / С. Люнченко // *Евразийский союз ученых*. – 2020. – № 4-4 (73). – С. 29-37.
47. Clustering of territorial objects in the management of their sustainable development / D. Rodionov, D. Alferyev, Yu. Klimova, K. S. Alpysbayev // *Sustainable Development and Engineering Economics*. – 2021. – № 1 (1). – P. 114-138. DOI:10.48554/SDEE.2021.1.7
48. Мирзабекова, М. Ю. Роль финансового анализа в управлении предприятием / М. Ю. Мирзабекова // *Экономика и бизнес: теория и практика*. – 2018. – № 10-2. – С. 44-47.
49. Лapidус, В. А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях / В. А. Лapidус. – М.: ОАО «Типография «НОВОСТИ», 2000. – 432 с.

50. Dean, Jr. J. W. Management theory and total quality: Improving research and practice through theory development / J. W. Dean Jr., D. E. Bowen // *Academy of Management Review*. – 1994. – Volume 19. № 3. – P. 392-418. DOI:10.2307/258933

51. Zineldin, Mosad. Total relationship management (TRM) and total quality management (TQM) / Mosad Zineldin // *Managerial Auditing Journal*. – 2000. – Volume 15. № 1-2. – P. 20-28. DOI:10.1108/02686900010304399

52. Вышлов, В. А. От всеобщего управления качеством продукции к всеобщему управлению по критериям качества / В. А. Вышлов // *Философия в XXI веке: социально-философские проблемы современной науки и техники: материалы I Междунар. науч.-практ. конф.* – Красноярск, 2023. – С. 160-163.

53. Вахитов, А. Р. Обеспечение заданного уровня качества рулевых наконечников автомобиля путем совершенствования процесса проектирования на основе методов стандартизации: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Р. Вахитов; Магнитогорск. гос. тех. ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2021. – 19 с.

54. Раймпель, Й. Шасси автомобиля: Рулевое управление / Й. Раймпель; пер. с нем. В. Н. Пальянова; под ред. А. А. Гальбрейха. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.

55. Sin, B. U. Process Design of a Ball Joint, Considering Caulking and Pull-Out Strength / B. U. Sin, K. H. Lee // *The Scientific World Journal*. – 2014. – № 1. – P. 1-10. DOI:10.1155/2014/971679

56. Design Optimization of Stabilizer Bar Link Used In Sedan Vehicles / E. M. Farhan, S. Sankar, T. Thomas, V. K. Deepak // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. – 2019. – Volume 8. Iss. 5. – P. 5597-5603. DOI: 10.15680/IJIRSET.2019.0805085

57. Гильфанов, А. А. Признаки и причины износа шаровых соединений автомобилей / А. А. Гильфанов // *Развитие АПК и сельских территорий в условиях модернизации экономики: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф.* – Казань, 2023. – С. 94-99.

58. Разработка, моделирование и совершенствование процессов производства шаровых шарниров автомобилей / И. Г. Гун, И. А. Михайловский, Д. С. Осипов, В.И. Куцепендик, В.В. Сальников, Е.И. Гун, А.В. Смирнов, А.В. Смирнов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2014. – № 1 (45). – С. 52-57.

59. Design of a tribological ball joint tester / S. Raes, T. Devreese, J. De Pauw, P. De Baets // International Journal of Sustainable Construction and Design. – 2015. – № 6 (1). – P. 121-126. DOI:10.21825/scad.v6i1.1137

60. Rutci, A. Investigation of suspension ball joint pull out force based on FEA method and experimental study / A. Rutci, F. S. Eren // International symposium on innovate technologies in engineering and science. – Alanya, 2018. – P. 1002-1010. DOI:10.33793/acperpro.01.01.165

61. Geren, Necdet. Parametric design of automotive ball joint based on variable design methodology using knowledge and feature-based computer assisted 3D modelling / Necdet Geren, Osman Oktay Akçalı, Melih Bayramoğlu // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2017. – № 66. – P. 87-103. DOI:10.1016/j.engappai.2017.08.011

62. Применение метода анализа видов, причин и последствий потенциальных несоответствий (FMEA) на различных этапах жизненного цикла автомобильной продукции / В. Е. Годлевский, А. Я. Дмитриев, Г. Н. Изюменко [и др.]. – М.: ГП «Перспектива», 2002. – 160 с.

63. Афанасьева, О. В. Анализ качества и причин отказов дизелей на основе метода DFMEA / О. В. Афанасьева, В. А. Носова // Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности, на транспорте и в логистике: сб. тр. XXII Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2022. – С. 80-87.

64. Пат. 2021104546 РФ, МПК В60G 21/02 (2006.01) F16C 11/06 (2006.01). Стойка стабили-затора 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.

65. Пат. 41099 РФ, МПК F16C 11/06. Комбинированный чехол шарового шарнира / Недиков В.П. Заявл. 05.05.2004; опубл. 10.10.2004. Бюл. №2.
66. United States Patent 7192214 – Sealing Bellows With Snap-On Connection.
67. Canadian Patent 2967428 – Locking boot for ball joint.
68. Гун, И. Г. Совершенствование процессов деформирования в технологической системе "сталь-прокат-изделия-узлы" с целью обеспечения конкурентоспособности шаровых шарниров: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И.Г. Гун; Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2000. – 48 с.
69. Осипов, Д. С. Обеспечение заданного уровня качества штампованных шаровых пальцев на основе повышения результативности сквозной технологии и системы менеджмента качества: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Д.С. Осипов. – Магнитогорск, 2004. – 19 с.
70. Сальников, В. В. Разработка и выбор сквозной технологии производства шаровых пальцев на основе комплексной оценки эффективности процессов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В.В. Сальников. – Магнитогорск, 2006. – 20 с.
71. Михайловский, И. А. Повышение результативности производства шаровых шарниров на основе регламентации комплекса требований к качеству изделий и материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И.А. Михайловский. – Магнитогорск, 2011. – 44 с.
72. Илья Шельменкин. Тест шаровых опор: испытываем на прочность и стойкость к морозам и коррозии 22 образца [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dvizhok.su/parts/test-sharovyix-opor-ispyityivaem-na-prochnost-i-stojkost-k-morozam-i-korrozii-22-obrazcza>, свободный. – (дата обращения 19.11.2025).
73. Никишев Вадим. Самые выдающиеся автомобили на платформе В0 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.zr.ru/content/articles/902263-renault-nissan-i-lada-na-plat/>, свободный. – (дата обращения 19.11.2025).

74. Heiβing Bernd. Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. / Heiβing Bernd, Ersoy Metin – 1st Edition, 2011. – 591 p.
75. 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.
76. 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.
77. Азгальдов, Г. Г. Построение дерева показателей свойств объекта / Г. Г. Азгальдов // Стандарты и качество. – 1996. – № 11. – С. 97-104.
78. «Дерево свойств» в оценке потребительских критериев сахаристых кондитерских изделий / И. Ю. Резниченко, Н. А. Фролова, Е. Е. Жарская [и др.] // Индустрия питания. – 2021. – № 1. – С. 5-12.
79. Вяцкова, Н. А. Классификация методов анализа и оценки рисков / Н. А. Вяцкова // Актуальные вопросы современной науки. – 2014. – № 33. – С. 103-122.
80. Singh, R. Classification of Steels / R. Singh // Applied Welding Engineering. – 2012. – № 6. – P. 51-56. DOI: 10.1016/C2019-0-03490-5
81. A Detailed Comparison of Various Steel Types — Stainless Steel, Structural Steel and Aluminum Steel / O. A. Adekoya [et al.] // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET). – 2020. – № 7 (6). – P. 103-109. DOI:10.32628/IJSRSET207615
82. Зимин, С. П. Классификация электрических свойств пористого кремния / С. П. Зимин // Физика и техника полупроводников. – 2000. – № 3. – С. 359-363.

83. Смирнов, М. А. К вопросу о классификации микроструктур низкоуглеродистых трубных сталей / М. А. Смирнов, И. Ю. Пышминцев, А. Н. Борякова // *Металлург.* – 2010. – № 7. – С. 45-51.

84. Болотов, В. М. Пищевые красители: классификация, свойства, анализ, применение: натуральные пищевые красители, неорганические (минеральные) пищевые красители, синтетические (искусственные) пищевые красители / В. М. Болотов, А. П. Нечаев, Л. А. Сарафанова. – СПб.: ГИОРД, 2008. – 240 с.

85. Дрягун, Э. П. Использование функционального подхода для выбора классификационных признаков винта самонарезающего / Э. П. Дрягун, М. А. Полякова // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* – 2022. – № 2. – С. 160-170.

86. Сафуанов, А. И. Особенности классификации винтов самонарезающих с учетом потребительских функций / А. И. Сафуанов, М. А. Полякова // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й междунар. науч.-техн. конф.* – Магнитогорск, 2020. – С. 201.

87. Полякова, М. А. Учет потребительских функций при нормировании свойств винтов самонарезающих / М. А. Полякова, Э. П. Дрягун, Э. Р. Сагритдинов // *Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики: сборник статей II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых.* – Екатеринбург, 2020. – С. 12-21.

88. Дрягун, Э. П. К вопросу о применении математических моделей в области практической стандартизации / Э. П. Дрягун, Ю. А. Извеков, М. А. Полякова // *От качества инструментов к инструментам качества: сборник докладов Всерос. науч.-техн. конф.* – Тула, 2023. – С. 63-70.

89. Структурирование свойств металлопродукции на основе функционально-целевого анализа / Г. С. Гун, Г. Ш. Рубин, М. В. Чукин [и др.] // *Производство проката.* – 2015. – № 8. – С. 25-31.

90. Функционально-целевой анализ как метод структурирования свойств и функций металлоизделий / Г. Ш. Рубин, М. В. Чукин, Г. С. Гун, М.

А. Полякова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – № 10. – С. 715-719.

91. Рубин, Г. Ш. Развитие квалиметрии метизного производства на основе методологии функционально-целевого анализа: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Г.Ш. Рубин. – Магнитогорск, 2011. – 31 с.

92. Камалутдинов, И. М. Совершенствование конструкции и технологии производства геофизического кабеля на основе функционально-целевого анализа качества продукции: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И.М. Камалутдинов. – Магнитогорск, 2010. – 20 с.

93. Полякова, М. А. Подходы к структурированию функций крепежных изделий / М. А. Полякова, Ю. В. Данилова // Национальная Ассоциация Ученых. – 2015. – № 3-3 (8). – С. 105-108.

94. Данилова, Ю. В. Разработка проекта стандарта на металлопродукцию на основе количественной оценки степени близости требований потребителя и производителя / Ю. В. Данилова, М. А. Полякова // Металлургия: технологии, инновации, качество. – Новокузнецк, 2015. – С. 239-244.

95. Обеспечение качества и результативности процесса производства высокопрочной стабилизированной арматуры для железобетонных шпал / М. В. Чукин, А. Г. Корчунов, В. Н. Лебедев [и др.] // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – № 3-2 (32). – С. 12-16.

96. Извеков, Ю. А. Оценка качества технологического оборудования машиностроительных производств / Ю. А. Извеков, Т. Г. Никонова // Инновации в машиностроении: сборник трудов IX Междунар. науч.-практ. конф. – Барнаул, 2018. – С. 233-237.

97. Investigation of the unevenness of the linear density of the thread and the choice of individual indicators of the quality of the thread / F. Kazakov, N. N. Sattarova, M. Aslonova, Z. Mukhtorova // Modern Innovations, Systems and Technologies. – 2022. – № 2. – С. 162-168. DOI: 2782-2818-2022-2-2-0162-0168

98. Войтов, А. Г. Техника [Текст] / А. Г. Войтов. – 2-е изд. – М.: Дашков и К, 2001. – 234 с.

99. Смирнов А.В. Разработка инструмента и технологии прессования полимерных вкладышей с наложением ультразвуковых колебаний при производстве стоек стабилизатора автомобилей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.В. Смирнов. – Магнитогорск, 2016. – 22 с.

100. Ашейчик, А. А. Экспериментальное исследование свойств уплотнительных резин при высоких и низких температурах / А. А. Ашейчик, В. Л. Полонский // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – 2016. – № 3. – С. 656-664.

101. Weise, H. P. Behavior of elastomeric seals at low temperature / H. P. Weise, H. Kowalewsky, R. Wenz // 3rd European Vacuum Conf (Evc-3) / 5th Austrian-Hungarian-Yugoslav Joint Vacuum Conf. – Vienna, Austria: Pergamon-Elsevier Science Ltd, 1991. – P. 491-498.

102. Understanding low temperature properties of elastomer seals / M. Jaunich, K. von der Ehe, D. Wolff [et al.] // Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material. – 2011. – № 22 (2). – P. 83-88. DOI:10.1179/1746510911Y.0000000004

103. Каучуки для герметизирующих материалов (обзор) / Е. С. Правада, Я. А. Вахрушева, Д. М. Герасимов, А. М. Чайкун // Труды ВИАМ. – 2022. – № 12 (118). – С. 14-26.

104. Салахов, Ф. Н. Основные показатели и инструменты контроля качества продукции / Ф. Н. Салахов // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2008. – № 13. – С. 77-78.

105. Ширялкин, А. Ф. Стандартизация и техническое регулирование в аспекте качества продукции: учебное пособие / А. Ф. Ширялкин. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 196 с

106. Василькова, Е. А. Стандарт и стандартизация: общие понятия / Е. А. Василькова // Вестник Таганрогского института управления и экономики. – 2019. – № 1(29). – С. 80-86.

107. Волкова, Т. А. Технология разработки и утверждения стандартов организаций / Т. А. Волкова, И. Ю. Захарова // Будущее науки – 2015 : сб. науч. ст. 3-й Междунар. молодеж. науч. конф. : в 2 т. – Курск, 2015. – С. 60-64.

108. 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.

109. Пат. 205156 РФ, МПК 16С 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.

110. Пат. 2440517 РФ, МПК F16С 11/06 (2006.01). Шаровой шарнир / И. Г. Гун, Ю. В. Калмыков, В. И. Артюхин, П.Е. Левченко, Д.А. Пестерев. Заявл. 24.08.2010; опубл. 20.01.2012 . Бюл № 2.

111. Пат. 237781 РФ, МПК F16С 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.

112. Deutsches Patent – und Markemant DE 10 2011 106 830 A1 – Offenlegungsschrift.

113. 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.

114. Sohrabi, M. J. Deformation-induced martensite in austenitic stainless steels: A review / M. J. Sohrabi, M. Naghizadeh, H. Mirzadeh // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2020. – № 20 (4). – P. 1-24. DOI:10.1007/s43452-020-00130-1

115. 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.

116. Optimized number of sheet metal forming operations in automobile components manufacturing / F. A. Stolyarov, I. G. Gun, M. A. Polyakova, I.A. Mikhailovkiy, 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.

117. 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.

118. 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.

119. Cold sheet stamping of automotive parts: analyzing the need for process design upgrade / F. A. Stolyarov, I. G. Gun, M. A. Polyakova [et al.] // Magnitogorsk Rolling Practice 2023: Proceedings of the VII International Youth Scientific and Technical Conference. – Magnitogorsk, 2023. – P. 9-10.

120. 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.

121. Михайловский, И. А. Разработка методики выбора режима технологической операции закатки шаровых шарниров на основе квалитметрической оценки качества процесса / И. А. Михайловский, Е. И. Гун // Металлургия: технологии, инновации, качество. – Новокузнецк, 2015. – С. 107-110.

122. Гун, Е. И. Разработка методики исследования качества металлопродукции с определением ключевой технологической операции на основе

метода анализа иерархий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. И. Гун. – Магнитогорск, 2016. – 22 с.

123. Шаровые шарниры шасси: совершенствование конструкций, технологий, методов оценки качества: монография / И. А. Михайловский, И. Г. Гун, Е. И. Гун, Е. Г. Касаткина. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. – 201 с.

124. Řiháček, J. Possibilities of using the Erichsen test for determination of forming limit diagram and its utilization for hydroforming / J. Řiháček, L. Mrňa, E. Peterková, M. Dvořák // METAL 2017: Intern. Conf. on Metallurgy and Materials. – Brno (CZ), 2017. – P. 286-291.

125. Glasner, T. Considering the edge-crack sensitivity of a hot-rolled steel in forming simulation / T. Glasner [et al.] // Challenges in Forming High-Strength Sheets. – Linz; Bristol, 2016. – P. 1-17. DOI:10.1088/1757-899X/159/1/012029

126. Paul, S. K. Theoretical analysis of strain- and stress-based forming limit diagrams / S. K. Paul // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2013. – P. 177-188. DOI:10.1177/0309324712468524

127. 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.

128. 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.

129. Семенов, В. К. Экспериментальное исследование гистерезисных свойств протекторных резин в условиях циклического нагружения, характерного для автомобильных шин / В. К. Семенов, А. Е. Белкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 2. – С. 9-14.

130. Бойко, А. Ф. Точный метод расчета необходимого количества повторных опытов / А. Ф. Бойко, Е. Ю. Кудеников // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 8. – С. 128-132.

131. Rosato, D. V. Testing, Inspection, and Quality Control / D. V. Rosato, D. V. Rosato, M. G. Rosato // Injection Molding Handbook. – Boston: Springer, 2000. – 1484 p.

132. Пашкова, Н. Н. Испытания электромагнитного привода как основной метод контроля качества / Н. Н. Пашкова, Н. В. Углова // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник научных трудов 9-й Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. – Курск, 2022. – С. 164-166.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Разработанные инструкции по проектированию уплотнительной системы с отсекателем



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
НАУЧНО ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ  
«БЕЛМАГ»

Введена с 16.02.2026

Утверждаю:  
Технический директор  
АО НПО «БелМаг»

  
Калмыков Ю.В.  
«16» 02 2026 г.

Разработка КД на конвейерную продукцию.  
Чехол защитный  
РИ-ОГК ДВ-ОВJ-SBJ-3-7

Экземпляр № \_\_\_\_\_

Магнитогорск 2026 г.



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ  
«БЕЛМАГ»**

Введена с 16.02.2026

Утверждаю:  
Технический директор  
АО НПО «БелМаг»

  
\_\_\_\_\_ Калмыков Ю.В.  
« 16 » 02 2026 г.

**Выбор параметров конструкции.  
Обеспечение герметичности сопряжения «палец (отсекатель)-чехол-кольцо»  
РИ-ОГК ДВ-ОВJ-SBJ-2-5**

Экземпляр № \_\_\_\_\_

Магнитогорск 2026 г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Акт внедрения результатов диссертационной работы на АО НПО «БелМаг»

УТВЕРЖДАЮ:



Исполнительный директор

АО НПО «БелМаг», к.т.н.

*Куцендик* В.И. Куцендик

«26» 02 2026 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов диссертационной работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы «РАЗРАБОТКА ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ ШАССИ», выполненной на кафедре технологий, сертификации и сервиса автомобилей ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» аспирантом Столяровым Ф.А., приняты АО НПО «БелМаг» для использования при проектировании автокомпонентов шасси автомобиля, в частности, шаровых шарниров передней подвески.

Вид передаваемых результатов:

- классификация шаровых шарниров шасси автомобилей;
- математическая модель выбора предпочтительных показателей качества шаровых шарниров шасси;
- конструкция уплотнительной системы шарового шарнира с отсекателем из нержавеющей стали;
- рабочие инструкции «РИ-ОГК DB-OBJ-SBJ-2-5» и «РИ-ОГК DB-OBJ-SBJ-3-7» для проектирования уплотнительной системы с отсекателем;
- численная модель процесса штамповки и раскатки отсекателя;
- усовершенствованная методика испытаний шаровых шарниров на герметичность.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения переданных результатов составляет 14,28 млн. рублей.

Финансовый директор – заместитель генерального директора  
по финансам, экономике и учету  
АО НПО «БелМаг»

Н.А. Буравцова

Технический директор – заместитель генерального директора  
АО НПО «БелМаг», к.т.н.

Ю.В. Калмыков

Главный конструктор  
АО НПО «БелМаг», к.т.н.

А.Р. Вахитов

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Акт об использовании результатов диссертационной работы  
в учебном процессе ФГБОУ ВО «МГТУ»

Утверждаю:

Проректор по образовательной деятельности  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
к.т.н., доцент  
Абдулвелеев И.Р.  
«31» марта 2026 г.



АКТ

об использовании в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский  
государственный технический университет им. Г.И. Носова»  
результатов диссертационной работы Столярова Ф.А.  
(научный руководитель И.Г. Гун)

Результаты диссертационной работы *«Разработка технико-технологических решений обеспечения качества автомобильных компонентов на примере шаровых шарниров шасси»*, выполненной на кафедре технологий, сертификации и сервиса автомобилей ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» аспирантом Столяровым Ф.А., в виде:

- классификации шаровых шарниров шасси автомобилей;
  - математической модели выбора предпочтительных показателей качества шаровых шарниров шасси;
  - компьютерной модели процесса штамповки и раскатки отсекаателя
- включены в учебный процесс подготовки студентов по направлениям 27.03.01 – Стандартизация и метрология (бакалавриат) по дисциплинам: «Технология производства металлопродукции», «Квалиметрия», «Планирование и организация эксперимента»; 27.04.01 – Стандартизация и метрология (магистратура) по дисциплине «Методология и методы научного исследования» и при подготовке кадров высшей квалификации по научной специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» по дисциплине «Математическое моделирование в управлении качеством продукции».

Директор института естествознания и стандартизации  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», председатель  
методической комиссии института, доц., к.т.н.

Сомова Ю.В.

Заведующий кафедрой технологий, сертификации  
и сервиса автомобилей, профессор, д.т.н.

Мезин И.Ю.