

НАЗАРОВ ДЕНИС ВИКТОРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ ГИБКИХ КОЛЕС
ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИВОДОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация
производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Научный руководитель:

Антипов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», кафедра производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Пантюхин Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», кафедра «Промышленная автоматика и робототехника», профессор;

Панюков Дмитрий Иванович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы», заведующий кафедрой.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита состоится 19 декабря 2023 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.05 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Nazarov_D_V_Sovershenstvovanie_modeli_obespecheniy_a.pdf.

Автореферат разослан «__» октября 2023 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.05,
доктор технических наук, доцент

Ерисов Я. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из актуальных проблем при производстве современных видов техники в различных отраслях машиностроения является повышение качества изготовления прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей, входящих в конструкцию узлов и агрегатов машин. Высокий интерес, значительное увеличение их количества в изделиях в настоящее время объясняется обеспечением высокой прочности и плотности компоновки, что особенно важно в ответственных областях: авиационная, ракетно-космическая, криогенная техника, изделия военно-промышленного комплекса, робототехника. К узлам и агрегатам вышеуказанных изделий, кроме обеспечения заданных эксплуатационных характеристик, предъявляются жесткие требования по качеству, что обуславливает повышенные технические требования к точности размеров тонкостенных цилиндрических деталей, их формы и взаимного расположения поверхностей.

На точность размеров, формы и взаимного расположения поверхностей тонкостенных цилиндрических деталей оказывает влияние несколько различных факторов, имеющих различную природу и степень их влияния. Для обеспечения жесткости технологической системы при механической обработке тонкостенной цилиндрической заготовки необходимо выдерживать ряд требований: геометрическая точность станка, жесткая фиксация заготовки в станочном приспособлении, качественно заточенный износостойкий режущий инструмент, высококвалифицированный наладчик и т.д. Значительное влияние на точность оказывает процесс базирования заготовки в станочном приспособлении и ее надежная фиксация при механической обработке, что затруднено недостаточной жесткостью тонкостенных цилиндрических заготовок. Базированием прецизионной тонкостенной цилиндрической заготовки является придание ей требуемой формы. После базирования заготовку необходимо закрепить, чтобы она сохранила при обработке неподвижность относительно приспособления. Для прецизионных тонкостенных деталей погрешности базирования в ряде случаев превышают величины погрешностей геометрических размеров и формы, что может вывести деталь из разряда прецизионных.

Сложным в технологическом отношении представителем этого класса деталей являются гибкие колеса волновых зубчатых передач (ВЗП). Наличие циклических деформаций в процессе работы и сравнительно небольшая радиальная жесткость повышают требования к равномерности толщины обода гибкого колеса и геометрическим размерам зубчатого венца, поэтому, формообразование оболочки и формирование зубчатого венца являются наиболее сложными операциями при изготовлении гибкого колеса.

Решение проблем базирования и закрепления гибких колес ВЗП сводится к исследованиям в области технологической оснастки. Для тонкостенных заготовок применяют приспособления с распределенными силами. Большая часть приспособлений для закрепления тонкостенных заготовок ориентированы на равномерное распределение усилий закрепления, вызывающих равномерные радиальные перемещения поверхностей заготовки. Так как контроль условий закрепления традиционно осуществляется посредством контроля усилий закрепления, возникает риск повышенного разброса значений перемещений поверхностей заготовки, например, из-за разброса механических характеристик материала в рамках партии запуска деталей.

Таким образом, исследования в данной области направлены, в первую очередь, на выявление наиболее значимых факторов, влияющих на точность базирования и контроля формы тонкостенных заготовок во время механической обработки, а также разработку методов обеспечения качества, которые будут способствовать минимизации возникающих погрешностей за счет контроля величины перемещения поверхностей заготовки. Необходимо провести анализ имеющихся в литературе методов и средств, относящихся к достижению заданных параметров точности механической обработки прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей за счет контроля величин перемещений поверхностей оснастки и заготовки.

Отсюда следует актуальность выбранной темы исследования.

Современное состояние вопроса

Значительный вклад в решение теоретических и практических вопросов управления качеством внесли российские и зарубежные ученые: Ю.П. Адлер, В.Н. Азаров, В.А. Барвинок, В.Я. Белобрагин, В.В. Бойцов, Б.В. Бойцов, В.А. Васильев, В.Г. Версан, Г.П. Воронин, В.А. Лapidус, Б.С. Мигачев, Э. Деминг, У. Шухарт, Дж. Джуран, Г. Тагути, К. Исикава, А. Фейгенбаум, Ф. Кросби и др. Экспериментальное и теоретическое изучение эффекта памяти формы нашло отражение в работах зарубежных и отечественных исследователей: Г. В. Курдюмовым и Л. Г. Хандросом, В. А. Лихачева, В. Н. Хачина, А. С. Тихонова, С. П. Беляева, В. А. Барвинка, В. И. Богдановича, В. С. Феоктистова, О. В. Ломовского, А. А. Мовчана, Дж. Д. Харрисона, Д. Е. Ходгсона, В. Б. Кросса, А. Х. Кариотиса, Ф. Д. Стилмера и др.

Целью исследования является повышение качества изготовления механизмов агрегатов космической техники за счет разработки и внедрения модели обеспечения качества прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих подходов к обеспечению качества изготовления прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей.

2. Разработка структурной модели обеспечения качества механизмов, содержащих прецизионные тонкостенные цилиндрические детали, основанной на применении анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA) на этапе конструкторско-технологической подготовки производства.

3. Разработка математической модели базирования с управляемым перемещением закрепления при механической обработке прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей.

4. Проведение анализа рисков появления потенциальных несоответствий и отказов при базировании с управляемым перемещением закрепления в процессе механической обработки прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей.

5. Разработка методики проектирования технологической оправки с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы.

6. Проведение экспериментальных исследований, подтверждающих адекватность предложенных научно-технических решений и расчёт экономического эффекта.

Область исследования соответствует п. 1 «Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства» и п. 3 «Научные основы и совершенствование методов стандартизации и менеджмента качества (контроль, управление, обеспечение, повышение, планирование качества) объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции» паспорта специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Объектом исследования является процесс изготовления прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей механизмов электромеханических агрегатов космических аппаратов (КА).

Предмет исследования. Методы и модели обеспечения качества прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей механизмов электромеханических агрегатов КА.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались принципы Всеобщего управления качеством (TQM). Решение поставленных задач проведено на основе анализа видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), ПО для инженерного анализа и численного моделирования (ANSYS), а также экспериментальных исследований с целью проверки адекватности теоретических положений. Теоретические и экспериментальные исследования основываются на методах системного анализа и квалитметрии.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке подходов и инструментария повышения качества механизмов агрегатов космической техники, содержащих прецизионные тонкостенные цилиндрические детали, и состоит в следующем:

1. Структурная модель обеспечения качества механизмов, содержащих прецизионные тонкостенные цилиндрические детали, основанная на применении анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA), отличающаяся созданием оптимизированной конструкции механизма и совершенствованием процесса базирования прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей в процессе механической обработки.

2. Математическая модель обеспечения качества процесса функционирования рабочей поверхности оправки из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ) при базировании прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления. Разработанная модель обосновывает и подтверждает возможность многократного применения технологической оснастки с рабочей частью из материала с ЭПФ.

3. Численная модель обеспечения качества процесса нарезания зубьев на гибком колесе в условиях базирования с управляемым перемещением закрепления на оправке с рабочей частью из материала с ЭПФ, учитывающая деформации гибкого колеса в процессе нарезания зубьев и перемещения элементов профиля зуба, влияющие на разность шага.

4. Методика проектирования и расчета параметров технологической оснастки для базирования прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления, особенностью которого является возможность управлять напряженно - деформированным состоянием заготовки.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в том, что структурная модель обеспечивает требования заказчика к ресурсу работы механизмов агрегатов космической техники, содержащих прецизионные тонкостенные цилиндрические детали, и снижает возможные риски появления отказов, как в конструкции, так и в процессе производства.

Предложенная структурная модель обеспечения качества механизмов агрегатов космической техники, содержащих прецизионные тонкостенные цилиндрические детали, основанная на анализе видов и последствий потенциальных отказов с одновременным учетом моделирования конструкции и технологического процесса, внедрена в учебный процесс Самарского университета. Предложенная методика процесса базирования с управляемым перемещением закрепления прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей и расчета параметров технологической оснастки внедрены в производственный процесс АО «РКЦ «Прогресс». Там же введены в технологическую документацию рекомендации по процессу нарезания и контроля зубьев на гибком колесе с применением технологической оснастки в условиях базирования с управляемым перемещением закрепления.

Практическая значимость заключается в оценке рисков и потенциальных отказов при проектировании конструкции механизмов агрегатов космической техники, содержащих прецизионные тонкостенные цилиндрические детали, на основе методики DFMEA. В оценке рисков и потенциальных отказов при проектировании процесса механической обработки прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей на основе методики PFMEA.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурная модель обеспечения качества волновых зубчатых передач, содержащих прецизионные тонкостенные цилиндрические детали.

2. Классификация рисков и потенциальных отказов конструкции волновой зубчатой передачи (DFMEA), включающая дерево отказов.

3. Классификация рисков и потенциальных отказов технологического процесса изготовления гибкого колеса (PFMEA), включающая дерево отказов.

4. Математическая и численная модели процесса функционирования рабочей поверхности оправки из материала с ЭПФ при базировании прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления.

5. Численная модель совместного деформирования технологической оправки из материала с ЭПФ и заготовки гибкого колеса вследствие упругой разгрузки, обусловленной снятием материала заготовки при нарезании зубьев, обеспечивающая возможность оценки рисков возникновения и величины несоответствия высоты и толщины зубьев гибкого колеса.

6. Методика расчета параметров технологической оснастки и порядок ее применения в процессе базирования прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления.

Степень достоверности. Достоверность научных положений, выводов и результатов исследования обеспечивается анализом существующих подходов к обеспечению качества прецизионных тонкостенных деталей, валидацией предложенных моделей и методики, практикой их применения в отдельных организациях.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях, в том числе: XIV Международная научная конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно - космических систем академика М.Ф. Решетнева (г. Красноярск, 2010 г.); Всероссийская научная конференция молодых ученых (г. Новосибирск, 2010 г.); Региональная научно – практическая конференция, посвященная 50-летию первого полета человека в космос (г. Самара, 2011 г.); Международная научно-техническая конференция «Современные компьютерные технологии фирмы DELCAM в науке, образовании и производстве» (г. Самара, 2011 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («II Козловские чтения») (г. Самара, 2011 г.); VII Всероссийский конкурс молодых ученых, посвященный 70-летию Победы (г. Москва, 2015 г.); XXXIX академических чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства (г. Москва, 2015 г.); Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2016 г.); XVI Всероссийская научно –техническая конференция «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара, 2017г.); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических процессов», посвященная 90-летию со дня рождения лауреата Государственной премии СССР, доктора технических наук, профессора Л. Б. Дмитриева (г. Тула, 2023 г.)

Публикации. Содержание диссертационной работы отражено в 20 работах; в том числе семи статьях, опубликованных в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России. Получены два патента.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 117 наименований и двух приложений. Текст диссертации изложен на 172 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и семь таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследования, определен объект и предмет исследования, указана научная новизна положений, выдвигаемых на защиту, а также практическая ценность и достоверность полученных результатов.

В первой главе выполнена классификация тонкостенных цилиндрических изделий по различным признакам (рисунок 1). Анализ классификации показывает, что наиболее сложными в технологическом плане являются нежесткие прецизионные оболочковые цилиндрических детали типа стакана с толщиной стенки 0,3...1,0 мм, имеющие стойкость к контактной усталости в условиях напряженного состояния. К деталям, эксплуатируемым в условиях космического пространства, кроме того предъявляются дополнительные требования по работе в вакууме, стойкости к воздействию радиационных излучений и т. д. Типичным представителем этого класса являются гибкие колеса ВЗП приводов солнечных батарей (СБ) КА. При ряде достоинств ВЗП перед другими передачами, имеют место их недостаточно высокие показатели надежности и долговечности при заданном ресурсе работы КА на орбите. Проблема заключается в высоких затратах на обеспечение качества, а именно на устранение несоответствий заданным требованиям конструкторской и эксплуатационной документации. В связи с чем заведомо увеличивается партия запуска и вынужденно применяется селективная сборка ВЗП приводов СБ, существенно увеличивая затраты.

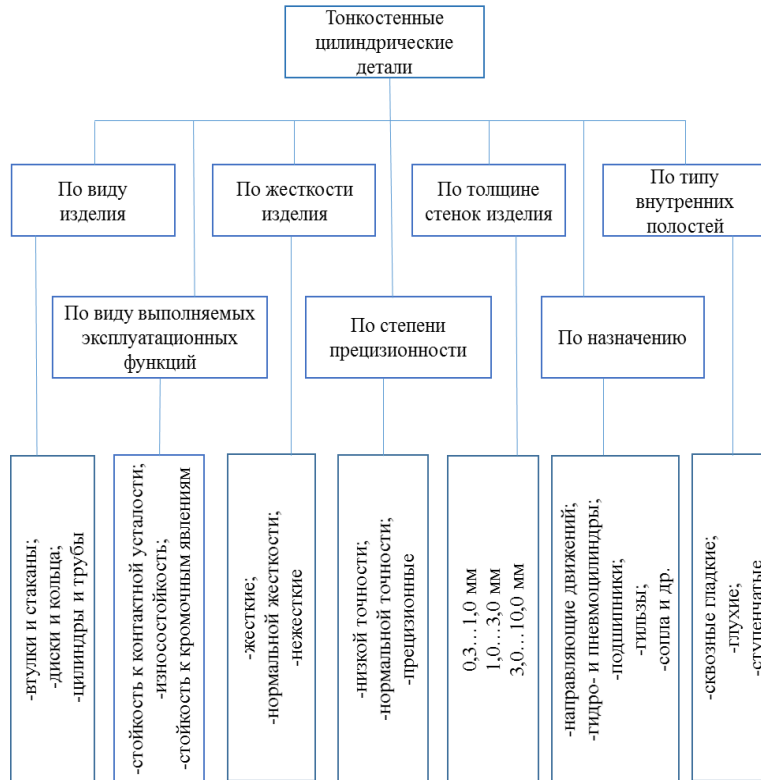


Рисунок 1 – Классификация изделий с тонкостенными поверхностями

В производстве КА в силу его малой серийности особое значение имеет совершенствование методов управления качеством направленных на прогнозирование его параметров и оценку рисков возникновения несоответствий. Применив статистические методы управления качеством было установлено, что значительное количество отказов приводов СБ КА происходит по причинам выхода из строя гибких колес и гибких подшипников ВЗП; причем часть дефектов связана с несовершенством конструкции, часть носит технологический характер.

Также определено, что наиболее значимым фактором, влияющим на точность и сохранение формы тонкостенных заготовок гибких колес во время механической обработки, является их базирование (рисунок 2). Решение проблем базирования и закрепления гибких колес ВЗП сводится к исследованиям в области технологической оснастки.

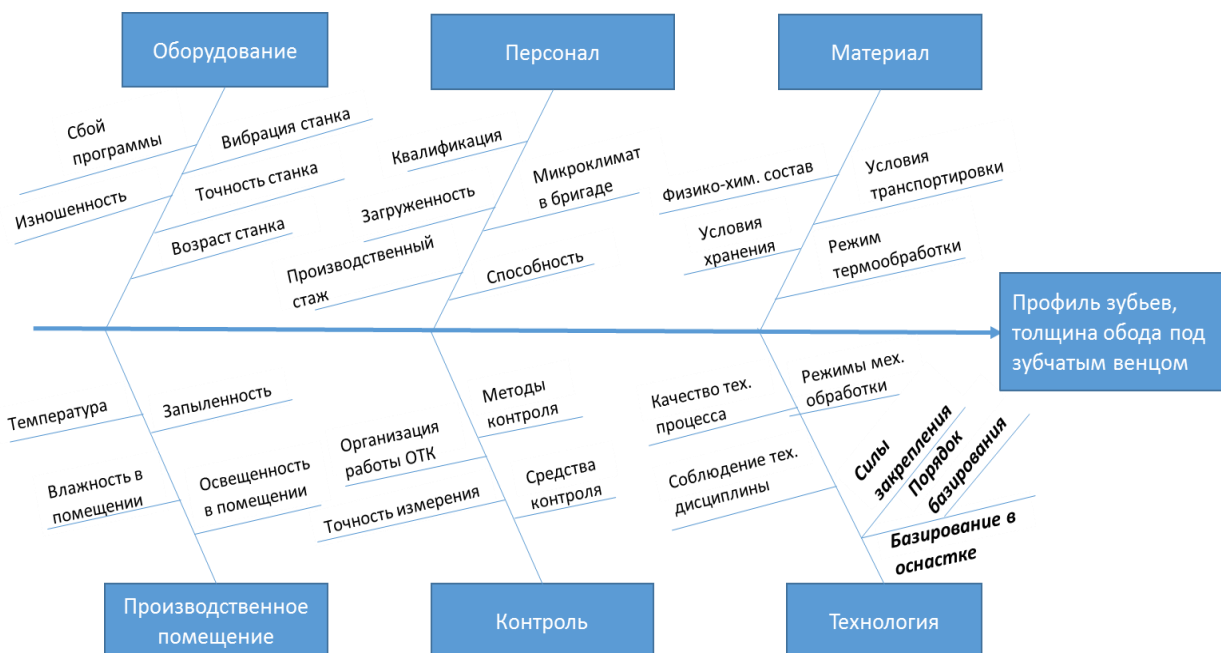


Рисунок 2 – Причинно-следственная диаграмма

Проведенный анализ имеющихся в литературе методов и средств закрепления тонкостенных заготовок выявил, что они не обеспечивают равномерное распределение сил закрепления и не удовлетворяют заданным значениям погрешности установки. Для обеспечения базирования предлагается использовать оправку с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ), обеспечивающей закрепление заготовки за счёт радиального натяга, вызванного контролируемым радиальным перемещением её рабочей поверхности в процессе закрепления заготовки. Для исключения погрешностей, связанных с базированием и закреплением заготовки, на финишных операциях чистового точения, шлифования и зубофрезерования предлагается обработку и межоперационное транспортирование осуществлять в едином приспособлении-спутнике, закрепляя его в рабочих позициях соответствующего оборудования.

Повышение качества ВЗП приводов СБ КА возможно обеспечить конструктивными и технологическими методами.

В второй главе разработана структурная модель обеспечения качества прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей (рисунок 3). Представленная структурная модель обеспечения качества основана на анализе видов и последствий потенциальных отказов (FMEA) на этапе конструкторско-технологической подготовки производства. Отличительной особенностью разработанной структурной модели является комплексный подход к обеспечению качества, включающий конструктивные, математические и технологические методы управления качеством, а также методы системы менеджмента качества.

В диссертационном исследовании разработанная структурная модель обеспечения качества прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей рассмотрена на примере гибких колес ВЗП приводов СБ КА.

Проведена процедура анализа первоначально созданной конструкции ВЗП, разработанная на основе типовой модели анализа видов и последствий потенциальных несоответствий конструкции (FMEA). Проведен структурный, функциональный анализ и анализ отказов конструкции ВЗП (рисунок 4).

Для каждого отказа определены потенциальные причины их возникновения и последствия возникновения. Проведена оценка отказов и установлен приоритет действий для устранения рисков возникновения отказов (H(high), M(medium), L(low)).

Высокий приоритет (H) получили причины:

- заклинивание ВЗП в результате разрушения гибкого колеса;
- заклинивание ВЗП в результате разрушения гибкого подшипника генератора волн.

Средний приоритет для рассмотрения и принятия мер (M) получили причины:

- проскок зубьев гибкого колеса относительно зубьев жесткого колеса вследствие износа зубьев гибкого колеса ВЗП;
- некорректный угол поворота генератора волн и других звеньев ВЗП при реверсивности движения вала генератора вследствие большой величины исходного зазора в профильном соединении генератора волн и вала генератора.

Установленные приоритеты действий позволили разработать мероприятия, направленные на предупреждение причин возникновения отказов в конструкции ВЗП.

Полученные результаты занесены в бланк протокола DFMEA-анализа.

Для снижения влияния накопленной суммарной погрешности за счет допусков на линейные размеры внутреннего, наружного колец и тел качения гибкого подшипника, необходимо оптимизировать конструкцию ВЗП. Особенностью предлагаемой конструкции будет являться перераспределение функций между ее конструктивными элементами.

В результате реализации мероприятий предложена конструкторская модель ВЗП, не имеющая подшипника качения генератора волн. Суть предложенной разработки в том, что дорожки качения в ВЗП нанесены непосредственно на профиле генератора волн и на гибком зубчатом колесе. На данную разработку получен патент № 2486388.

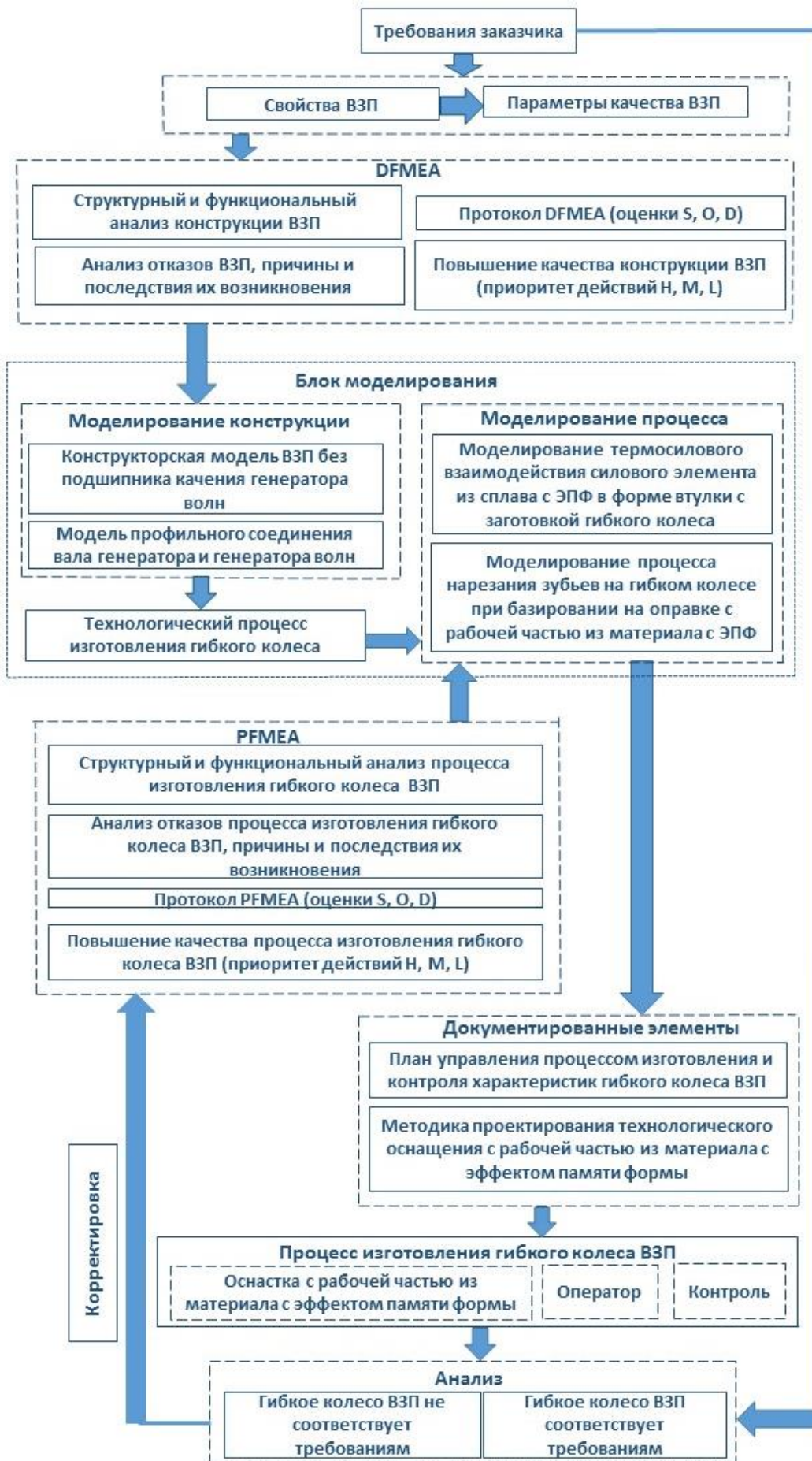


Рисунок 3 – Структурная модель обеспечения качества прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей

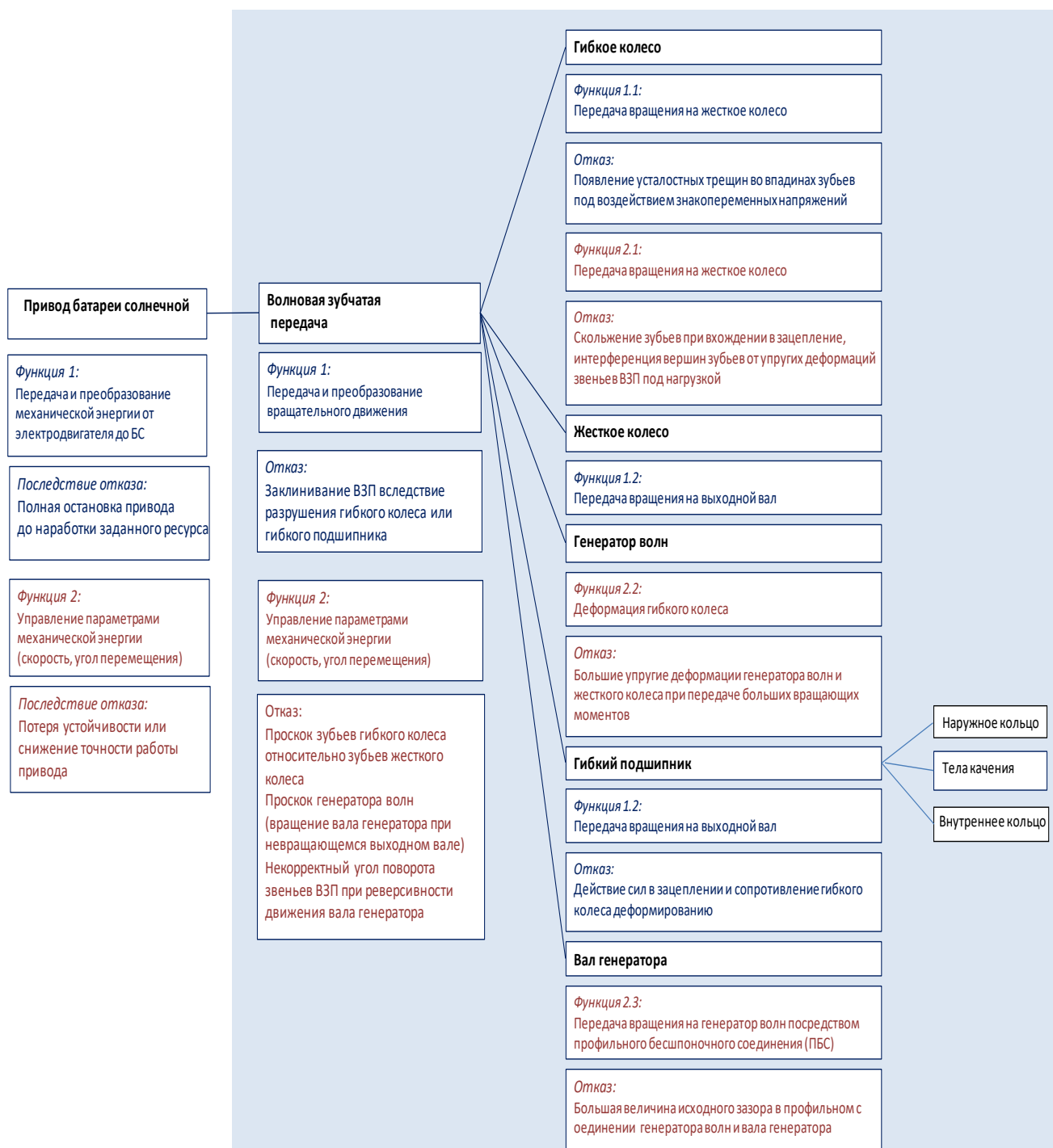


Рисунок 4 – Дерево отказов рассматриваемого элемента

Для оценки влияния точности профиля на величину бокового зазора в профильном соединении необходимо исследовать причины появления ошибки мертвого хода в соединении генератора волн и вала генератора и получить аналитические зависимости.

Для передачи крутящего момента от вала генератора на генератор волн в данной конструкции ВЗП используется трехгранное профильное соединение (РК-профиль), сопряжение деталей в котором осуществляется по гладкой поверхности, имеющей в поперечном сечении трехгранный профиль.

В соединениях с зазорами и с переходными посадками при изменении направления вращения элементы РК-профиля имеют возможность дополнительного поворота до момента касания профилей вала и втулки. Сложность определения этого угла θ определяется его зависимостью от величины диаметрального зазора в соединении, его расположением в поле допуска и криволинейностью контактирующих профилей. Эти обстоятельства делают изначально неопределенными координаты точек профиля, в которых произойдет контакт.

Проведена оценка изменения угла θ при сборке соединения при различных размерах вала и отверстия (в пределах допуска) при сохранении постоянства диаметрального зазора $\Delta_O + \Delta_B = 0,015\text{мм}$ (Δ_O ; Δ_B – отклонения отверстия и вала соответственно). Расчеты показывают, что смещение зазора в верхнюю часть поля допуска ведет к снижению угла θ .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что независимо от диаметра соединения при малых передаваемых крутящих моментах особое внимание при проектировании профиля должно уделяться участкам с углами (в полярной системе координат) $39^\circ \dots 40^\circ$; $159^\circ \dots 160^\circ$ и $279^\circ \dots 280^\circ$. Для снижения риска возникновения отказа в виде некорректного угла поворота генератора волн и других звеньев ВЗП при реверсивности движения вала генератора необходимо учитывать это обстоятельство на этапе разработки конструкции.

Снизить вероятность отказов по причинам заклинивания ВЗП в результате разрушения гибкого колеса и проскока в зубчатом зацеплении вследствие износа зубьев гибкого колеса предлагается технологическими методами.

В третьей главе представлена оценка рисков, проведен анализ видов и последствий потенциальных несоответствий процесса механической обработки гибкого колеса ВЗП на основе методологии PFMEA. Определены структурные элементы процесса механической обработки и установлены их основные функции. Выявлены возможные отказы структурных элементов, определены их последствия и потенциальные причины возникновения. Анализируя полученные значимости последствий отказов, возникающих в процессе механической обработки гибких колес, можно сделать вывод, что наиболее значимыми являются отказы операции «Зубофрезерная» по причине элемента функционирования «Оправка». На рисунке 5 представлен фрагмент дерева отказов для операции «Зубофрезерная».

Оценка возможности возникновения, обнаружения и предупреждения причин отказов позволила сформулировать основные мероприятия, направленные на повышение качества процесса базирования и закрепления тонкостенной заготовки на финишных операциях механической обработки. В соответствии с этим проведено математическое и численное моделирование термосилового взаимодействия силового элемента из сплава с ЭПФ в форме втулки с обрабатываемой заготовкой гибкого зубчатого колеса. Детализированная математическая модель функционирования силового элемента приспособления для механической обработки в дальнейшем была использована для разработки методики проектирования приспособлений, охватывающей широкую номенклатуру тонкостенных деталей, для которых необходимо базирование с управляемым перемещением закрепления.

На ряду с этим, при проведении PFMEA-анализа выявлен возможный отказ для операции «Зубофрезерная», присущий применению различных типов оправок (как малоконусной, так и с силовым элементом из материала с ЭПФ). Нарезание зубьев гибкого колеса в условиях базирования с управляемым перемещением закрепления приводит к неравномерному снижению жесткости по окружности, а также к неравномерному тангенциальному перемещению точек, лежащих на окружности заготовки. В результате изменяется диаметр делительной окружности, и как следствие получают разность в ширине зубьев, неравномерность шага, что в конечном итоге может привести к возникновению дополнительных нерасчетных нагрузок при совместной работе гибкого и жесткого колес ВЗП. Это обуславливает дополнительные риски снижения ресурса ВЗП, возникает необходимость их оценки. Для этого проведено исследование влияния приспособления на точность шага зубчатого венца, являющегося основным параметром детали, изменение его геометрических характеристик во время обработки.

Численное моделирование процесса нарезания зубчатого венца гибкого колеса при базировании на оправке с рабочей частью из материала с ЭПФ проводилось с использованием программного обеспечения ANSYS. Исследования показали, что наибольшие перемещения заготовки, влияющие на точность зубьев, происходят при нарезании первых нескольких зубьев. Максимумы эти перемещения и в окружном и в радиальном направлении достигают после нарезания 4-го зуба (рисунок 6). В процессе нарезания зубьев гибкого колеса с использованием базирования на оправке с рабочей частью из материала с ЭПФ необходимо учитывать влияние этих перемещений на точность зубьев.



Рисунок 5 – Фрагмент дерева отказов для операции «Зубофрезерная»

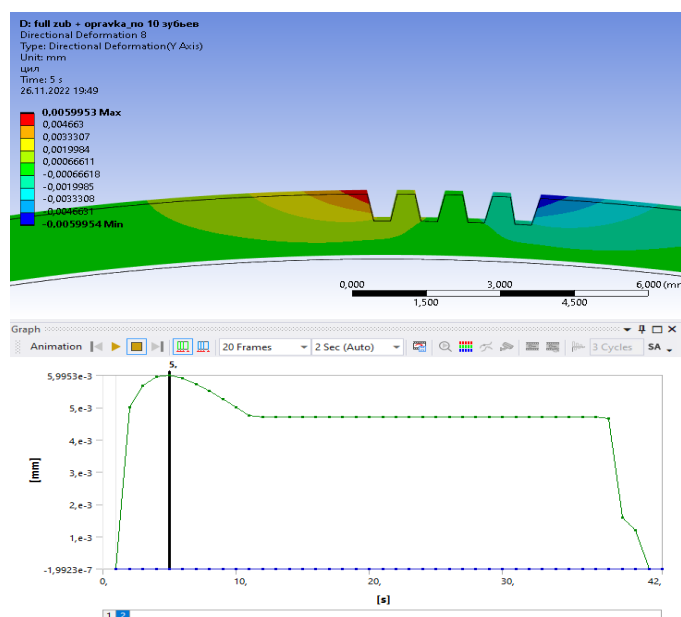


Рисунок 6 – Эпюра перемещений в окружном направлении в цилиндрической системе координат после нарезания 4-го зуба

В четвертой главе представлена методика проектирования технологической оправки с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы. На конструкцию оправки получен патент № 2616738. Разработан технологический процесс изготовления экспериментального образца оправки для базирования с управляемым перемещением закрепления; составлен план управления процессами изготовления и контроля характеристик гибкого колеса ВЗП.

Для экспериментальных исследований в лабораторных условиях рабочей части оправки из материала с ЭПФ разработано и изготовлено специальное испытательное оборудование, в состав которого входит механическая и электронная части. По результатам исследования процесса функционирования образцов и обработки полученных данных построена зависимость величины рабочего хода оправки от диаметра её отверстия. Проведена отработка процесса базирования заготовки прецизионной тонкостенной детали в оправке в условиях производства.

Рассчитан показатель экономической эффективности внедрения результатов исследования. Годовая экономическая эффективность составила 2,7 млн. руб.

В заключении изложены основные результаты и выводы исследования, подтверждающие положения, выносимые на защиту, определены перспективы дальнейшего изучения проблемы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведённого исследования решена важная научная задача в области повышения качества изготовления изделий космической техники и достигнута цель диссертационного исследования, которая направлена на повышение качества изготовления механизмов агрегатов космической техники за счет разработки и внедрения модели обеспечения качества прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей:

1. Проведенная классификация тонкостенных прецизионных деталей выявила проблематику в вопросах качества при изготовлении гибких колес волновых зубчатых передач приводов солнечных батарей космических аппаратов. Согласно статистическим данным производства, лишь 40% гибких колес проходят полный цикл наземных ресурсных испытаний в составе волновых зубчатых передач. Для безусловного обеспечения плановых заданий приходится увеличивать партию запуска, учитывая заведомо наличие брака при изготовлении, что недопустимо. На основе анализа технической литературы и применения статистических методов управления качеством выявлено, что отказы во время проведения испытаний на ресурс происходят в следствие нескольких видов дефектов, имеющих различную природу возникновения. Часть дефектов связана с несовершенством конструкции, часть носит технологический характер. Анализ построенной причинно-следственной диаграммы показал,

что главной причиной дефектов в виде разности шага зубьев, разности толщины обода под зубчатым венцом является искажение формы и геометрии заготовки вследствие базирования и закрепления в технологической оснастке. Для обеспечения качества гибких колес волновых зубчатых передач требуется базирование с управляемым перемещением рабочих поверхностей оснастки, придающим форму заготовке в процессе механической обработки. Эту задачу можно решить путем применения приспособления с рабочей частью из материала с памятью формы.

2. Разработана структурная модель обеспечения качества волновых зубчатых передач, содержащих прецизионные тонкостенные цилиндрические детали. Ее концепция основана на применении анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA) на этапах всего жизненного цикла изделия. Модель представляет собой схему взаимосвязанных блоков, отображающих этапы обеспечения качества волновых зубчатых передач и позволяет оценить потенциальные дефекты и принять меры для их исключения или минимизации.

3. Проведена классификация рисков и потенциальных отказов конструкции волновой зубчатой передачи (DFMEA), включающая дерево отказов. На основе процедуры DFMEA-анализа проведено моделирование, направленное на повышение качества конструкции волновых зубчатых передач. Перераспределения функций между конструктивными элементами волновых зубчатых передач привело к повышению ее нагрузочной способности и долговечности на 17% вследствие увеличения зоны зацепления зубьев на 30%. В результате оценки влияния точности профиля на величину бокового зазора в профильном соединении генератора волн и вала генератора были определены участки с углами, которым должно уделяться особое внимание при проектировании и контроле точности изготовления профиля. Данные мероприятия позволяют увеличить передаваемый крутящий момент в 1,3 раза и избежать потенциальных отклонений в процессе производства и эксплуатации.

4. Проведена классификация рисков и потенциальных отказов технологического процесса изготовления гибкого колеса (PFMEA), включающая дерево отказов. На основе процедуры PFMEA-анализа разработаны математическая и численная модели процесса функционирования рабочей поверхности оправки из материала с памятью формы при базировании прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления. Также, разработана численная модель совместного деформирования технологической оправки из материала с эффектом памяти формы и заготовки гибкого колеса вследствие упругой разгрузки, обусловленной снятием материала заготовки при нарезании зубьев, обеспечивающая возможность оценки рисков возникновения и величины несоответствия высоты и толщины зубьев гибкого колеса.

5. Экспериментально исследован процесс функционирования образцов-втулок из сплава с памятью формы. В результате сравнения результатов численного моделирования с результатами натурного установлена адекватность аналитической и численной моделей. Разработана методика расчета параметров технологической оснастки и порядок ее применения в процессе базирования прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления. На основе проведенных исследований отработаны инженерные методики проектирования оснастки и порядок ее применения в процессе базирования прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления, оптимизирован технологический процесс механической обработки в части исполнения и контроля операции нарезания зубчатого венца.

6. Проведена комплексная апробация предложенных решений, что подтверждено актами внедрений. Предложенная модель обеспечения качества прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей внедрена в учебный процесс Самарского университета. Применение оснастки в процессе базирования прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления и оптимизация технологического процесса механической обработки в АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара) привели к снижению уровня дефектности по причине отклонения обода от соосности на 28%, а по причине неравномерного шага зубьев на 37%. Использование результатов исследований позволило в АО «РКЦ «Прогресс» получить экономический эффект около 2,7 миллиона рублей за 2022 год при

изготовлении гибких колес волновых зубчатых передач приводов солнечных батарей КА «Ресурс-П».

Перспективой дальнейшей разработки темы в рамках общей тенденции на цифровизацию подготовки производства является:

- разработка технологических процессов механической обработки изделий с учетом деформаций, наведенных воздействием технологической оснастки;
- моделирование процесса совместного деформирования изделия и элементов технологической оснастки для оценки рисков, прогнозирования качества, видов и вероятности возникновения несоответствий.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК России:

1 **Назаров, Д.В.** Оценка рисков и потенциальных отказов при проектировании процесса изготовления гибких колес волновых зубчатых передач на основе методики РФМЕА / Д.В. Назаров, Д.В. Антипов, О.В. Ломовской // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25. – № 3(113). – С.26-34.

2 **Назаров, Д.В.** Экспериментальные исследования рабочей части оправки для прецизионного шлифования из материала с ЭПФ в лабораторных условиях / Д.В. Антипов, О.В. Ломовской, Д.В. Назаров, А.А. Шаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Выпуск 4. – С.412-416.

3 **Назаров, Д.В.** Определение напряженно-деформированного состояния при нарезании зубьев гибкого колеса на оправке с силовым элементом из материала с ЭПФ / Д.В. Назаров, Д.В. Антипов, Д.С. Горяинов, О.В. Ломовской // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Выпуск 4. – С.419-424.

4 **Назаров, Д.В.** Компьютерное моделирование процесса функционирования автореверсивной втулки из материала с памятью формы / Д.С. Горяинов, Е.Г. Громова, О.В. Ломовской, Д.В. Назаров, А. Н. Плотников, А.А. Шаров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20. – № 4-3(84). – С. 422-426.

5 **Назаров, Д.В.** Автореверсивная втулка из материала с ЭПФ для прецизионного шлифования тонкостенных осесимметричных деталей / О.В. Ломовской, Д.В. Назаров, А. Н. Плотников, А.А. Шаров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 6 (4). – С. 1181-1185.

6 **Назаров, Д.В.** Угловая точность профильных соединений / А.Ф. Денисенко, Д.В. Назаров, И.К. Рыльцев // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2012. №4 (36). С. 136-143.

7 **Назаров, Д. В.** Методика и критерии селективной сборки волновых зубчатых передач приводов солнечных батарей космического аппарата / Д.В. Назаров, О.П. Прудников, С.В. Тюлевин // Вестник СибГАУ. – 2012. Вып. 2(42). С. 101-106.

Патенты:

8 Патент № 2486388 С2 Российская Федерация, МПК F16H 1/00. Волновая зубчатая передача: № 2011114329/11: заявл. 12.04.2011: опубл. 27.06.2013 / А. Ф. Денисенко, **Д. В. Назаров**, Н. В. Еремин, А. А. Грошев; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Самарский государственный технический университет.

9 Патент № 2616738 Российская Федерация, МПК В23В 31/40, В23Q 3/14. Оправка для закрепления тонкостенной детали при прецизионном шлифовании: № 2015139616: заявл. 17.09.2015: опубл. 18.04.2017 / С. В. Тюлевин, **Д. В. Назаров**, В. И. Богданович [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева", Акционерное общество "Ракетно-космический центр "Прогресс" (АО "РКЦ "Прогресс").

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

10. **Назаров, Д. В.** Селективная сборка волновых зубчатых передач приводов солнечных батарей космического аппарата / О. П. Прудников, С. В. Тюлевин, Д. В. Назаров, А. В. Ливочкин // Решетневские чтения. – 2010. – Т. 1. – С. 82-83.

11. **Назаров, Д. В.** Влияние формы зубьев зубчатых колес на характеристики и долговечность волновых зубчатых передач / Д.В. Назаров, О.П. Прудников, Д.С. Горяинов // Наука. Технологии.

Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Часть 2 - с. 257-259.

12. **Назаров, Д. В.** Моделирование зацепления волновых зубчатых передач привода солнечных батарей / О. П. Прудников, Ю. А. Костюков, Д. В. Назаров // Региональная науч. – практич. конф., посвящ. 50-ти летию первого полета человека в космос (14-15 апреля 2011), тезисы докладов, Самара, 2011. - с.126.

13. **Назаров, Д. В.** Создание нового поколения электромеханических приводов трансформируемых систем космических аппаратов / В. П. Еремин, Н. В. Еремин, А. Н. Кирилин, Б. А. Лопатин, Д. В. Назаров и др.; под ред. проф. А. Н. Кирилина. - Самара: ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2011. - 521 стр.

14. **Назаров, Д. В.** Разработка конструкции волновой зубчатой передачи с применением высокоточных профильных соединений / Д. В. Назаров, Д. С. Горяинов // Современные компьютерные технологии фирмы DELCAM в науке, образовании и производстве: Тезисы докл. междунар. научно-техн. конф. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – с. 89.

15. **Назаров, Д. В.** Исследование геометрии зацепления волновых зубчатых передач привода солнечных батарей / Д. В. Назаров, О. П. Прудников // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («II Козловские чтения») (12-16 сентября 2011), тезисы докладов, Самара, 2011. - с. 356-357.

16. **Назаров, Д. В.** Совершенствование процесса прецизионного шлифования тонкостенных деталей / О. В. Ломовской, Д. В. Назаров // Итоги диссертационных исследований. Том 3. – Материалы VII Всероссийского конкурса молодых ученых, посвященного 70-летию Победы. – М.: РАН, 2015. С. 21-26.

17. **Назаров, Д. В.** Совершенствование процесса прецизионного шлифования на базе эффекта памяти формы / О. В. Ломовской, Д. В. Назаров // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXIX академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства, Москва, 27–30 января 2015 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2015. С. 476-479.

18. **Назаров, Д. В.** Моделирование функционирования рабочего элемента приспособления из материала с памятью формы / О. В. Ломовской, Д. С. Горяинов, Д. В. Назаров // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов международной научно-технической конференции, Самара, 22–24 июня 2016 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 2016. – С. 8-9.

19. **Назаров, Д. В.** Прецизионное шлифование тонкостенных осесимметричных деталей с применением оснащения на базе эффекта памяти формы / Д. В. Назаров, О. В. Ломовской, А. А. Шаров // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XVI Всероссийской научно – технической конференции, Самара, 25–28 октября 2017 года / Отв. редактор А. Ф. Денисенко. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. – С. 27.

20. **Назаров, Д. В.** Модель обеспечения качества изготовления волновых зубчатых передач / Д. В. Назаров, Д. В. Антипов // Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических процессов: Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения лауреата Государственной премии СССР, доктора технических наук, профессора Л. Б. Дмитриева, Тула, 23 июня 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 189-194.