

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»

На правах рукописи

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Антипов Дмитрий Вячеславович,
доктор технических наук,
доцент

Самара - 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 Современное состояние вопроса по обеспечению качества прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей и задачи исследования.....	11
1.1 Классификация прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей и области их применения.....	11
1.2 Анализ факторов, влияющих на качество изготовления гибких колес волновых зубчатых передач.....	16
1.3 Анализ факторов, влияющих на точность установки и закрепления заготовки в приспособлении. Технические решения в конструкциях технологической оснастки, использование материалов с памятью формы в их конструкциях	31
1.4 Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования.....	41
ГЛАВА 2 Управление качеством волновой зубчатой передачи на этапах ее жизненного цикла.....	44
2.1 Разработка модели обеспечения качества волновой зубчатой передачи.....	44
2.2 Оценка и анализ рисков потенциальных отказов, возникающих в процессе проектирования волновой зубчатой передачи на основе методики DFMEA	48
2.3 Совершенствование конструкции волновой зубчатой передачи путем перераспределения функций между ее конструктивными элементами.....	56
2.4 Оценка влияния точности профиля на величину бокового зазора в профильном соединении генератора волн и вала генератора	60
2.5 Выводы по главе 2	66
ГЛАВА 3 Совершенствование технологической оснастки и процесса механической обработки гибких колес волновых зубчатых передач за счет моделирования процессов базирования и нарезания зубчатого венца.....	69
3.1 Оценка и анализ рисков потенциальных отказов, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации прецизионных гибких зубчатых колес волновых зубчатых передач на основе методики PFMEA	69
3.2 Математическое и численное моделирование процесса базирования с управляемым перемещением закрепления при механической обработке прецизионных гибких зубчатых колес на оправке с рабочей частью в виде втулки из сплава с эффектом памяти формы	88
3.3 Численное моделирование процесса нарезания зубчатого венца гибкого колеса при базировании с управляемым перемещением закрепления	102
3.4 Выводы по главе 3	112
ГЛАВА 4 Комплексная апробация предложенных решений.....	115

4.1 Разработка оборудования и методики проведения экспериментальной проверки процесса функционирования рабочей части приспособления для базирования с управляемым перемещением закрепления в лабораторных условиях	115
4.2 Разработка методики проектирования и технологического процесса изготовления приспособления с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы.....	122
4.3 Отработка процесса базирования заготовки прецизионной тонкостенной детали в приспособлении в условиях производства. Разработка плана управления процессами изготовления и контроля характеристик гибкого колеса волновой зубчатой передачи	136
4.4 Расчет показателей экономической эффективности внедрения результатов исследования.....	141
4.5 Выводы по главе 4	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ А	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	171

ВВЕДЕНИЕ

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 усилиями закрепления. 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.

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 научной 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 квалиметрии.

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 ЭПФ при базировании прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления. Разработанная модель обосновывает и подтверждает возможность многоразового 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 методик, 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 академические 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, четырёх глав, заключения, списка литературы из 117 наименований и двух приложений. Текст диссертации изложен на 172 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и семь таблиц.

ГЛАВА 1 Современное состояние вопроса по обеспечению качества прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей и задачи исследования

1.1 Классификация прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей и области их применения

Технический прогресс задает вектор развития техники, диктуя широкое применение деталей, имеющих тонкие стенки, с целью облегчения конструкции изделий. На сегодняшний день в общей массе деталей, подвергающихся механической обработке, их доля значительно увеличилась. Тонкостенные детали, обеспечивая высокую плотность компоновки конструкции изделий, находят активное использование в различных отраслях промышленности. В частности, они применяются в самолето - и ракетостроении, разработках космического и военно-промышленного комплексов.

Для систематизации и структурирования данных по типовым представителям класса тонкостенных цилиндрических деталей необходимо разработать их классификацию, выстраивая обобщенную и специализированную иерархию объектов и классов [102]. Для этого требуется выявить общие свойства деталей и определить суть проблем в области качества. Классификация тонкостенных цилиндрических деталей позволит осмыслить «узкие места» и сформировать направление дальнейшего исследования.

На рисунке 1.1 представлена классификация тонкостенных цилиндрических деталей. Классификация деталей осуществляется по следующим признакам:

- по виду детали;
- по жесткости детали;
- по толщине стенок детали;
- по типу внутренних полостей;
- по виду выполняемых эксплуатационных функций;

- по степени прецизионности;
- по назначению.

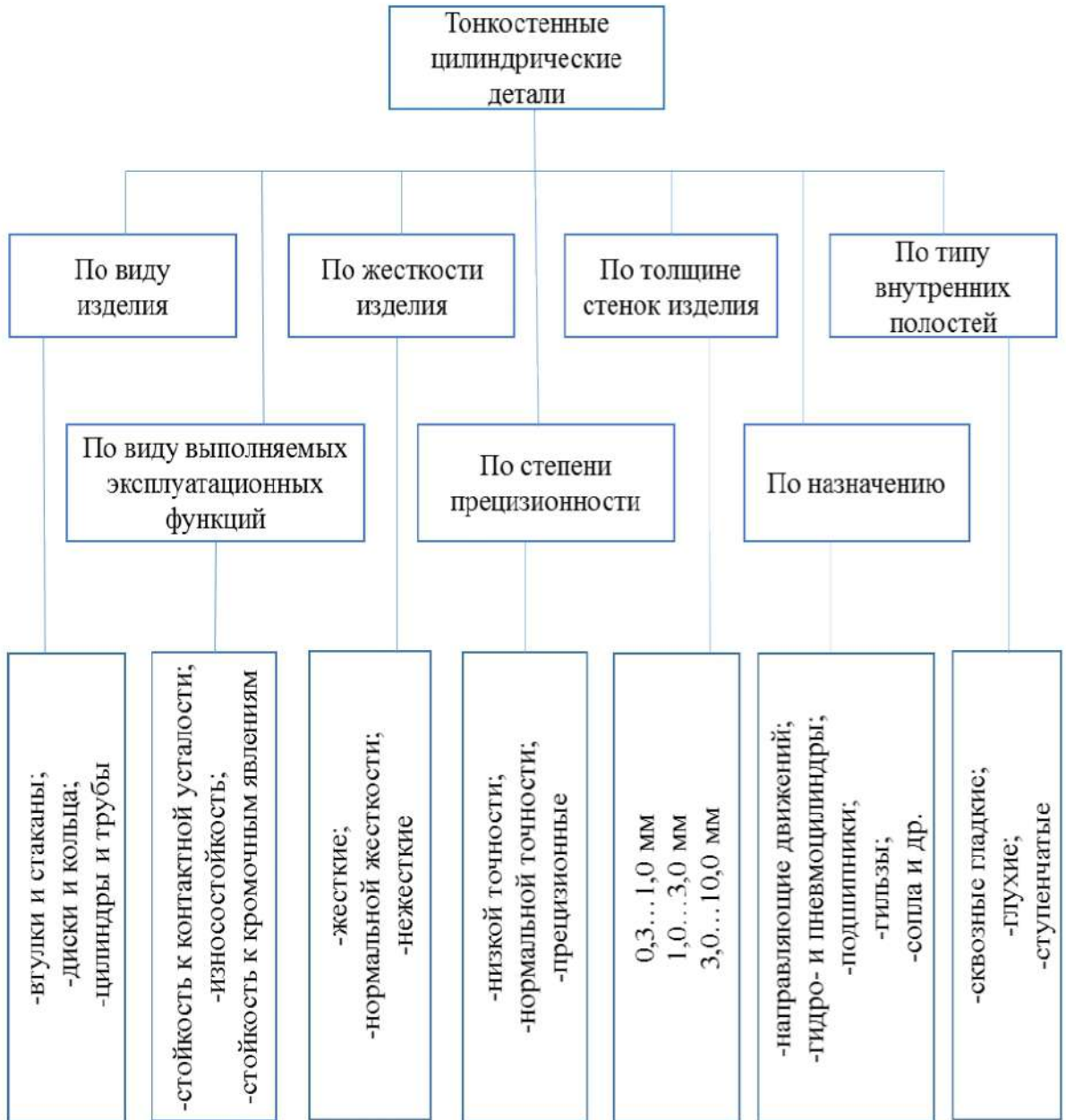


Рисунок 1.1 – Классификация тонкостенных цилиндрических деталей

По виду, тонкостенные цилиндрические детали классифицируются следующим образом: втулки и стаканы; диски и кольца; цилиндры и трубы.

К дискам и кольцам можно отнести такие детали, в которых отношение высоты H к диаметру D не превышает значения $H/D \leq 0,5$. При этом для колец отношение наружного D к внутреннему d диаметру не должно превышать следующего значения $D/d \leq 2,0$. Для втулок и стаканов значение отношения высоты к диаметру находится в следующих пределах $0,5 \dots 2,0$.

По жесткости, тонкостенные цилиндрические детали классифицируются на: жесткие, нормальной жесткости и нежесткие.

К жестким можно отнести такие детали, на деформацию которых не оказывают влияние силы закрепления в приспособлениях при обработке. К нормальной жесткости относятся детали, деформация которых от закрепления в приспособлении при обработке находится в пределах допуска на обработку. Для нежестких деталей необходимо применение специального технологического оснащения для обеспечения заданной жесткости, поскольку без его использования возможна деформация детали, превышающая допуск на обработку.

По толщине стенок, тонкостенные цилиндрические детали классифицируются на детали с толщиной стенок: 0,3 ... 1,0 мм; 1,0 ... 3,0 мм; 3,0 ... 10,0 мм.

По типу внутренних полостей, тонкостенные цилиндрические детали классифицируются на: сквозные гладкие, глухие и ступенчатые.

По виду выполняемых эксплуатационных функций, тонкостенные цилиндрические детали могут реализовывать следующие функции: стойкость к контактной усталости, износостойкость, стойкость к кромочным явлениям, сопротивляемость коррозии, стойкость к схватыванию, стойкость к комбинированному воздействию и др.

По степени прецизионности, тонкостенные цилиндрические детали могут быть следующие: низкой точности, нормальной точности, прецизионные.

По назначению, тонкостенные цилиндрические детали можно подразделять на: направляющие вращательного, сложного и прямолинейного движений, гидро- и пневмоцилиндры, подшипники, гильзы, сопла, лайнеры и др.

В процессе эксплуатации тонкостенных цилиндрических деталей возникает множество различных особенностей работы их отдельных элементов и зон [53]:

- наличие в изделии множества различных местных концентраторов напряжений;
- наличие ударных нагрузок в изделии и его элементах;

- неравномерность распространения деформаций растяжения, сжатия, изгиба, кручения, сдвига, а также объемных и сложных комбинированных деформаций по конструкции детали и ее элементам;
- неравномерность и местное действие контактных деформаций на исполнительных элементах тонкостенной цилиндрической детали;
- наличие краевых эффектов, кромочных контактов и деформаций смятия;
- наличие возможности потери устойчивости сжатых или деформированных тонкостенных цилиндрических деталей;
- наличие повторно-переменных деформаций детали;
- неравномерное изнашивание поверхностных слоев детали в зонах износа в процессе эксплуатации;
- возникающие механические, коррозионные, физические, химические, тепловые и комбинированные процессы.

Выполнена классификация тонкостенных цилиндрических деталей по различным признакам. В результате этой классификации существенно облегчается понимание основных проблем и дальнейшее развитие подхода к выявлению «узких мест» при их изготовлении. Рассмотрены основные особенности эксплуатации тонкостенных цилиндрических деталей. Анализ этих особенностей эксплуатации показывает, что главным для них является то, что их действие обычно переменное в пространстве по конструкции изделия и во времени. А также существует множество особых зон в тонкостенных цилиндрических деталях, в которых концентрируются напряжения. При этом на эти особые зоны детали параллельно может накладываться несколько видов воздействий.

Анализ классификации показывает, что наиболее сложными в технологическом плане являются нежесткие прецизионные тонкостенные цилиндрические 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. Поэтому затраты на обеспечение

качества изготовления деталей, работающих в условиях космического пространства, очевидно, выше аналогов в других отраслях.

Одним из направлений развития современной космической техники является минимизации габаритно-массовых параметров приводов различных механизмов, улучшения их выходных характеристик и увеличения времени их безотказной работы. В связи с этим, большой интерес представляет использование приводов с волновыми зубчатыми передачами (ВЗП), находящими всё более широкое применение в различных отраслях техники. Основными достоинствами ВЗП (рисунок 1.2) являются: большая редукция при малой массе, высокий КПД, значительный передаваемый крутящий момент при распределении усилий на большое число зубьев, высокая кинематическая точность, возможность передачи движения в герметизированное пространство. Эти положительные качества достигаются за счет использования зубчатых колес с очень малым модулем (0,2 – 0,4 мм) и волнообразного преобразователя движения [32, 43].



Рисунок 1.2 – Волновая зубчатая передача электропривода солнечной батареи КА «Ресурс-ДК»

Однако при ряде достоинств ВЗП перед другими передачами, имеют место технологические трудности в изготовлении ее конструктивных элементов (гибкое колесо и генератор волн) и недостаточно высокие показатели надежности и долговечности [92-94]. Как показали исследования, одной из причин выхода из строя ВЗП является быстрое разрушение зубьев и, в конечном счете, заклинивание или поломка передачи. Реализация принципа работы ВЗП требует точного изготовления элементов передачи, взаимного геометрического соответствия их параметров и высокой точности сборки [64].

В конструкции космического аппарата (КА) «Ресурс-ДК» для ориентации солнечных батарей применяются электроприводы с ВЗП. В процессе наработки ресурса при проведении конструкторско-доводочных испытаний, зафиксированы случаи шума, вибраций, повышения температуры и полного отказа электроприводов по причине заклинивания ВЗП.

1.2 Анализ факторов, влияющих на качество изготовления гибких колес волновых зубчатых передач

Триумфом научно-технической революции последней четверти 20-го века стала «революция в области качества», характеризуемая изменениями, влияющими на бизнес, организацию, производство и личность [97]. Качество продукции имеет первостепенное значение для любого производителя и определяет его статус для потребителя при последующей эксплуатации. В основе любого производства лежит удовлетворенность потребителя качеством продукта, и производитель должен ориентировать свое внимание на запросы заказчика.

Проведем анализ существующих методов и подходов к управлению качеством производственной продукции. Основные принципы менеджмента, эволюция методов обеспечения качества, содержание и требования к системам менеджмента качества (СМК), а также вопросы управления качеством технологических процессов рассмотрены Б. В. Бойцовым [6], В. А. Барвинком [8,

11, 12, 14, 15]. Исследования Шухарта-Деминга, Уилера и Ю. П. Адлера по методам статистического управления процессами изложены в работах [3, 5].

Вопросы стандартизации и качества нашли отражение в работах отечественных ученых: В.Я. Белобрагина, В.А. Васильева, В.Г. Версана, Г.П. Воронина, Б.С. Мигачева [18-22, 45, 27-31, 57, 58].

Время активного существования космического аппарата (КА) на орбите во многом определяет эффективность работы солнечных батарей (СБ). В состав приводов СБ входит волновая зубчатая передача (ВЗП), обеспечивающая большую редукция при малой массе. Основным требованием к работе приводов СБ и в целом КА является ресурс, заданный в тактико-технических требованиях заказчика. Повышение ресурса ВЗП, а, следовательно, увеличение надежности, долговечности и срока эксплуатации приводов солнечных батарей КА является первостепенной задачей.

Надежность — это комплексное свойство объекта, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определенные сочетания этих свойств. Эти свойства объекта связаны с выполнением объектом заданных функций при различных условиях его существования. Полный или частичный отказ данных функций и соответственно нарушение требований, предъявляемых к объекту, как раз и является рисками, которые рассматриваются в технических системах. Здесь же находятся и риски, связанные с качеством продукции и процессов ее производства.

Обзор литературных источников как отечественных [7, 47, 50, 100, 111], так и зарубежных авторов [112, 114, 115, 117] показал, что методы анализа рисков классифицируются по способу получения и оценки информации о риске, получаемой после их применения — качественные и количественные методы анализа. Цель качественного анализа заключается в определении факторов, областей, видов и характеристик риска с нечисловым способом их оценки, а цель

количественного анализа состоит в численном определении вероятности риска и возможного объёма или тяжести последствий по каждому виду риска.

Суть качественных методов заключается в обнаружении экспертным путём на основе опыта работы по данному направлению с применением различных методов анализа информации, результатом которых является набор соответствующих выводов о риске, основанных на приблизительных оценках (меньше, больше) или использовании словесных оценок (например, низкий, средний, высокий).

В случае же количественных методов применяются различные методы оценки с использованием численных данных, которые получаются на основе имеющейся количественной информации о данной системе или о прототипе. Необходимо отметить, что эта информация должна быть получена путем объективных измерений, а потом осуществляется прогнозирование изменения состояния системы во времени, с оценкой последствий риска.

Таким образом, получается, что это два дополняющих друг друга вида анализа рисков, поэтому часто также упоминается третий вид, который называют «комплексным».

В настоящее время наиболее популярны следующие методы анализа рисков:

- диаграмма Парето – статистический метод анализа рисков;
- диаграмма Исикавы – метод анализа причин;
- анализ видов и последствий (критичности) отказов (FMEA) – комплексный метод.

Типовая последовательность действий при анализе рисков состоит из следующих стадий: [36].

1. Постановка задач анализа рисков.
2. Управление данными об объекте анализа.
3. Моделирование объекта анализа.
4. Применение методов анализа риска.
5. Разработка и определение комплекса мероприятий по минимизации рисков.

6. Протоколирование результатов анализа, оформление отчета и передача документации.

Изложенный алгоритм является универсальным и содержит последовательность общих задач, необходимых для проведения анализа рисков с помощью любого из известных методов. Как пример, FMEA включает в себя все указанные этапы, метод Исикава, применяют только на третьем этапе приведенного перечня, поэтому остальные этапы необходимо определять и протоколировать самостоятельно.

Процедуру FMEA начали использовать в военном ведомстве США с 1949 года. Документ носил характер руководства по выполнению анализа видов и последствий отказов (MIL-P-1629) которое применяли в качестве метода оценки надежности при определении критичности отказов проектируемого оборудования. Отказы в нем классифицировались по величине воздействия на успешную реализацию программы [113].

В авиакосмической промышленности США метод FMEA начал применять в 60-х годах прошлого века. Процедура использовалась NASA в целях обеспечения надежности разрабатываемых образцов ракетной техники, в том числе в рамках лунной программы Apollo [116], а также Galileo, Magellan, Skylab, Viking, Voyager. Специалисты гражданского авиастроения адаптировали данную методику для своей отрасли и издали как ARP926 в 1967 году (сейчас ARP4761).

Вопросы в области оценки затрат на качество нашли отражение в трудах многих знаменитых ученых Японии и США: Г. Тагути, К. Исикава, Ф. Кросби, А. Фейгенбаум, Э. Деминг, Д. Джуран [38, 46, 97].

Обычно выделяют три подхода к оценке затрат на качество [54]:

- концепция «всеобщего благосостояния» выдвинутая Г. Тагути,
- концепция стоимостной модели процесса, выдвинутая Ф. Кросби,
- концепция PAF (расходы, связанные с предупреждением, оценкой и отказами).

Концепция PAF (prevention, appraisal, failure – предупреждение, оценка, отказ) заключается в следующем (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Блок-схема затрат на качество по концепции PAF

Затраты, связанные с обеспечением качества, разбиваются на две группы: затраты на достижение соответствия по качеству (инвестиции) и затраты, связанные с несоответствием по качеству (потери) [4].

Затраты, связанные с соответствием, делятся на затраты на оценку и предупреждение, а затраты, связанные с несоответствием, – на внутренние отказы и внешние отказы.

Затраты на предупреждение:

- моделирование качества, разработка оборудования для измерений и испытаний,
- анализ качества и мониторинг конструкции,
- плановое обследование и ремонт оборудования для измерений и испытаний,
- плановое обследование и ремонт технологического оборудования,
- ответственность и обязательства поставщиков материалов и комплектующих,
- обучение персонала в области качества,
- анализ качества и мероприятия по развитию качества.

Затраты на оценку:

- предпроизводственный аудит,
- определение способа контроля,
- выполнение лабораторных испытаний,
- испытание и контроль,
- оборудование для измерений и испытаний,
- материалы, расходуемые при проведении контроля и испытаний,
- анализ и доклад о результатах испытаний и контроля,
- натурные испытания на функционирование, анализ складских запасов.

Затраты на оценку будут оправданы в том случае, если несоответствие обнаружат до того, как продукция попадет к потребителю. Такими действиями могут быть [84]:

- контроль документации и испытания продукции до передачи заказчику,
- диагностика работы оборудования или мониторинг поставщиков,
- наличие складских запасов материалов и комплектующих сверх нормы для замены дефектных,
- реставрация поврежденных поверхностей,
- проверка подготовленных для оплаты счетов до передачи их заказчику.

Обнаружение отклонений на этой стадии позволяет избежать серьезных затрат на отказы и сбои в будущем, и помогает разрабатывать более результативные методы контроля.

В литературе [42, 55] затраты на соответствие нередко называют предупредительными или профилактическими затратами на повышение качества. Упомянутые затраты являются выигрышными инвестициями в улучшение качества.

Затраты, связанные с внутренними отказами:

- исправление повреждений и поломок,
- поиск и устранение дефектов,
- повторные испытания и контроль,
- неисправности,
- понижение категории качества,

- упушения у субподрядчиков,
- остановки оборудования и процессов.

Затраты, связанные с внешними отказами:

- претензии,
- возврат продукции,
- снижение продаж,
- рекламация продукции,
- ответственность за продукцию.

Затраты, связанные с отказами, обычно именуют безвозвратными затратами на качество. Эти затраты составляют порядка (4-5) % от объема продаж.

Для получения целостного представления о потерях, следует, кроме традиционных затрат, учитывать и скрытые затраты:

- срывы сроков сдачи продукции,
- срывы сроков оформления документов,
- запасы материалов комплектующих,
- дополнительные затраты на транспортировку,
- ошибки в оформлении счетов на оплату,
- содержание дополнительной сервисной службы,
- неполное выполнение заказов,
- потери времени на рекламационную деятельность с неудовлетворенным заказчиком,
- доработка конструкции продукции ненадлежащего качества,
- неиспользованные производственные мощности и др.

Эти расходы, не отраженные в бухгалтерских документах, составляют не менее (15-20) % от общего объема продаж.

Скрытые затраты, вызванные внешними отказами, являются следствием обстоятельств:

- реализация необоснованно взятых обязательств,
- проработка и удовлетворение жалоб,

- выплаты неустоек потребителю, за срыв сроков и нарушение договорных обязательств,

- выезд специалистов к потребителю для устранения неисправностей,

- снижение уровня недовольности вследствие отзыва продукции.

Усилия по устранению неисправностей, выявленных вне компании, обычно направлены на возврат доверия потребителей, в противном случае это чревато потерей рынка.

Проблема при изготовлении гибких зубчатых колес ВЗП заключается в высоких затратах на обеспечение качества, а именно на устранение несоответствий заданным требованиям конструкторской и эксплуатационной документации.

Как отмечено в параграфе 1.1, основными причинами выхода из строя ВЗП являются: поломка гибкого колеса от усталостных трещин, возникающих во впадинах зубьев; разрушение подшипников качения генератора волн; проскок генератора волн при больших крутящих моментах [43, 104].

Основным фактором, ограничивающим нагрузочную способность ВЗП, является поломка гибких колес. Поломка обусловлена образованием и последующим ее развитием усталостной трещины по впадинам зубьев. Возникновение трещины провоцирует действие знакопеременных напряжений изгиба в ободке гибкого колеса, в отличие от обычных зубчатых колес, где разрушающими являются напряжения изгиба зуба. Следовательно, критической зоной гибкого колеса, т.е. местом где высока вероятность возникновения разрушения, является дно впадины зубчатого венца, имеющее сложную геометрическую форму.

Летно-конструкторские испытания и лабораторно-отрабочные исследования ВЗП свидетельствуют о влиянии геометрии зубчатого венца и технологии изготовления гибких колес на их долговечность. Это выражается в значительном разбросе ресурса работы гибких колес до поломки по причине изгибной усталости их стенки под зубчатым венцом. Собранные в производстве статистические данные сведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Статистические данные по отказам ВЗП при проведении испытаний на ресурс

Параметр	Количество, шт.
ВЗП, отработавшие требуемый ресурс	10
Отказы ВЗП по причине: – интенсивный износ зубьев из-за неравномерного распределения контактных напряжений	5
Отказы ВЗП по причине: – выкрашивание и надлом зубьев в следствие отклонения от параллельности и перекоса рабочих осей	2
Отказы ВЗП по причине: – трещина оболочки гибкого колеса	1
Отказы ВЗП по причине: – заклинивание ВЗП при упоре вершин зубьев колес на выходе зубьев из зацепления	1
Отказы ВЗП по причине: – разрушение гибкого подшипника качения генератора волн	3
Отказы ВЗП по причине: – повышенная вязкость смазочных материалов	1
Отбракованные гибкие колеса, не допущенные до сборки ВЗП	2
Итого гибких колес, участвующих в выборке	25

Статистические методы являются научно-методической базой информационного обеспечения процессов управления качеством. Они способствуют планированию, позволяют почерпнуть важные сведения, без потерь сократить объем информации и принять решение [103]. Практичность статистических методов обусловлена изменчивостью, наблюдаемой в ходе и результатах практически всех процессов даже в условиях их кажущейся

стабильности. С их помощью возможно эффективнее применить имеющиеся данные для принятия решений, что, в свою очередь, способствует постоянному росту качества продукции и процессов [25, 96].

Отказы ВЗП возникают в результате сочетания неблагоприятных факторов, превышающих возможности объекта (ВЗП) к их восприятию. Отказы характеризуются скачкообразной зависимостью степени повреждения объекта от наработки. По всем признакам отказы являются внезапными, т. к. интенсивность отказов не зависит от наработки ВЗП, т. е. вероятность отказа не зависит от предыдущей наработки объекта (не связана с постепенным накоплением повреждений). Таким образом, прогнозирование вероятности отказа вызывает сложности (по статистическим данным, собранным в производстве, вероятность отказа составляет 60%).

По статистике дефекты гибких колес в основном не подлежат доработке, уровень неисправимого брака на производстве доходит до 60%. На устранение этих несоответствий тратятся колоссальные средства.

Математическая статистика изучает вопросы сбора, обработки и анализа результатов производственной деятельности. Этот раздел науки содержит внушительное количество современных методов анализа и выявления дефектов. Статистические методы управления качеством являются неотъемлемой частью современных систем менеджмента качества, действующих на предприятиях России. К таким методам относится построение диаграммы Парето [68, 90].

При контроле качества анализ Парето – это инструмент структурирования данных, показывающий, из каких основных факторов состоит анализируемый объект. Диаграммой Парето называют построение, в котором строятся столбцы гистограммы в нисходящем порядке, начиная слева. Основой графика Парето является правило «80...20»: 80% проблем являются результатом 20 % причин.

Таким образом, выяснив причины появления основных дефектов, можно ликвидировать почти все потери, сосредоточив усилия на устранении именно этих потерь. Диаграмма Парето – это метод, позволяющий распределить усилия для решения возникающих проблем и обнаружить основные причины, которые нужно

проанализировать в первую очередь.

Правило Парето – принцип, который применим во множестве ситуаций. Принцип Парето можно применить к любой группе причин, вызывающих то или иное последствие, когда большая часть последствий вызвана малым количеством причин. Анализ Парето позволяет ранжировать отдельные факторы по значимости или важности, выявить и устранить в первую очередь те причины, которые вызывают наибольшее количество проблем (несоответствий).

По результатам разборки ВЗП и проведении диагностики деталей, была составлена карта дефектов. Результаты анализа иллюстрируются диаграммой Парето (рисунок 1.4)

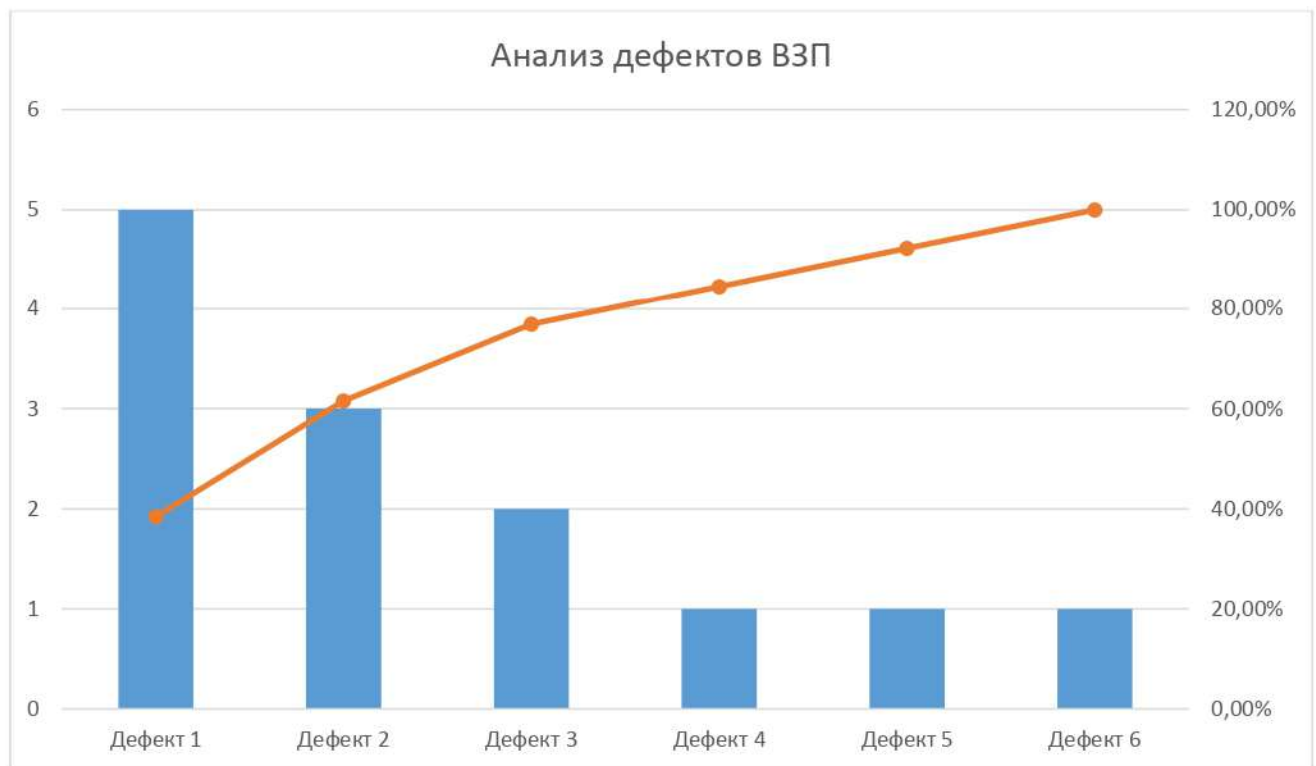


Рисунок 1.4 – Диаграмма Парето

Дефект 1 – интенсивный износ зубьев из-за неравномерного распределения контактных напряжений;

дефект 2 – разрушение гибкого подшипника качения генератора волн;

дефект 3 – выкрашивание и надлом зубьев в следствие отклонения от параллельности и перекоса рабочих осей;

дефект 4 – трещина оболочки гибкого колеса;

дефект 5 – заклинивание ВЗП при упоре вершин зубьев колес на выходе зубьев из зацепления;

дефект 6 – повышенная вязкость смазочных материалов.

Как видно из анализа, дефект по причине 6, который привел к незначительному повышению температуры и уровня шума, что не является критичным, имеет единичный характер. Указанный дефект требует разработки рабочей инструкции и мероприятий по дополнительному входному контролю смазки. Причины дефектов 1 – 5 сводятся к особо ответственным элементам ВЗП – гибкому колесу и подшпнику качения генератора волн. Ввиду нежесткости конструкции, гибкое колесо может иметь отклонения по соосности, неравномерности толщины стенки оболочки, профилю зуба. Разрушение подшпников качения генератора волн с гибкими кольцами происходит в следствие интенсивного износа дорожек качения.

Основной причиной разрушения гибкого колеса является усталость материала, происходящая от переменных напряжений изгиба в результате его деформации во время работы. Трещины чаще всего образуются во впадинах между зубьями и распространяются на гибкий цилиндр. Реже разрушение происходит из-за перегрузок или нарушений зацепления (проскоки, интерференция и т. д.).

Влияние зубьев на напряжения в зубчатом венце гибкого колеса проявляется в виде концентрации напряжений у ножки зубьев, различной жесткости зубчатого венца на участках зуба и впадины, а также дополнительного изгибающего момента в случае нагружения.

Ведь нагрузка на зубья зависит не только от нагрузки передачи, но и от размера зоны зацепления, распределения нагрузки в этой зоне, которые, в свою очередь, зависят от параметров зацепления, зазоров в размерной цепи кулачок – гибкое колесо, жесткости элементов передачи, точности их изготовления и т. д.

Привод с ВЗП предназначен для вращения солнечной батареи (СБ) космического аппарата (КА) и передачи генерируемой электроэнергии с СБ на КА. Последствие отказа ВЗП заключается в снижении эффективности работы СБ, что является определяющим фактором длительности функционирования КА на орбите.

Снизить вероятность возникновения риска внезапного отказа ВЗП возможно посредством выбора, реализации и контроля соответствующих управляющих действий.

Как было изложено выше, причины, вызывающие внезапный отказ ВЗП [44]:

- поломка гибкого колеса от усталостных трещин, возникающих во впадинах зубьев;

- изнашивание зубьев, обусловленное перекосом гибкого колеса, деформируемого с одного торца; прогрессирующее изнашивание – скольжением зубьев при вхождении в зацепление;

- разрушение подшипников качения генератора волн.

Изнашивание зубьев и поломка гибкого зубчатого колеса ВЗП определяется отклонениями геометрических размеров и формы зубчатого венца, проявляющимися, в конечном итоге, из-за несовершенства технологии механической обработки гибких колес и качества сборки ВЗП.

Разрушение подшипников качения генератора волн. У подшипников с гибкими кольцами интенсивно изнашиваются дорожки качения вследствие действия сил в зацеплении и сопротивления гибкого колеса деформированию. Это приводит к увеличению радиальных зазоров, соизмеримых с величиной радиальной деформации W_0 , искажению формы деформации и выходу из строя передачи. Дефект, связанный с износом дорожек качения, является конструктивным. Устранение указанного дефекта возможно путем совершенствования конструкции ВЗП в части перераспределения функций между ее конструктивными элементами.

В настоящее время при проведении контроля готовой продукции в производстве выявляется много несоответствий геометрии зубчатого венца гибких колес. В связи с чем заведомо увеличивается партия запуска и вынужденно применяется селективная сборка ВЗП приводов СБ, использующая некоторые критерии для оценки геометрии и взаимной сопрягаемости элементов передачи [78]. Ее основной недостаток — наличие незавершенного производства, что отрицательно сказывается на бухгалтерской отчетности.

В работе К. Исикавы [46] доступно описана система статистических методов, используемых для анализа процессов и решения задач с целью улучшения процесса. Среди них инструменты по сбору данных, гистограммы, диаграммы Парето, диаграммы рассеяния, причинно-следственные диаграммы (диаграмма Исикавы), диаграммы расслоения (стратификация), графики и контрольные карты. Э. Деминг также считает их простыми, но эффективными инструментами статистического управления процессами (СУП).

На рисунке 1.5 представлена диаграмма [33, 90], оценивающая влияние различных факторов на величину неустраняемого брака по причине отклонений от геометрических параметров гибких зубчатых колес (профиль зубьев, толщина обода под зубчатым венцом, шаг зубьев).

Анализ факторов, влияющих на отклонения от геометрических параметров гибких зубчатых колес показывает, что главной причиной дефектов в виде разности шага зубьев, разности толщины обода под зубчатым венцом является искажение формы и геометрии заготовки. Необходимо также отметить, что применяемый в настоящее время способ контроля не выявляет дефекты в виде искажения профиля зуба. Контроль профиля производится визуально под микроскоп путем сравнения с шаблоном эталона.

Формообразование оболочки и зубообразование являются наиболее сложными операциями при изготовлении гибкого колеса. Тонкостенная заготовка гибкого зубчатого колеса не обладает достаточной жесткостью и под действием давления инструмента, станочного приспособления и других нагрузок, неизбежных при механической обработке, изменяют свою форму и размеры.

Решить проблему управления качеством гибких зубчатых колес можно путем обеспечения жесткости заготовки в процессе базирования в оснастке и при ее дальнейшей механической обработке.

Один из путей решения задачи управления качеством изготовления гибкого колеса – это создание приспособления, обеспечивающего жесткость заготовки в процессе базирования в оснастке и при ее дальнейшей механической обработке.

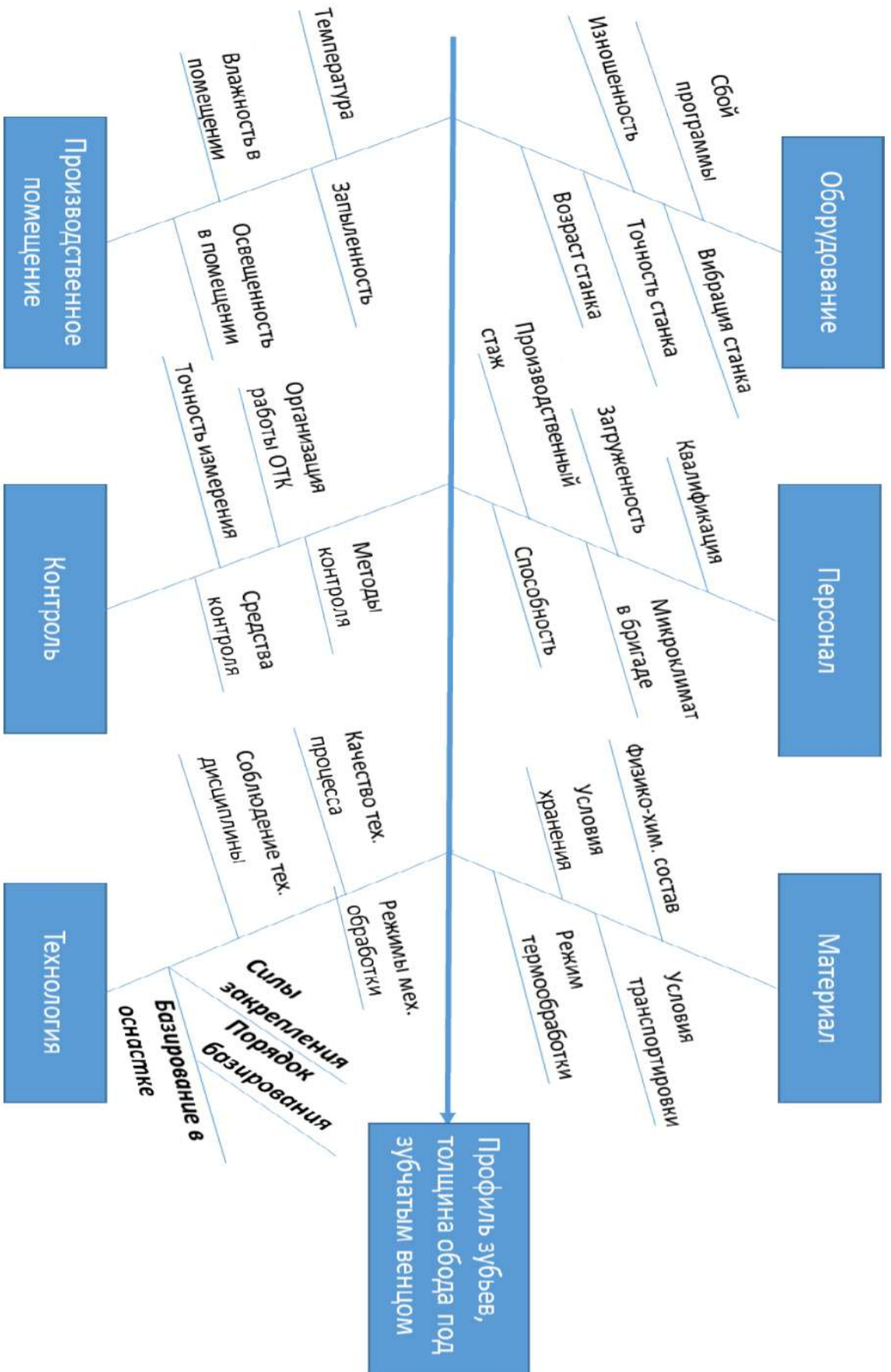


Рисунок 1.5 – Причинно-следственная диаграмма

У гибких колес зубья имеют такую же форму и размеры, как и у зубьев обычных передач. Более распространены зубья с эвольвентным профилем, поскольку это позволяет использовать стандартный зубонарезной инструмент. Существует две технологии изготовления: нарезание и накатка зубья гибкого колеса. Процесс нарезания зубьев реализуется на оправках (при деформированном или недеформированном гибком колесе). При деформированном волнообразователем гибком колесе процесс нарезания зубьев моделирует работу волновой передачи, в которой при вращении волнообразователя перемещение режущего инструмента повторяет движение имитируемого жесткого колеса. В качестве режущего инструмента при нарезании зубьев гибкого колеса по методу обкатки используются червячные фрезы.

Нарезание зубьев гибкого колеса в условиях базирования на разжимных оправках приводит к снижению жесткости и растяжению заготовки. В следствие чего увеличивается диаметр делительной окружности, вызывая разность в ширине зубьев, неравномерность шага, что в конечном итоге может создать натяг при зацеплении. Поэтому необходимо изучить влияние разницы шага зубьев на точность зацепления гибкого и жесткого колес.

Обеспечить точность геометрии зубчатого венца гибкого колеса, тем самым повышая сопротивление усталости последнего, возможно путем изменения расстояния между делительной окружностью колеса и червячной фрезой, то есть смещением инструмента в процессе нарезания зубьев. Выполненный комплекс исследований позволит предложить рекомендации по выбору оптимальной технологии нарезания зубчатого венца гибкого колеса в условиях базирования на разжимных оправках.

1.3 Анализ факторов, влияющих на точность установки и закрепления заготовки в приспособлении. Технические решения в конструкциях технологической оснастки, использование материалов с памятью формы в их конструкциях

Показатели точности деталей рассматриваемого класса (отклонение от соосности поверхностей) определяется величиной погрешности ориентации заготовки относительно станочного приспособления ε_y по отношению к требуемой [89]. Погрешностью установки ε_y является отклонение фактически достигнутого положения заготовки при установке в станочное приспособление (СП) от требуемого. ε_y возникает по причинам неоднородности качества поверхностей заготовок, не совмещения измерительных и технологических баз, неточности изготовления и износа опор СП, нестабильности сил закрепления и т. д. ε_y вычисляют по погрешностям: базирования ε_b , закрепления ε_z и положения $\varepsilon_{пр}$; ε_b является случайной погрешностью; ε_z содержит как случайные составляющие погрешности, объединяемые в основную $\varepsilon_{z о}$, так и закономерно изменяющуюся систематическую погрешность $\varepsilon_{z и}$, связанную с изменением формы поверхности контакта установочного элемента в результате его износа; $\varepsilon_{пр}$ включает закономерно изменяющуюся систематическую погрешность $\varepsilon_{и}$, определяемую возрастающим изнашиванием установочных элементов, а также постоянные систематические погрешности $\varepsilon_{ус}$, определяемые погрешностями изготовления и сборки СП и ε_c , определяющую установку приспособления на станке. Конструктивная схема СП существенно оказывает влияние только на погрешность базирования, которая является величиной случайной. Остальные составляющие отклонения являются систематическими, их возможно компенсировать поднастройкой инструмента.

Далее был проведен анализ известных технологических процессов для механической обработки прецизионных оболочковых деталей.

В процессе проведения исследований выполнен анализ существующих конструктивных схем станочных приспособлений, позволяющих реализовать технологический процесс получения тонкостенных цилиндрических деталей методом шлифования.

В процессе обработки информации, полученной в результате изучения научно-технической литературы при обработке тонкостенных цилиндрических

деталей на круглошлифовальных станках традиционно в качестве станочных приспособлений используют патроны, оправки и другие приспособления.

Известны оправки цилиндрические для установки заготовок с гарантированным зазором (рисунок 1.6) конструктивно простые, позволяют вести многоместную обработку, но не обеспечивают точного центрирования [89].

Заготовки с точным отверстием и небольшой высоты шлифуют на длинных центровых оправках с небольшой конусностью. Диаметр оправки с одной стороны на 0,01 мм меньше номинального диаметра отверстия шлифуемой заготовки; диаметр оправки с другой стороны — превышает диаметр отверстия заготовки на 0,015 мм. Конусность оправки должна быть не более 0,015 мм на 100 мм длины [48]. Контакт с базовыми поверхностями — в точке или по линии торца.

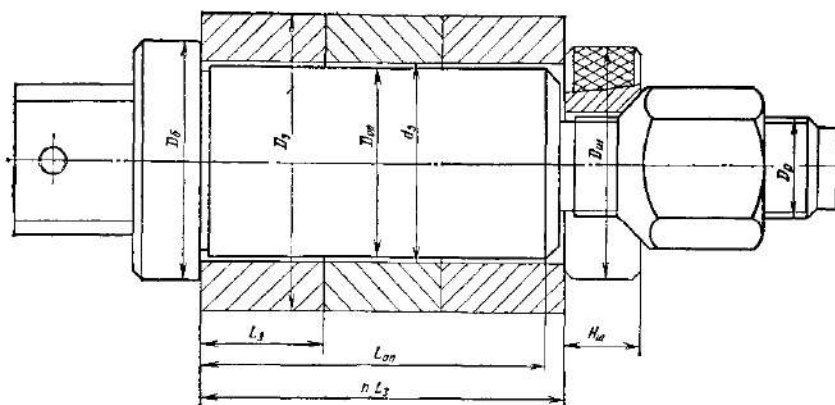


Рисунок 1.6 – Цилиндрическая оправка для установки заготовок с гарантированным зазором

Оправки цилиндрические прессовые (рисунок 1.7) используют для точной обработки толстостенных заготовок с большими силами резания [89]. Они имеют центровое исполнение. Для точной установки заготовки по длине используют упорные съемные кольца. Недостатки прессовых оправок следующие: значительное вспомогательное время, необходимость в специальном прессе для запрессовки заготовки и распрессовки обработанной детали; быстрое изнашивание рабочих шеек, возможные повреждения базовой поверхности в результате прессовой установки и снятия заготовки, что особенно характерно при обработке заготовок из титановых сплавов. Контакт с базовой поверхностью — равномерный.

Для шлифования заготовок с более широким допуском по внутреннему диаметру используют разжимные оправки.

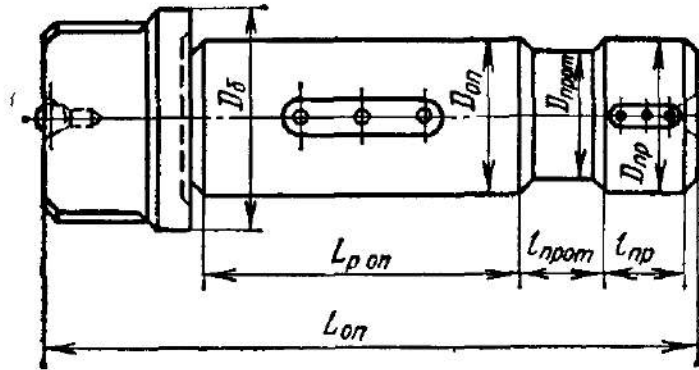


Рисунок 1.7 – Цилиндрическая оправка для прессовой установки заготовки

Оправки кулачковые (рисунок 1.8) имеют большой радиальный ход кулачков и позволяют устанавливать заготовки с различными номинальными диаметрами базовых отверстий. Оправки с большим четным числом кулачков в одном ряду центрируют точнее.

Оправки цанговые (рисунок 1.9) имеют меньший радиальный ход лепестков их рабочего элемента – цанги, но имеют, по сравнению с кулачковыми, меньшую погрешность установки [48, 89]. Контакт с базовой поверхностью заготовки – в локальных зонах.

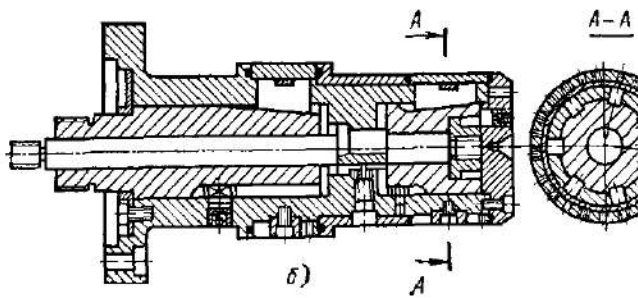


Рисунок 1.8 – Кулачковая

оправка

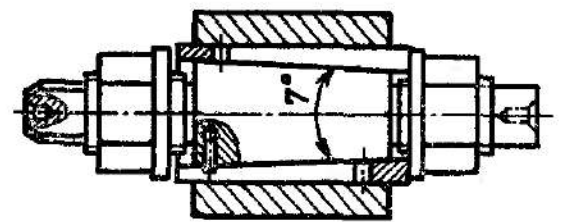


Рисунок 1.9 – Цанговая оправка

Оправки с гофрированными втулками (рисунок 1.10) применяются для изготовления точных деталей. Они используются для обработки зубчатых колес, колец, втулок, гильз (в том числе тонкостенных) [48].

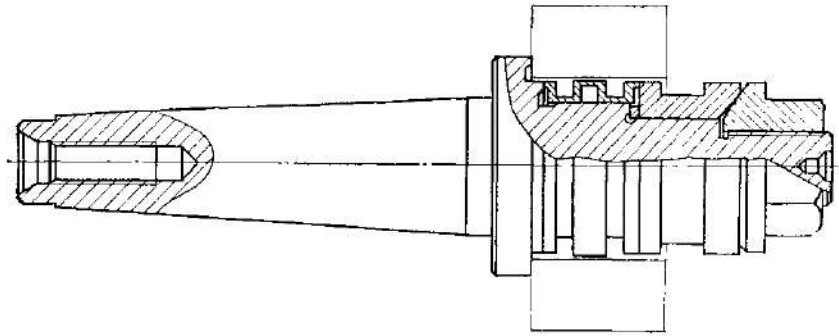


Рисунок 1.10 – Оправка с гофрированной втулкой

Под действием осевого сжимающего усилия гофрированная втулка упруго деформируется. При этом наружный ее диаметр увеличивается, а внутренний — уменьшается. Внутренним диаметром втулка устанавливается на валу оправки, а наружным — точно центрирует и крепит заготовку. Вид контакта гофрированной втулки с заготовкой – кольцевые линии, расположенные вдоль образующей полой заготовки.

В конструкциях оправок для закрепления цилиндрических заготовок в качестве средства центрирования и закрепления заготовки успешно применяют вязкий гидропласт (рисунок 1.11) (в составе полихлорвиниловой смолы и других веществ). Принцип действия таких конструкций основан на равномерной передаче давления гидропласта на стенки центрирующей втулки [48]. Контакт по базовой поверхности заготовки ограничен локальными зонами.

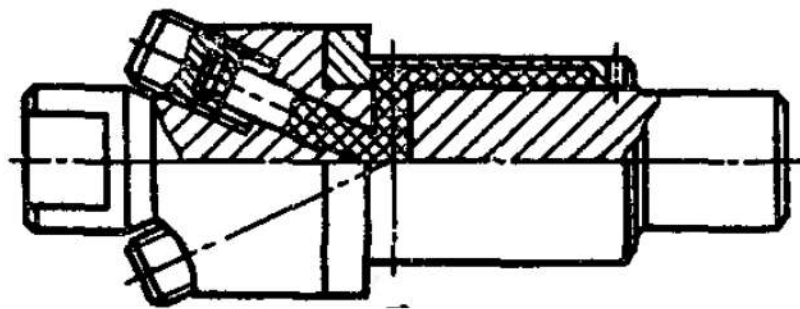


Рисунок 1.11 – Оправка с гидропластом

По материалам публикаций была проведена проработка статистических данных о точности установки заготовки в оправках рассмотренных схем и полученная информация отражена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Значения погрешности установки для различных конструктивных схем оправок

Тип оправки	Квалитет обработки базы заготовки	ϵ_y , мкм
Цанговые, кулачковые	7...9	20...50
Цилиндрические, для установки заготовок, с гарантированным зазором и с закреплением по торцу	8...10	10...20
Оправки с гофрированными втулками	7...9	10...15
Оправки с гидропластом	7...9	10...15
Конусные оправки	7...9	3...8
Цилиндрические, для установки заготовок с гарантированным натягом	7...9	2...3

Прецизионное шлифование можно выполнять на бесцентрово-шлифовальных станках [87].

Шлифование на жестких опорах (рисунок 1.12) применяется для обработки тонкостенных деталей. Оно позволяет устранять отклонение от соосности наружного и внутреннего диаметров, а также разностенность втулок, гильз и других полых деталей типа колец. Заготовка в процессе шлифования базируется внутренней цилиндрической поверхностью на неподвижных опорах.

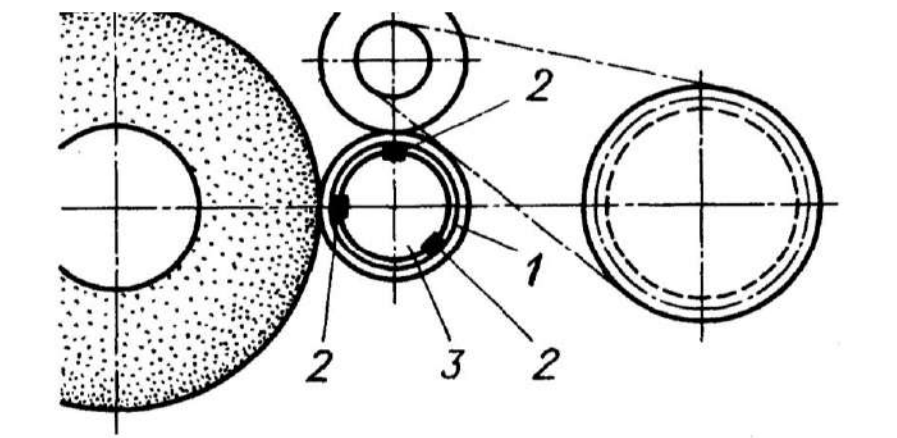


Рисунок 1.12 – Схема прецизионного шлифования на бесцентрово-шлифовальных станках с использованием жесткой оправки:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – жесткие опоры; 3 – кронштейн с оправкой; 4 – ведущие ролики; 5 – шлифовальный круг

Для этого на бесцентрово-шлифовальном станке вместо суппорта с опорным ножом установлен кронштейн с оправкой 3, на которой закреплены жесткие опоры 2. Обрабатываемая деталь 1 с помощью ведущих роликов 4 поджимается и вращается на этих опорах. Шлифовальный круг 5 в свою очередь прижимает деталь к опоре 2 и копирует в процессе шлифования по наружному диаметру внутреннюю цилиндрическую поверхность.

Приспособление для шлифования гильз на жестких опорах показано на рисунке 1.13.

На столе подвижной бабки ведущего круга закреплена плита, несущая кронштейн 2 с оправкой 3. Вдоль оси оправки выполнены три продольных паза, в которых закреплены твердосплавные жесткие опоры 4. Опоры по длине оправки расположены двумя поясами соответственно шлифуемым поверхностям. Для облегчения установки обрабатываемой детали 1 на оправку 3 служит направляющий стакан 8 с заходным конусом, вынесенный за пределы рабочей зоны станка.

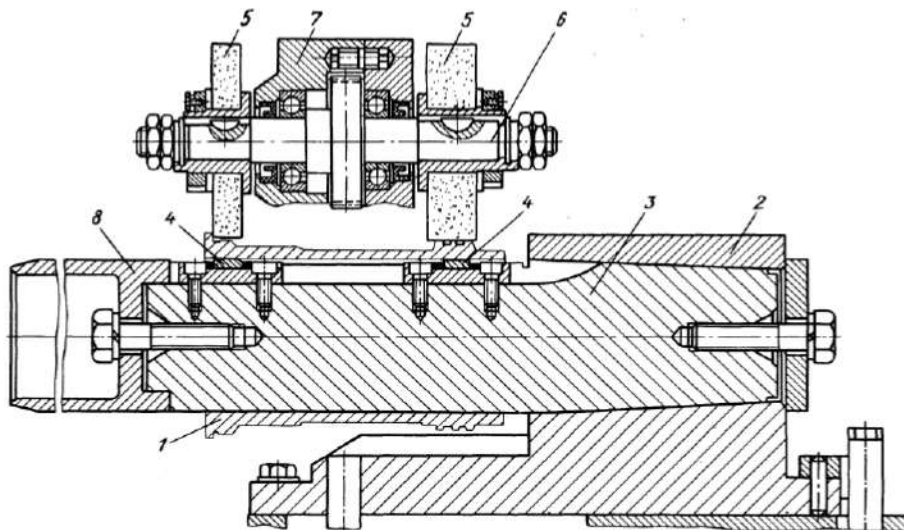


Рисунок 1.13 – Приспособление для шлифования на жестких опорах:

1 – обрабатываемая заготовка; 2 – кронштейн; 3 – оправка; 4 – жесткие опоры из твёрдого сплава; 5 – ведущие абразивные ролики; 6 – ось; 7 – узел вращения ведущих роликов; 8 – направляющий стакан

На плите расположена стойка, на которой смонтирован узел 7 вращения ведущих роликов. В корпусе на оси 6 закреплены два ведущих абразивных ролика 5. Ролики изготовляют из нормального электрокорунда на вулканитовой связке твердостью Т. Вращение роликов осуществляется от привода вращения ведущего круга.

Для плавности и легкости вращения гильзы на жестких опорах необходимо, чтобы участки контакта жестких опор имели минимальную шероховатость ($Ra = 0,1$ мкм). Лучше всего эти участки доводить алмазной пастой.

В процессе шлифования разностенность гильз уменьшается с 50 — 250 до 10 — 20 мкм. Простота наладки и установки гильзы на станок позволила повысить производительность операции примерно в 2 раза по сравнению с шлифованием на центровых круглошлифовальных станках.

По результатам анализа существующих конструктивных схем станочных приспособлений, позволяющих реализовать технологический процесс получения тонкостенных цилиндрических деталей методом шлифования, сделаны следующие выводы.

Использование в процессе шлифования жестких цилиндрических оправок с поджимом по торцу не обеспечивает требуемой точности установки, следовательно, не обеспечивает заданной предельной разнотолщинности деталей.

Приспособления, в которых базирование и закрепление деталей осуществляется по цилиндрическим поверхностям на разжим или на обжим (оправки цанговые, оправки с гидропластом, мембранные патроны), обеспечивает отклонения центрирования более 20...50 мкм за счет изменчивого перемещения зажимающих поверхностей в радиальном направлении. Еще один недостаток заключается в радиальном деформировании обрабатываемой тонкостенной заготовки на величину большую, чем точность обработки (оправки с гидропластом, оправки с гофрированными трубками, оправки с тарельчатыми пружинами, и т. д.) вследствие недостаточной точности регулирования рабочего хода зажимающих поверхностей, что ведет к значительному проценту брака.

Использование в процессе шлифования цилиндрических прессовых или конических оправок, обеспечивающих необходимую точность обработки, ограничено сложностью обеспечения надёжного закрепления обрабатываемой заготовки вследствие её деформируемости, определяемой малым поперечным сечением и материалом заготовки с невысоким модулем упругости, характерным для титановых сплавов. К тому же установка заготовки из титанового сплава путём напрессовки на оправку может вызвать задиры на базовой поверхности.

Проблемой является обеспечение жесткости заготовки и точности ее формы в приспособлении.

Поставленная задача может быть решена путём применения цилиндрической оправки, обеспечивающей закрепление заготовки за счёт радиального натяга, вызванного контролируемым радиальным перемещением её рабочей поверхности в процессе закрепления заготовки.

Указанные радиальные перемещения рабочей поверхности оправки можно получить, если её изготовить из материала, обладающего эффектом памяти формы (ЭПФ), способным уменьшать свой диаметр при нагреве (этап установки заготовки) и увеличивать диаметр (этап закрепления и обработки) при охлаждении.

ЭПФ представляет собой необычный пример обратимой пластичности кристаллов. Данный эффект наиболее ярко проявляется в материалах, испытывающих термоупругое мартенситное превращение, и наблюдается при температурах, допускающих существование мартенситной и аустенитной фаз.

Впервые термоупругие мартенситные превращения представлены в работах Г. В. Курдюмова и Л. Г. Хандросома еще в 40-х годах 20 века. В это же время начали исследовать основную логику и принципы термоупругих мартенситных переходов, влияние различных факторов на кинетику превращений этого типа и ряд физических свойств сплавов, претерпевающих термоупругое превращение [66].

Развитие экспериментальных и теоретических исследований в области эффекта памяти формы нашло отображение в работах зарубежных и отечественных исследователей: 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. [107, 109, 23, 24, 51, 59-62, 101]

Феномен ЭПФ заключается в следующем. Образец в виде какого-либо полуфабриката (пруток, лента, проволока и т.п.), обладающий эффектом памяти формы, пластически деформируют при температуре T^D выше температуры начала прямого мартенситного превращения M^H с целью придания ему определенной формы, затем охлаждают до температур, обеспечивающих протекание (полное или частичное) мартенситного превращения и деформируют в этой температурной области до получения плоской формы. При нагреве выше температуры конца обратного мартенситного превращения A^K образец вновь восстанавливает форму, которая была ему придана при температуре $T^D > M^H$.

Наиболее ярко ЭПФ выражен в никелиде титана или нитиноле. Данный сплав нашел самое широкое применение в машиностроении из-за своих физико-механических свойств, обеспечивающих его удачное применение на практике. В. Б. Кроссом, А. Х. Кариотисом, Ф. Д. Стилмером и др. исследовано влияние деформации растяжением, сжатием на восстановление формы никелида титана [107, 109].

Свойство этих материалов восстанавливать форму после нагрева нашло в трансформирующихся конструкциях; устройствах для регулирования расхода жидкости и газов; силовых приводах; технологических процессах сборки разъемных и неразъемных соединений [26, 77, 80].

Практическое применение эффекта памяти формы нашло отражение в технологической оснастке и приспособлениях: силовой прижим для формования элементов конструкций из полимерных композиционных материалов, устройство для развальцовки труб в трубных решетках [9, 10, 16, 17, 98, 99]. Устройство с силовым приводом на основе ЭПФ применяется в процессе прецизионной сборки трубопроводов, обеспечивая управление уровнем остаточных напряжений в сварных швах трубопроводов [52].

Для обеспечения качества изготовления гибких колес ВЗП требуется базирование с управляемым перемещением закрепления, придающее форму заготовке в процессе механической обработки.

1.4 Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования

1. Анализ выполненной классификации тонкостенных цилиндрических деталей показывает, что наиболее сложными в технологическом плане являются нежесткие прецизионные тонкостенные цилиндрические детали типа стакана с толщиной стенки 0,3...1,0 мм, имеющие стойкость к контактной усталости в условиях напряженного состояния, работающие в условиях вакуума, радиационного излучения и т. д. Ярким представителем этого класса деталей являются гибкие колеса волновых зубчатых передач приводов солнечных батарей космических аппаратов.

2. 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. Задача обеспечения качества изготовления указанных деталей, работающих в условиях космического пространства, очевидно, острее аналогов в других отраслях, т. к. отказ этого элемента влечет за собой невыполнение целевых задач всего космического аппарата. Применяя статистические методы управления качеством выявлено, что выход из строя волновых зубчатых передач происходит в следствие нескольких видов дефектов, имеющих различную природу возникновения. Часть дефектов связана с несовершенством конструкции, часть носит технологический характер. Гибкие колеса волновых зубчатых передач являются сложным в технологическом плане представителем класса прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей.

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 закрепления, придающее форму заготовке в процессе механической обработки.

3. Существующие в настоящее время станочные приспособления не обеспечивают точность размеров и формы, предъявляемую требованиями конструкторской документации. Для обеспечения базирования с управляемым перемещением закрепления предлагается использовать оправку с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы. Необходима разработка модели для управления напряженно-деформированным состоянием и методика проектирования процесса управляемого базирования тонкостенных цилиндрических деталей. Также, необходимо оценить влияние базирования с управляемым перемещением закрепления и оправки на точность шага зубчатого венца, являющегося основным параметром детали, изменение его геометрических характеристик во время обработки.

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

Задачи:

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.

ГЛАВА 2 Управление качеством волновой зубчатой передачи на этапах ее жизненного цикла

2.1 Разработка модели обеспечения качества волновой зубчатой передачи

Для формирования требуемых характеристик и свойств ВЗП на всех этапах ее жизненного цикла была составлена структурная модель обеспечения качества, представляющая собой схему взаимосвязанных элементов. Модель обеспечения качества (рисунок 2.1) состоит из блоков, отображающих этапы обеспечения качества ВЗП.

Для ВЗП приводов СБ основными свойствами являются: работоспособность до наработки заданного ресурса, а также устойчивая и точная работа всех звеньев ВЗП. На данные свойства влияют параметры качества элементов ВЗП, таких как: гибкое колесо, гибкий подшипник качения, генератор волн и вал генератора.

Гибкое колесо должно быть устойчиво к циклическим знакопеременным нагрузкам и износу зубьев. Кольца гибкого подшипника, уменьшающего трение между гибким колесом и генератором волн должны обеспечивать заданную долговечность. В профильном соединении генератора волн и вала генератора необходимо обеспечить угловую точность для минимизации люфта при реверсивности движения.

После определения основных параметров качества элементов ВЗП для обеспечения тактико-технических требований заказчика проведен анализ видов и последствий потенциальных несоответствий конструкции ВЗП (DFMEA) и процесса изготовления гибкого колеса ВЗП (PFMEA).

При проведении анализа видов и последствий потенциальных несоответствий конструкции ВЗП (DFMEA) был проведен структурный и функциональный анализ. При проведении анализа отказов были определены возможные отказы ВЗП при невыполнении элементами ВЗП основных функций:

- заклинивание ВЗП вследствие разрушения гибкого колеса;

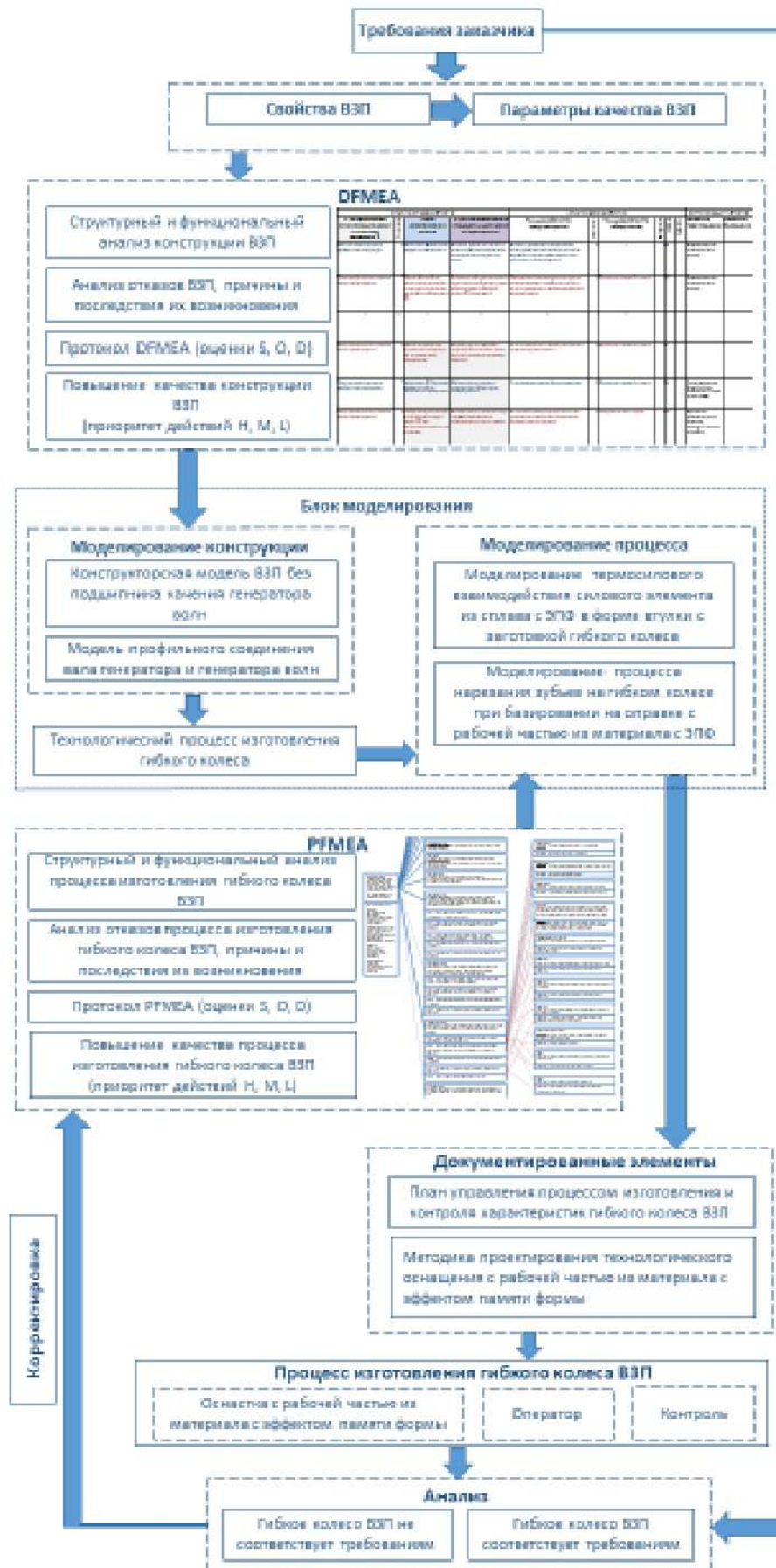


Рисунок 2.1 – Модель обеспечения качества ВЗП

- заклинивание или проскок зубьев гибкого колеса относительно зубьев жесткого колеса вследствие износа зубьев гибкого колеса ВЗП;
- проскок генератора волн (вращение вала генератора при невращающемся выходном вале);
- заклинивание ВЗП вследствие разрушения гибкого подшипника генератора волн;
- некорректный угол поворота генератора волн и других звеньев ВЗП при реверсивности движения вала генератора.

Далее, для всех несоответствий были определены потенциальные причины возникновения отклонений и последствия их возникновения. Итогом проведенных анализов стали структурная и функциональная схемы, схема отказов, заполнение бланка протокола проведения DFMEA с ранжированием отказа S, возможности возникновения отказа O и мер обнаружения отказа D. В заключении по суммированию данных баллов была установлена очередность действий для предотвращения рисков возникновения отказов (H (high), M (medium), L (low)).

Следующим этапом проведена оценка рисков, возникающих в процессе механической обработки гибкого колеса (PFMEA). Аналогично процессу DFMEA при PFMEA проводится структурный и функциональный анализ процесса механической обработки гибкого колеса, а также анализ отказов.

Установлен приоритет действий для устранения рисков возникновения отказов (H(high), M(medium), L(low)). Установленные приоритеты действий позволили разработать мероприятия, направленные на предупреждение причин возникновения отказов в процессе механической обработки гибких колес. Полученные результаты занесены в бланк протокола PFMEA-анализа.

Следующим блоком модели обеспечения качества является блок моделирования. В него входит моделирование конструкции и моделирование процесса.

В блоке «Моделирование конструкции» представляются мероприятия, направленные на повышение качества конструкции ВЗП, определенные в

результате проведения DFMEA: оптимизация конструкции ВЗП путем перераспределения функций между ее конструктивными элементами и оценка влияния точности профиля на величину бокового зазора в профильном соединении.

В блоке «Моделирование процесса» представляются мероприятия, направленные на повышение качества процесса механической обработки гибких колес ВЗП, определенные в результате проведения PFMEA: моделирование процесса базирования с контролируемым натягом при механической обработке гибких зубчатых колес в приспособлении – спутнике и моделирование процесса нарезания зубчатого венца гибкого колеса при базировании с управляемым усилием закрепления.

Оценивая модель процесса базирования была разработана методика проектирования приспособления - спутника с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ) для базирования прецизионных тонкостенных деталей. Такие приспособления, позволяющие использовать феноменальные свойства материалов с ЭПФ, обеспечивают стабильность требуемых перемещений своих рабочих поверхностей в радиальном направлении и способны развивать значительные рабочие усилия.

По результатам проведения PFMEA разработан план управления процессами изготовления и контроля характеристик гибкого колеса ВЗП. В плане управления для каждой элементарной контрольной операции процесса прописываются методы контроля и управления ключевыми характеристиками, а также планы реагирования на выявляемые отклонения.

После блока подготовки производства следует блок самого процесса изготовления гибкого колеса ВЗП. На входе в модель процесса механической обработки будет заготовка гибкого колеса. Используя приспособление - спутник с рабочей частью из материала с ЭПФ для базирования прецизионных тонкостенных деталей, а также технологию процесса нарезания зубчатого венца гибкого колеса при базировании с контролируемым натягом на выходе получим деталь (гибкое зубчатое колесо).

Заключительным блоком модели обеспечения качества является анализ функционирования гибких зубчатых колес в составе привода с ВЗП на соответствие требованиям заказчика. В результате анализа гибкие колеса либо удовлетворяют требованиям заказчика и тогда процесс считается высокого качества, либо не соответствуют требованиям и, следовательно, необходимо провести дополнительный анализ всего процесса, выявить несоответствия и провести корректировку.

2.2 Оценка и анализ рисков потенциальных отказов, возникающих в процессе проектирования волновой зубчатой передачи на основе методики DFMEA

FMEA-анализ является популярным инструментом менеджмента качества, обеспечивающим снижение рисков и имеющим широкое распространение в автомобильной и авиационной отраслях [13, 79, 82, 83].

FMEA конструкции (DFMEA) представляет собой рассмотрение изначально созданной конструкции исследуемого объекта [37]. Это процедура, используемая в технике для изучения возможности варианта проектирования, наиболее соответствующего поставленным целям и требованиям технического задания. Итоговым документом анализа является протокол, содержащий основные функции конструкции и анализирующий потенциальные причины возникновения отказов.

DFMEA в соответствии с первым международным руководством по анализу неисправностей и последствий отказов [106] предполагает проведение следующих стадий:

- 1) структурный анализ;
- 2) функциональный анализ;
- 3) анализ отказов;
- 4) оценку рисков;
- 5) разработку мероприятий по снижению рисков.

Применим методiku DFMEA для повышения качества конструкции ВЗП. Данный метод помогает улучшить конструкцию ВЗП и предусмотреть необходимые технологические меры, предупреждая появление и снижая комплексный риск возникновения дефектов. Для проведения анализа DFMEA была создана команда из пяти специалистов, был определен план проведения DFMEA анализа и сформированы основные требования к конструкции ВЗП.

Структурный анализ конструкции. После детального анализа ВЗП, для проведения DFMEA было построено дерево структурного анализа, представленное на рисунке 2.2

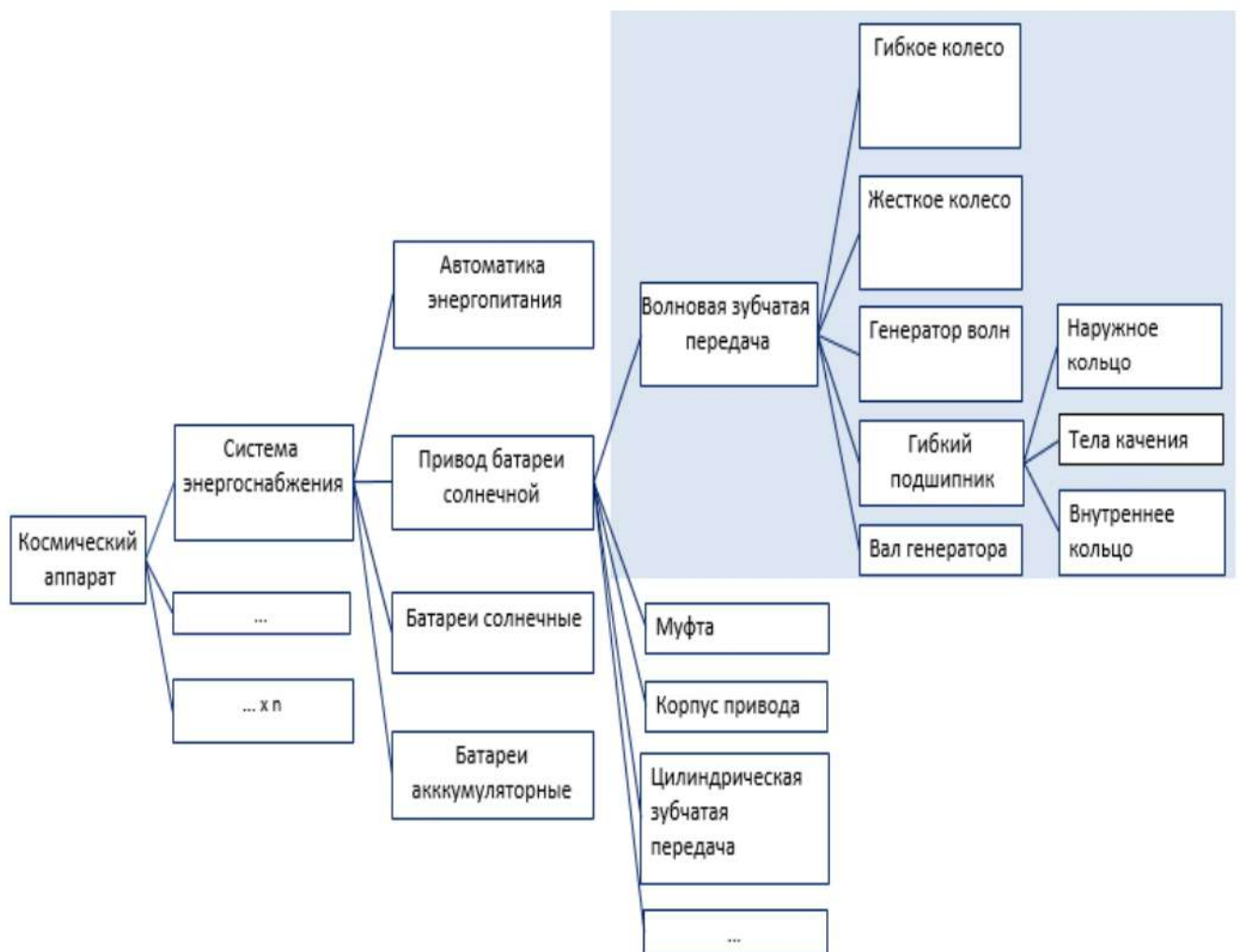


Рисунок 2.2 – Дерево структурного анализа ВЗП

Функциональный анализ конструкции. После рассмотрения структурных элементов конструкции были определены функции данных структурных элементов, описывающие их предназначение. Результатом функционального анализа стало дерево функционального анализа, представленное на рисунке 2.3

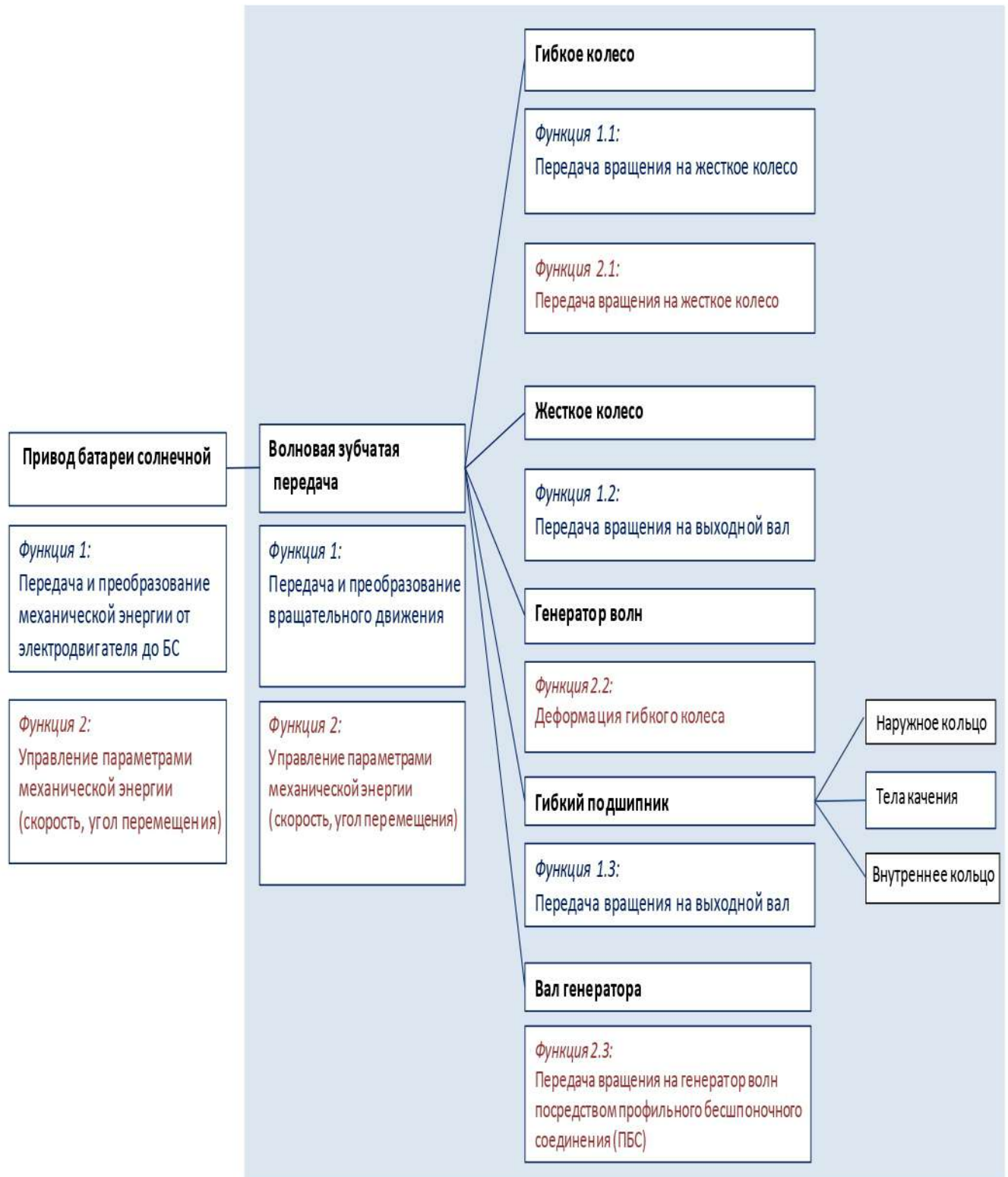


Рисунок 2.3 – Дерево функционального анализа ВЗП

После проведения структурного анализа и функционального анализа заполняется бланк протокола DFMEA «Этап 2» и «Этап 3», фрагмент бланка представлен на рисунке 2.4

Структурный анализ (Этап 2)			Функциональный анализ (Этап 3)		
1. Следующий верхний уровень системы	2. Рассматриваемый элемент	3. Следующий или нижний уровень или тип характеристики	1. Функция и требования следующего верхнего уровня	2. Функция и требование рассматриваемого элемента	3. Функция и требование следующего нижнего уровня
№ 1 Привод батареи солнечной (БС)	Волновая зубчатая передача	Гибкое колесо	<p><u>Функция:</u> передача и преобразование механической энергии от электродвигателя до БС</p> <p><u>Требование:</u> надежность работы при заданном ресурсе</p>	<p><u>Функция:</u> передача и преобразование вращательного движения</p> <p><u>Требование:</u> надежность работы при заданном ресурсе</p>	<p><u>Функция:</u> передача вращения на жесткое колесо</p> <p><u>Требование:</u> устойчивость к циклическим переменным контактным напряжениям</p>
		Жесткое колесо	<p><u>Функция:</u> передача и преобразование механической энергии от электродвигателя до БС</p> <p><u>Требование:</u> надежность работы при заданном ресурсе</p>	<p><u>Функция:</u> управление параметрами механической энергии (скорость, угол перемещения)</p> <p><u>Требование:</u> обеспечить заданную точность преобразования движения</p>	<p><u>Функция:</u> передача вращения на жесткое колесо</p> <p><u>Требование:</u> устойчивость к износу зубьев</p>
		Генератор волн	<p><u>Функция:</u> управление параметрами механической энергии (скорость, угол перемещения)</p> <p><u>Требование:</u> обеспечить заданную точность преобразования движения</p>	<p><u>Функция:</u> передача и преобразование вращательного движения</p> <p><u>Требование:</u> надежность работы при заданном ресурсе</p>	<p><u>Функция:</u> передача вращения на выходной вал</p>
		Гибкий подшипник	<p><u>Функция:</u> передача и преобразование механической энергии от электродвигателя до БС</p> <p><u>Требование:</u> надежность работы при заданном ресурсе</p>	<p><u>Функция:</u> управление параметрами механической энергии (скорость, угол перемещения)</p> <p><u>Требование:</u> обеспечить заданную точность преобразования движения</p>	<p><u>Функция:</u> деформация гибкого колеса (ГК)</p> <p><u>Требование:</u> обеспечивать постоянную кривизну деформированного ГК в пределах зон зацепления</p>
		Вал генератора	<p><u>Функция:</u> управление параметрами механической энергии (скорость, угол перемещения)</p> <p><u>Требование:</u> обеспечить заданную точность преобразования движения</p>	<p><u>Функция:</u> передача и преобразование вращательного движения</p> <p><u>Требование:</u> надежность работы при заданном ресурсе</p>	<p><u>Функция:</u> уменьшение трения между гибким колесом и генератором волн</p> <p><u>Требование:</u> обеспечить ресурс при требуемой надёжности</p>

Рисунок 2.4 – Фрагмент бланка протокола DFMEA «Этап 2» и «Этап 3»

Анализ отказов. Отказом является нарушение работоспособности объекта, при котором система или элемент перестает выполнять целиком или частично свои функции. При невыполнении элементами ВЗП основных функций могут возникать следующие отказы:

- заклинивание ВЗП вследствие разрушения гибкого колеса;
- заклинивание или проскок зубьев гибкого колеса относительно зубьев жесткого колеса вследствие износа зубьев гибкого колеса ВЗП;
- проскок генератора волн (вращение вала генератора при невращающемся выходном вале);
- заклинивание ВЗП вследствие разрушения гибкого подшипника генератора волн;
- некорректный угол поворота генератора волн и других звеньев ВЗП при реверсивности движения вала генератора.

Также для каждого отказа были определены потенциальные причины возникновения отказов и последствия возникновения отказов. После проведения анализа было построено дерево отказов, представленное на рисунке 2.5.

Оценка рисков. Для каждого последствия отказа был определен критерий значимости S при помощи таблицы общих критериев оценки значимости [106]. Результаты оценки занесены в «Этап 4» таблицы бланка протокола DFMEA (рисунок 2.6).

Полученные значения значимостей последствий отказов показывают, что значимость последствий будет умеренно-высокой для всех отказов (оценка 7) и может привести к выходу из строя изделия и (или) снижению ресурса его работы. Возникновение отказа приведет к значительным затратам потребителя изделия.

Следующим этапом для каждой потенциальной причины отказа определена оценка возможности возникновения отказа (O) и оценка мер обнаружения отказа (D). Данные оценки проставлялись с помощью таблиц критериев возможности возникновения (O) и оценки обнаружения (D) [106].

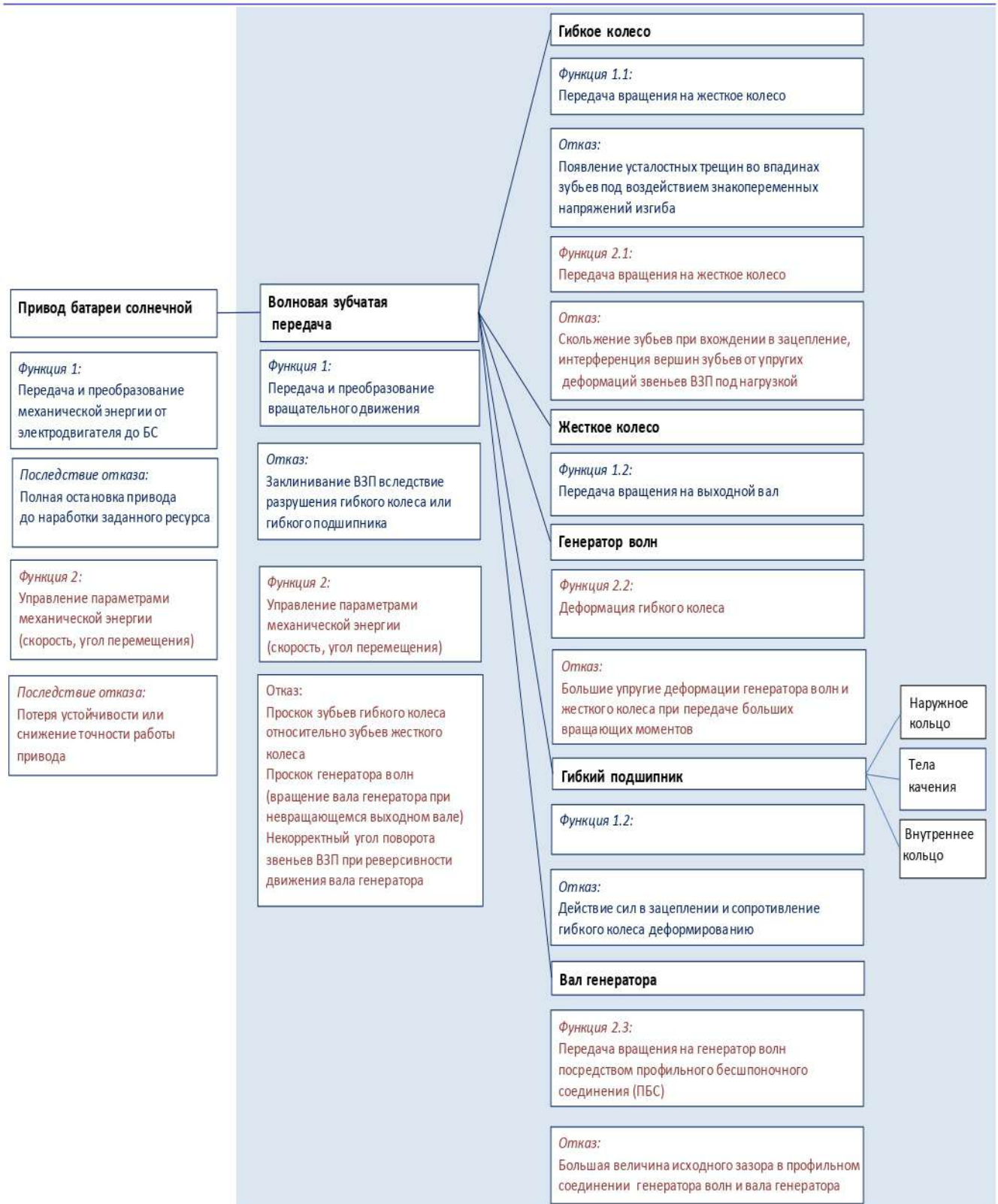


Рисунок 2.5 – Дерево отказов ВЗП

Анализ отказов (Этап 4)			Анализ риска (Этап 5)				Оптимизация (Этап 6)	
1. Последствие отказа элемента верхнего уровня/или конечного пользователя ТС	2. Отказ рассматриваемого элемента	3. Причина отказа элемента следующего нижнего уровня или характеристики	Текущие действия по предупреждению	Текущие действия по обнаружению	Обнаружение	DFMEA AP	Действия по предупреждению	Действия по обнаружению
Полная остановка привода до набора заданного ресурса	7 Заклинивание ВЗП вследствие разрушения гибкого колеса	Появление усталостных трещин во впадинах зубьев под воздействием знакопеременных напряжений изгиба	Проведение усталостных испытаний образцов	-	9	H	Совершенствование технологического процесса	
Потеря устойчивости или снижение точности работы привода	7 Проскок зубьев гибкого колеса относительно зубьев жесткого колеса вследствие износа зубьев гибкого колеса ВЗП	Скольжение зубьев при вхождении в зацепление, интерференция вершин зубьев от упругих деформаций звеньев ВЗП под нагрузкой	Моделирование максимального момента, при котором отсутствует интерференция зубьев и расчет геометрических параметров передачи на указанный момент	Проведение испытаний на стенде	5	M	Совершенствование технологического процесса	
Потеря устойчивости или снижение точности работы привода	7 Проскок генератора волн (вращение вала генератора при не вращающемся выходном вале)	Большие упругие деформации генератора волн и жесткого колеса при передаче больших вращающих моментов	Расчет геометрических параметров передачи на требуемый крутящий момент	Проведение испытаний на стенде	2	L		
Полная остановка привода до набора заданного ресурса	7 Заклинивание ВЗП вследствие разрушения гибкого подшипника генератора волн	Действие сил в зацеплении и сопротивление гибкого колеса деформированию	Расчет грузоподъемности гибкого подшипника	Проведение испытаний на стенде	8	H	Перераспределение функций гибкого подшипника на другие элементы ВЗП	
Потеря устойчивости или снижение точности работы привода	7 Некорректный угол поворота генератора волн и других звеньев ВЗП при реверсивности движения вала генератора	Большая величина исходного зазора в профильном соединении генератора волн и вала генератора	Селективный подбор генератора волн и вала генератора для обеспечения минимального бокового зазора в соединении	Инструментальный контроль	6	M	Определение критических углов и локальное ужесточение допуска на профиль	

Рисунок 2.6 – Фрагмент бланка DFMEA «Этап 4», «Этап 5» и «Этап 6»

Выявлено, что несмотря на принятые меры по предупреждению отказов гибкого колеса таких как: появление усталостных трещин во впадинах зубьев под воздействием знакопеременных напряжений изгиба и скольжение зубьев при вхождении в зацепление, данные причины имеют достаточно высокую оценку вероятности возникновения отказов (оценка 6). Также высокую вероятность возникновения отказа (оценка 6) имеет гибкий подшипник и профильное соединение вала и генератора волн. Остальные отказы имеют низкую вероятность возникновения.

При оценке возможности обнаружения причин отказов (D) было определено, что большая часть причин отказов имеет умеренную и высокую способность обнаружения (оценка D равна 2, 5 и 6). Отказы по причинам разрушения гибкого колеса и гибкого подшипника генератора волн обнаружить сложно, они проявляются в процессе наработки ресурса.

После получения оценок значимости (S), возможности возникновения (O) и возможности обнаружения (D) в результате их сочетания был 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.

Низкий приоритет для рассмотрения и принятия мер (L) получила причина:

- проскок генератора волн (вращение вала генератора при не вращающемся выходном вале).

Разработка мероприятий по снижению рисков.

Следующим этапом проведена оптимизация полученных данных. Определены действия для улучшения мер предупреждения причин возникновения отказов в конструкции ВЗП. Бланк протокола DFMEA представлен на рисунке 2.6.

Результатом проведения DFMEA анализа стал разработанный перечень мероприятий, направленных на повышения качества конструкции ВЗП.

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.

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.

Конструкция гибкого колеса достаточно хорошо изучена и оптимизирована. Отказы гибкого колеса происходят по причинам появления усталостных трещин во впадинах зубьев под воздействием знакопеременных напряжений изгиба и износа зубьев. Данные отказы предлагается минимизировать путем внесения изменений в технологический процесс изготовления гибкого колеса.

Данные мероприятия позволят повысить эксплуатационные характеристики деталей ВЗП, а, следовательно, и увеличить долговечность работы ВЗП и привода БС в целом.

2.3 Совершенствование конструкции волновой зубчатой передачи путем перераспределения функций между ее конструктивными элементами

Особенностью работы волновых генераторов является то, что они вращаются с высокой частотой входного звена, воспринимая большие нагрузки выходного

звена. Оптимальным по нагрузочной способности является кулачковый генератор волн. Одной из причин выхода из строя ВЗП является износ дорожек качения подшипников, что приводит к увеличению радиальных зазоров, и искажению формы деформации.

Известна ВЗП, содержащая генератор волн с насаженным на него гибким подшипником, взаимодействующим с гибким зубчатым колесом, входящим в зацепление с жестким зубчатым колесом [43]. Недостаток передачи - неоднозначные зазоры, а, следовательно, нагрузки по контуру гибкого колеса, что существенно влияет на качество зацепления зубьев (уменьшение зоны зацепления и увеличение максимальной нагрузки на зубья), величину крутящего момента, долговечность передачи.

Наиболее близким по своей технической сущности к предлагаемому изобретению является устройство, содержащее генератор, представляющий собой кулачок, профиль которого выполнен по форме кольца, деформированного четырьмя радиальными силами [2]. К недостаткам прототипа относится повышенный износ гибкого подшипника в местах приложения сил.

Важным недостатком рассмотренных аналога и прототипа является то, что при любых значениях допусков на линейные и угловые параметры кулачка, внутреннее, наружное кольца и тела качения гибкого подшипника, гибкого зубчатого колеса, накопленная суммарная погрешность существенно влияет на количество одновременно зацепляющихся зубьев гибкого и жесткого зубчатых колес, что в конечном итоге приводит к уменьшению крутящего момента передачи в целом и КПД передачи.

Техническим результатом изобретения является повышение нагрузочной способности и долговечности волновой зубчатой передачи вследствие увеличения зоны зацепления зубьев.

Технический результат достигается тем, что волновая зубчатая передача, содержащая генератор волн, гибкое зубчатое колесо, взаимодействующее с жестким зубчатым колесом, где дорожки качения нанесены непосредственно на

профиле генератора волн и на внутренней поверхности гибкого зубчатого колеса, при этом профиль генератора волн выполнен в соответствии с формулой:

$$R = \sqrt{(R_0 - E \cos t)^2 + (nE \sin t)^2}; \quad (2.1)$$

$$\varphi = \frac{t}{N} + \operatorname{arctg} \frac{nE \sin t}{R_0 - E \cos t} \quad (2.2)$$

где R и φ - текущие координаты точки профиля;

R_0 - средний радиус $R_0 = (R_1 + R_2) / 2$;

R_1 и R_2 - минимальный и максимальный радиус векторы;

E - величина, характеризующая подъем профиля; $E = (R_2 - R_1) / 2$;

n - коэффициент, влияющий на форму профиля

$$0 < n < \frac{N^2 + 1}{2N} + \frac{R_0}{E}$$

t - независимый параметр; $0 \leq t \leq 2\pi N$;

N - число волн генератора.

Сущность изобретения поясняется рисунками.

На рисунке 2.7 изображена предлагаемая передача, поперечный разрез; на рисунке 2.8 - то же, продольный разрез.

Волновая зубчатая передача содержит генератор волн 1, на профиле которого выполнена дорожка качения 2, тела качения 3, гибкое зубчатое колесо 4, на внутренней поверхности которого выполнена дорожка качения 5, жесткое зубчатое колесо 6, вал 7 вращения генератора 1.

Предлагаемая волновая зубчатая передача работает следующим образом. Вал 7 приводит во вращение генератор волн 1. При вращении генератора волна бежит по окружности гибкого зубчатого колеса 4 и вызывает его вращение относительно закрепленного в корпусе жесткого зубчатого колеса в направлении, обратном вращению генератора волн. Угол поворота гибкого колеса за один оборот генератора волн зависит от передаточного отношения, т.е. разницы количества зубьев гибкого и жесткого зубчатых колес.

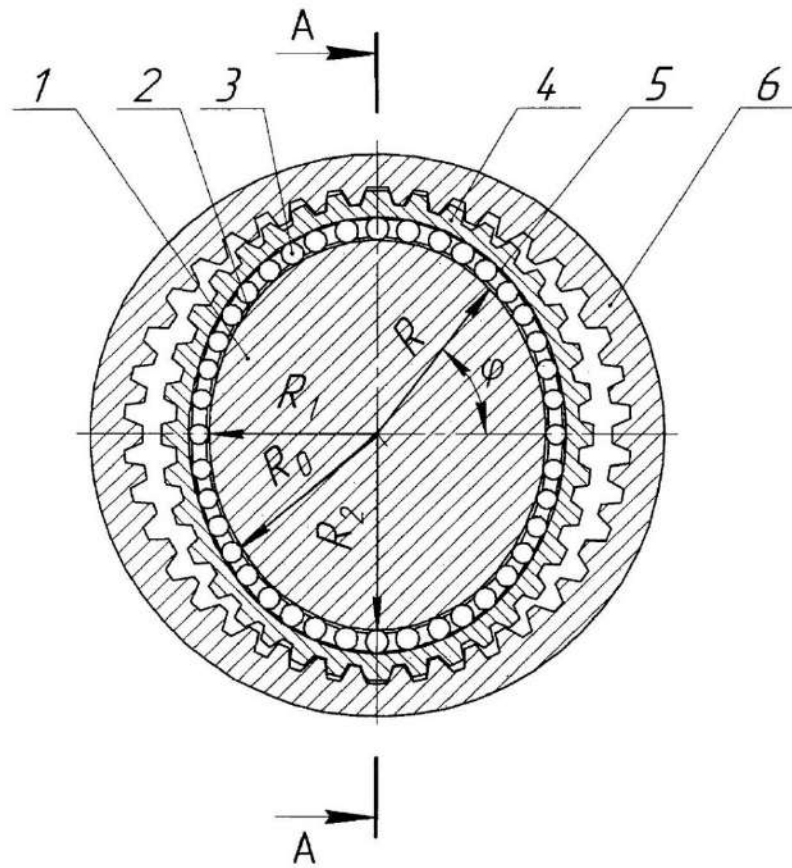


Рисунок 2.7 – Предлагаемая конструкция ВЗП (поперечный разрез)

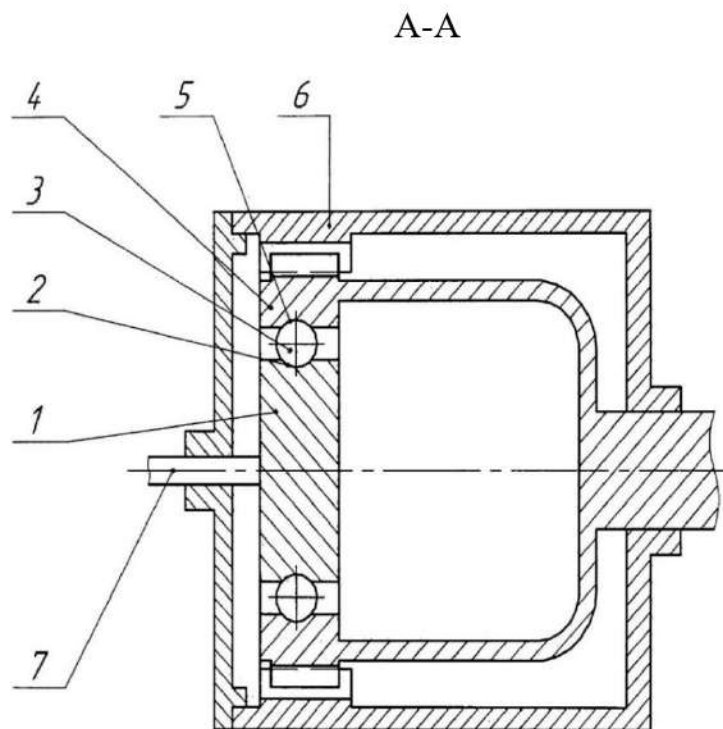


Рисунок 2.8 – Предлагаемая конструкция ВЗП (продольный разрез)

Для повышения нагрузочной способности и долговечности ВЗП вследствие увеличения зоны зацепления зубьев предложена новая конструкция ВЗП, не имеющая подшипника качения генератора волн [75]. Суть предложенной разработки в том, что дорожки качения (2, 5) в ВЗП нанесены непосредственно на профиле генератора (1) волн и на гибком зубчатом колесе (4).

На данную разработку получен патент № 2486388 С2 Российская Федерация [75].

2.4 Оценка влияния точности профиля на величину бокового зазора в профильном соединении генератора волн и вала генератора

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

К основным эксплуатационным преимуществам ПБС перед шлицевыми и шпоночными можно отнести следующие: вес профильных валов может быть сокращен до 40 % и более (особенно при использовании пустотелых валов); длина ступицы может быть сокращена до 10 %; более высокая долговечность (особенно при знакопеременных нагрузках) за счет отсутствия острых углов, канавок и резких переходов профиля; меньшие энергозатраты на совершение работы по передаче крутящего момента и т. д.

Кроме того, трехгранные ПБС автоматически центрируются под нагрузкой, так как зазоры в соединении при приложении момента выбираются равномерно с трех сторон, что приводит уменьшению шума и вибраций при работе.

В работе [95] неоспоримо показаны достоинства профильных валов по ряду технико-экономических показателей по сравнению со шпоночными и шлицевыми.

Профильные соединения могут быть выполнены с гарантированным зазором или натягом, а также с переходными посадками. В цилиндрических профильных соединениях с зазором допускаются относительные осевые перемещения деталей

как при отсутствии нагрузки от передаваемого крутящего момента, так и под действием нагрузки.

Профильные соединения эффективно используются не только для передачи большого крутящего момента, но и для точной передачи вращательного движения при относительно небольшом крутящем моменте. Кроме того, их можно применять в реверсивных механизмах.

Различают ПБС с четным и нечетным числом граней сопрягаемых деталей. Контур сечения детали с нечетным числом граней обладает свойством равноосности: постоянством расстояния («диаметра») D между двумя параллельными и касательными к контуру прямыми, которое не зависит от угла поворота контура относительно параллельных касательных. Свойством равноосности обладают все контуры с нечетным числом граней, но лишь трехгранный контур самоцентрируется под воздействием нагрузки. Последний называют равноосным контуром (РК), а соответствующее соединение – РК-профилем.

Наибольшее распространение получили трехгранные и четырехгранные профильные соединения.

Трехгранные профильные соединения рекомендуется применять как неподвижные при передаче крутящего момента, четырехгранные – как подвижные, допускающие передачу крутящего момента и осевое перемещение втулки относительно вала.

Возможность расширения использования ПБС в прецизионных узлах и механизмах требует обеспечения не только минимальных отклонений от параллельности осей собираемых деталей, но и достижения требуемой угловой точности. Особенно это актуально для прецизионных механизмов, работающих в реверсном режиме.

В соединениях с зазорами и с переходными посадками при изменении направления вращения элементы ПБС имеют возможность дополнительного поворота до момента касания профилей вала и втулки. Сложность определения этого угла 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.

Примем за исходное положение вала и втулки ПБС, когда возможный зазор распределяется симметрично по профилю (рисунок 2.9).

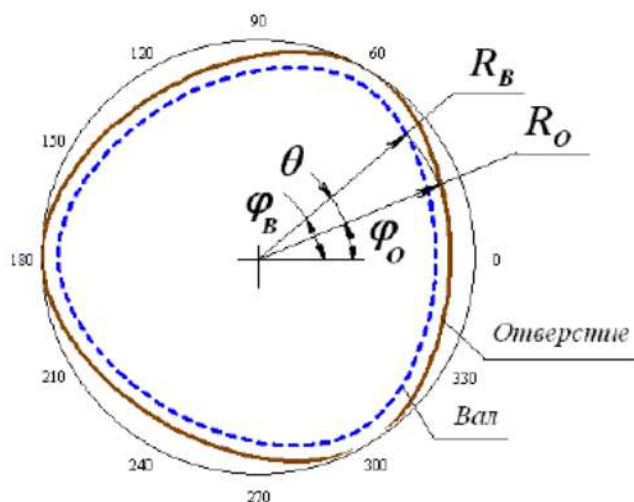


Рисунок 2.9 – Исходное положение вала и отверстия в соединении при симметричном распределении зазора по профилю.

В общем случае угловая точность ПБС будет определяться углом поворота θ в пределах имеющегося диаметрального зазора (при приложении минимального крутящего момента) (см. рисунок 2.9).

Однако поскольку углы поворота точек профиля вала до касания с профилем отверстия θ при повороте вала вследствие криволинейности контуров будут различными и зависят от текущих координат, то поворот вала будет определяться касанием точек, для которых $\theta \rightarrow \min$.

В соответствии с ОСТ 92-4742-86 в полярной системе координат

$$\begin{cases} R = \sqrt{\left(\frac{D}{2} - E \cos t\right)^2 + (NE \sin t)^2}; \\ \varphi = \frac{t}{N} + \arctg(NE \sin t / (\frac{D}{2} - E \cos t)), \end{cases} \quad (2.3)$$

где D – условный диаметр профильного соединения:

$$D = (D_1 + D_2) / 2;$$

D_1 и D_2 – диаметры вписанной и описанной окружностей;

E – эксцентриситет кривой (основной параметр некруглого профиля):

$$E = (D_2 - D_1) / 4;$$

N – число граней соединения;

t – независимый параметр, рад ($0 \leq t \leq 2\pi N$).

Для стандарта ОСТ 92-4742-86 величина эксцентриситета E выбрана из условия возможности обработки профиля отверстия втулки цилиндрическим инструментом с наружным диаметром $D_{II} = D / 2$:

– для трехгранного профиля ($N = 3$)

$$E = D / 32;$$

– для четырехгранного профиля ($N = 4$)

$$E = D / 60.$$

Диаметры D_1 и D_2 вписанной и описанной окружностей контурной кривой определяются по формулам:

$$D_1 = D - 2E; D_2 = D + 2E.$$

Подставив в уравнения (1) значения $E = D/32$ и $N = 3$ для трехгранного профиля РК-3, получим

$$\begin{cases} R = \frac{D}{32} \sqrt{(16 - \cos t)^2 + (3 \sin t)^2}; \\ \varphi = \frac{t}{3} + \operatorname{arctg}(3 \sin t / (16 - \cos t)), \end{cases} \quad (2.4)$$

С учетом необходимости обеспечения в соединении требуемых посадок сборка соединения осуществляется из деталей, параметры которых могут меняться в пределах допуска. Таким образом,

– для отверстия:

$$\begin{cases} R_O = \frac{D_O}{32} \sqrt{(16 - \cos t_O)^2 + (3 \sin t_O)^2}; \\ \varphi_O = \frac{t_O}{3} + \operatorname{arctg}(3 \sin t_O / (16 - \cos t_O)), \end{cases} \quad (2.5)$$

– для вала:

$$\begin{cases} R_B = \frac{D_B}{32} \sqrt{(16 - \cos t_B)^2 + (3 \sin t_B)^2}; \\ \varphi_B = \frac{t_B}{3} + \operatorname{arctg}(3 \sin t_B / (16 - \cos t_B)), \end{cases} \quad (2.6)$$

где $D_O = D + \Delta_O$;

$D_B = D - \Delta_B$ (т. к. рассматриваем только соединения с зазором);

Δ_O ; Δ_B – отклонения отверстия и вала соответственно, определяемые допусками на изготовление.

Из равенства $R_O = R_B$ находим связь параметров t_B и t_O :

$$t_B = \arccos\left(-2 \pm \frac{1}{2}\sqrt{B}\right), \quad (2.7)$$

$$\text{где } B = 16 + \frac{1}{2}\left[265 - \left(\frac{D_O}{D_B}\right)^2 (265 - 32y - 8y^2)\right]; y = \cos t_O.$$

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что величина угла θ изменяется пропорционально величине исходного зазора в соединении (рисунок 2.10)

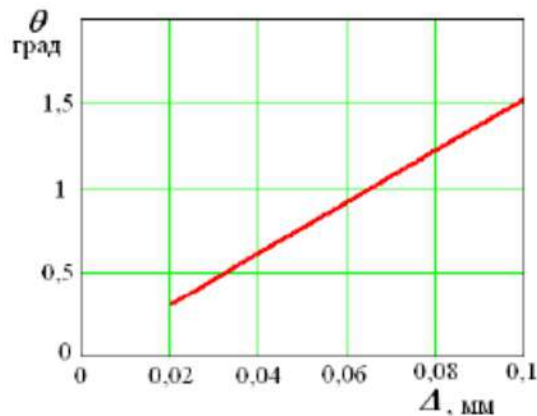


Рисунок 2.10 – Зависимость изменения угла θ от величины зазора в соединении ($D = 40$ мм; $\Delta_O = \Delta_B = \Delta$).

Анализ влияния точности изготовления вала и отверстия на угловую точность соединения был выполнен на примере трех РК-3 соединений: соединения $D = 40$ мм с посадкой H7/h6 ($\Delta_{O \max} = 0,025$ мм; $\Delta_{B \max} = 0,016$ мм); соединения $D = 30$ мм с посадкой H7/h6 ($\Delta_{O \max} = 0,021$ мм; $\Delta_{B \max} = 0,013$ мм) и соединения $D = 20$ мм с посадкой H7/h6 ($\Delta_{O \max} = 0,021$ мм; $\Delta_{B \max} = 0,013$ мм). На рисунках 2.11 и 2.12 приведены графики изменения угла θ при сборке соединения при различных размерах вала и отверстия (в пределах допуска) при сохранении постоянства диаметрального зазора $\Delta_O + \Delta_B = 0,015$ мм.

Из приведенных графиков следует, что смещение зазора в верхнюю часть поля допуска ведет к снижению угла θ . Причем интенсивность снижения увеличивается с уменьшением диаметра соединения.

Расчеты показывают, что в зависимости от соотношения действительных размеров D_O и D_B (при отклонениях Δ_O и Δ_B в пределах допуска) зона контакта располагается в следующих диапазонах углов φ_O и φ_B (для первого квадранта):

– для $D = 20\text{мм}$: $\varphi_{O\text{кас}} = 39,186612^\circ \dots 39,395944^\circ$; $\varphi_{B\text{кас}} = 39,495078^\circ \dots 39,704991^\circ$;

– для $D = 40\text{мм}$: $\varphi_{O\text{кас}} = 39,289850^\circ \dots 39,415033^\circ$; $\varphi_{B\text{кас}} = 39,476036^\circ \dots 39,602423^\circ$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что независимо от диаметра соединения при малых передаваемых крутящих моментах особое внимание при контроле точности изготовления профиля должно уделяться участкам с углами (в полярной системе координат) $39^\circ \dots 40^\circ$; $159^\circ \dots 160^\circ$ и $279^\circ \dots 280^\circ$.

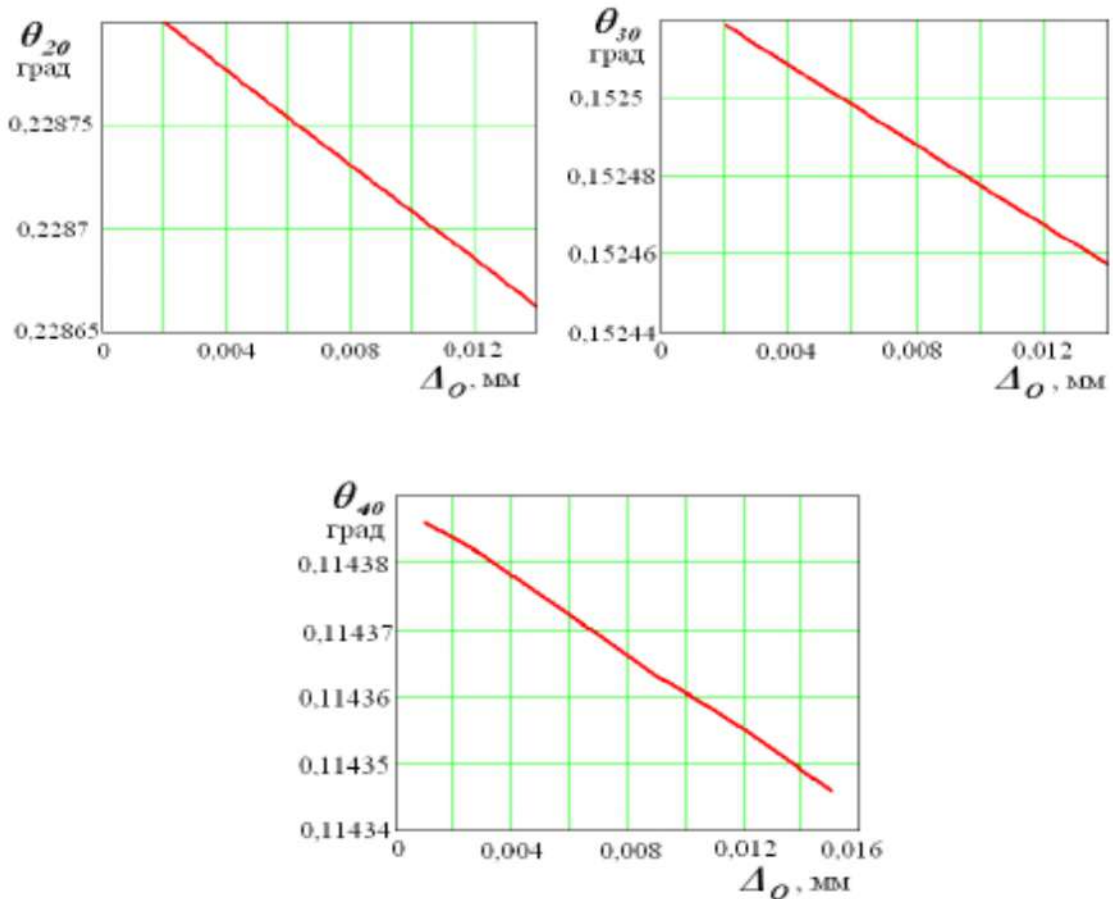


Рисунок 2.11 – Изменение угла θ соединения (θ_{20} ; θ_{30} ; θ_{40} при $D = 20$; 30; 40 мм соответственно) при сохранении постоянства диаметрального зазора $\Delta_O = \Delta_B = 0,015\text{ мм}$

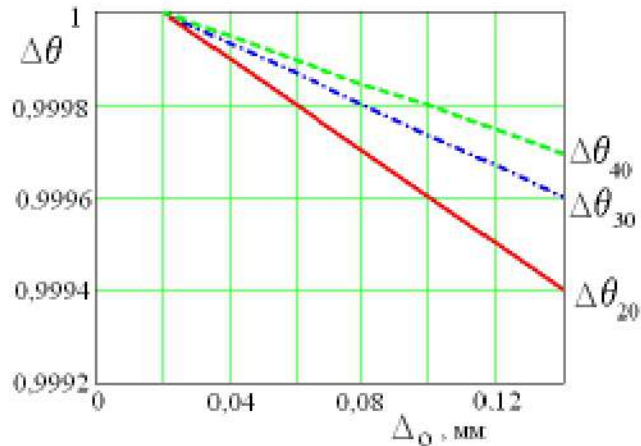


Рисунок 2.12 – Сравнение изменения угла θ для различных диаметров соединения при сохранении постоянства диаметрального зазора $\Delta_O + \Delta_B = 0,015$

$$\text{мм} \left(\Delta\theta = \frac{\theta}{\theta_{\Delta_O=0,002}} \right)$$

2.5 Выводы по главе 2

1. Разработана структурная модель обеспечения качества гибких зубчатых колес в составе волновых зубчатых передач. Модель состоит из восьми блоков, отображающих этапы обеспечения качества волновых зубчатых передач: «Свойства и параметры качества волновых зубчатых передач», DFMEA-анализ, PFMEA-анализ, «Моделирование конструкции», «Моделирование процесса», «Подготовка производства», «Процесс изготовления гибкого колеса волновой зубчатой передачи» и заключительного «Анализ функционирования гибких зубчатых колес в составе привода с волновой зубчатой передачей». Данная модель позволяет выявить факторы, оказывающие влияние на качество волновых зубчатых передач и оценить степень их воздействия. Установлена взаимосвязь этапов обеспечения качества волновых зубчатых передач от проектирования до изготовления.

2. На основе применения анализа видов и последствий потенциальных отказов на этапе проектирования конструкции (DFMEA) проведена оценка рисков возникновения потенциальных и фактических несоответствий конструкции волновых зубчатых передач. Выявлено пять потенциальных несоответствий

элементов конструкции волновых зубчатых передач, из них наиболее значимыми с рангом Н (high) являются два несоответствия: заклинивания волновых зубчатой передачи по причинам разрушения гибкого колеса и (или) гибкого подшипника, ведущие к полной остановке привода. Еще два несоответствия получили ранг М (medium): проскок зубьев гибкого колеса и некорректный угол поворота генератора волн, ведущие к потере устойчивости или снижению точности работы привода. Установлен перечень мероприятий, направленных на повышение качества процесса проектирования составных элементов волновых зубчатых передач. Данные мероприятия позволят повысить эксплуатационные характеристики деталей ВЗП, а, следовательно, и увеличить долговечность работы волновых зубчатых передач и привода солнечной батареи в целом.

3. Проведено моделирование, направленное на повышение качества конструкции волновой зубчатой передачи, определенное в результате проведения процедуры DFMEA-анализа. Совершенствование конструкции волновых зубчатых передач путем перераспределения функций между ее конструктивными элементами и изменения уравнения, описывающего профиль генератора волн, привело к повышению нагрузочной способности и долговечности волновых зубчатых передач на 17% вследствие увеличения зоны зацепления зубьев на 30%.

Проведена оценка влияния точности профиля на величину бокового зазора в профильном соединении генератора волн и вала генератора. Определены участки с углами, которым должно уделяться особое внимание при 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. Конструкция гибкого колеса достаточно хорошо изучена и оптимизирована. Отказы гибкого колеса происходят по причинам появления усталостных трещин во впадинах зубьев под воздействием знакопеременных напряжений изгиба и износа зубьев. Данные отказы предлагается минимизировать путем внесения изменений в технологический процесс изготовления гибкого колеса. Для этого необходимо провести оценку рисков, возникающих в процессе

механической обработки гибкого колеса (PFMEA), акцентируя внимание на финишные операции, где жесткость заготовки сопоставима с жесткостью готовой детали.

5. Научной новизной является 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.

ГЛАВА 3 Совершенствование технологической оснастки и процесса механической обработки гибких колес волновых зубчатых передач за счет моделирования процессов базирования и нарезания зубчатого венца

3.1 Оценка и анализ рисков потенциальных отказов, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации прецизионных гибких зубчатых колес волновых зубчатых передач на основе методики PFMEA

Процесс управления риском охватывает различные аспекты работы с риском, от идентификации и анализа риска до оценки его допустимости и определения потенциальных возможностей снижения риска посредством выбора, реализации и контроля соответствующих управляющих действий [34].

Анализ риска представляет собой структурированный процесс, целью которого является определение как вероятности, так и размеров неблагоприятных последствий исследуемого действия, объекта или системы. Посредством проведения анализа риска предпринимаются попытки ответить на три основных вопроса: что может выйти из строя (идентификация опасности); с какой вероятностью это может произойти (анализ частоты); каковы последствия этого события (анализ последствий).

В целом FMEA является результатом работы команды, состоящей из квалифицированных специалистов, способных признать и оценить значимость и последствия различных типов потенциальных несоответствий конструкции и процессов, которые могут привести к отказам продукции [69-71]. Работа в команде стимулирует процесс мышления и гарантирует необходимое качество экспертизы. FMEA представляет собой метод, позволяющий идентифицировать тяжесть последствий видов потенциальных отказов, и обеспечить меры по снижению риска [72-74]. В некоторых случаях FMEA также включает в себя оценку вероятности возникновения видов отказов. Это расширяет анализ [35, 63].

Целью данного исследования является разработка типовой модели оценки рисков, построенной на основе анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса (PFMEA), возникающих в процессе механической обработки оболочки и нарезания зубчатого венца гибкого колеса.

PFMEA является методом структурирования и улучшения процесса. С его помощью определяются потенциальные сбои, проводится анализ их причин и последствий. В итоге, принимаются предупреждающие решения, направленные на профилактику и устранение возникновения этих сбоев [41, 85, 108].

Данный метод впервые начал применяться в аэрокосмической отрасли еще в 60-х годах XX века. FMEA – один из наиболее популярных методов анализа видов и последствий отказов, согласно требованиям стандарта IATF 16949: 2016 он является одним из обязательных для промышленных компаний. В июне 2019 года AIAG & VDA выпустили первое международное руководство по анализу неисправностей и последствий отказов (FMEA). Целью нового руководства является создание общей основы для FMEA для всех секторов.

Проведение анализов рисков и последствий процесса механической обработки проводилось по новому подходу, в который входят: планирование и подготовка; структурный анализ; функциональный анализ; анализ отказов; анализ рисков; оптимизация и документация результатов. Используемый в руководстве подход делает риски процесса механической обработки более прогнозируемыми.

На этапе «Планирование и подготовка» сформирована команда для проведения PFMEA анализа. Команда включает пять специалистов в области механической обработки. Определены: план проведения PFMEA анализа, основные требования конструкторской и эксплуатационной документации к гибким колесам и ВЗП, требования нормативных документов, подробно рассмотрена технология изготовления гибких колес и ВЗП. На этапе подготовки составлена блок-схема процесса изготовления гибкого колеса ВЗП. Блок-схема представлена на рисунке 3.1.

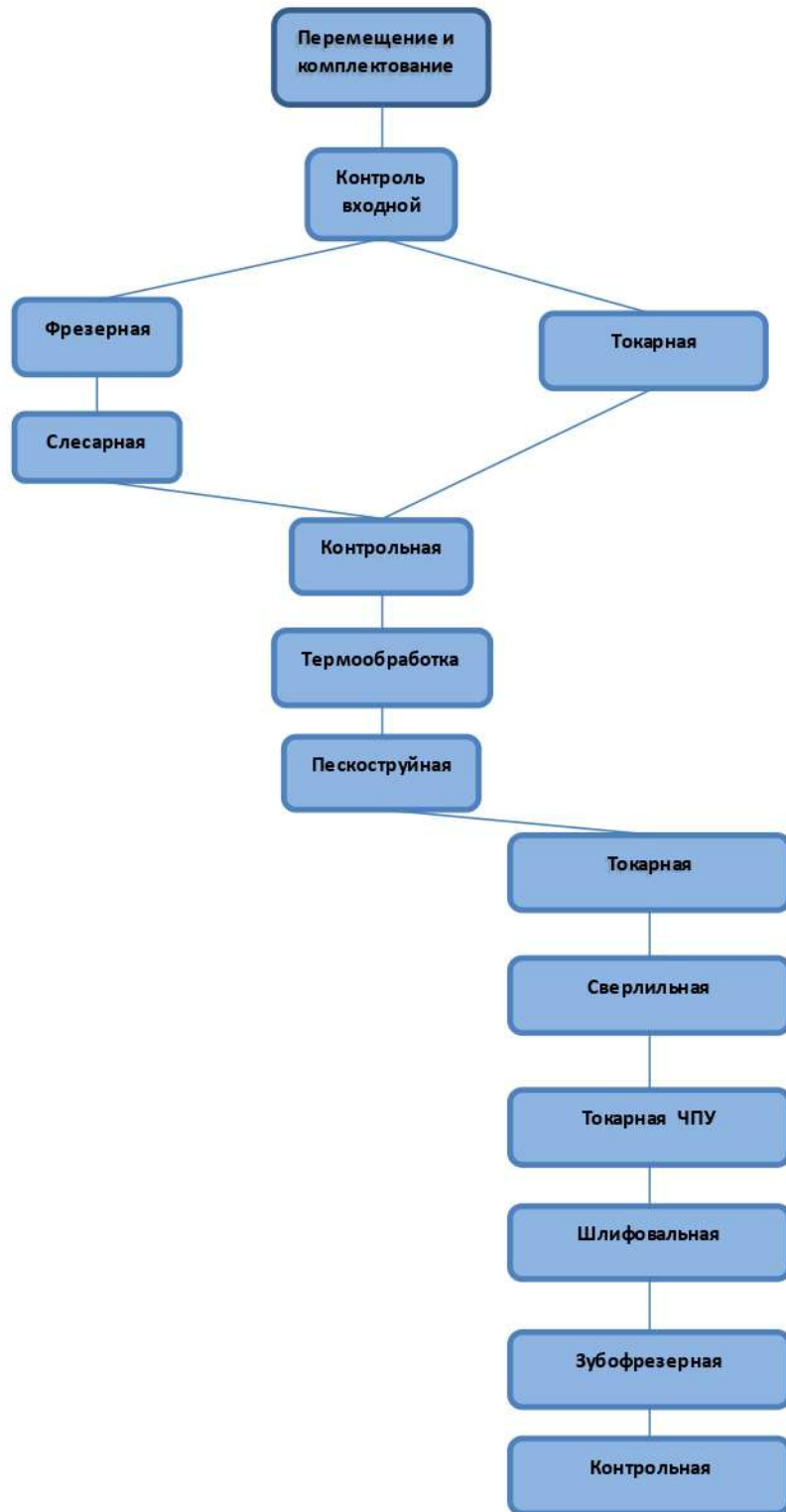


Рисунок 3.1 – Блок-схема процесса изготовления гибкого колеса ВЗП

На этапе проведения структурного анализа, используя блок-схему процесса изготовления гибкого колеса ВЗП, составлено дерево структурного анализа для каждой операции, фрагменты которого для трех операций представлены на рисунках 3.2, 3.3 и 3.4.

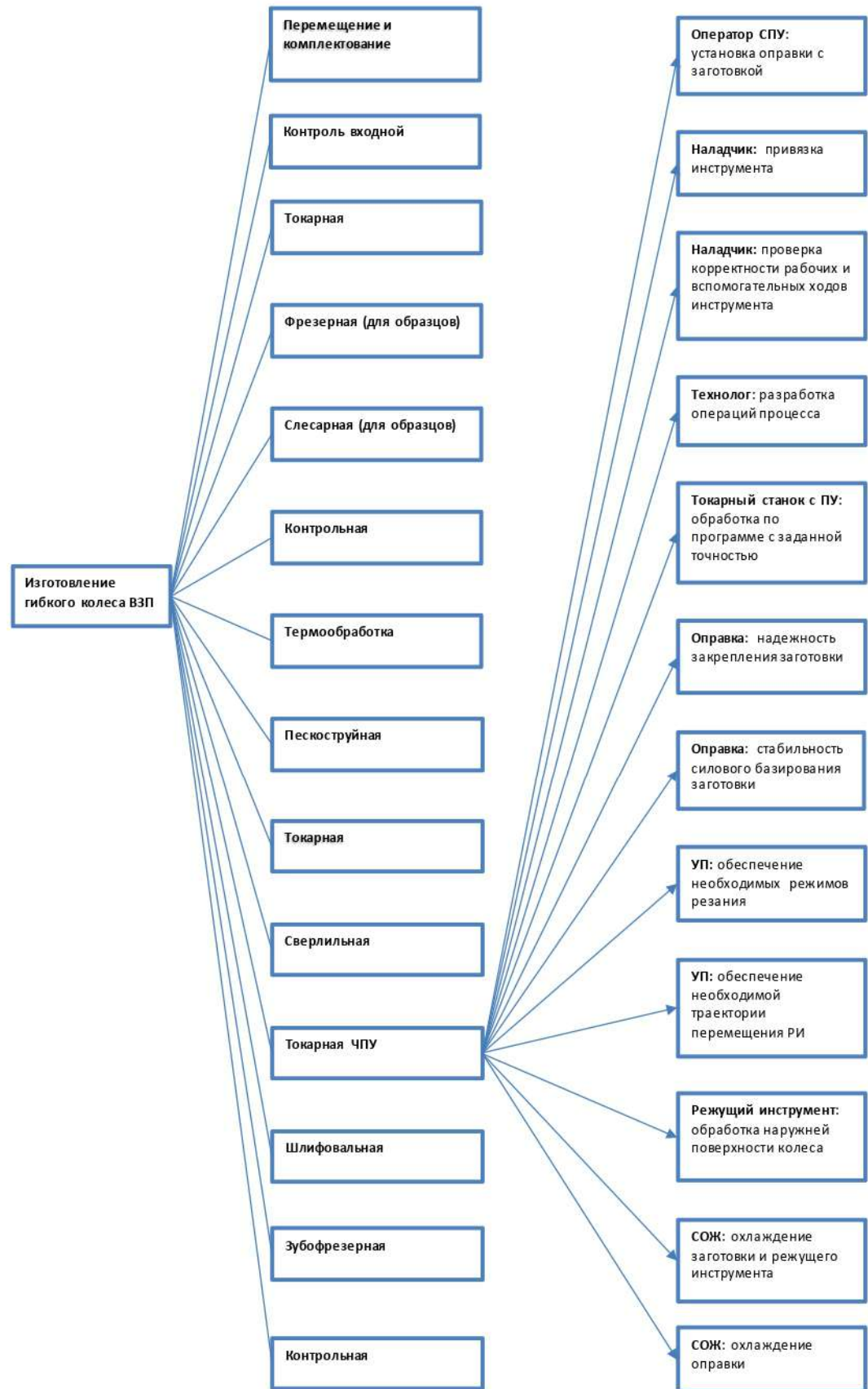


Рисунок 3.2 – Дерево структурного анализа для операции «Токарная ЧПУ»

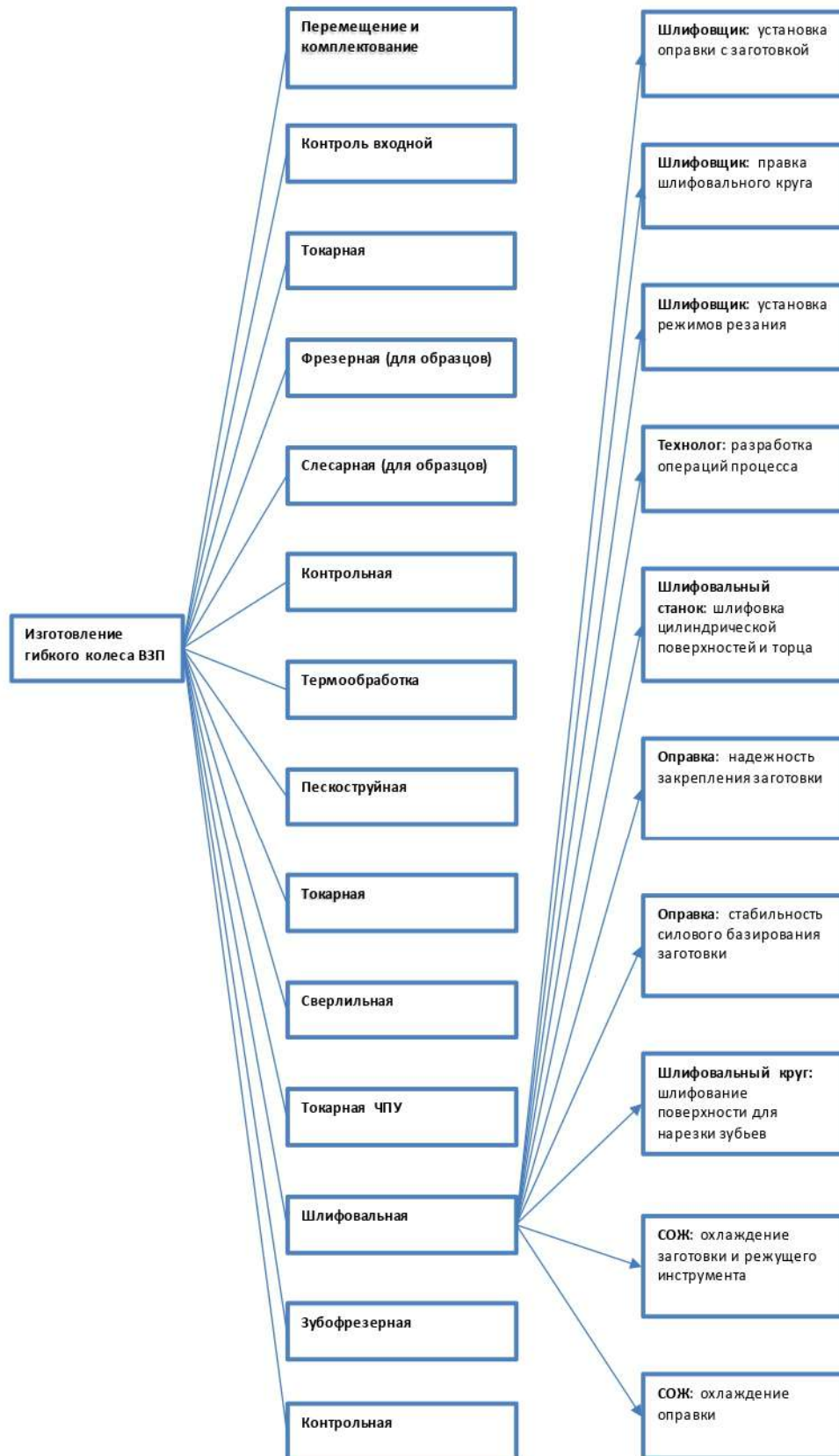


Рисунок 3.3 – Дерево структурного анализа для операции «Шлифовальная»

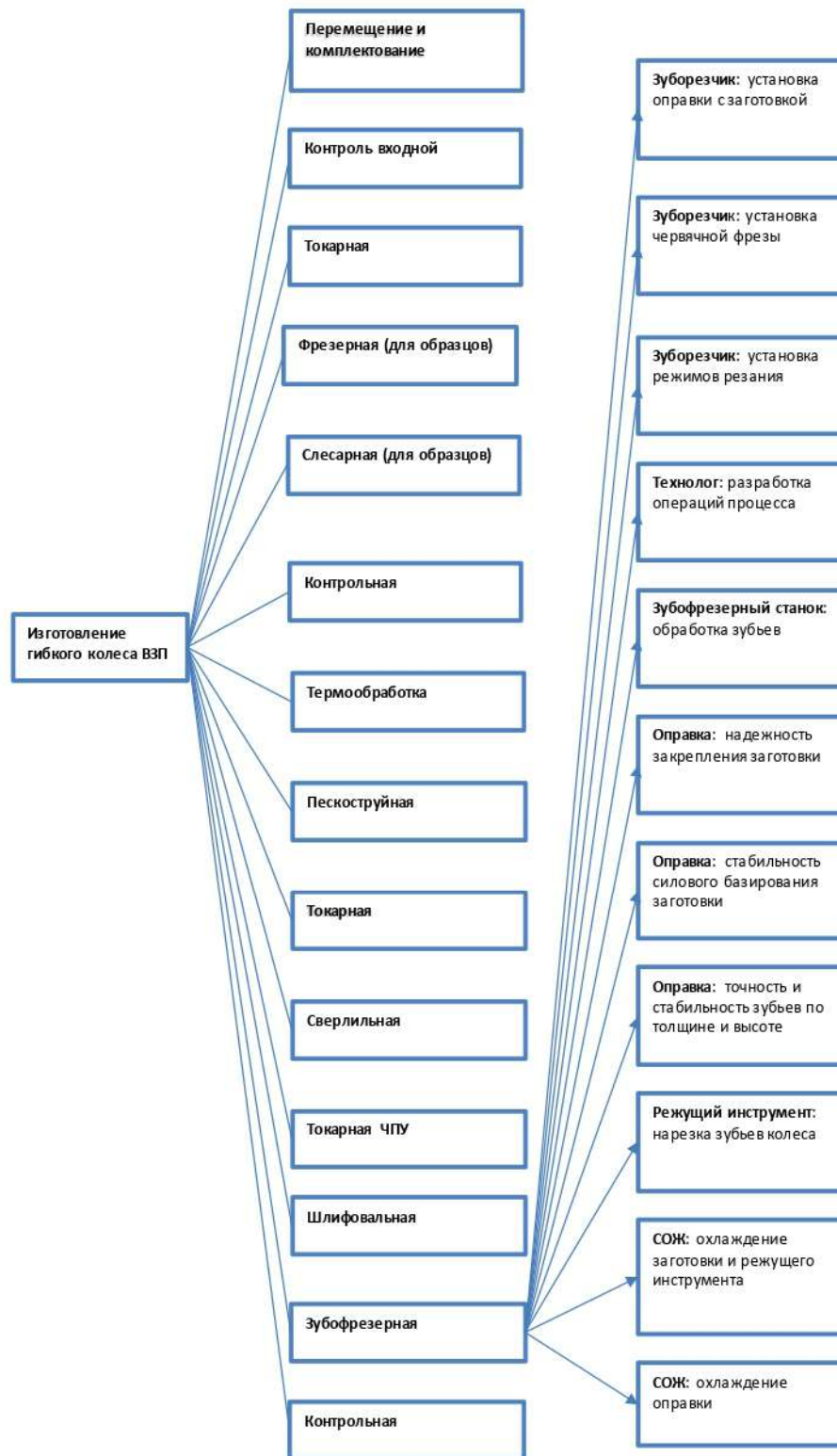


Рисунок 3.4 – Дерево структурного анализа для операции «Зубофрезерная»

В результате функционального анализа определены основные функции процесса изготовления гибкого колеса ВЗП, а также операций процесса и элементов функционирования процесса изготовления гибкого колеса ВЗП.

Фрагменты дерева функционального анализа для трех операций представлены на рисунках 3.5, 3.6 и 3.7.

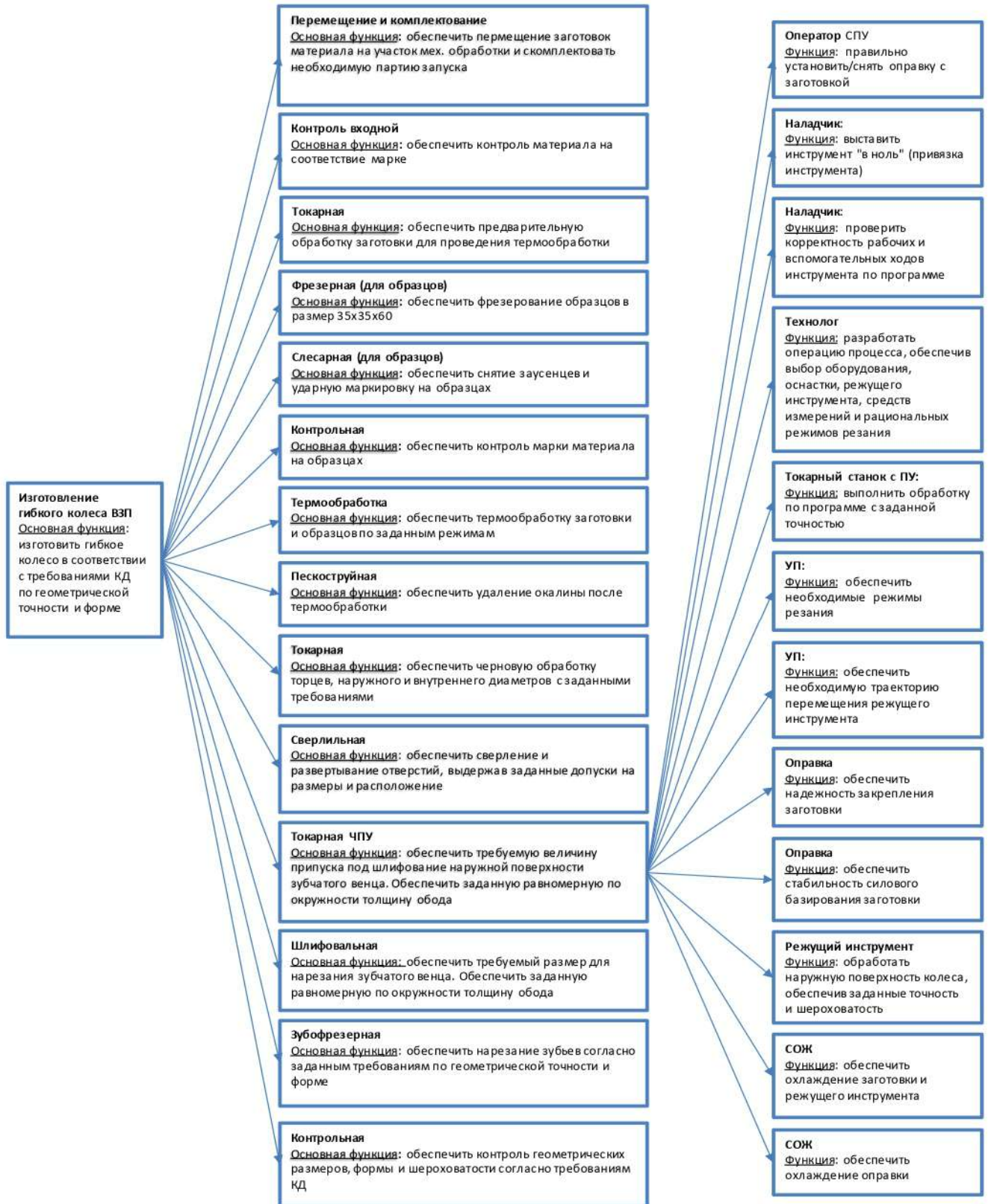


Рисунок 3.5 – Дерево функционального анализа для операции «Токарная ЧПУ»

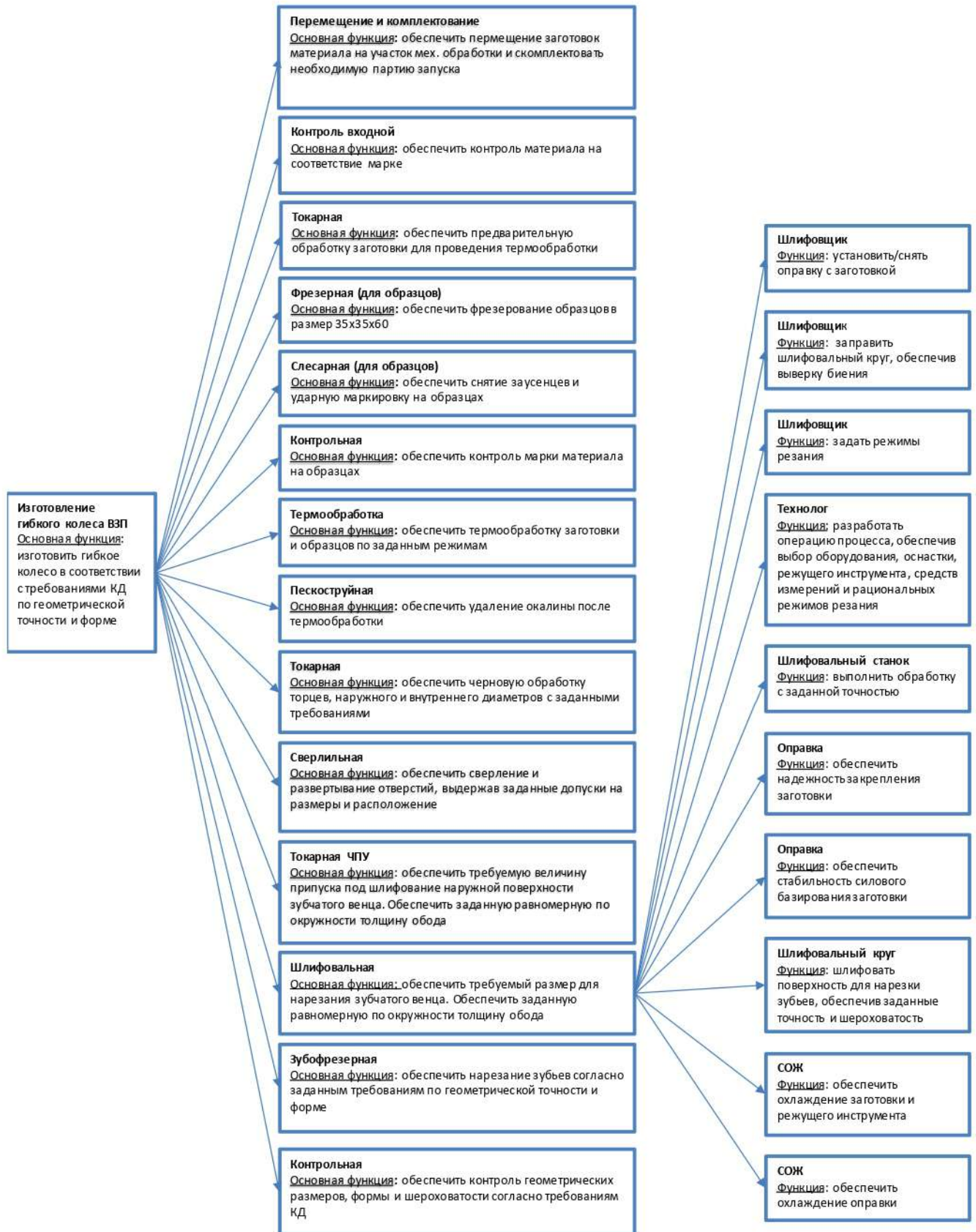


Рисунок 3.6 – Дерево функционального анализа для операции «Шлифовальная»

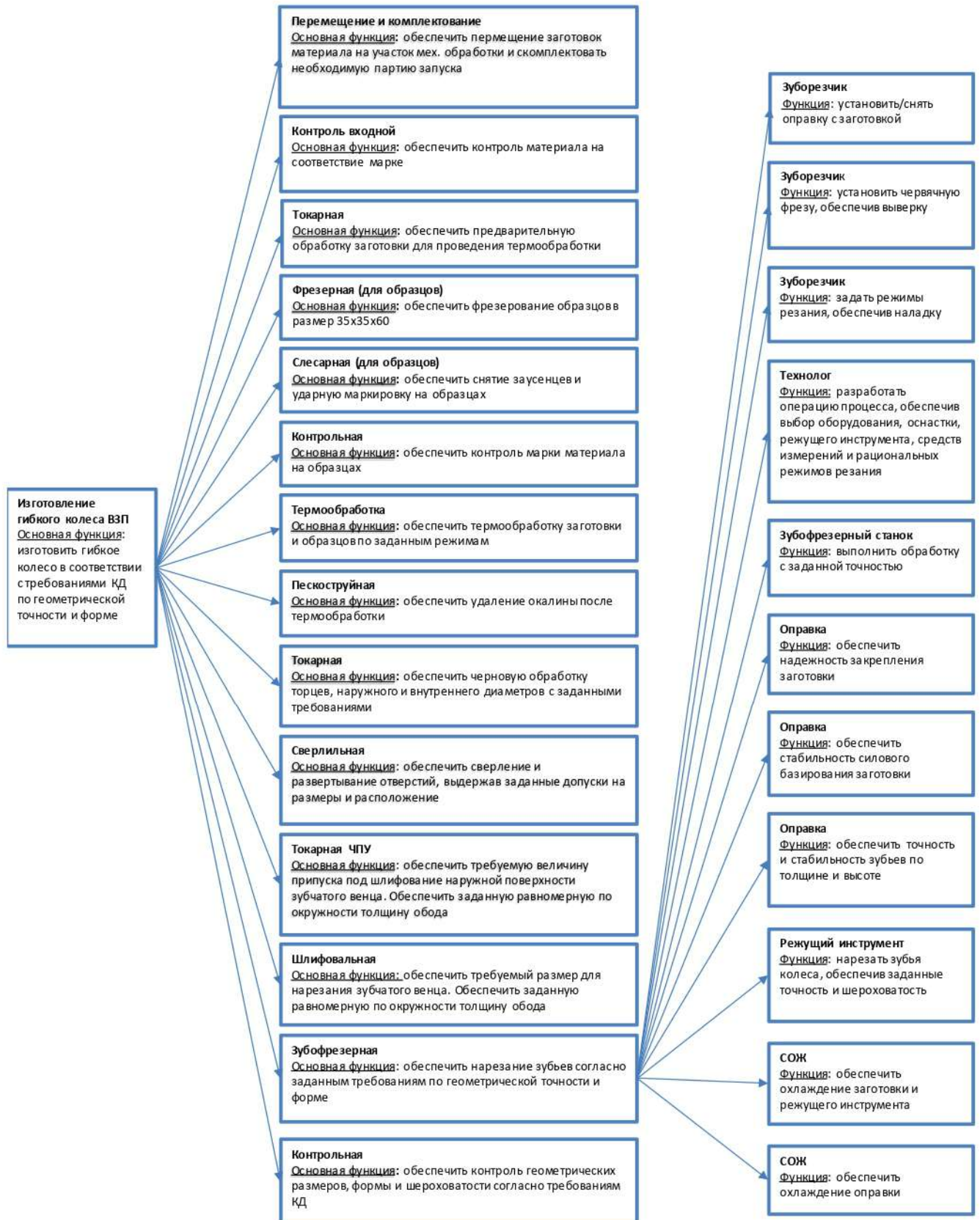


Рисунок 3.7 – Дерево функционального анализа для операции «Зубофрезерная»

Проведена оценка отказов и установлен приоритет действий для устранения рисков возникновения отказов (H(high), M(medium), L(low)). Фрагменты дерева отказов для трех операций представлены на рисунках 3.8, 3.9 и 3.10.

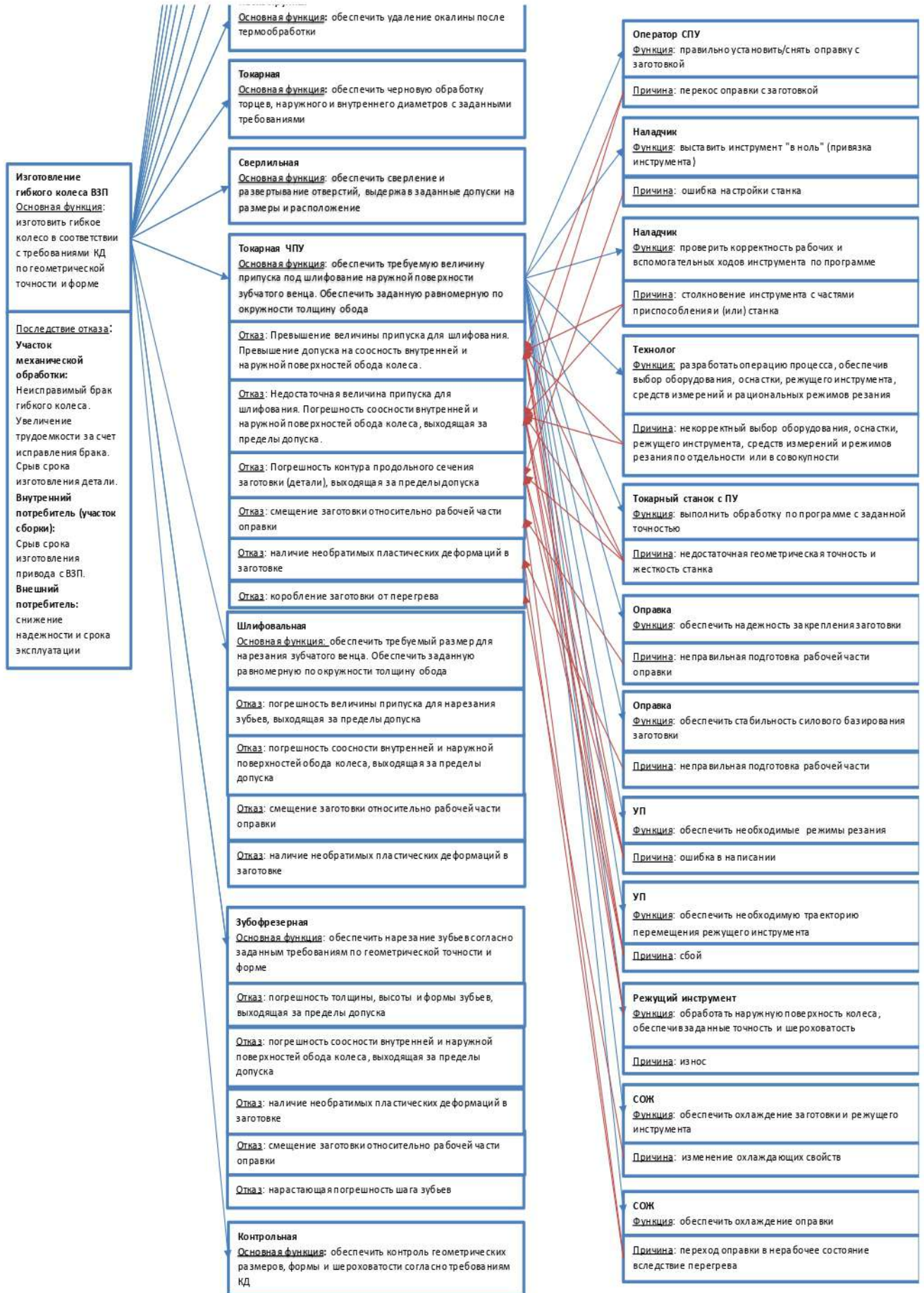


Рисунок 3.8 – Фрагмент дерева отказов для операции «Токарная ЧПУ»

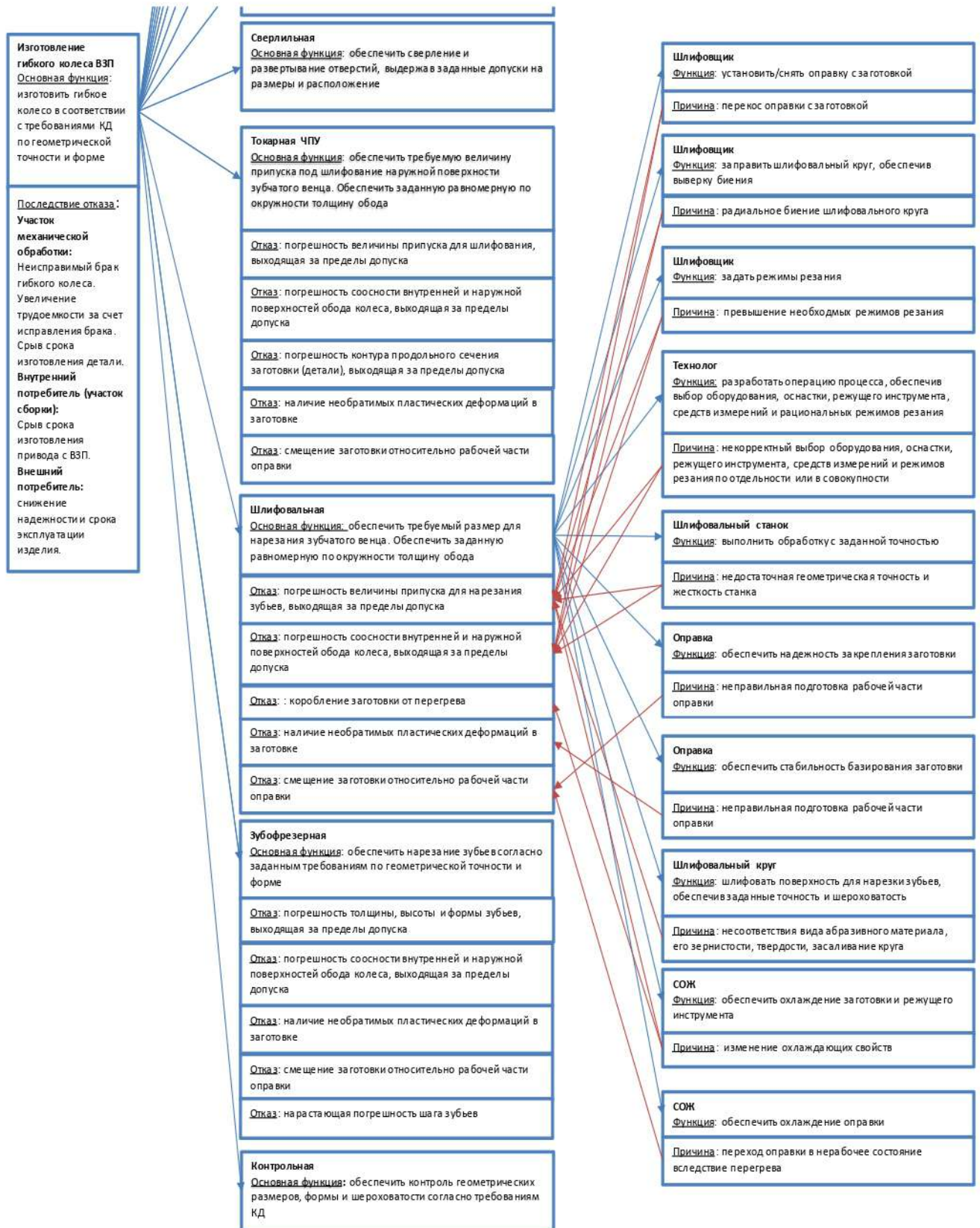


Рисунок 3.9 – Фрагмент дерева отказов для операции «Шлифовальная»

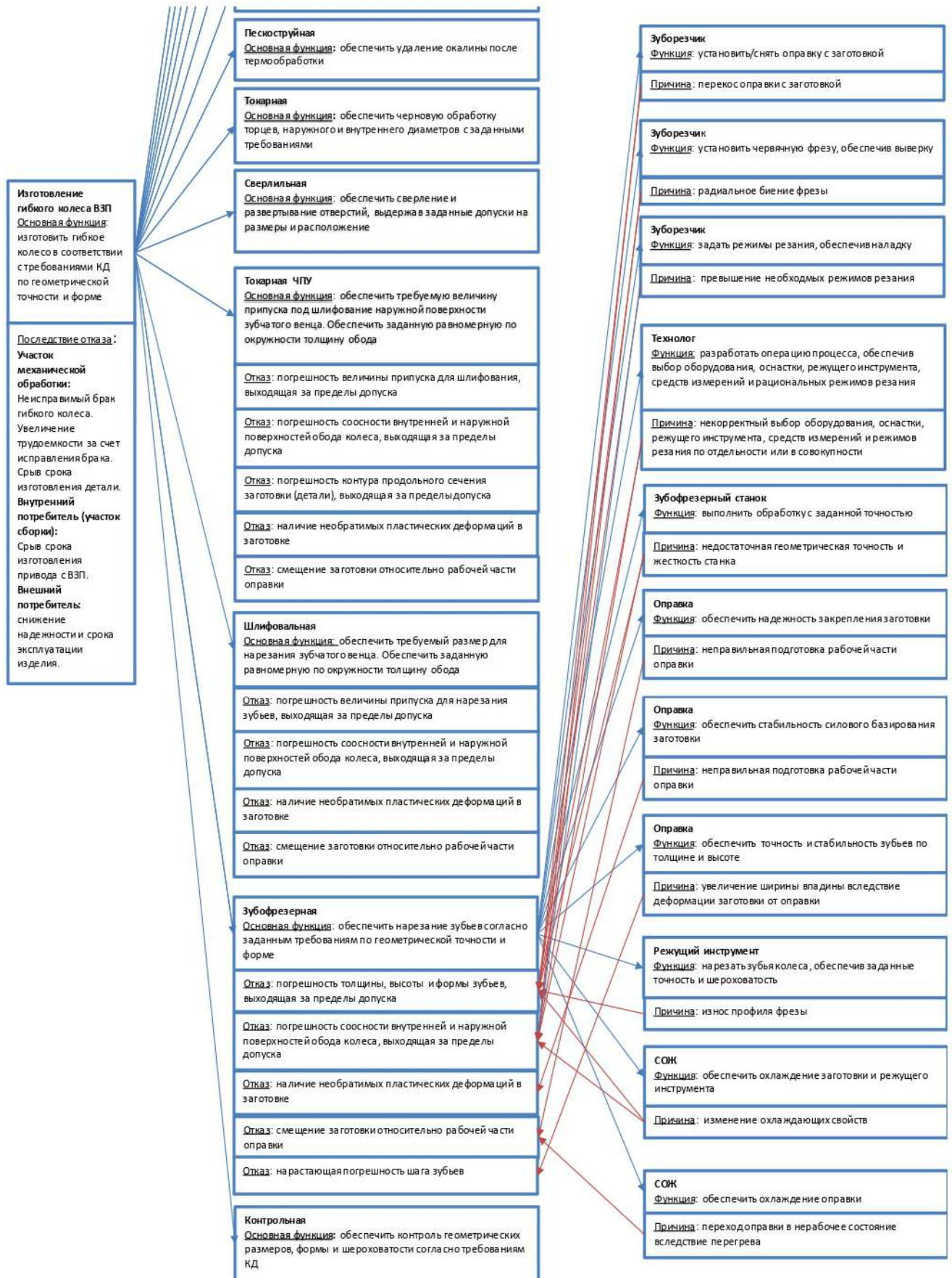


Рисунок 3.10 – Фрагмент дерева отказов для операции «Зубофрезерная»

Установленные приоритеты действий позволили разработать мероприятия, направленные на предупреждение причин возникновения отказов в процессе механической обработки гибких колес. Полученные результаты занесены в бланк протокола PFMEA-анализа (фрагменты бланка протокола PFMEA-анализа для операций «Токарная ЧПУ», «Шлифовальная», «Зубофрезерная» представлены на рисунках 3.11 – 3.16).

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ (ЭТАП 2)			ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ (ЭТАП 3)		
1. Процесс создания системы, подсистемы, компонента или наименование процесса	2. Операция процесса, номер участка и имя рассматриваемого элемента (4М)	3. Элемент функционирования процесса	1. Функция процесса. Функция системы, подсистемы, компонента или процесса	2. Функция операции, процесса и характеристики продукции (количественные значения при необходимости)	3. Функция элемента процесса и параметры процесса
Изготовление гибкого колеса ВЗП	Токарная обработка наружного контура по программе	Оператор СПУ	Изготовить гибкое колесо в соответствии требованиями КД по геометрической точности и форме	Обеспечить требуемую величину припуска под шлифование наружной поверхности зубчатого венца. Обеспечить заданную равномерную по окружности толщину обода.	Оператор СПУ: правильно установить/ снять оправку с заготовкой
		Технолог			Технолог: разработать операцию процесса, обеспечить выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и рациональных режимов резания
		Токарный станок с ПУ			Токарный станок с ПУ: выполнить обработку по программе с заданной точностью
		Наладчик			Наладчик: выставить инструмент "в ноль" (привязка инструмента)
		Управляющая программа			УП: обеспечить необходимые режимы резания УП: обеспечить необходимую траекторию перемещения режущего инструмента
		Режущий инструмент			Режущий инструмент: обработать наружную поверхность колеса, обеспечив заданные точность и шероховатость
		СОЖ			СОЖ: обеспечить охлаждение заготовки и режущего инструмента СОЖ: обеспечить охлаждение оправки
		Оправка для базирования			Оправка: обеспечить надежность закрепления заготовки Оправка: обеспечить стабильность силового базирования заготовки

Рисунок 3.11 – Фрагмент бланка «Этап 2» и «Этап 3» для операции «Токарная ЧПУ»

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ (ЭТАП 4)				АНАЛИЗ РИСКА (ЭТАП 5)					ОПТИМИЗАЦИЯ (ЭТАП 6)			
1. Последствия отказов для следующего верхнего уровня или конечного потребителя	Значимость (S)	2. Отказ операции процесса	3. Причины отказа в элементах функционирования процесса	Текущие меры по предупреждению (причины)	Возникновение (O)	Текущие меры по обнаружению (причины или отказа)	Обнаружение (D)	RPMCA AP	Специальная характеристика	Действия по предупреждению	Действия по обнаружению	
Участок механической обработки: увеличение трудоемкости за счет исправления брака. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): срыв срока изготовления привода с ВЗП.	7	Величина припуска для шлифования, выходящая за пределы допуска.	Оператор СПУ: перекос оправки с заготовкой	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором	2	L				
			Технолог: некорректный выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и режимов резания по отдельности или в совокупности	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L				
			Токарный станок с ПУ: недостаточная геометрическая точность и жесткость станка	Проверка на технологическую точность	2	Паспортизация	2	L				
			Наладчик: столкновение инструмента с частями приспособления и (или) станка	Визуализация траектории перемещения режущего инструмента на станке	2	Рабочая инструкция	2	L				
			УП: ошибка в написании	Визуализация траектории перемещения режущего инструмента в симуляторе	2	Рабочая инструкция	2	L				
			УП: сбой	Введение блокировок в УП	2	-	2	L				
Участок механической обработки: неисправимый брак гибкого колеса. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): срыв срока изготовления привода с ВЗП.	7	Погрешность соосности внутренней и наружной поверхностей обода колеса, выходящая за пределы допуска.	Оператор СПУ: перекос оправки с заготовкой	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором часового типа	2	L				
			Технолог: некорректный выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и режимов резания по отдельности или в совокупности	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L				
			Токарный станок с ПУ: недостаточная геометрическая точность и жесткость станка	Проверка на технологическую точность	2		2	L				
			Наладчик: столкновение инструмента с частями приспособления и (или) станка	Визуализация траектории перемещения режущего инструмента на станке	2	Рабочая инструкция	2	L				
			УП: ошибка в написании	Визуализация траектории перемещения режущего инструмента в симуляторе	2	Рабочая инструкция	2	L				
			УП: сбой	Введение блокировок в УП	2	-	2	L				
Участок механической обработки: неисправимый брак гибкого колеса. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): срыв срока изготовления привода с ВЗП.	7	Коробление заготовки от перегрева	СОЖ: изменение охлаждающих свойств	Своевременная замена	2	Контроль марки и рецептуры приготовления	2	L				
			Технолог: некорректный выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и режимов резания по отдельности или в совокупности	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L				
			Токарный станок с ПУ: недостаточная геометрическая точность и жесткость станка	Проверка на технологическую точность	2		2	L				
			Наладчик: столкновение инструмента с частями приспособления и (или) станка	Визуализация траектории перемещения режущего инструмента на станке	2	Рабочая инструкция	2	L				
			УП: ошибка в написании	Визуализация траектории перемещения режущего инструмента в симуляторе	2	Рабочая инструкция	2	L				
			УП: сбой	Введение блокировок в УП	2	-	2	L				
Участок механической обработки: неисправимый брак гибкого колеса. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): срыв срока изготовления привода с ВЗП.	7	Погрешность контура продольного сечения заготовки (детали), выходящая за пределы допуска	Наладчик: ошибка настройки станка	Визуализация траектории перемещения режущего инструмента на станке	2	Рабочая инструкция	2	L				
			УП: ошибка в написании	Визуализация траектории перемещения режущего инструмента в симуляторе	2	Рабочая инструкция	2	L				
			УП: сбой	Введение блокировок в УП	2	-	2	L				
			Токарный станок с ПУ: недостаточная геометрическая точность и жесткость станка	Проверка на технологическую точность	2	Паспортизация	2	L				
			Технолог: некорректный выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и режимов резания по отдельности или в совокупности	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L				
			Токарный станок с ПУ: недостаточная геометрическая точность и жесткость станка	Проверка на технологическую точность	2		2	L				
Участок механической обработки: неисправимый брак гибкого колеса. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): срыв срока изготовления привода с ВЗП.	7	Наличие необратимых пластических деформаций в заготовке	Оправка: неправильная подготовка рабочей части оправки		7		7	M		Моделирование функционирования рабочей части оправки с заготовкой		
			Смещение заготовки относительно рабочей части оправки	Оправка: неправильная подготовка рабочей части оправки		7		7	M		Моделирование функционирования рабочей части оправки с заготовкой	
			СОЖ: переход оправки в нерабочее состояние вследствие перегрева			7		7	M		Контроль температуры оправки	Инфракрасный пирометр "Кельвин"

Рисунок 3.12 – Фрагмент бланка «Этап 4», «Этап 5» и «Этап 6» для операции «Токарная ЧПУ»

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ (ЭТАП 2)			ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ (ЭТАП 3)		
1. Процесс создания системы, подсистемы, компонента или наименование процесса	2. Операция процесса, номер участка и имя рассматриваемого элемента (4М)	3. Элемент функционирования процесса	1. Функция процесса. Функция системы, подсистемы, компонента или процесса	2. Функция операции, процесса и характеристики продукции (количественные значения при необходимости)	3. Функция элемента процесса и параметры процесса
Изготовление гибкого колеса ВЗП	Шлифование наружной поверхности под нарезание зубчатого венца	Шлифовщик	Изготовить гибкое колесо в соответствии с требованиями КД по геометрической точности и форме	Обеспечить требуемый размер для нарезания зубчатого венца. Обеспечить заданную равномерную по окружности толщину обода	Шлифовщик: установить/снять оправку с заготовкой
					Шлифовщик: заправить шлифовальный круг, обеспечив выверку биения
					Шлифовщик: задать режимы резания
		Технолог			Технолог: разработать операцию процесса, обеспечив выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и рациональных режимов резания
		Шлифовальный станок			Шлифовальный станок: выполнить обработку с заданной точностью
		Оправка			Оправка: обеспечить надежность закрепления заготовки
					Оправка: обеспечить стабильность силового базирования заготовки
		Шлифовальный круг			Шлифовальный круг: шлифовать поверхность для нарезки зубьев, обеспечив заданные точность и шероховатость
		СОЖ			СОЖ: обеспечить охлаждение заготовки и режущего инструмента
	СОЖ: обеспечить охлаждение оправки				

Рисунок 3.13 – Фрагмент бланка «Этап 2» и «Этап 3» для операции «Шлифовальная»

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ (ЭТАП 4)				АНАЛИЗ РИСКА (ЭТАП 5)					ОПТИМИЗАЦИЯ (ЭТАП 6)			
1. Последствия отказов для следующего верхнего уровня или конечного потребителя	Значимость (S)	2. Отказ операции процесса	3. Причины отказа в элементах функционирования процесса	Текущие меры по предупреждению (причины)	Возникновение (O)	Текущие меры по обнаружению (причины или отказа)	Обнаружение (D)	PFMEA AP	Специальная характеристика	Действия по предупреждению	Действия по обнаружению	
Участок механической обработки: увеличение трудоемкости за счет исправления брака. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): срыв срока изготовления привода с ВЗП.	7	Величина припуска для нарезания зубьев, выходящая за пределы допуска.	Шлифовщик: перекос оправки с заготовки	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором часового типа	2	L				
			Шлифовщик: радиальное биение шлифовального круга	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором часового типа	2	L				
			Шлифовщик: превышение необходимых режимов резания	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L				
			Технолог: некорректный выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и режимов резания по отдельности или в совокупности	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L				
			Шлифовальный станок: недостаточная геометрическая точность и жесткость станка	Проверка на технологическую точность	2	Паспортизация	2	L				
			Шлифовальный круг: вид абразивного материала, его зернистость, твердость, засаливание	Дополнительное образование, своевременная замена	2	Аттестация, визуальный контроль	2	L				
Участок механической обработки: неисправимый брак гибкого колеса. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): срыв срока изготовления привода с ВЗП.	7	Погрешность соосности внутренней и наружной поверхностей обода колеса, выходящая за пределы допуска.	Шлифовщик: перекос оправки с заготовки	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором часового типа	2	L				
			Шлифовщик: радиальное биение шлифовального круга	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором часового типа	2	L				
			Шлифовщик: превышение необходимых режимов резания	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L				
			Технолог: некорректный выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и режимов резания по отдельности или в совокупности	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L				
			Шлифовальный станок: недостаточная геометрическая точность и жесткость станка	Проверка на технологическую точность	2	Паспортизация	2	L				
Участок механической обработки: неисправимый брак гибкого колеса. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): срыв срока изготовления привода с ВЗП.	7	Коробление заготовки от перегрева	СОЖ: изменение охлаждающих свойств	Своевременная замена	2	Контроль марки и рецептуры приготовления	2	L				
Участок механической обработки: неисправимый брак гибкого колеса. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): срыв срока изготовления привода с ВЗП.	7	Наличие необратимых пластических деформаций в заготовке	Оправка: не правильная подготовка рабочей части оправки		7		7	M		Моделирование функционирования рабочей части оправки с заготовкой		
			Смещение заготовки относительно рабочей части оправки	Оправка: не правильная подготовка рабочей части оправки		7		7	M		Моделирование функционирования рабочей части оправки с заготовкой	
			СОЖ: переход оправки в нерабочее состояние вследствие перегрева		7		7	M		Контроль температуры оправки	Инфракрасный пирометр "Кельвин"	

Рисунок 3.14 – Фрагмент бланка «Этап 4», «Этап 5» и «Этап 6» для операции «Шлифовальная»

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ (ЭТАП 2)			ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ (ЭТАП 3)		
1. Процесс создания системы, подсистемы, компонента или наименование процесса	2. Операция процесса, номер участка и имя рассматриваемого элемента (4М)	3. Элемент функционирования процесса	1. Функция процесса. Функция системы, подсистемы, компонента или процесса	2. Функция операции, процесса и характеристики продукции (количественные значения при необходимости)	3. Функция элемента процесса и параметры процесса
Изготовление гибкого колеса ВЗП	Нарезание зубьев	Зуборезчик	Изготовить гибкое колесо в соответствии с требованиями КД по геометрической точности и форме	Обеспечить нарезание зубьев согласно заданным требованиям по геометрической точности и форме.	Зуборезчик: установить/снять оправку с заготовкой
					Зуборезчик: установить червячную фрезу, обеспечив выверку
					Зуборезчик: задать режимы резания, обеспечив наладку
		Технолог			Технолог: разработать операцию процесса, обеспечив выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и рациональных режимов резания
		Зубофрезерный станок			Зубофрезерный станок: выполнить обработку с заданной точностью
		Оправка для силового базирования			Оправка: обеспечить надежность закрепления заготовки
					Оправка: обеспечить стабильность силового базирования заготовки
					Оправка: обеспечить точность и стабильность зубьев в по толщине и высоте
	Режущий инструмент	Режущий инструмент: нарезать зубья колеса, обеспечив заданные точность и шероховатость			
	СОЖ	СОЖ: обеспечить охлаждение заготовки и режущего инструмента			
		СОЖ: обеспечить охлаждение оправки			

Рисунок 3.15 – Фрагмент бланка «Этап 2» и «Этап 3» для операции «Зубофрезерная»

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ (ЭТАП 4)				АНАЛИЗ РИСКА (ЭТАП 5)					ОПТИМИЗАЦИЯ (ЭТАП 6)		
1. Последствия отказов для следующего верхнего уровня или конечного потребителя	Значимость (S)	2. Отказ операции процесса	3. Причины отказа в элементах функционирования процесса	Текущие меры по предупреждению (причины)	Возникновение (O)	Текущие меры по обнаружению (причины или отказа)	Обнаружение (D)	РЕИМАР	Специальная характеристика	Действия по предупреждению	Действия по обнаружению
Участок механической обработки: Неисправимый брак гибкого колеса. Увеличение трудоемкости за счет исправления брака. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): Срыв срока изготовления привода с ВЗП. Внешний потребитель: снижение надежности и срока эксплуатации изделия.	8	Погрешность толщины, высоты и формы зубьев, выходящая за пределы допуска	Зуборезчик: перекос оправки с заготовкой	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором часового типа	2	L			
			Зуборезчик: радиальное биение фрезы	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором часового типа	2	L			
			Зуборезчик: превышение необходимых режимов резания	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L			
			Технолог: некорректный выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и режимов резания по отдельности или в совокупности	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L			
			Зубофрезерный станок: недостаточная геометрическая точность и жесткость станка	Проверка на технологическую точность	2	Паспортизация	2	L			
			Режущий инструмент: износ профиля фрезы	Своевременная замена	2	Учет времени наработки	2	L			
			Зуборезчик: перекос оправки с заготовкой	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором часового типа	2	L			
Участок механической обработки: Неисправимый брак гибкого колеса. Увеличение трудоемкости за счет исправления брака. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): Срыв срока изготовления привода с ВЗП. Внешний потребитель: снижение надежности и срока эксплуатации изделия.	8	Погрешность соосности внутренней и наружной поверхностей обода колеса, выходящая за пределы допуска	Зуборезчик: радиальное биение фрезы	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором часового типа	2	L			
			Зуборезчик: превышение необходимых режимов резания	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L			
			Технолог: некорректный выбор оборудования, оснастки, режущего инструмента, средств измерений и режимов резания по отдельности или в совокупности	Дополнительное образование	2	Аттестация	2	L			
			Зубофрезерный станок: недостаточная геометрическая точность и жесткость станка	Проверка на технологическую точность	2	Паспортизация	2	L			
			Зуборезчик: перекос оправки с заготовкой	Математическое моделирование	2	Инструментальный контроль индикатором часового типа	2	L			
Участок механической обработки: Неисправимый брак гибкого колеса. Увеличение трудоемкости за счет исправления брака. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): Срыв срока изготовления привода с ВЗП. Внешний потребитель: снижение надежности и срока эксплуатации изделия.	8	Коробление заготовки от перегрева	СОЖ: изменение охлаждающих свойств	Своевременная замена	2	Контроль марки и рецептуры приготовления	2	L			
Участок механической обработки: Неисправимый брак гибкого колеса. Увеличение трудоемкости за счет исправления брака. Срыв срока изготовления детали. Внутренний потребитель (участок сборки): Срыв срока изготовления привода с ВЗП. Внешний потребитель: снижение надежности и срока эксплуатации изделия.	8	Наличие не обратимых пластических деформаций в заготовке	Оправка: не правильная подготовка рабочей части оправки		7		7	M		Моделирование функционирования рабочей части оправки с заготовкой	
			Оправка: не правильная подготовка рабочей части оправки		7		7	M		Моделирование функционирования рабочей части оправки с заготовкой	
			СОЖ: переход оправки в нерабочее состояние вследствие перегрева		7		7	M		Контроль температуры оправки	Инфракрасный пирометр "Кельвин"
			Оправка: увеличение ширины впадины вследствие деформации заготовки от оправки		7	Инструментальный контроль скобой по роликам	7	M		Моделирование влияния натяга заготовки и оправки на равномерность шага зубьев	Контроль геометрии стационарным 3D сканером

Рисунок 3.16 – Фрагмент бланка «Этап 4», «Этап 5» и «Этап 6» для операции «Зубофрезерная»

Анализируя полученные значимости последствий отказов, возникающих в процессе механической обработки гибких колес, можно сделать вывод, что наиболее значимыми являются отказы операции «Нарезание зубьев» по причине элемента функционирования «Оправка». Данные отказы могут привести к умеренно-высоким последствиям. Для самого участка, осуществляющего нарезание зубьев – это 100% гибких колес. Данный брак является частично устранимым: более половины деталей бракуются окончательно и запускается новая партия. Это приводит к значительным затратам и дополнительной трудоемкости. Последствием отказов для внутреннего потребителя (участок сборки ВЗП) будет частичная забраковка изделия, которая приведет к дополнительным затратам на замену забракованных деталей и увеличению времени производственного цикла. Для внешнего потребителя последствием данных отказов являются снижение надежности и срока эксплуатации изделия [106].

Следующим этапом проведена оптимизация полученных данных. Определены действия для улучшения мер предупреждения и обнаружения причин возникновения отказов, возникающих в ходе закрепления заготовки гибкого колеса и ее последующей механической обработки.

В результате проведенного исследования сделан вывод, что для снижения возникновения рисков, связанных с базированием и закреплением, рекомендовано разработать рабочую инструкцию по периодическому измерению параметров функционирования рабочей части оправки с целью подтверждения адекватной работы силового элемента из материала с ЭПФ.

Риски, связанные с низкой квалификацией персонала, рекомендовано снизить путем создания рабочих инструкций для различных операций процесса, а также дополнительного контроля со стороны службы качества и представителя приемки.

3.2 Математическое и численное моделирование процесса базирования с управляемым перемещением закрепления при механической обработке прецизионных гибких зубчатых колес на оправке с рабочей частью в виде втулки из сплава с эффектом памяти формы

В процессе решения технологических задач, возникающих при механической обработке тонкостенных осесимметричных деталей, предложен процесс силового базирования с управляемым перемещением закрепления при механической обработке тонкостенных осесимметричных деталей с использованием оправки с рабочей частью в виде втулки из сплава с ЭПФ. Свойства материала данного силового элемента позволяют обеспечить строго заданные радиальные рабочие перемещения силового элемента из сплава с ЭПФ, определяемые физико-механическими свойствами этих сплавов и режимами подготовки силового элемента. Это свойство механизированного оснащения с ЭПФ позволяет с высокой точностью управлять напряженно – деформированным состоянием материала заготовки в виде тонкостенной втулки. Применение данного способа позволяет обеспечить прецизионное базирование и закрепление заготовки за счет равномерного радиального натяга, вызванного управляемым радиальным перемещением её внешней поверхности в процессе обработки и свободное, без приложения нагрузки, снятие по завершении обработки.

Схема процесса силового базирования на оправке с рабочей частью из материала с ЭПФ представлена на рисунке 3.17. На нём условно изображены трубчатый силовой элемент 1 из сплава с ЭПФ, на пример ТН-1. Отверстие силового элемента 1 имеет радиус r_1 , а рабочая часть силового элемента выполнена с радиусом r_2 . Рабочая часть силового элемента 1 должна быть согласована с базовой поверхностью обрабатываемой детали и предназначена для базирования данной детали по четырем точкам.

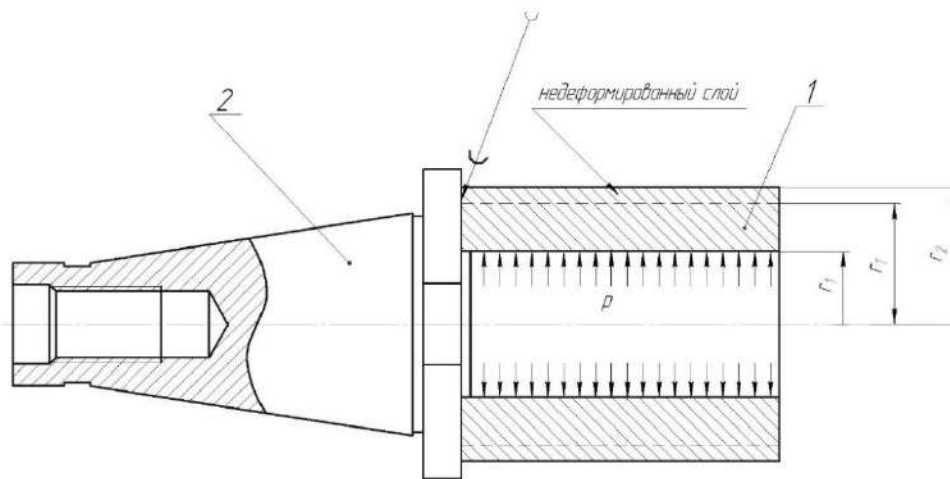


Рисунок 3.17 - Схема процесса базирования с управляемым усилием закрепления на оправке с рабочей частью из материала с ЭПФ

Втулка, изготовленная из сплава, обладающего ЭПФ (например $TiNi$), после соответствующей предварительной термосиловой подготовки, способна уменьшаться в диаметре при нагреве (этап установки заготовки) и увеличиваться при охлаждении (этап закрепления и обработки). Свойства сплавов с ЭПФ позволяют обеспечить требуемую стабильность и осесимметричность радиальных перемещений.

Для реализации данного подхода необходимо внешнее силовое воздействие, обеспечивающее раздачу самой втулки при температурной разгрузке – охлаждении. В подобных случаях, для силового элемента с ЭПФ в виде кольца или полого цилиндра малой скважности, решением служит дополнительный упругий элемент, например, реверсивная пружина. В рассматриваемом случае, при большой скважности, использование реверсивной пружины является проблематичным. При проведении предварительных экспериментов с силовым элементом данного вида, обнаружен эффект автореверсивного ЭПФ, возникающий и стабильно воспроизводящийся при определенном соотношении геометрических параметров и условий термосиловой подготовки силового элемента рассматриваемого типа. Данный эффект возникает, если в процессе предварительной принудительной раздачи втулки в псевдопластичной фазе деформация внутреннего слоя превышает предел текучести её материала. Тогда при восстановлении исходной формы в

процессе фазового перехода (при автообжиге) в этой области наводятся сжимающие напряжения, препятствующие деформации восстановления.

Для успешного практического применения предложенного процесса прецизионного шлифования требуется создание методики проектирования станочных приспособлений с силовым элементом из сплава с ЭПФ в форме втулки с заданным диапазоном изменения диаметра рабочей поверхности в зависимости от номенклатуры сечений и материала обрабатываемых деталей. Для создания данной методики необходима разработка математической модели термосилового взаимодействия силового элемента из сплава с ЭПФ в форме втулки с обрабатываемыми деталями, позволяющая управлять напряженно – деформированным состоянием системы деталь-приспособление.

Характер закрепления при нагружении заготовки в процессе её обработки дает основание принять в качестве допущения возможность рассматривать ее как оболочку при плоском напряженно-деформированном состоянии. В этом случае, как известно [81, 86] состояние осесимметричного объекта под внутренним давлением определяется тангенциальной компонентой напряжения и средним радиусом кривизны оболочки по уравнению Лапласа:

$$\frac{\sigma}{R} = \frac{p}{h}, \quad (3.1)$$

где σ – тангенциальные напряжения; R – средний радиус оболочки; p – давление на поверхности контакта с оправкой; h – толщина стенки. Раздача детали под давлением p и опоясывающим растяжением $\sigma = R \frac{p}{h}$ определяется согласно [86]:

$$w = \frac{\sigma R}{E} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right). \quad (3.2)$$

Величина крутящего момента, передаваемого оправкой через втулку с ЭПФ на заготовку в процессе шлифования, при значительной площади контакта достаточна при минимальном контактном давлении. Задавшись для гарантирования чисто упругой раздачи заготовки величиной $\sigma = 0.5\sigma_{0.2}$,

определяем необходимую величину рабочего хода втулки из материала с ЭПФ с помощью выражения (3.2).

Исходными соотношениями феноменологической модели силового элемента, форма которого, как и заготовка, имеет вид втулки, принимаются схематизированные экспериментальные зависимости, представленные на рисунке 3.18 [56]:

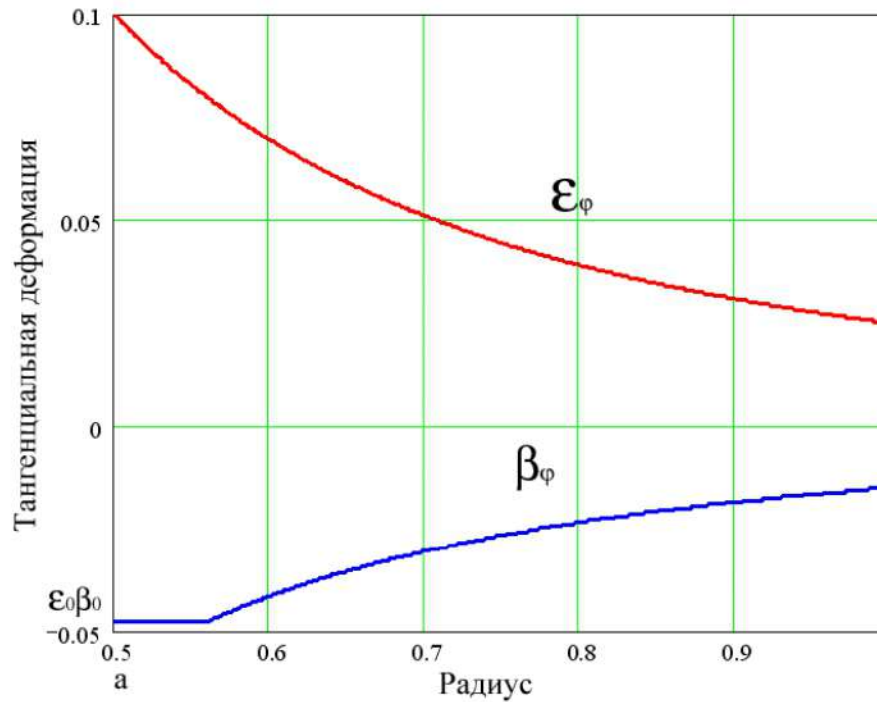


Рисунок 3.18 – Распределение тангенциальных деформаций наведения ε_φ и тангенциальной структурной деформации β_φ по радиусу силового элемента с ЭПФ в виде втулки

По граничным условиям силового элемента с ЭПФ в процессе предварительного деформирования при его термосиловой подготовке и последующего функционирования допускаем, что он находится в плоскодеформированном состоянии - $\varepsilon_z = 0$. Ввиду малости последней по сравнению со средней величиной остальных компонент деформаций примем условие несжимаемости (квазипластическое состояние):

$$\varepsilon_\rho + \varepsilon_\varphi = 0, \quad (3.3)$$

где ε_ρ , ε_φ – радиальная и окружная компоненты тензора деформаций.

Объединяя (3.3) и уравнение совместности деформации, имеющее в рассматриваемом случае вид [86]:

$$\frac{d\varepsilon_\varphi}{d\rho} - \frac{\varepsilon_\varphi - \varepsilon_\rho}{\rho} = 0, \quad (3.4)$$

получаем интеграл в тангенциальных деформациях вида

$$\varepsilon_\varphi = \frac{a}{\rho^2} \Delta, \quad (3.5)$$

где a - внутренний диаметр распорной втулки; 2Δ - величина ее раздачи по внутреннему диаметру; ρ - радиальная координата.

При моделировании процесса перекристаллизационного возврата геометрии силового элемента при его функционировании введем допущение, что температурное поле равномерно по его сечению (безградиентное) вследствие невысокой скорости нагрева или охлаждения системы деталь-приспособление. Пусть a и b - соответственно внутренний и наружный радиус втулки с ЭПФ. Также примем следующие допущения:

1) напряжения в материале силового элемента в процессе функционирования ограничены пределом упругости высокотемпературной фазы (соответствующей температуре конца обратного мартенситного превращения материала силового элемента);

2) материал втулки по-прежнему находится в плоскодеформированном состоянии: $\varepsilon_z = 0$;

3) тензор структурно-фазовой деформации является ортотропным девиатором и связан с начальной деформацией (деформацией наведения) согласно рисунку 3.18.

В таком случае приходим к системе уравнений, аналогичной осесимметричной краевой задаче термоупругости для полого цилиндра с закреплёнными торцами, содержащей:

обобщённый закон Гука в цилиндрической системе координат

$$\begin{cases} \varepsilon_\varphi + \beta = \frac{1+\mu}{E} [(1-\mu)\sigma_\varphi - \mu\sigma_\rho] \\ \varepsilon_\rho - \beta = \frac{1+\mu}{E} [(1-\mu)\sigma_\rho - \mu\sigma_\varphi] \end{cases}, \quad (3.6)$$

уравнение равновесия

$$\sigma_\varphi = \sigma_\rho + \rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho}; \quad (3.7)$$

уравнение совместности деформации

$$\varepsilon_\rho = \varepsilon_\varphi + \rho \frac{d\varepsilon_\varphi}{d\rho}. \quad (3.8)$$

Величины E и μ - соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала силового элемента.

Граничные условия в напряжениях на основании очевидной разгрузки при автообжиме втулки поверхности $\rho = b$ и отсутствие нагрузок на поверхности $\rho = a$ можно принять однородными:

$$\sigma_\rho(a) = \sigma_\rho(b) = 0. \quad (3.9)$$

Переходя к нормированной величине напряжений $\sigma(\rho) = \frac{1-\mu^2}{E} \sigma_\rho(\rho)$, систему (3.6)-(3.8) сводим одному уравнению вида:

$$\frac{d}{d\rho} \left(\rho^3 \frac{d\sigma}{d\rho} \right) = \frac{d}{d\rho} (\rho^2 \beta). \quad (3.10)$$

Решая краевую задачу (3.10) с учетом деформационных зависимостей (3.5), проиллюстрированных рисунком 3.18, получаем:

$$\tilde{\sigma}_\rho = -\lambda \left(1 - \frac{\alpha^2}{\eta^2} \right) + \begin{cases} \ln \frac{\eta}{\alpha}, \alpha \leq \eta \leq \chi \\ \ln \frac{\chi}{\alpha} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\chi^2}{\eta^2} \right), \chi \leq \eta \leq 1 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\tilde{\sigma}_\varphi = -\lambda \left(1 + \frac{\alpha^2}{\eta^2} \right) + \begin{cases} \ln \frac{\eta}{\alpha} + 1, \alpha \leq \eta \leq \chi \\ \ln \frac{\chi}{\alpha} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\chi^2}{\eta^2} \right), \chi \leq \eta \leq 1 \end{cases}, \quad (3.12)$$

где c – граница области предельной деформации при предварительной раздате; ε_0 – величина предельной обратимой деформации; β_0 – коэффициент обратимости деформации; $\eta = \frac{\rho}{b}$ – безразмерная радиальная координата; $\tilde{\sigma} = \frac{1-\mu^2}{E\beta_0\varepsilon_0}\sigma$

$$; \alpha = \frac{a}{b}; \chi = \frac{c}{b}; \lambda = \frac{1}{1-\alpha} \left[\ln \frac{\chi}{\alpha} + \frac{1-\chi^2}{2} \right],$$

На рисунке 3.19 показано распределение напряжений, определяемое с помощью выражений (3.11) и (3.12).

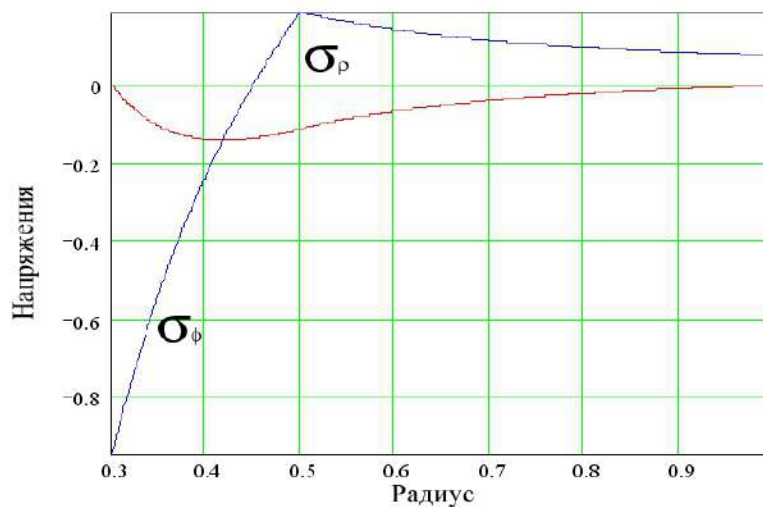


Рисунок 3.19 – Распределение тангенциальных напряжений σ_ϕ и радиальных напряжений σ_ρ по радиусу силового элемента с ЭПФ в виде втулки с радиусом 1 при относительном к радиусу внешней поверхности значению радиуса текучести 0.5 и при соотношении структурной деформации и деформации наведения 0.6

Как видно из (3.11), (3.12) и рисунка 3.19, во внутренних слоях втулки наводятся значительные по величине сжимающие тангенциальные напряжения, способствующие возвращению геометрических параметров данной втулки с ЭПФ, в исходное состояние.

Распределение тангенциальных структурных деформаций по сечению силового элемента из сплава с эффектом памяти формы также получено путем интегрирования дифференциального уравнения, в свою очередь полученного из условия совместности деформаций:

$$\beta_{\varphi} = \begin{cases} \beta_0, a \leq \eta \leq c \\ \beta_0 \frac{a}{\eta^2} \Delta, c \leq \eta \leq 1 \end{cases} \quad (3.13)$$

где β_{φ} - тангенциальная компонента структурной деформации; $2a$ – диаметр отверстия трубы; 2Δ - величина радиального перемещения стенки отверстия трубы при ее раздаче; η - текущая координата по радиусу сечения трубы; β_0 – соотношении структурной деформации (деформации памяти формы) и деформации наведения; c – значение радиуса текучести полученное при наведении структурных деформаций в материале силового элемента.

Если сделать допущение, что в процессе прямого мартенситного превращения, при охлаждении реального силового элемента с ЭПФ, из-за градиента температурного поля, граница перекристаллизации перемещается от внешней поверхности рассматриваемого силового элемента к его внутренней поверхности (что происходит при установке холодной заготовки на нагретую втулку, а также и при конвективном теплообмене на наружной поверхности нагретого силового элемента), эти сжимающие тангенциальные напряжения, предположительно, возрастут и более эффективно выполняют функцию возвратной пружины, способствуя стабильной автореверсивной работе втулки и, тем самым, дополнительно обеспечат надежную многоцикловую фиксацию заготовок. При этом величина автораздачи вследствие слабой сопротивляемости внешних слоев, переходящих в квазипластическое состояние в «мягкой» (мартенситной) фазе, практически равна величине начальной принудительной раздачи, и составляет на внешней поверхности

$$w^* = \frac{a}{b} w, \quad (3.14)$$

где w - величина начальной раздачи по внутренней поверхности, определяемая согласно (3.2) и (3.5). Высказанное допущение требует дальнейшей теоретической и экспериментальной проверки.

Таким образом, результаты математического моделирования процесса функционирования силового элемента в виде втулки из материала с ЭПФ, входящего в конструкцию оправки для прецизионного шлифования в рамках феноменологической теории деформируемого твёрдого тела позволяют сформулировать наиболее простое объяснение механизма экспериментально наблюдаемого автореверсивного режима и подтверждают возможность его практического использования.

Дальнейшее развитие полученных результатов предполагается получить путём детализации модели за счёт выявления зависимости величины рабочего хода и натяга втулки из материала с ЭПФ оправки для базирования с управляемым усилием закрепления от её геометрических параметров и параметров термосиловой подготовки, а также за счёт учета неравномерности температурного поля, которая существует при функционировании реального силового элемента из сплава с ЭПФ. Детализированная математическая модель функционирования силового элемента приспособления для механической обработки, после всесторонней экспериментальной проверки, может быть использована для разработки методики проектирования данных приспособлений и позволит охватить достаточно широкую номенклатуру тонкостенных деталей, для которых необходимо базирование с управляемым усилием закрепления.

Для успешного внедрения в производство технологических процессов рассматриваемого класса необходима инженерная методика проектирования соответствующего технологического оснащения. Необходимая методика проектирования данного технологического оснащения может быть разработана с применением аналитических зависимостей, связывающих конструктивные параметры и параметры подготовки рабочей части оснащения с параметрами ее функционирования.

Эта цель может быть достигнута за счет решения задачи по аналитическому моделированию процесса функционирования силового элемента в виде втулки из сплава с ЭПФ и сравнения полученных ранее соответствующих результатов [1].

Для подтверждения адекватности результатов аналитического моделирования проведено численное моделирование процесса функционирования рабочей части оснащения (втулки из материала с ЭПФ) с использованием системы ANSYS. К тому же, численное моделирование процесса подготовки и функционирования втулки из материала с ЭПФ позволяет глубже исследовать процессы, происходящие в материале, которые влияют на работоспособность технологического оснащения.

На первом этапе численного моделирования процесса работы втулки проведено математическое описание свойств материала с памятью формы. Для описания поведения материала была использована трехмерная термомеханическая конечно элементная модель для фазовых превращений под действием напряжений, описанная в [110]. В рамках классической необратимой термодинамики, используемая модель способна воспроизводить все основные особенности поведения материалов с памятью формы в объемном напряженно-деформируемом состоянии.

В основе используемой модели лежит известное уравнение потенциала свободной энергии, которое имеет вид:

$$\Psi(\varepsilon, T, \varepsilon_{tr}) = \frac{1}{2}(\varepsilon - \varepsilon_{tr}) : D : (\varepsilon - \varepsilon_{tr}) + \tau_M(T) \|\varepsilon_{tr}\| + \frac{1}{2} h \|\dot{\varepsilon}_{tr}\|^2 + I_{\dot{\varepsilon}_{tr}}(\dot{\varepsilon}_{tr}) \quad , \quad (3.15)$$

где D – тензор упругой жесткости материала;

ε – общая деформация;

ε_{tr} – общая деформация фазового перехода;

$\dot{\varepsilon}_{tr}$ – девиаторная деформация фазового перехода;

$\tau_M(T)$ – положительная и монотонно возрастающая функция температуры $\beta(T-T_0)$;

β – параметр материала, характеризующий величину деформации памяти формы;

T – текущая температура;

T_0 – температура конца мартенситного перехода в ненапряженном состоянии;

h – параметр материала, связанный с упрочнением материала во время фазового перехода;

$I_{\epsilon_{tr}}(\epsilon_{tr})$ – индикаторная функция, введенная для соблюдения условий нормирования деформации перехода.

Для проверки корректности параметров материала с ЭПФ, используемых в конечно - элементной модели, создаваемой в системе ANSYS, были проведены сравнительные тестовые эксперименты. Для этого была рассмотрена одномерная задача, описывающая функционирование проволоки из материала с ЭПФ. Проведены натурные эксперименты, заключающиеся в термоциклировании проволоки из материала с ЭПФ, а также выполнены численные эксперименты по исследованию этого процесса с помощью программы ANSYS. Целью сравнения экспериментальных результатов натурального моделирования с результатами численного эксперимента был подбор библиотечных характеристик материала с ЭПФ, содержащихся в системе, для использования их при моделировании процесса функционирования автореверсивной втулки.

Для тестового эксперимента была использована проволока из сплава ТН-1 длиной 400 мм и диаметром 1 мм. Один конец проволоки был закреплен. Для задания равномерных по длине проволоки деформаций наведения был применен технологический прием - проволока нагревалась до температуры выше температуры конца обратного мартенситного превращения ее материала (400°C) путем пропускания по ее сечению электрического тока. Далее противоположный конец проволоки нагружался силой в 300 Н путем закрепления соответствующих грузов на свободном конце. Нагрев отключался, и материал проволоки охлаждался до температуры ниже температуры конца прямого мартенситного превращения (22°C). В процессе охлаждения проволока растягивалась – в ее материале создавалась деформация наведения. Далее грузы частично убирались, и соответствующая нагрузка (нагрузка сопротивления) составляла 100 Н. Потом проволока аналогичным образом нагревалась до температуры выше температуры конца обратного мартенситного превращения ее материала (400°C). В результате проволока сокращала свою длину. Температура нагрева контролировалась

термопарой и потенциометром. На каждом этапе эксперимента длина проволоки контролировалась с помощью рулетки. В результате эксперимента установлено, что после деформирования с нагрузкой 300Н длина проволоки увеличилась на $48 \pm 0,5$ мм. При уменьшении нагрузки до 100Н удлинение образца составило $44 \pm 0,5$ мм при напряжении сопротивления 127 МПа. После нагрева материала проволоки до 400°C удлинение проволоки составило $17 \pm 0,5$ мм при неизменившемся напряжении сопротивления.

Далее данная задача функционирования проволоки из материала с ЭПФ была смоделирована в системе ANSYS. Для конечно элементной модели был выбран балочный элемент BEAM188. Задана длина элемента - 1,5 мм и его диаметр – 1,0 мм. Свойства материала с ЭПФ заданы в библиотеке системы ANSYS Shape Memory Alloy с различными значениями соответствующих параметров. В результате моделирования процесса наведения деформации памяти формы и процесса возврата при термоупругих фазовых превращениях, получены численные решения данной задачи для различных значений библиотечных параметров. Из множества полученных решений выбрано то, у которого результаты наиболее близки к результатам тестового эксперимента.

Результаты выбранного решения: на конец первого шага расчета упругопластическое удлинение проволоки составило 46,3 мм, на конец второго шага расчета удлинение составило 42,6 мм, на третьем шаге, при термоупругих фазовых превращениях с действующим напряжением сопротивления 127 МПа, остаточное удлинение равнялось 17,3 мм.

По результатам сравнительного эксперимента натурального и численного моделирования проведен уточненный выбор параметров материала с ЭПФ.

В дальнейшем данная модель материала с уточненными коэффициентами была применена при моделировании процесса функционирования рабочего элемента приспособления - втулки из материала с ЭПФ.

Цель моделирования состояла в определении напряженно-деформированного состояния втулки из материала с ЭПФ, особенно распределения окружных напряжений вдоль радиуса втулки. Это важно для научного

подтверждения существования эффекта автореверсивности рабочего элемента приспособления, обеспечивающего его стабильное и многоцикловое функционирование.

Численное моделирование производилось с применением статического анализа в плоской осесимметричной постановке. Применен конечный элемент PLANE182. Наружный диаметр втулки задан равным 28 мм (точка 2), диаметр осевого отверстия задан равным 14 мм (точка 1). Длина втулки 30 мм (рисунок 3.20).

Задача решалась в три этапа.

На первом этапе в материале втулки создавалось поле деформаций наведения за счет перемещения поверхности отверстия вдоль оси X. На практике такое поле деформаций наведения в материале втулки выполняется, например, путем дорнования.

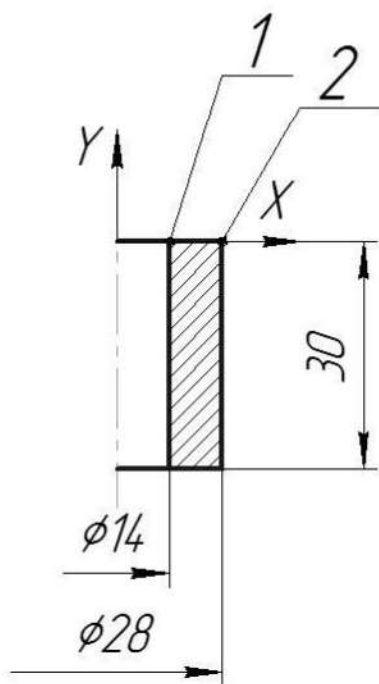


Рисунок 3.20 – Расчетная схема для моделирования процесса функционирования втулки

На втором этапе перемещения поверхности отверстия снимались, то есть освобождалась поверхность внутреннего отверстия (например, путем извлечения дорна), и происходил упругий возврат втулки.

На третьем этапе задавался равномерный по сечению нагрев втулки от начальной температуры 22 °С до конечной температуры 400 °С (выше температуры конца обратного мартенситного превращения материала втулки). На этом этапе моделировался процесс возврата втулки к форме, приближенной к первоначальной, другими словами диаметры внутреннего отверстия и наружной поверхности уменьшались.

Для разработанной конечно-элементной модели задавались последовательно четыре значения перемещения наведения: 0,10; 0,15; 0,20 и 0,25 мм на радиус внутреннего отверстия.

Результатами моделирования являются значения компонент, характеризующих напряженно-деформированное состояние втулки из материала с ЭПФ (радиальные напряжения, окружные напряжения, радиальные деформации, окружные деформации) для решений на всех этапах численного эксперимента в точках, расположенных вдоль оси X (от точки 1 до точки 2 на рисунке 3.20).

Получены также зависимости изменения окружных напряжений (на этапе возврата) от раздачи втулки (рисунок 3.21, рисунок 3.22).

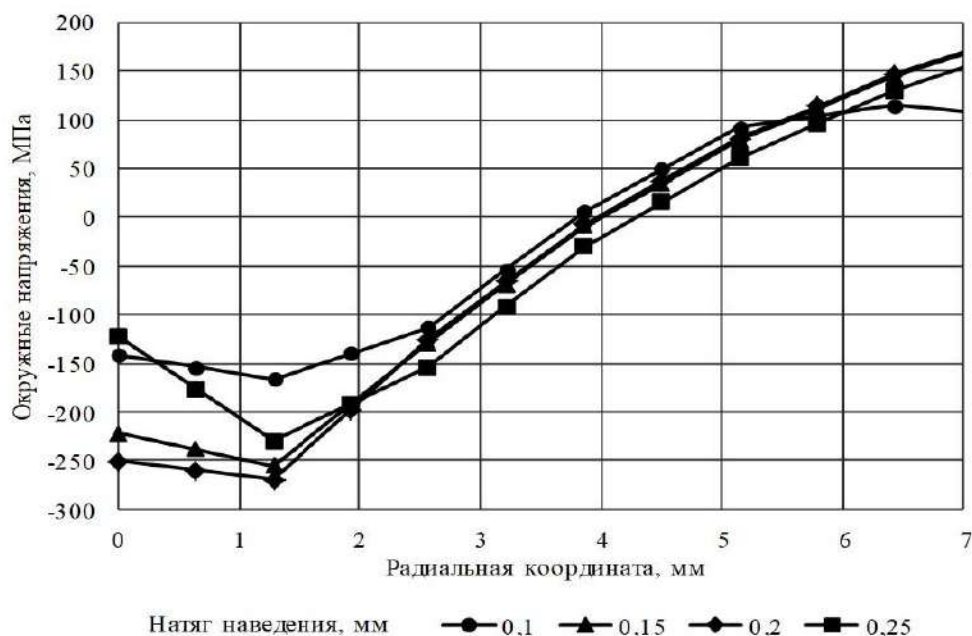


Рисунок 3.21 – Распределение окружных напряжений в зависимости от раздачи втулки (по толщине втулки) при различных натягах наведения

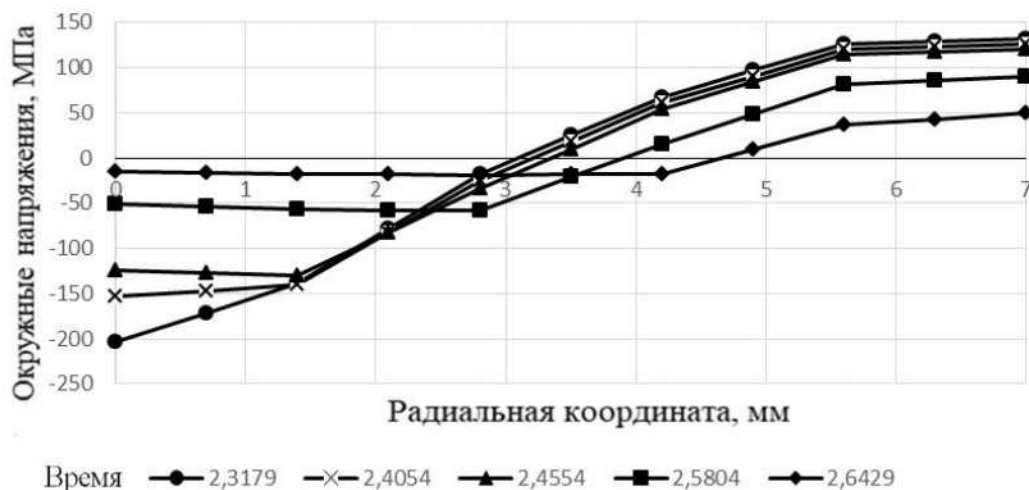


Рисунок 3.22 – Распределение окружных напряжений по толщине втулки на этапе возврата

3.3 Численное моделирование процесса нарезания зубчатого венца гибкого колеса при базировании с управляемым перемещением закрепления

Изнашивание зубьев и поломка гибкого зубчатого колеса ВЗП определяется отклонениями геометрических размеров и формы зубчатого венца, проявляющимися, в конечном итоге, из-за несовершенства технологии механической обработки гибких колес. Это подтвердил проведенный PFMEA анализ технологического процесса изготовления гибкого колеса [106].

Согласно проведенному анализу, формообразование оболочки и зубообразование являются наиболее сложными операциями при изготовлении гибкого колеса. Тонкостенная заготовка гибкого зубчатого колеса не обладает достаточной жесткостью и под действием давления инструмента, станочного приспособления и других нагрузок, неизбежных при механической обработке, изменяют свою форму и размеры.

Данную проблему управления качеством гибких зубчатых колес можно решить путем обеспечения жесткости заготовки в процессе базирования в оснастке и при ее дальнейшей механической обработке. Поставленная задача решается применением разработанного ранее технологического оснащения с применением

эффекта памяти формы (ЭПФ). Цилиндрическая прецизионная оправка обеспечивает закрепление заготовки за счёт управления заданным радиальным натягом, вызванным контролируемым равномерным радиальным перемещением её рабочей поверхности в процессе закрепления заготовки.

Нарезание зубьев гибкого колеса в условиях базирования с управляемым перемещением закрепления приводит к снижению жесткости и растяжению заготовки. В результате изменяется диаметр делительной окружности, и как следствие получают разность в ширине зубьев, неравномерность шага, и в конечном итоге могут возникнуть нерасчетные дополнительные нагрузки при совместной работе гибкого и жесткого колес ВЗП. Это обуславливает дополнительные риски снижения ресурса ВЗП, возникает необходимость их оценки. Для этой оценки важно исследовать влияние методов базирования с управляемым перемещением закрепления и приспособления на точность шага зубчатого венца, являющегося основным параметром детали, изменение его геометрических характеристик во время обработки.

Компьютерное моделирование процесса нарезания зубьев на гибком колесе с использованием базирования на оправке с рабочей частью из материала с ЭПФ проводилось с использованием системы ANSYS. Задача решалась в плоско-деформированной постановке.

Гибкое колесо содержит 290 зубьев. Заготовка колеса установлена на оправке из материала с памятью формы с натягом. Величина натяга составляла 0,2 мм на диаметр. Натяг моделировался построением оправки с диаметром на 0,2 больше, чем посадочный диаметр заготовки. В процессе моделирования нарезания зубьев производилось поочерёдное удаление элементов, принадлежащих зоне выреза. После нарезания всех зубьев моделировалось удаление оправки.

Целью моделирования было определение деформаций гибкого колеса в процессе нарезания зубьев. На основе чертежа была построена геометрическая модель заготовки гибкого колеса (рисунок 3.23). На рисунке 3.24 показаны поверхности вырезов зубьев.

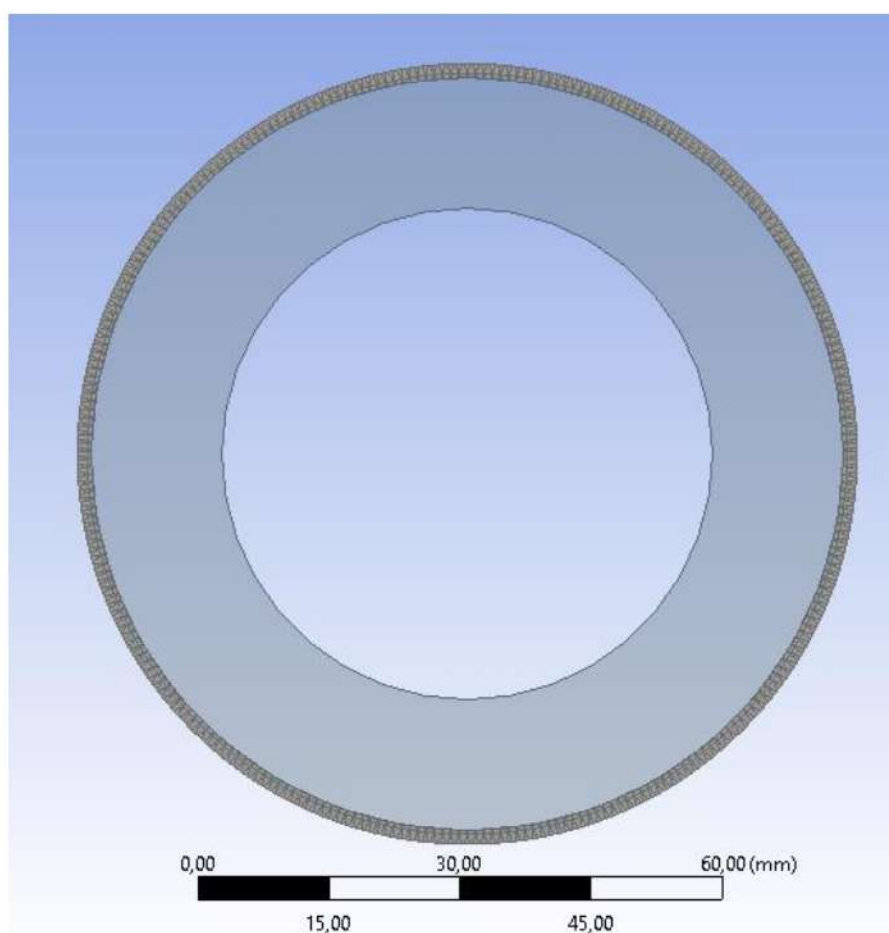


Рисунок 3.23 – Геометрическая модель заготовки гибкого колеса на оправке

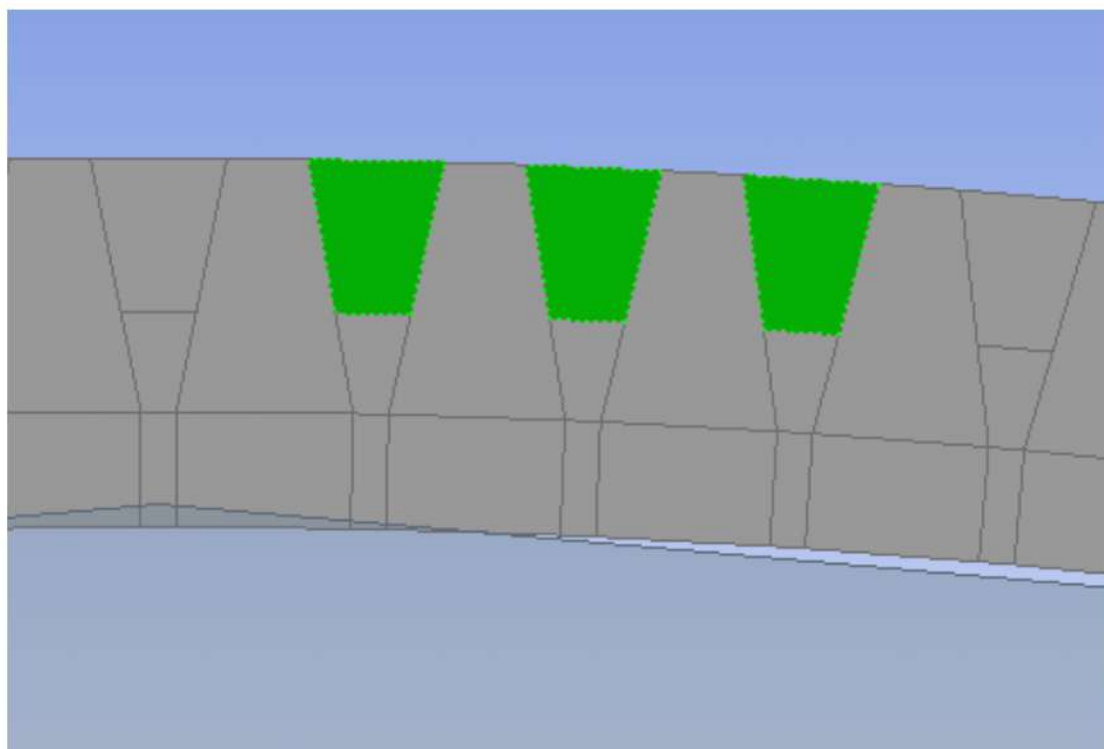


Рисунок 3.24 – Поверхности вырезов зубьев

Материал заготовки и оправки принят со средними свойствами конструкционной стали: модуль Юнга $E=2e11$ Па, коэффициент Пуассона 0,3. Предполагаемая величина деформации находится в упругой зоне материала. Между оправкой и заготовкой создана контактная пара с трением 0,1 (рисунок 3.25).

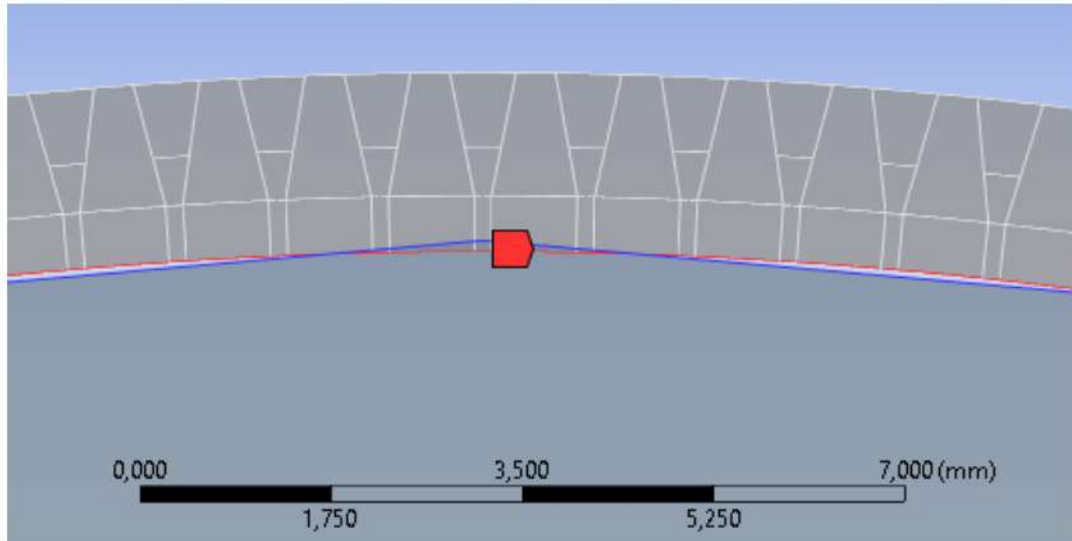


Рисунок 3.25 – Обозначение контактной пары

Конечно-элементная сетка была разбита регулярно четырёхугольными элементами со средними узлами (рисунок 3.26)

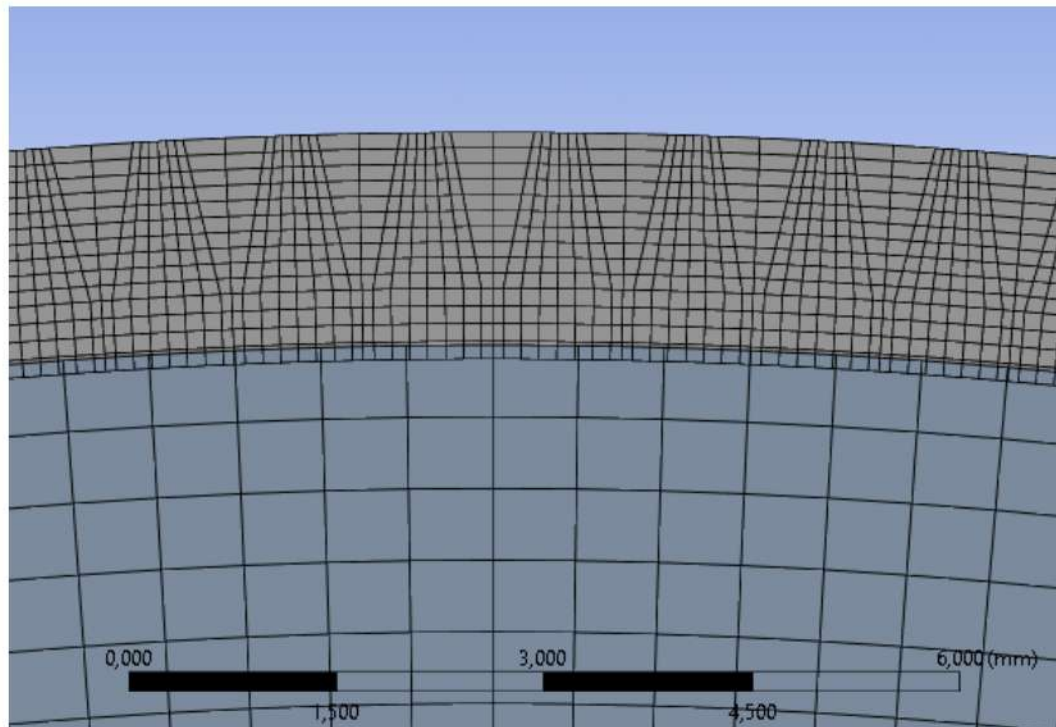


Рисунок 3.26 – Конечно-элементная сетка

В местах поверхностей вырезов созданы компоненты, состоящие из элементов (рисунок 3.27).

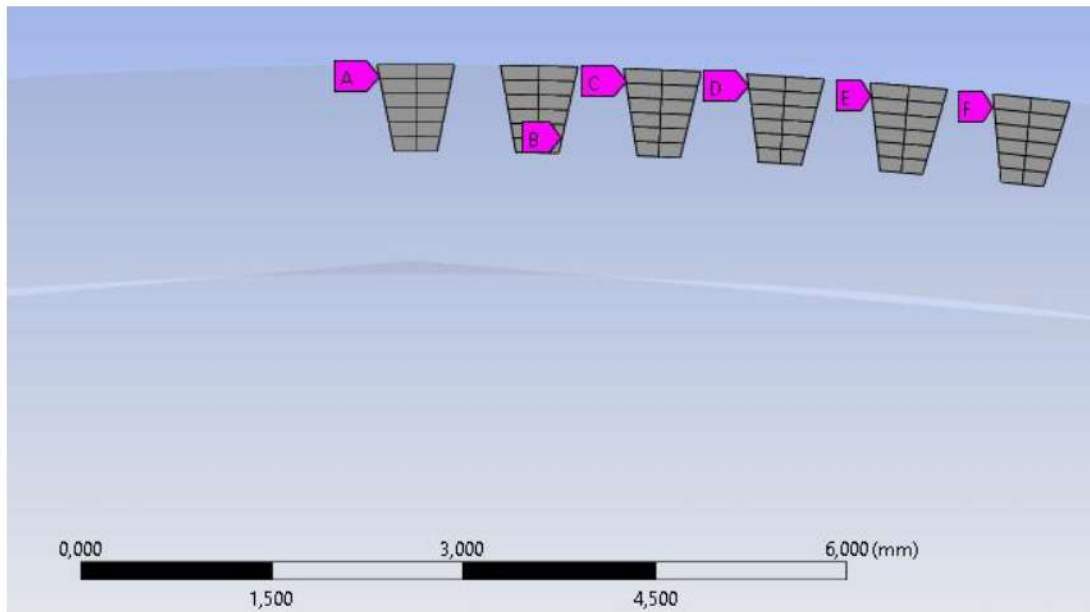


Рисунок 3.27 – Некоторые компоненты на поверхностях вырезов

Внутреннее ребро оправки закреплено по всем степеням свободы (рисунок 3.28).

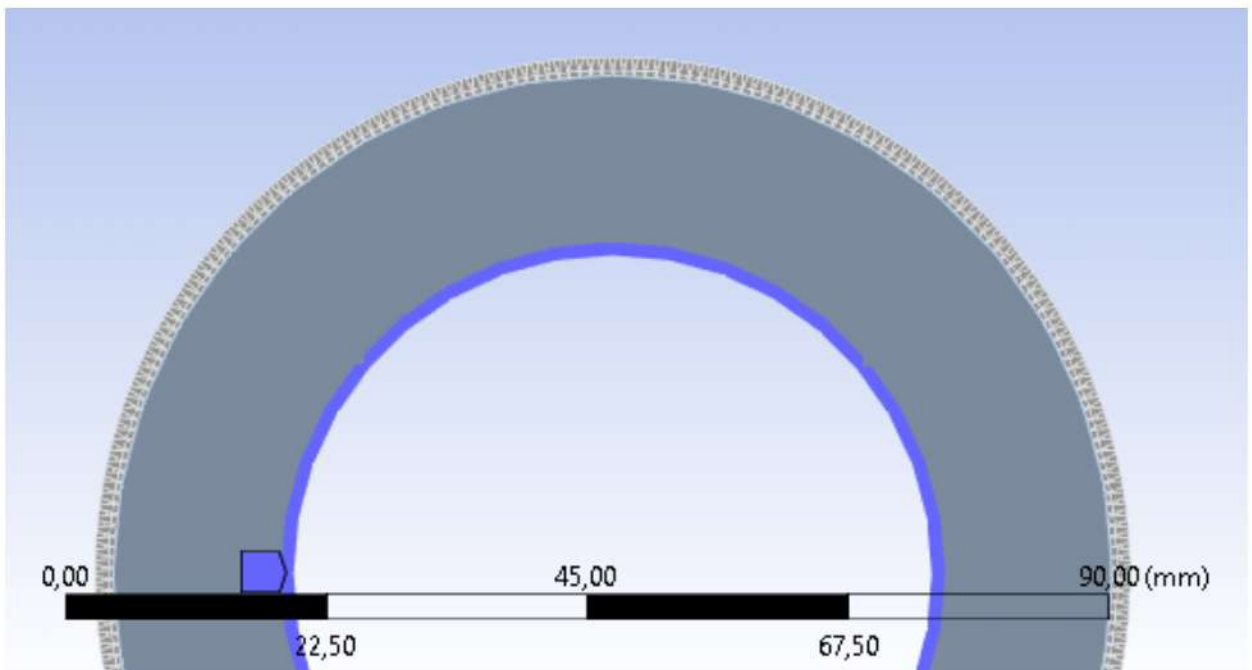


Рисунок 3.28 – Закрепление внутреннего ребра оправки

По окончании моделирования зубьев удалялись контактные элементы и моделировался упругий возврат заготовки.

Первый шаг нагружения – моделирование натяга. На рисунке 3.29 показана эпюра суммарных перемещений в абсолютной системе координат на конец 1-го шага. Видно, что максимум практически равен величине натяга.

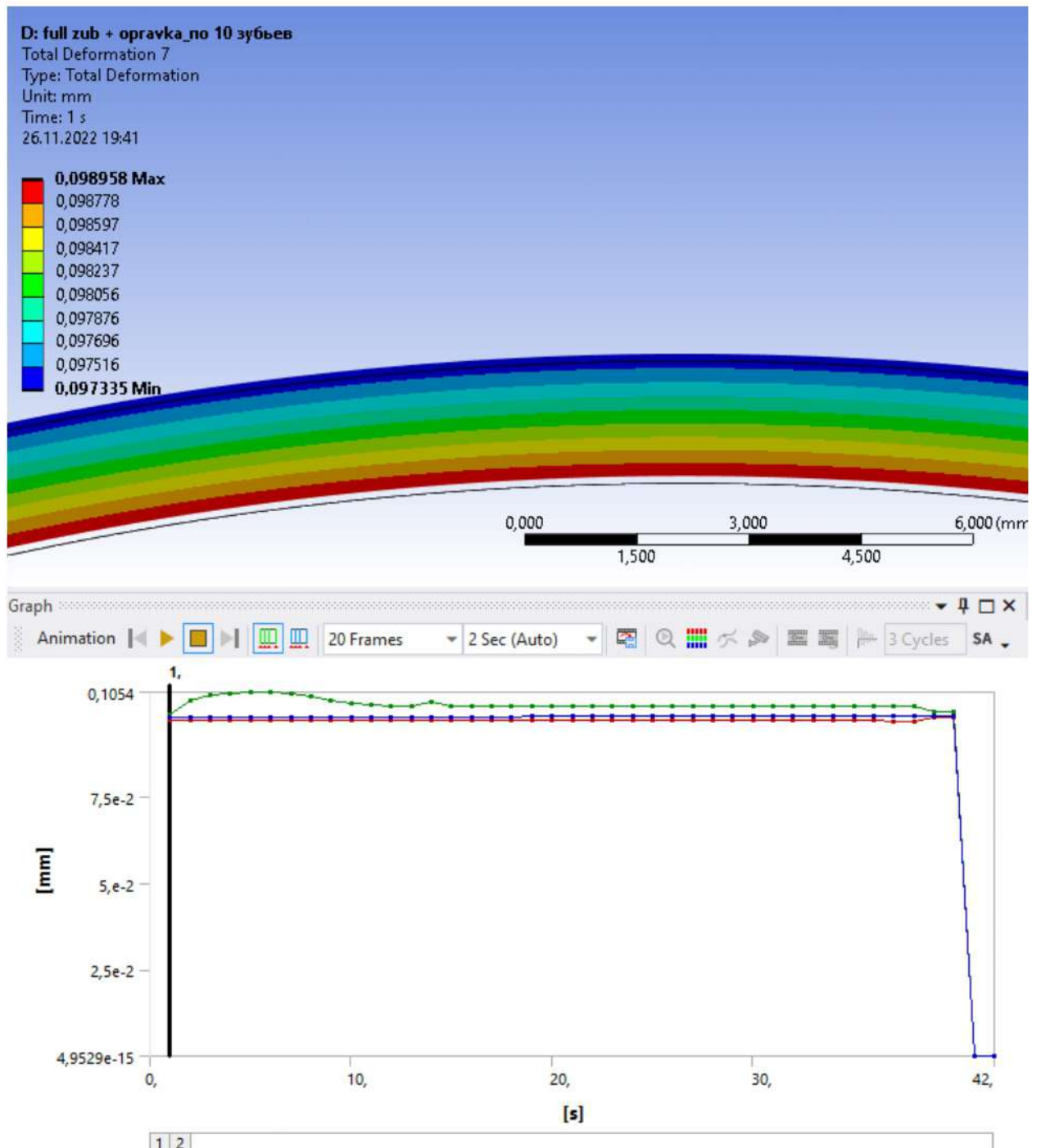


Рисунок 3.29 – Эпюра суммарного перемещения на конец 1-го шага

Для оценки радиальных и окружных перемещений введена цилиндрическая система координат (СК). Центр этой СК совпадает с центром оправки.

После нарезания 1-го зуба видно окружное перемещение в сторону увеличения радиуса (рисунок 3.30). Максимум перемещения составляет ~ 5 мкм.

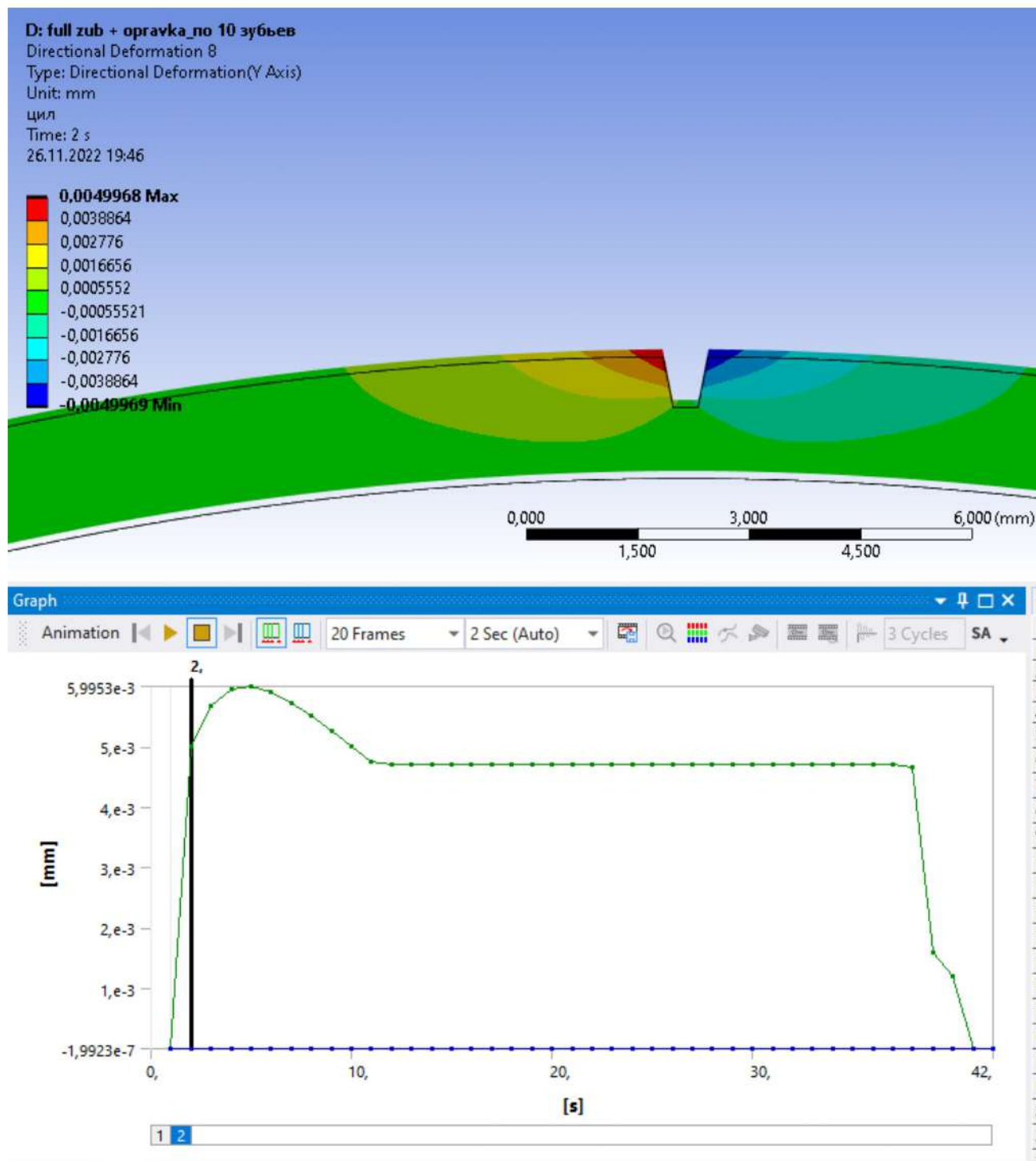


Рисунок 3.30 – Эпюра перемещений в окружном направлении в цилиндрической СК после нарезания 1-го зуба

Окружные перемещения увеличиваются в процессе нарезания первых 4-х зубьев (рисунок 3.31). Максимальное значение перемещения элементов профиля зуба составляет ~ 6 мкм, что соизмеримо с допуском на погрешность профиля зуба $f_f=9$ мкм для $m=0,3$ мм и степени точности 7-f по ГОСТ 9178-81.

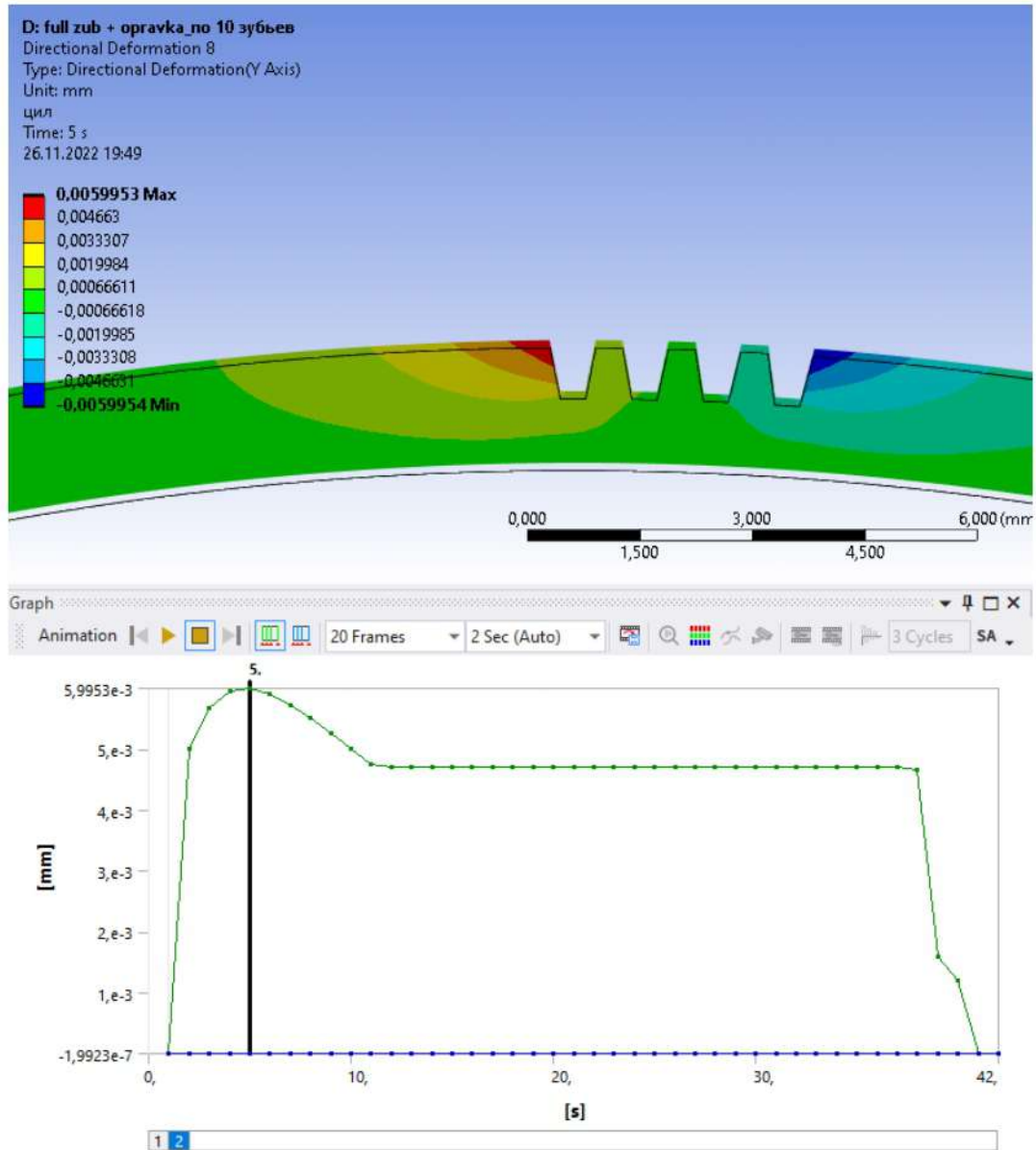


Рисунок 3.31 – Эпюра перемещений в окружном направлении в цилиндрической СК после нарезания 4-го зуба

В радиальном направлении эпюра после нарезания 4-го зуба представлена на рисунке 3.32. Составляет примерно те же 5 мкм. На эпюре видно суммирование этих перемещений с натягом.

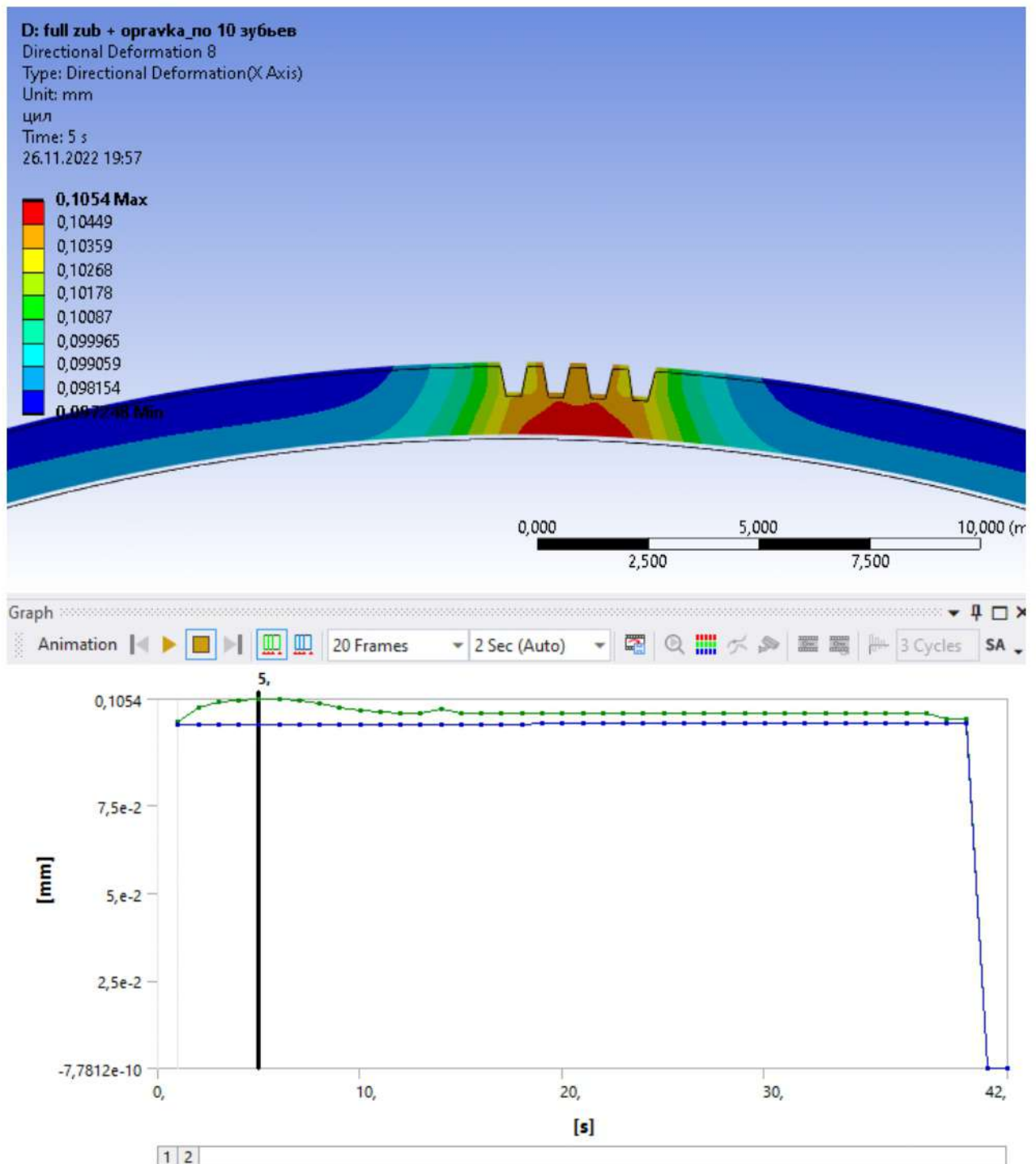


Рисунок 3.32 – Окружные перемещения в цилиндрической СК после нарезания 4-го зуба

При дальнейшем нарезании зубьев величина окружных перемещений стабилизируется и составляет $\sim 4,7$ мкм (рисунок 3.33).

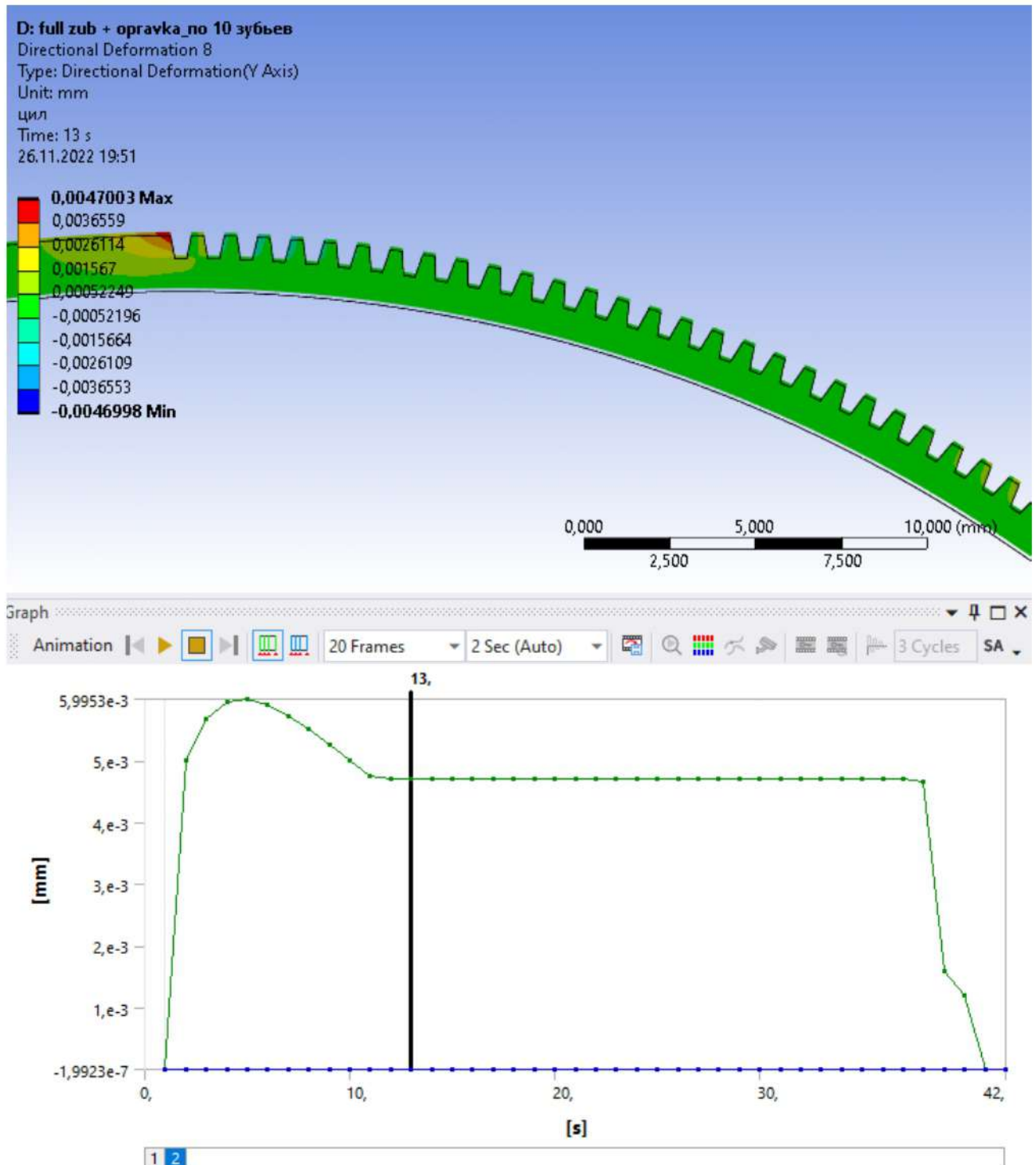


Рисунок 3.33 – Эпюра перемещений в окружном направлении в цилиндрической СК после нарезания 12-го зуба

При нарезании предпоследнего и последнего зуба окружные перемещения значительно снижаются и составляют $\sim 1,5$ мкм. При разгрузке заготовка полностью возвращается в исходное состояние.

3.4 Выводы по главе 3

1. Выполнена оценка рисков потенциальных отказов процесса механической обработки гибких колес волновых зубчатых передач. Инструмент оценки рисков основан на методике анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса (PFMEA). Проведен структурный, функциональный анализ и анализ отказов, возникающих в процессе токарной обработки, шлифования и нарезания зубьев гибкого колеса.

На токарной операции обработки наружного контура гибкого колеса по программе выявлено шесть потенциальных несоответствий по 22-ум причинам, из них наиболее значимыми с рангом М (medium) являются два несоответствия по трем причинам: неправильная подготовка рабочей части оправки и ее перегрев, ведущие к необратимым пластическим деформациям или смещению заготовки относительно рабочей части оправки.

На операции шлифования наружной поверхности под нарезание зубчатого венца гибкого колеса выявлено пять потенциальных несоответствий по 15-ти причинам, из них наиболее значимыми с рангом М (medium) являются те же два несоответствия по трем причинам: неправильная подготовка рабочей части оправки и ее перегрев, ведущие к необратимым пластическим деформациям или смещению заготовки относительно рабочей части оправки.

На операции нарезания зубчатого венца гибкого колеса выявлено шесть потенциальных несоответствий по 16-ти причинам, из них наиболее значимыми с рангом М (medium) являются три несоответствия по четырем причинам: неправильная подготовка рабочей части оправки и ее перегрев, ведущие к необратимым пластическим деформациям или смещению заготовки относительно рабочей части оправки и нарастающая погрешность шага зубьев вследствие деформации заготовки от оправки.

В результате анализа проведена оценка рисков и установлен перечень мероприятий, направленных на повышение качества процесса механической обработки гибких колес волновых зубчатых передач. Среди указанных

мероприятий – контроль температуры оправки, моделирование функционирования рабочей части оправки с заготовкой и моделирование влияния натяга заготовки и оправки на неравномерность шага зубьев.

2. Проведено математическое и численное моделирование процесса совместного функционирования втулки из материала с эффектом памяти формы и тонкостенной цилиндрической заготовки. Полученные результаты теоретических исследований с использованием математической и численной моделей позволили обосновать экспериментально обнаруженный эффект автореверсивной работы втулки из материала с эффектом памяти формы. Полученная численная модель позволила оценить поведение втулки из материала с ЭПФ эффектом памяти формы в различных условиях. При этом было определено напряженно-деформированное состояние исследуемого объекта (радиальные напряжения, окружные напряжения, радиальные деформации, окружные деформации) и его влияние на работоспособность технологической оснастки. Кроме того, был произведен численный эксперимент при разных значениях перемещения наведения на радиус внутреннего отверстия, который показал зависимость тангенциальных напряжений от величины натяга наведения.

3. Проведено численное моделирование процесса нарезания зубчатого венца гибкого колеса при базировании на оправке с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы. 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. В процессе нарезания зубьев гибкого колеса с использованием базирования на оправке с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы необходимо учитывать влияние этих перемещений на точность зубьев. Обеспечить точность геометрии зубчатого венца гибкого колеса, тем самым повышая сопротивление усталости последнего, возможно путем изменения расстояния между делительной окружностью колеса и фрезой, то есть смещением инструмента в процессе нарезания зубьев.

4. Детализированная математическая модель функционирования силового элемента технологической оснастки нуждается во всесторонней экспериментальной проверке для оценки ее адекватности. Проведенные теоретические исследования позволяют создать методику проектирования технологической оснастки для базирования прецизионных тонкостенных деталей с управляемым перемещением закрепления.

5. Научной новизной является разработанная математическая модель обеспечения качества процесса функционирования рабочей поверхности оправки из материала с ЭПФ при базировании прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления. А также, 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. Проведенное моделирование позволило снизить уровень дефектности по причине отклонения обода от соосности на 28%, а по причине неравномерного шага зубьев на 37%.

ГЛАВА 4 Комплексная апробация предложенных решений

4.1 Разработка оборудования и методики проведения экспериментальной проверки процесса функционирования рабочей части приспособления для базирования с управляемым перемещением закрепления в лабораторных условиях

В процессе экспериментов исследовалась работа образцов, соответствующих расчетным случаям при численном экспериментальном исследовании, изложенным в главе 3. Изготовлены образцы в виде втулки из материала с ЭПФ. Размеры образцов-втулок: наружный диаметр - 28 мм, длина 37 мм. Диаметры отверстий в образцах задавались следующим рядом: 10, 12, 14, 16, 18, 20 мм, что соответствовало толщинам их стенки 9, 8, 7, 6, 5 и 4 мм.

Дорнование отверстий в образцах проводилось со степенью радиальной деформации, соответствующей предельному состоянию каждого образца, обеспечивающей пластическое деформирование всего сечения образцов. Величины раздачи по внутреннему диаметру образцов, соответствуют также условию, заданному при численном эксперименте.

Далее образцы нагревались потоком горячего воздуха до температуры выше температуры конца обратного мартенситного превращения (150°C). При этом фиксировались изменения внутреннего и наружного диаметров образцов, а также температура на внутренней и наружной поверхностях образцов.

При охлаждении образцов за счёт естественного конвективного теплообмена до температуры ниже предела прямого мартенситного превращения материала втулки (20°C) наблюдался возврат к первоначальной форме – увеличивался диаметр наружной и внутренней поверхностей. Для данного цикла также фиксировались изменения внутреннего и наружного диаметров образцов, а также температура на внутренней и наружной поверхностях образцов.

Для проведения измерений параметров образцов в процессе эксперимента разработано и изготовлено специальное испытательное оборудование, в состав которого входит механическая и электронная части.

Схема механической части испытательного оборудования представлена на рисунке 4.1, а ее внешний вид представлен на рисунке 4.2.

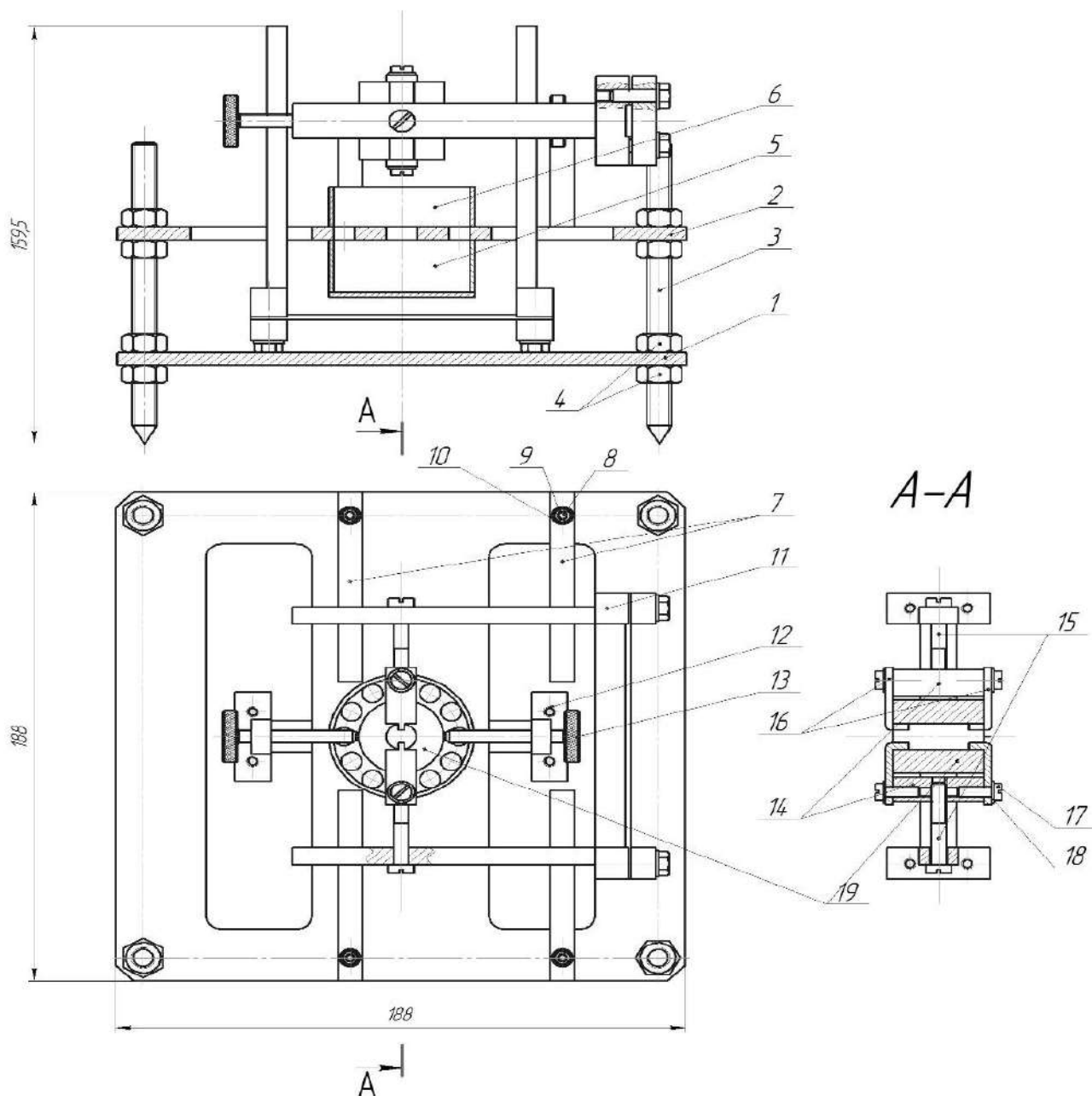


Рисунок 4.1 – Схема механической части:

1 – нижняя плита, 2 – верхняя плита, 3 – стойка, 4 – гайка, 5 – коллектор, 6 – дефлектор, 7 – опора датчика, 8 – шпилька, 9 – гайка, 10 – шайба, 11 – датчик перемещения внутренней поверхности образца, 12 – датчик перемещения

наружной поверхности образца, 13 - нажимной винт, 14 – сухарь, 15 – винт, 16 – скоба, 17 – винт, 18 – шайба, 19 – образец.

Данный узел состоит из двух плит, нижней 1 и верхней 2, которые соединены с помощью четырех стоек 3 и зафиксированы с помощью гаек 4. На нижней поверхности верхней плиты 2 закреплен по центру коллектор для подачи горячего воздуха на образец, а на верхней поверхности данной плиты закреплен дефлектор 6, предназначенный для стабилизации и профилирования струи горячего воздуха. На верхней плите расположены четыре опоры 7 датчика перемещения, закреплённые к ней с помощью шпилек 8, гаек 9 и шайб 10. На опорах 7 располагается датчик перемещения точек внутренней поверхности исследуемого образца 11. Датчик перемещения точек наружной поверхности исследуемого образца 12 установлен на нижней плите 1. На датчике перемещения точек наружной поверхности исследуемого образца 12 установлены нажимные винты 13, предназначенные для контактирования с наружной поверхностью образца.

Исследуемый образец закрепляется с помощью системы подвесов, изображенной в сечении А-А рисунка 4.1. Система подвеса образца содержит сухари 14, соединяемые с датчиком 11 с помощью винтов 15. К сухарям 14 крепятся скобы 15, удерживающие образец и скобы 15 соединены с сухарями 14 с помощью винтов 17 и шайб 18.

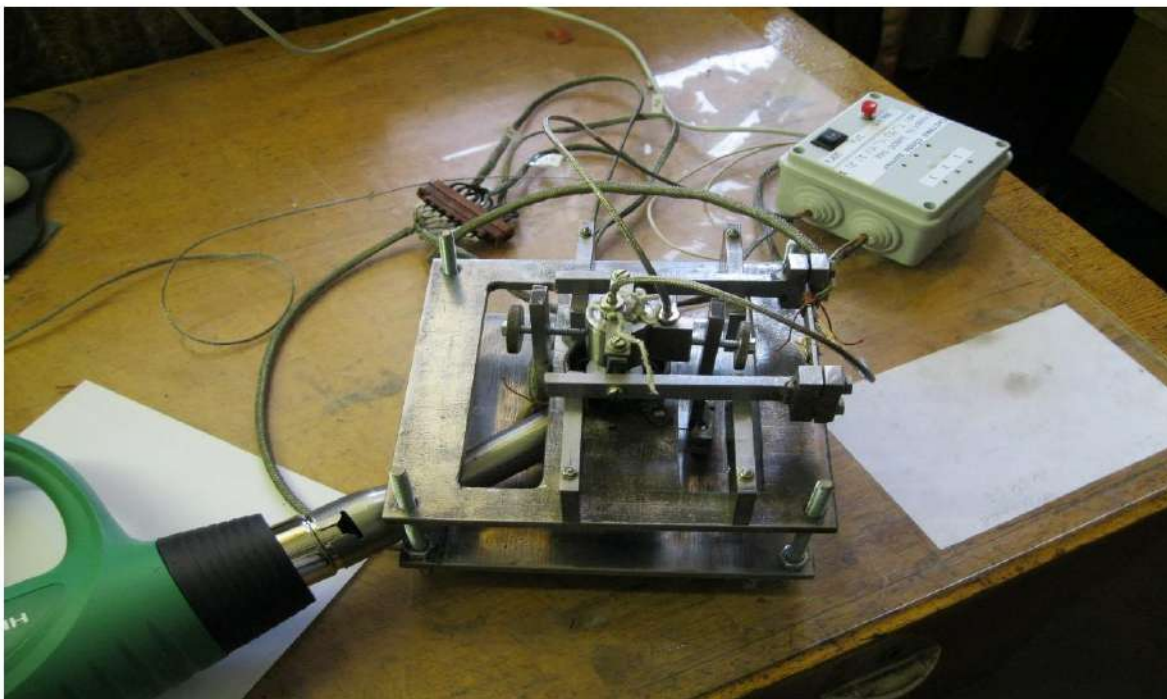


Рисунок 4.2 – Внешний вид механической части

Датчик перемещения предназначен для преобразования механической величины – перемещения одной точки относительно другой в аналоговый сигнал, иными словами позволяет получить аналоговый сигнал – изменение потенциала как функцию перемещения двух точек относительно друг друга. Также в механическую часть входит устройство для тарирования датчиков.

Разработана и изготовлена электронная часть испытательного оборудования, а также разработано специальное программное обеспечение, позволяющее визуализировать изменение параметров функционирования рабочей части оправки из материала с ЭПФ.

Электронная часть испытательного оборудования представляет систему сбора данных в виде аналоговых сигналов, которые она преобразует в аналоговый сигнал и передает через контроллер на компьютер, где он регистрируется с помощью специально разработанной программы. Система сбора данных предназначена для сбора и мониторинга на компьютере данных о длительности сбора информации (в миллисекундах), температуре (2 канала измерений в градусах Цельсия) и перемещениях (3 канала в миллиметрах) с частотой 1 Гц или 10 Гц.

Структурная схема системы сбора данных представлена на рисунке 4.3. В состав системы сбора данных входит: блок сбора данных и программное

обеспечение для ПК, обеспечивающее возможность мониторинга, калибровки, сохранения и печати собранных данных.

Блок сбора данных собран на контроллере Arduino-Uno (или аналогичном), имеющем 6 входов для сбора аналоговых данных с трех тензодатчиков перемещений, а также цифровые выходы для сбора данных с двух цифровых датчиков температуры. Контроллер оснащен портом mini-USB для кабельной связи с компьютером (скорость обмена данными 38400 Бод). Тензоусилитель служит для усиления аналоговых сигналов, поступающих с тензорезисторов, соединенных по полумостовой схеме. При этом измерительный мост содержит два тензорезистора, работающих в противофазе и два прецизионных постоянных резистора. Балансировка моста осуществляется регулировкой многооборотного подстроечного резистора до вывода рабочей точки в требуемое положение.

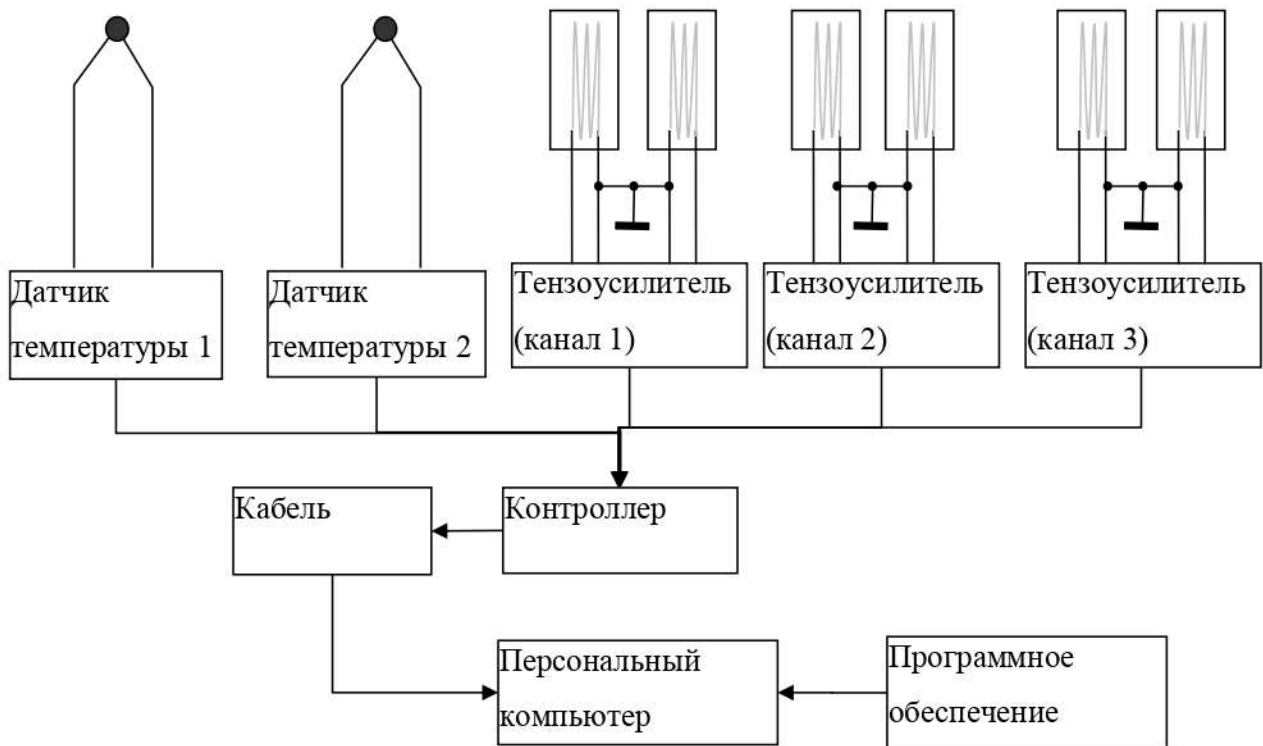


Рисунок 4.3 – Структурная схема системы сбора данных

Питание тензоусилителя, контроллера и усилителя термопар осуществляется от напряжения 5В осуществляется от компьютера через USB порт. В качестве

программного обеспечения может использоваться любая терминальная программа, работающая с последовательным портом Serial.

Перед началом экспериментов выполнена тарировка датчиков перемещения. Для этого датчики закреплялись в устройстве для тарировки. По разработанной методике включалась измерительная система, с помощью винта 9 задавалось перемещение консолей датчика на величину 0,1 мм, и оно контролировалось с помощью индикатора 12. Далее делалась выдержка 3...5 секунд, и задавалось следующее перемещение консоли датчика.

В результате получены графики тарировки для датчиков перемещений. Данные графики использовались для расшифровки циклограмм параметров функционирования рабочей части оправки из материала с ЭПФ.

После проведения тарировки датчиков исследуемый образец устанавливался по схеме, представленной на рис. 4.1, включалась измерительная система, с помощью фена HİTACHI RH 600T на образец подавался нагретый до 350°C воздух, затем, при достижении образцом температуры 150°C, подача нагретого воздуха прекращалась. При проведении данного цикла выполнялась запись циклограммы параметров процесса функционирования образца из материала с ЭПФ. Типовая циклограмма параметров процесса функционирования оправки для прецизионного шлифования из сплава с ЭПФ представлена на рисунке 4.4.

Таким образом, проведено исследование процесса функционирования для всех образцов. После обработки результатов экспериментов построена зависимость величины рабочего хода оправки от диаметра её отверстия, представленная на рисунке 4.5.

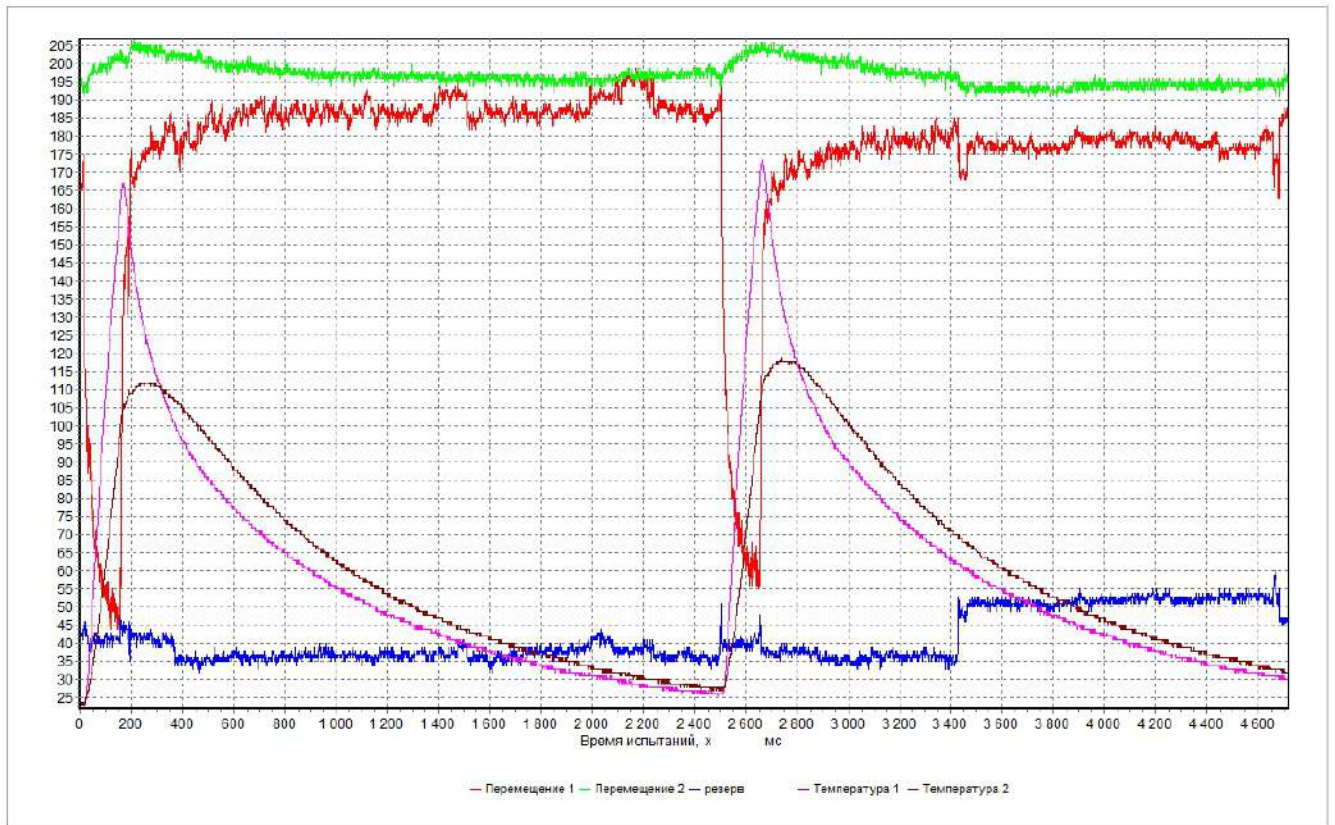


Рисунок 4.4 – Типовая циклограмма параметров процесса функционирования оправки для прецизионного шлифования из сплава с ЭПФ

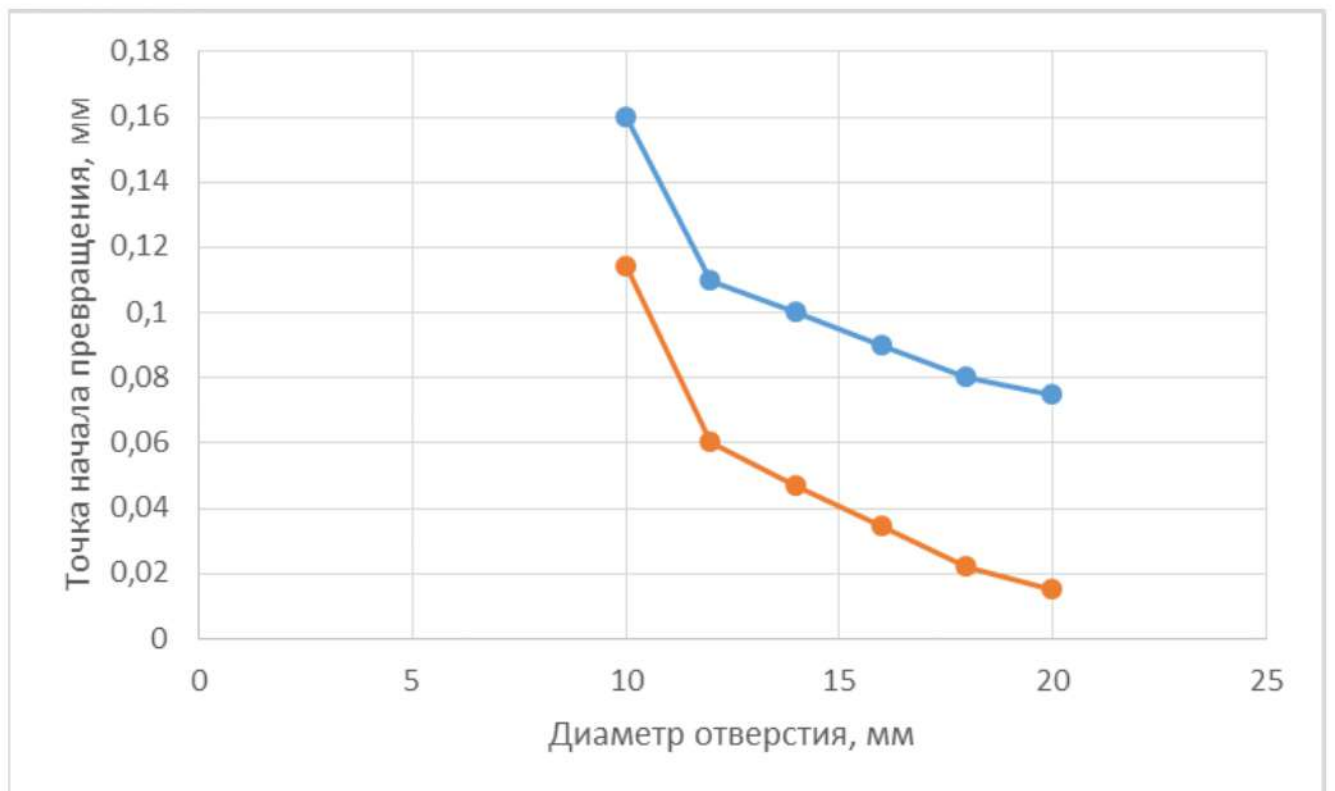


Рисунок 4.5 – Зависимость величины рабочего хода оправки от диаметра её отверстия

4.2 Разработка методики проектирования и технологического процесса изготовления приспособления с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы

На рисунке 4.6 представлена предлагаемая типовая оправка для прецизионного шлифования тонкостенных деталей. Оправка содержит силовой элемент 1 в виде трубы из сплава с эффектом памяти формы, на пример ТН-1. Отверстие силового элемента 1 имеет радиус r_1 , а рабочая часть силового элемента выполнена с радиусом r_2 . Рабочая часть силового элемента 1 должна быть согласована с базовой поверхностью обрабатываемой детали и предназначена для базирования данной детали по четырем точкам.

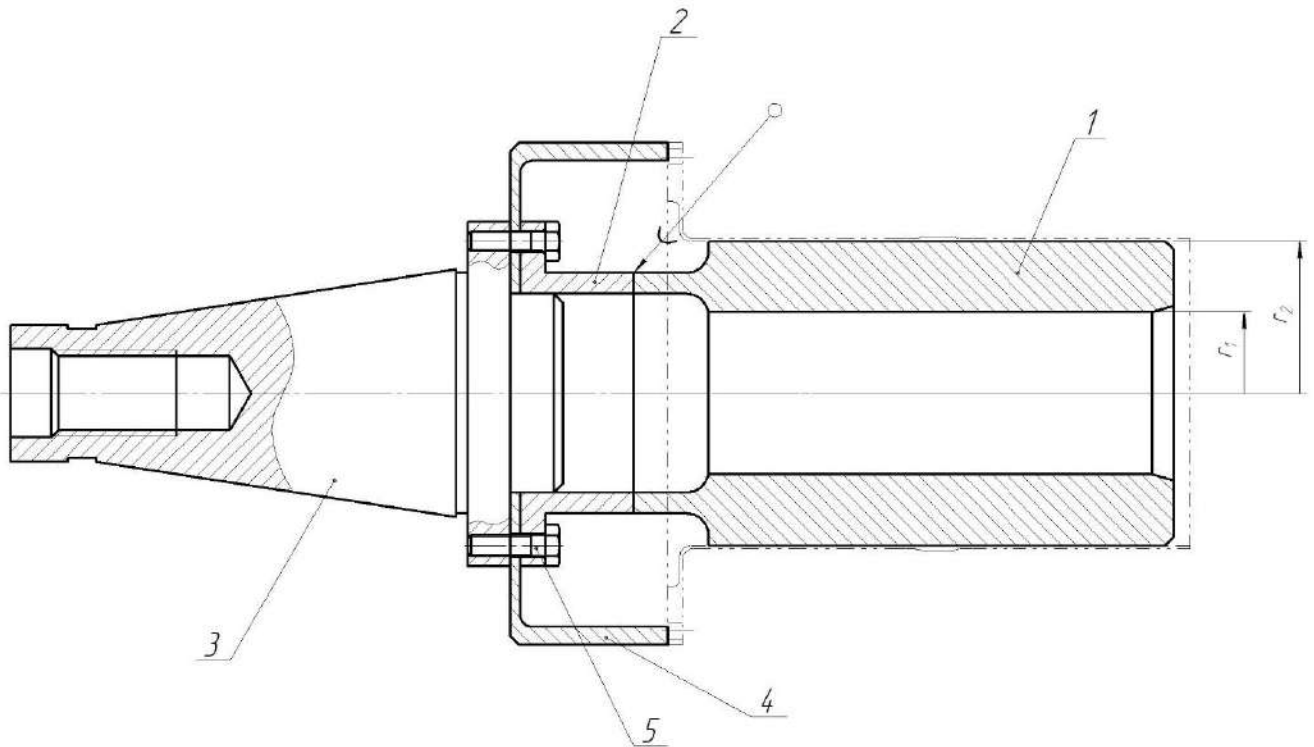


Рисунок 4.6 – Оправка для прецизионного шлифования тонкостенных деталей:

1 – силовой элемент из сплава с эффектом памяти; 2 – установочная оправка; 3 – хвостовик; 4 – упор; 5 – болт

К силовому элементу 1 присоединена с помощью пайки установочная оправка 2 с фланцем, выполненная из износостойкого материала, например, из инструментальной стали. Установочная оправка размещена на центрирующем пояске хвостовика 3, который имеет конусную поверхность, предназначенную для

установки в шпинделе шлифовального станка. Хвостовик 3 имеет фланец с отверстиями, предназначенный для закрепления силового элемента через установочную оправку 2. С фланцем хвостовика 3 также контактирует и крепится упор 4 с помощью болтов 5, предназначенный для базирования обрабатываемой детали (указана штрих-два-пунктирной линией) в осевом направлении. Силовой элемент подвергнут термосиловой обработке (раздача с помощью дорнования с последующим термоциклированием для придания стабильности перемещений рабочей поверхности оправки в радиальном направлении) таким образом, что диаметр рабочей части при её нагреве до температуры выше конца обратного мартенситного превращения меньше, чем её диаметр при охлаждении до температуры ниже конца прямого мартенситного превращения материала силового элемента.

Оправка для прецизионного шлифования используется следующим образом. Оправку устанавливают в шпиндель шлифовального станка. Силовой элемент оправки нагревают техническим феном до температуры выше конца обратного мартенситного превращения материала силового элемента 1 оправки. При этом диаметр рабочей части силового элемента оправки 1 уменьшается и становится меньше диаметра базового отверстия обрабатываемой детали. На рабочую часть силового элемента 1 оправки устанавливают обрабатываемую деталь и прижимают к упору 4. Далее за счёт естественного теплообмена материал силового элемента 1 охлаждается до температуры ниже конца прямого мартенситного превращения материала силового элемента. При этом диаметр рабочей части силового элемента 1 увеличивается до величины, обеспечивающей необходимый натяг между силовым элементом 1 оправки и базовой поверхностью обрабатываемой детали. Далее выполняют все необходимые переходы по обработке детали. По окончании обработки силовой элемент оправки вновь нагревают техническим феном до температуры выше конца обратного мартенситного превращения материала силового элемента 1 оправки. При этом диаметр рабочей части силового элемента оправки 1 уменьшается и становится меньше диаметра базового отверстия обрабатываемой детали. Образуется гарантированный зазор между рабочей

поверхностью оправки и базовой поверхностью детали. Обработанную деталь снимают с оправки, оправку извлекают из шпинделя станка. Либо, при необходимости, на оправку может быть установлена следующая деталь из партии запуска.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют создать специализированные устройства для силового базирования прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей методом их совместной раздачи с использованием давления силового элемента из сплава с памятью формы ТН-1.

С помощью полученной экспериментальной зависимости максимального относительного изменения диаметра δ_{max} от степени радиального обжатия Δ силового элемента в первом приближении определяется величина предварительного обжатия силового элемента, которое обеспечит требуемое радиальное перемещение его наружной поверхности.

Затем с помощью деформационно-силовых зависимостей и результатов экспериментальных исследований, предварительно определяются геометрические параметры полого силового элемента: R_1 , R_2 и L – радиус внутренней поверхности, радиус наружной поверхности и длина соответственно. При этом предполагается, что кольцевой силовой элемент является тонкостенной трубой (напряжения и деформации памяти формы в его сечении распределены равномерно), нагруженным давлением на внешней поверхности (реакцией заготовки на радиальное перемещение её стенок).

По алгоритму подбора параметров кольцевого силового элемента из сплава с ЭПФ с типоразмером заготовки проводится уточнение параметров кольцевого силового элемента из сплава с ЭПФ.

Проведенные теоретические исследования, позволили создать методику проектирования специализированного устройства для прецизионной обработки тонкостенных деталей летательных аппаратов – оправки для прецизионного шлифования.

Разработанная методика проектирования технологии изготовления рабочей части оправки для прецизионного шлифования из материала с эффектом памяти формы содержит следующие этапы:

- 1) расчет силовых параметров процесса шлифования тонкостенной детали;
 - 2) расчет сил закрепления и натяга закрепления и расчет исполнительных размеров рабочей части трубчатого силового элемента из сплава с ЭПФ;
 - 3) расчет технологических параметров термосиловой подготовки рабочей части оправки для прецизионного шлифования и расчет заготовки рабочей части оправки;
 - 4) поверочный расчет параметров работы силового элемента и натяга закрепления обрабатываемой детали;
 - 5) разработка рабочих чертежей на оправку для прецизионного шлифования.
- Расчет силовых параметров процесса шлифования тонкостенной детали.

Эффективная мощность при шлифовании периферией круга с продольной подачей определяется по формуле [87]:

$$N=C_N V^r t^x s^y d^q, \quad (4.1)$$

где V – скорость вращательного движения заготовки при круглом шлифовании, м/мин; t – глубина шлифования, мм; s – продольная подача в направлении оси шлифовального круга на один оборот заготовки, мм/об. дет.; d – диаметр шлифования, мм.

При круглом наружном шлифовании с продольной подачей на каждый ход параметры резания согласно таблице 55-4 [87] приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры резания при круглом наружном шлифовании с продольной подачей на каждый ход

Вид шлифования	Скорость круга V_k , м/с	Скорость заготовки v_z , м/мин	Глубина шлифования t , мм	Продольная подача s
Предварительное	30-35	12-25	0,01-0,025	(0,3-0,7) В
Окончательное	30-35	15-55	0,005-0,015	(0,2-0,4) В

где В – ширина шлифовального круга.

Коэффициенты и показатели степени определяются по таблице 56-4 [87] в зависимости от зернистости и твёрдости шлифовального круга, которые определяются согласно разделу 3 – Абразивные инструменты [87]. Согласно нему, зернистость абразивного круга при предварительном и чистовом шлифовании деталей с шероховатостью $R_a=2,5-0,32$ должна быть 40 или 32 единицы. Для чистового шлифования заготовок из закалённых сталей рекомендуется применять среднемягкие и средние круги твёрдостью CM2 – C2.

Тогда по таблице 56-4 [87] получаем: $C_N=2,65$; $r=0,5$; $x=0,5$; $y=0,55$; при зернистости 40 и твёрдости CM1 – C1.

Обработка выполняется на кругло шлифовальном станке OVERBECK 400-RU. Технические характеристики станка согласно паспортным данным приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристики станка OVERBECK 400-RU

Характеристика	Величина
Макс. расстояние между шпинделем и столом	100 мм
Диаметр диска	300 мм
Ширина диска	60 мм
Отверстие в диске	127 мм
Макс. скорость диска	2440 м/мин
Мощность шпиндельного мотора	7 кВт

Наибольшая мощность шлифования будет при предварительном шлифовании на максимальных режимах при ширине шлифовального круга 25мм.

Тогда

$$N=2,65 \cdot 25^{0,5} \cdot 0,025^{0,5} \cdot 17,5^{0,55}=10,1 \text{ кВт.}$$

Тангенциальная составляющая силы резания может быть определена по формуле [49]:

$$P_z=1000N_e/v_{кр}. \quad (4.2)$$

При скорости круга 30м/с мощность равна

$$P_z=1000 \cdot 10,1/30=340 \text{ Н.}$$

Расчет сил закрепления и натяга закрепления и расчет исполнительных размеров рабочей части трубчатого силового элемента из сплава с ЭПФ.

Оправки цилиндрические прессовые обычно используются для точной обработки толстостенных заготовок с большими силами резания [48] (стр. 150). Для точной установки заготовки по длине используются упорные кольцевые площадки.

Методика расчёта:

Исходя из размеров детали: l_3 – длина опорной поверхности заготовки; D_3 – наружный диаметр заготовки; d – номинальный посадочный диаметр заготовки; d_{\min} – минимальный посадочный диаметр заготовки; d_{\max} – максимальный посадочный диаметр заготовки. Свойств материалов E_p – модуль упругости, МПа и μ_p – коэффициент Пуассона материала детали, $E_{оп}$ – модуль упругости и $\mu_{оп}$ – коэффициент Пуассона материала оправки. Действующий силовой фактор $M_{кр}$ – крутящий момент сил резания.

Определяется:

1. Длина рабочей шейки оправки с упорным буртиком принимается из условия:

$$L_{p.оп} = l_3 - (2 \dots 5), \text{ мм.} \quad (4.3)$$

2. Гарантированный крутящий момент (Н·мм), передачу которого должна обеспечить проектируемая оправка определяется выражением:

$$M_{кр. гар} = KM_{кр}, \quad (4.4)$$

где K – коэффициент запаса [48] (стр. 378).

3. Давление в соединении «заготовка – рабочая шейка оправки», необходимое для надёжного закрепления заготовки определяется по формуле:

$$P = \frac{2M_{кр. гар}}{\pi d_3^2 f L_{p.оп}}, \quad (4.5)$$

где $f = 0,16$ - коэффициент трения.

4. Номинальный диаметр (мм) рабочей шейки оправки для прецизионного шлифования определяется по формуле:

$$D_{on} = \frac{d_{3\max}}{1 - p \left[\frac{\chi}{E_{on}} \left(\frac{1+t_o^2}{1-t_o^2} - \mu_{on} \right) + \frac{1}{E_3} \left(\frac{1+t_3^2}{1-t_3^2} + \mu_3 \right) \right]}, \quad (4.6)$$

$$\text{где } t_o = \frac{d_{on}}{d_3}; \quad t_3 = \frac{d_3}{D_3}.$$

Коэффициент χ определяют по графику рис.8 стр. 150 [87].

Допуск наружного диаметра $D_{оп}$ рабочей шейки оправки рекомендуется назначать г6, а внутреннего диаметра $d_{оп}$ пустотелой оправки Н9. Допуск соосности центрального отверстия и рабочей шейки пустотелой оправки – в пределах 10-й степени точности.

Для закрепления заготовки колеса необходимо иметь жёсткую оправку, размеры которой определим по ранее изложенной методике.

1. Длина рабочей шейки оправки в соответствии с чертежом детали составляет 47,4мм.

2. Гарантированный крутящий момент (Н·мм), передачу которого должна обеспечить проектируемая оправка определяется по формуле:

$$M_{кр. гар} = KM_{кр.},$$

где K – коэффициент запаса.

$M_{кр}$ определим исходя из силы резания, которая составляет 340Н на диаметре 87,6мм. Тогда $M_{кр} = 340 \cdot 87,6/2 = 14892 \text{ Нмм}$. Коэффициент запаса можно принять $K=2,5$. Получаем $M_{кр. гар} = 2,5 \cdot 14892 = 37230 \text{ Нмм}$.

3. Давление в соединении «заготовка – рабочая шейка оправки», необходимое для надёжного закрепления заготовки при диаметре посадочной поверхности 86 мм рассчитанная по формуле (4.5) составит:

$$p = \frac{2 \cdot 37230}{\pi \cdot 86^2 \cdot 0,16 \cdot 47,4} = 0,42 \text{ Мпа}$$

4. Номинальный диаметр (мм) рабочей шейки пустотелой оправки согласно формуле (6):

Определяем параметры $t_o = \frac{76}{86} = 0,884$; $t_3 = \frac{86}{87,6} = 0,982$.

Коэффициент $\chi=0,98$. Модуль упругости материала детали $E_d=2 \cdot 10^5$ МПа, модуль упругости материала оправки $E_{оп}=6,5 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона материалов оправки и детали составляет 0,3.

Номинальный диаметр (мм) рабочей шейки пустотелой оправки, рассчитанный по формуле (4.6) составит:

$$D_{on} = \frac{86}{1 - 0,42 \left[\frac{0,98}{0,65 \cdot 10^5} \left(\frac{1 + 0,884^2}{1 - 0,884^2} - 0,3 \right) + \frac{1}{2 \cdot 10^5} \left(\frac{1 + 0,982^2}{1 - 0,982^2} + 0,3 \right) \right]} = 86,0143 \text{ мм.}$$

Таким образом, натяг должен составлять 0,014 мм при максимальном диаметре посадочного отверстия и 0,034 мм при минимальном диаметре посадочного отверстия.

Допускаемая величина упругих деформаций цилиндрического образца может быть определена соотношением:

$$\varepsilon_{уп} = \frac{\sigma_i}{E}, \quad (4.7)$$

где предел текучести материала для трубной заготовки в закаленном состоянии составляет $\sigma_i=785$ МПа.

Тогда допускаемая величина упругих деформаций, рассчитанная по формуле

$$(4.7) \text{ составит: } \varepsilon_{уп} = \frac{785}{2 \cdot 10^5} = 0,0039$$

Для диаметра детали 86 мм величина упругой деформации составит $\Delta D=86 \cdot 0,0039=0,33$ мм, что значительно больше, чем деформация, получаемая при установке на оправку.

Расчет заготовки рабочей части оправки и расчет технологических параметров термосиловой подготовки рабочей части оправки.

Для расчета диаметра заготовки силового элемента из сплава с ЭПФ задают значение относительного к рабочему диаметру оправки ρ , значение радиуса зоны

текучести η , возникающей при термосиловой подготовке силового элемента. При

этом $\eta = \frac{b}{\rho}$. Значение η зависит от величины радиальной раздачи внутренней поверхности силового элемента 2Δ (рисунок 4.7).

Далее по формулам (3.5) и (3.13) приведенным в третьей главе с учетом параметров a и b (рисунок 4.7) определяют тангенциальные деформации наведения ε_ϕ и тангенциальные деформации памяти формы β_ϕ , действующие на рабочей поверхности силового элемента. Разность этих значений составит деформацию памяти формы на рабочей поверхности силового элемента из сплава с ЭПФ. Данная величина используется для определения рабочих перемещений трубчатого силового элемента из материала с эффектом памяти формы.

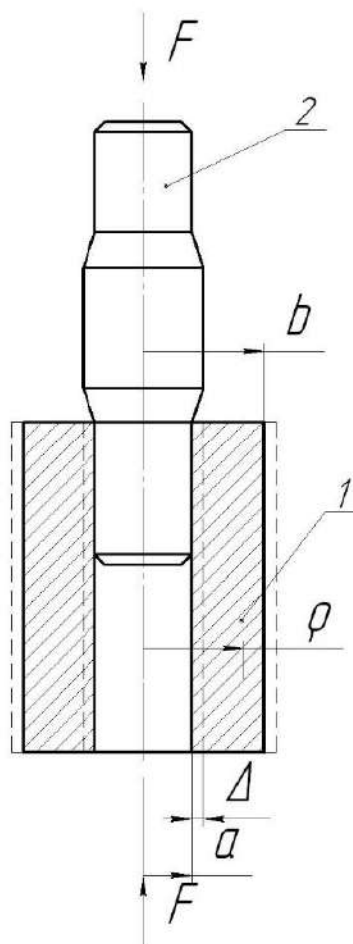


Рисунок 4.7 – Схема радиальной раздачи силового элемента путём дорнования:

a – внутренний диаметр заготовки рабочей части; b – наружный диаметр заготовки рабочей части; 2Δ – радиальная раздача рабочей части

Величина рабочего хода ΔD трубчатого силового элемента из сплава с эффектом памяти формы составит:

$$\Delta D = D(\varepsilon_{\varphi} - \beta_{\varphi}) \quad (4.8)$$

Диаметр заготовки силового элемента рассчитывают исходя из величины перемещения рабочей поверхности данного силового элемента, полученной при раздаче посредством дорнования, и он может быть определен по формуле:

$$D_{\text{загот.}} = D(1 - \varepsilon_{\varphi}) \quad (4.9)$$

Данные, полученные в результате указанных расчетов, используются для разработки рабочих чертежей заготовки трубчатого силового элемента оправки для прецизионного шлифования.

Поверочный расчет параметров работы силового элемента и натяга закрепления обрабатываемой детали.

В рамках поверочного расчета определяется поле компонент тензора напряженного состояния разработанного силового элемента в процессе функционирования по формулам (3.2) и (3.3), а также определяется распределение интенсивности напряжений памяти формы по сечению силового элемента и контролируется отсутствие зон, где интенсивность напряжений превышает предел текучести материала силового элемента с целью обеспечения его многоциклового работы.

Далее по формулам (3.11) и (3.12) определяются перемещения и напряжения в материале обрабатываемой детали, вызванные натягом от действия рабочих перемещений силового элемента и контролируется прочность и точность обработки при шлифовании.

Разработка программы расчета параметров кольцевого силового элемента из сплава с ЭПФ и параметров его предварительной подготовки.

По полученным аналитическим выражениям разработана с помощью системы MathCAD программа расчета на ЭВМ геометрических параметров трубчатого силового элемента и параметров его предварительной подготовки по заданному потребному натягу закрепления на оправке для прецизионного

шлифования по разработанному алгоритму. На рисунке 4.8 представлена блок-схема методики проектирования приспособлений с рабочей частью из материала с ЭПФ.



Рисунок 4.8 – Блок-схема методики проектирования приспособлений с рабочей частью из материала с ЭПФ для выполнения финишных операций механической обработки

**Разработка технологического процесса изготовления
экспериментального образца оправки для базирования с управляемым
перемещением закрепления**

Для дальнейшей верификации разработанной модели и для проверки разработанного технологического процесса изготовления оправки для прецизионного шлифования с рабочей частью из материала с ЭПФ, проведены лабораторные исследования экспериментального образца оправки для прецизионного шлифования. Для этого разработана экспериментальная оправка, эскиз которой представлен на рисунке 4.9.

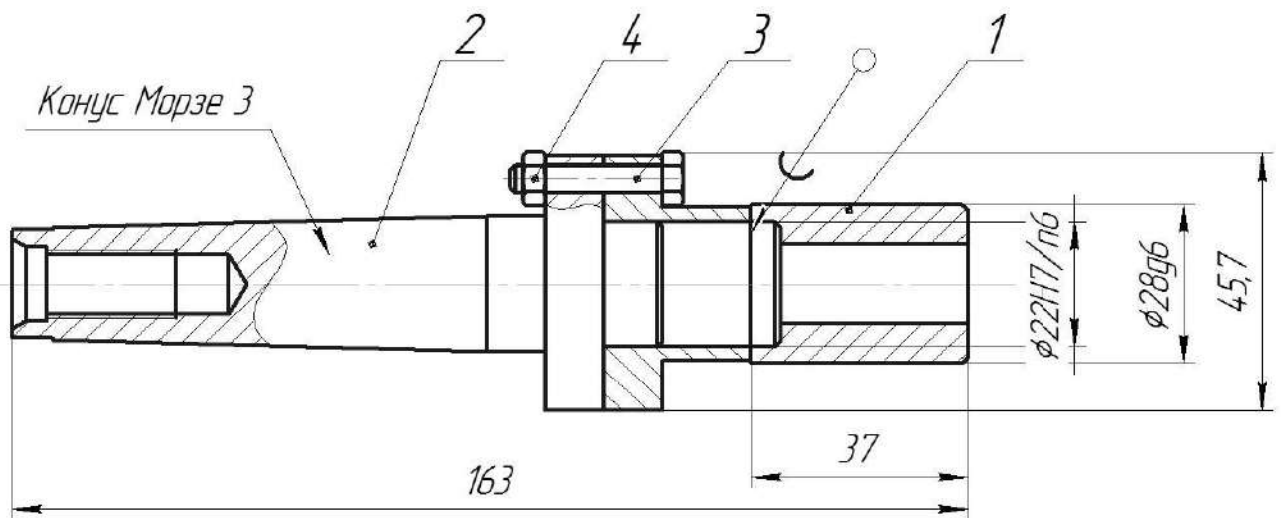


Рисунок 4.9 – Эскиз экспериментальной оправки для базирования с управляемым перемещением закрепления:

1 – рабочая часть оправки, 2 – хвостовик, 3 – болт, 4 – гайка

Оправка содержит рабочую часть 1, которая составная, состоит из двух частей – передней части и задней части, которые соединены по диаметральной плоскости с помощью пайки. Более подробно рабочая часть оправки изображена на эскизе ниже (рисунок 4.10). Рабочая часть соединена с хвостовиком 2 по посадке H7/g6 между центрирующим пояском хвостовика и расточной в задней части оправки. Рабочая часть 1 зафиксирована с хвостовиком с помощью трех болтов 3 и гаек 4. На хвостовике 2 выполнен конус Морзе, предназначенный для установки оправки в шпинделе шлифовального станка. Также в хвостовике 2 выполнено осевое резьбовое отверстие, предназначенное для надёжного закрепления оправки

для прецизионного шлифования в шпинделе станка с помощью соответствующей тяги.

На рисунке 4.10 изображен эскиз рабочей части оправки для прецизионного шлифования. Рабочая часть оправки содержит переднюю часть 1, выполненную из материала ТН-1. Также оправка содержит заднюю часть 2, выполненную из материала сталь 45. Передняя часть 1 и задняя часть 2 оправки соединена с помощью пайки на титановом припое. Задняя часть оправки 2 предназначена для точного (с минимальными отклонениями по несоосности) соединения всей рабочей части оправки 1 с хвостовиком 2 (рисунок 4.9).

Разработан укрупнённый технологический процесс изготовления оправки для прецизионного шлифования, который представлен в таблице 4.3.

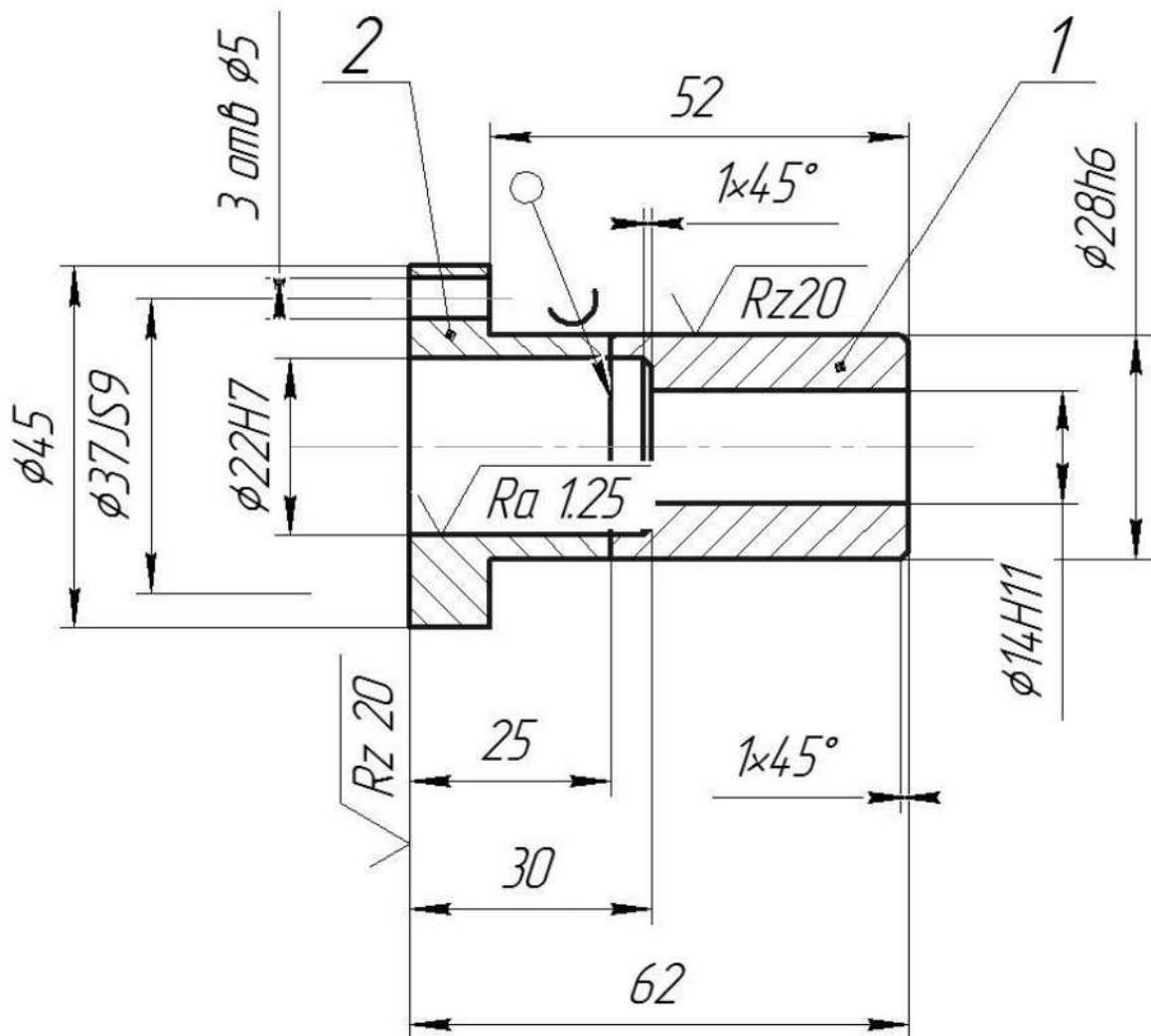


Рисунок 4.10 – Эскиз рабочей части оправки для прецизионного шлифования:

1 – передняя часть (материал – ТН-1), 2 – задняя часть (материал сталь 45)

Таблица 4.3 - Укрупнённый технологический процесс изготовления рабочей части оправки для прецизионного шлифования

№ операции	Наименование и содержание операции	Процессы, параметры
005	Изготовление рабочей части оправки 1. Точение заготовки передней части 2. Точение заготовки задней части 3. Пайка рабочей части оправки 4. Точение рабочей части оправки 5. Подготовка рабочей части оправки	Токарная обработка - операционный эскиз (рисунок 4.11, а) Токарная обработка - операционный эскиз (рисунок 4.11, б) Пайка в вакууме, вакуум 10^{-5} мм рт. ст., усилие сжатия 80 кН, температура 800°C Токарная обработка - операционный эскиз (рисунок 4.10) Дорнование, степень деформирования – по предельному состоянию передней части
010	Изготовление хвостовика оправки	Токарная обработка - операционный эскиз (рисунок 4.12)
015	Сборка оправки для прецизионного шлифования	Механическая сборка
020	Калибровка рабочей части оправки	Шлифование передней части с допуском по h6

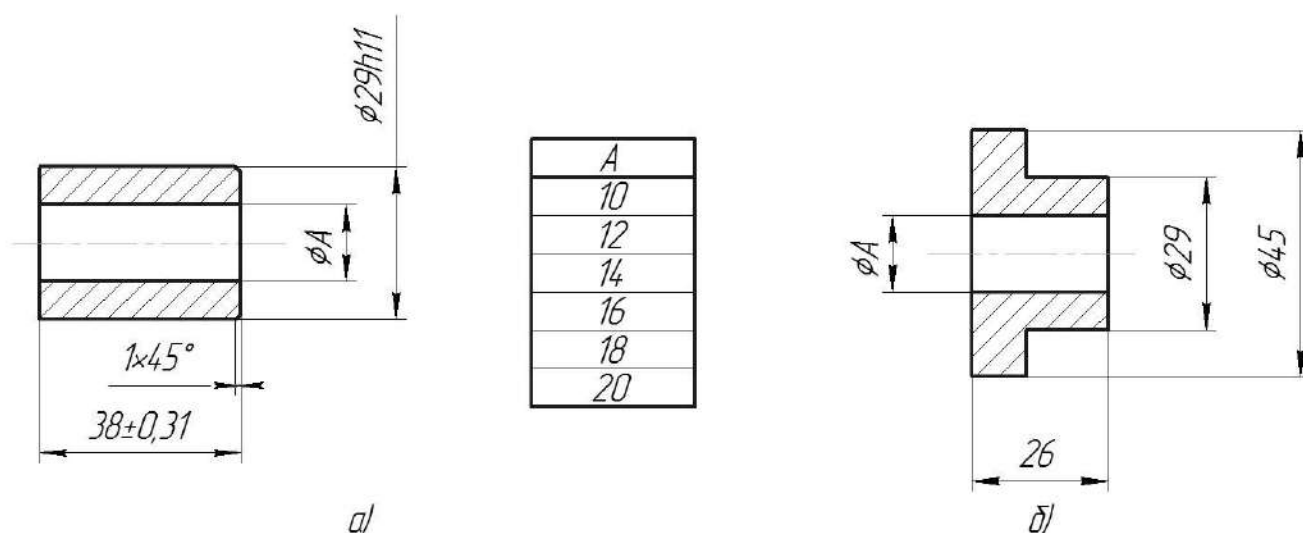


Рисунок 4.11 – Операционные эскизы для изготовления заготовок составных частей рабочей части оправки для прецизионного шлифования: а) – операционный эскиз передней части, б) – операционный эскиз задней части

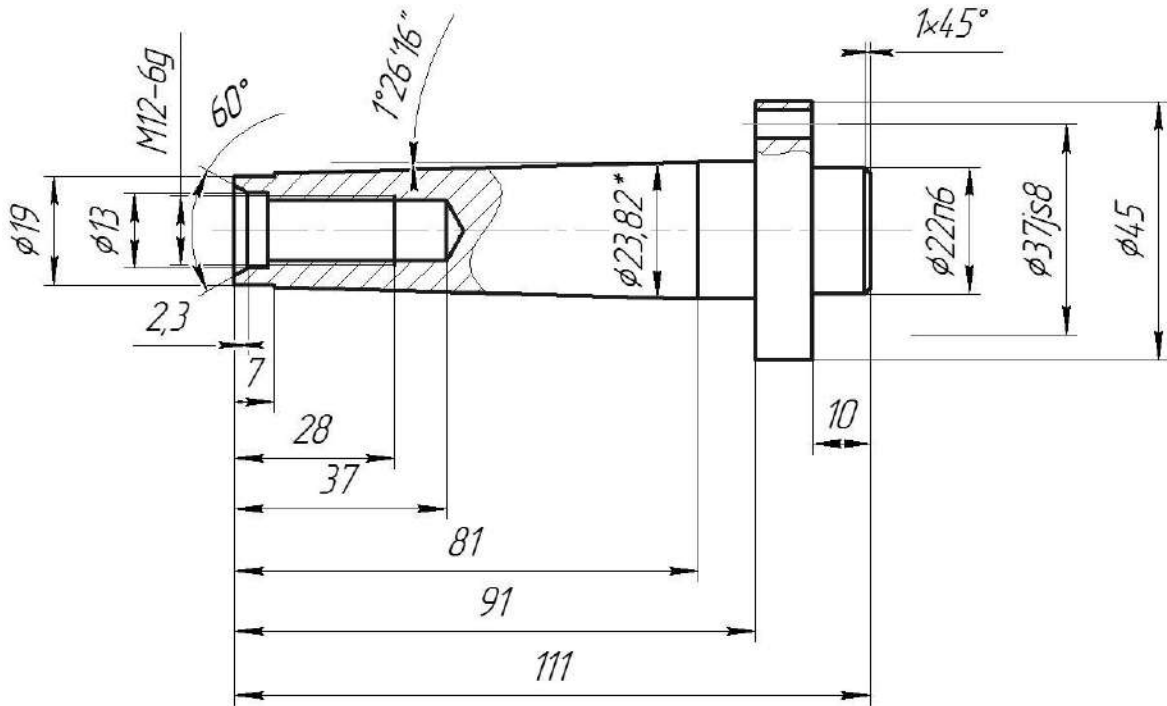


Рисунок 4.12 – Операционный эскиз для изготовления хвостовика оправки

Для уточняющей проверки операции 005 разработанного технологического процесса изготовления оправки с рабочей частью из материала с ЭПФ, проведены лабораторные исследования.

4.3 Отработка процесса базирования заготовки прецизионной тонкостенной детали в приспособлении в условиях производства. Разработка плана управления процессами изготовления и контроля характеристик гибкого колеса волновой зубчатой передачи

Экспериментальные исследования процесса базирования выполнялись в производственном цехе АО «РКЦ «Прогресс». Отработка проводилась на круглошлифовальном универсальном станке модели OVERBECK 400 RU. Использовался изготовленный по чертежам и методике (параграф 4.2) опытный образец оправки с рабочей частью из материала с ЭПФ. Изготовлены образцы-имитаторы в виде втулок из материала 03X11H8M2Ф-ВД с размерами: наружный диаметр - 31 мм, внутренний диаметр - 28 мм, длина 20 мм. Шлифование наружного диаметра проводилось до размера $\text{Ø } 30_{-0,1}$ мм.

В ходе эксперимента использовалось следующее оснащение и средства контроля.

Технический фен BOSCH GHG 660 LCD

Технический фен предназначен для запрессовки или сварки различных материалов при помощи горячего воздуха. За счет использования в конструкции мощного двигателя 2300 Вт обеспечивается его высокая производительность. Воздух, нагретый до температуры 660 градусов, под давлением и со скоростью 500 л/мин подается из сопла. Фен технический предусматривает возможность использования нескольких типов работы, которые задают определенные параметры температуры подаваемого воздуха, скорости и давления. Тип и режим работы отображаются на ЖК-дисплее, что позволяет максимально точно контролировать характеристики производимых операций.

Бесконтактный инфракрасный термометр Кельвин Компакт 600

Компактный оптический прибор для измерения температуры объектов 2- 5 см на 5-10 метрах.

Диапазон измерения температуры	-20 °С ... +600 °С
Диапазон рабочих температур	-40 °С ... +50 °С
Погрешность измерения	1%+1°С

Рабочая часть оправки нагревалась потоком горячего воздуха до температуры выше температуры конца обратного мартенситного превращения (150°С). При этом фиксировались изменение наружного диаметра рабочей части оправки, а также температура на ее поверхности (рисунок 4.13). Далее, образцы-имитаторы свободно устанавливались на рабочую часть оправки.

После охлаждения образцов и оправки за счёт естественного конвективного теплообмена до температуры ниже предела прямого мартенситного превращения материала втулки (20°С) наблюдался возврат рабочей части оправки к первоначальной форме – увеличивался диаметр наружной поверхностей и образец-имитатор надежно фиксировался. Для данного цикла также фиксировались изменения наружного диаметра рабочей части оправки, а также температура на его поверхности. На рисунке 4.14 изображен непосредственно процесс шлифования образца. В процессе обработки снимался припуск до заданной величины наружного диаметра.



Рисунок 4.13 – Процесс нагрева рабочей части оправки перед установкой заготовки

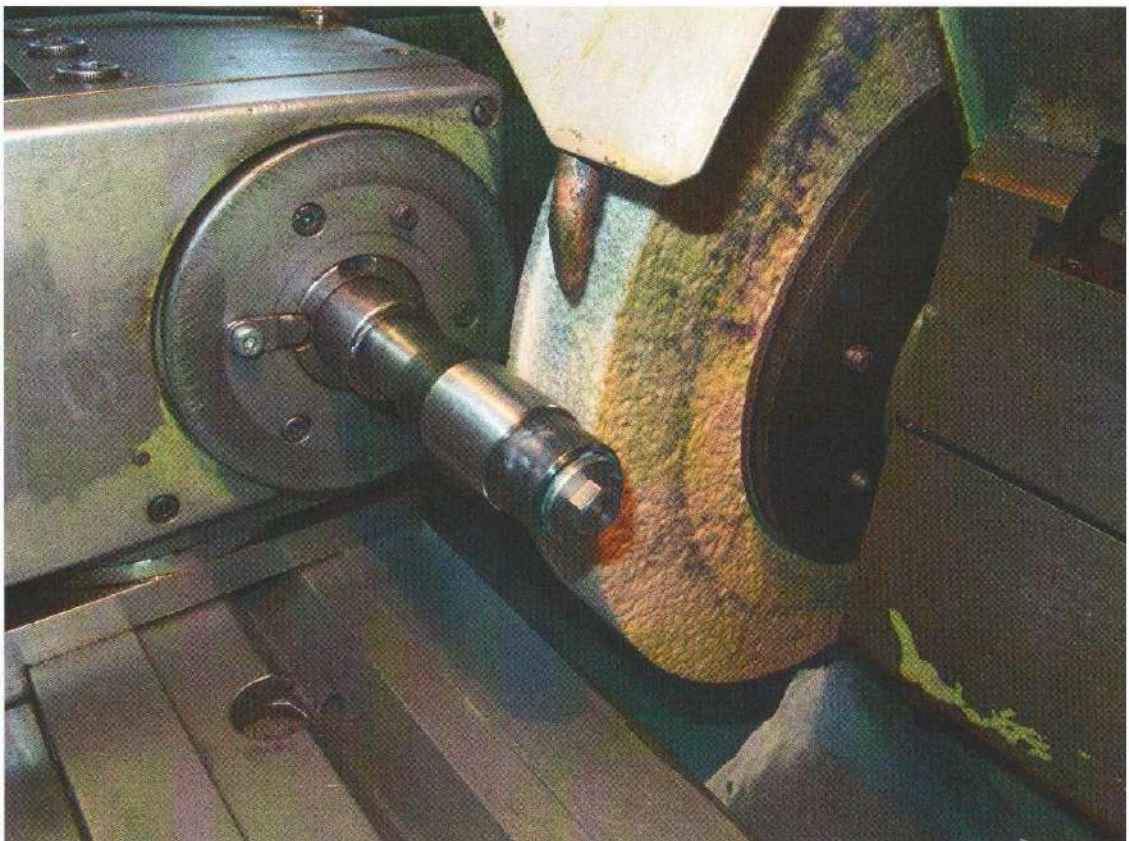


Рисунок 4.14 – Процесс шлифования закрепленной на оправке заготовки

Снятие заготовки осуществлялось в той же последовательности: рабочая часть оправки нагревалась потоком горячего воздуха.

Анализ результатов экспериментального исследования процесса базирования заготовки прецизионной тонкостенной детали в приспособлении в условиях производства практически подтверждает пригодность методики проектирования технологического оснащения с рабочей частью из материала с ЭПФ. Применение разработанной конструкции технологического оснащения позволяет создавать силы закрепления необходимой величины, подтверждая стабильность рабочего хода при многократном применении.

Разработка плана управления.

На этапе подготовки производства изделия необходимо разработать план управления (ПУ), определяющий порядок описания управления процессами изготовления изделий (контроля характеристик).

В плане управления для каждой контрольной операции процесса прописываются методы контроля и управления ключевыми характеристиками, которые возникают или меняются на данной операции, а также планы реагирования на выявляемые отклонения [91].

Инструмент «План Управления» (с английского термина «Control Plan») широко применяется в зарубежных компаниях, главным образом в автомобильной промышленности. В последние годы отечественные предприятия, также активно применяют этот инструмент в своей деятельности. По своему информационному наполнению план управления определяет систему методов управления процессами изготовления продукции. В эту систему включают статистические методы, такие как выборочный контроль, настройка процесса по первым изделиям, карты регулирования и так далее. В плане управления описывается, что и с какой периодичностью необходимо измерять в процессе производства и что необходимо предпринять на основании полученных результатов измерений.

Реализация озвученных выше принципов предупреждения отказов предполагает применение системы взаимосвязанных методов, в том числе статистических. Методология предупреждения отказов охватывает все этапы

жизненного цикла продукции [40], но в данной работе рассматриваются этапы разработки технологии и производства продукции.

Разработка ПУ включает сбор и анализ следующей информации:

- анализы видов и отказов процессов (FMEA);
- технологической документации;
- специальных характеристик продукции и параметров процессов;
- опыт, полученный при разработке подобных процессов;
- результаты исследований процессов и заполнение формы плана управления.

В ПУ отражаются текущие методы управления, используемые измерительные системы на каждом из этапов перспективного планирования качества продукции, начиная с разработки опытного образца и кончая совершенствованием продукции на этапе серийного производства.

При составлении данного ПУ принималось во внимание, что вносимые характеристики и параметры должны быть измеримы.

ПУ используется на протяжении всего времени производства данного вида продукции и дает возможность многоцелевой команде принять меры для снижения уровня брака и повышения качества продукции на всех этапах ее изготовления.

ПУ пересматривается и, при необходимости, обновляется при перспективном планировании качества продукции. При серийном выпуске продукции планы управления пересматриваются по мере внесения изменений в технологический процесс (при изменениях, влияющих на продукцию, процесс изготовления, измерения, логистику, при получении рекламаций и брака).

До начала процесса производства проводится обучение персонала, участвующего в нем. Процесс обучения заключается в умении работать с планами управления для выявления отклонений на ранних стадиях производства. Производственные участки при этом обеспечиваются учтенными копиями планов управления.

ПУ является связующим звеном между всеми документами, применяемыми для управления производственным процессом, включая и методики измерений.

ПУ имеет тот же статус, что и технологическая документация, и по аналогии с технологической документацией в него вносятся изменения. Необходимо отметить, что любые изменения в процессе могут еще больше ухудшить процесс. Поэтому изменения необходимо тщательно прорабатывать перед внесением в ПУ.

В руководстве по перспективному планированию качества продукции [76] рекомендована типовая форма плана управления. По полученным статистическим данным был разработан план управления процессом изготовления и контроля характеристик гибкого колеса ВЗП (Приложение А).

ПУ – это эффективный метод контроля и анализа производственного процесса. Применение этого документа позволяет учесть максимально возможное число факторов, влияющих на качество продукции и отработать способы их устранения; привести процесс в статистически управляемое состояние, что приводит к уменьшению затрат на контроль и изготовление продукции.

4.4 Расчет показателей экономической эффективности внедрения результатов исследования

Расчет экономической эффективности проводился как оценка результата от внедрения методики проектирования технологической оснастки с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы и использования приспособления-спутника в технологическом процессе. Расчет выполнен на основе технико-экономического анализа и существующей технологии изготовления гибких колес ВЗП приводов солнечных батарей космического аппарата «Ресурс-П» на предприятии АО «РКЦ «Прогресс» относительно вновь разработанной технологии. Экономическая эффективность рассчитывалась на основе «Методики эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений» [88]. Технико-экономические и социальные преимущества разработанного и внедренного в производство технологического процесса механической обработки гибких колес ВЗП приводов солнечных батарей

космических аппаратов по сравнению с существующим процессом, заключаются в следующем:

- снижение трудоемкости и затрат на материалы за счет снижения уровня дефектности;
- снижение производственных издержек на операции сборки и разборки ВЗП приводов СБ после выявления дефектов в виде разрушения гибких зубчатых колес.

Определение затрат на выполнение НИР.

Проведенные и изложенные в данной работе исследования носят прикладной характер. Выполненная на производственной и научной базе кафедры ПЛА и УКМ Самарского университета НИР оценивается определенным объемом. Этот объем учитывает проведенный поисковый этап, в течение которого проводился анализ номенклатуры изготавливаемых деталей, обзор и анализ литературных источников и т.д. Учитываются затраты на осуществленные теоретические исследования. Также учтены затраты на проведенные необходимые экспериментальные исследования. В результате это позволило создать новую технологию механической обработки гибких колес ВЗП с базированием на приспособлении-спутнике с рабочей частью из материала с ЭПФ. Оценка затрат на НИР осуществлена следующим образом.

В плановую себестоимость НИР включаются все затраты, связанные с ее выполнением. Они учитываются в себестоимости по следующим статьям калькуляции:

- материалы;
- спецоборудование для научных (экспериментальных) работ;
- заработная плата;
- отчисление в фонд социального страхования;
- расходы на служебные командировки;
- затраты, выполняемые сторонними организациями;
- прочие прямые расходы;

- накладные расходы.

Составлена калькуляция плановой себестоимости НИР. Основные статьи расходов составили:

Затраты на основные материалы. При проведении экспериментальных исследований на оснащение израсходовано 60 кг легированной стали по цене 195 руб/кг, на образцы 5 кг круга из сплава 03X11H8M2Ф-ВД по цене 760 руб/кг, на изготовление образцов и силовые элементы израсходовано 9 кг сплава ТН-1 по цене 12000 руб/кг. Суммарные затраты на основные материалы М составили 123500 рублей.

Затраты на заработную плату. В этой статье учтены затраты на заработную плату научных сотрудников, лаборантов и рабочих, которые принимают участие в выполнении данных исследований. Эти затраты отражены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Фонд зарплаты научно-технического персонала

Должность	Количество, ед.	Месячная ставка, руб.	Продолжительность работ, мес.	Всего, руб.
старший НС	1	27500	12	330000
ведущий инженер	1	24500	6	147000
токарь, 5 разряд	1	22500	2	45000
лаборант	1	22000	6	132000
Итого				654000

Отчисление в фонд социального страхования ФСС на основании нормативов, действующих в Самарском университете, предусматриваются в размере 35,6% от фонда заработной платы научно-технического персонала. При проведении работ по данной теме, рассчитываемая статья составляет ФСС=232824 рублей.

Затраты на электроэнергию. Затраты определены по формуле:

$$P_{\text{Э}} = \sum_{i=1}^n M_i t_i C_{\text{Э}}, \quad (4.10)$$

где M_i - мощность электродвигателя единицы оборудования, кВт;

t_i - время работы единицы оборудования, час.;

i - число единиц оборудования;

$C_{\text{Э}}$ - стоимость электроэнергии, $C_{\text{Э}} = 5,04$ руб/кВт*час.

При проведении экспериментальных исследований использовалась установка МТВ-10, имеющая электропривод мощностью 2,1 кВт в течение 176 часов.

При изготовлении образцов, экспериментального оснащения, приспособления использовалось металлорежущее и сварочное оборудование:

- установка для диффузионной сварки, имеющая насосы мощностью 10 кВт в течение 4 часов;
- токарно-винторезный станок 1К62, имеющий электропривод мощностью 11 кВт в течение 258 часов;
- вертикально-фрезерный станок 6Р10, имеющий электропривод мощностью 5,5 кВт в течение 40 часов;
- вертикально-сверлильный станок 2Н125, имеющий электропривод мощностью 1,5 кВт в течение 36 часов.

Затраты на электроэнергию составили:

$$P_{\text{Э}} = 2,1 * 176 * 5,04 + 10 * 4 * 5,04 + 11 * 258 * 5,04 + 5,5 * 40 * 5,04 + 1,5 * 36 * 5,04 = 16640,06 \text{ руб.}$$

Затраты на амортизацию. Используемое оборудование находится на балансе кафедры ПЛА и УКМ, поэтому в затратах на НИР учитывались расходы на его амортизацию. Затраты на амортизацию A определяются по формуле:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n k_i H n_i}{100 * 12}, \quad (4.11)$$

где A - амортизационные отчисления, руб.; k - балансовая стоимость оборудования, руб.; i - число единиц оборудования; H - норма амортизации,

принимаемая в Самарском университете равной 10% от стоимости оборудования, в год; n_i - число месяцев использования единицы оборудования по данной теме.

Результаты расчета затрат на амортизацию оборудования отражены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Амортизационные отчисления

Наименование оборудования	Балансовая стоимость, руб.	Время работы по теме, мес.	Амортизационных отчислений, руб.
Машина МТВ- 10	160000	1	1333,33
Установка для диффузионной сварки	230000	0,05	95,83
Токарно-винторезный станок 1К62	105000	1,5	1312,5
Вертикально-фрезерный станок 6Р10	90000	0,25	187,5
Вертикально-сверлильный станок 2Н125	43000	0,25	89,58
Итого			3018,74

Накладные расходы НИР НР на основании нормативов, действующих в Самарском университете, составляют 200% от заработной платы персонала. Они составили:

$$НР=2*ЗПЛ=2*654000=1308000 \text{ рублей.}$$

Плановая себестоимость НИР $C_{НИР}$ складывается из вышперечисленных затрат, с учетом того, что НИР в РФ НДС не облагаются и определяется по формуле:

$$C_{\text{НИР}} = M + 3\text{ПЛ} + \text{ФСС} + P_{\text{Э}} + A + \text{НР}, \quad (4.12)$$

где ЗПЛ – фонд заработной платы; ФСС – отчисления в фонд социального страхования; $P_{\text{Э}}$ – расходы на электроэнергию; А – амортизационные отчисления; НР – накладные расходы.

Плановая себестоимость НИР с учетом всех статей расходов составила:

$$C_{\text{НИР}} = 123500 + 654000 + 232824 + 16640,06 + 3018,74 + 1308000 = 2337982,8 \text{ руб.}$$

Прогноз цены на НИР.

В состав цены НИР включаются затраты на НИР и прибыль научно-исследовательской организации. Минимальная прогнозируемая цена на обеспечение качества гибких зубчатых колес ВЗП приводов СБ КА за счет внедрения в технологический процесс приспособления-спутника с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы определяется по формуле:

$$C_{\text{НИР}} = C_{\text{НИР}} + \text{Прибыль}. \quad (4.13)$$

Сумма прибыли в цене, согласно нормативов, действующих в Самарском университете, определяется в 20% от стоимости НИР и составляет:

$$C_{\text{НИР}} = 2337982,8 * (1 + 0,2) = 2805579,36 \text{ руб.}$$

Оценка технического эффекта технологии механической обработки прецизионных гибких колес ВЗП с базированием на приспособлении-спутнике с рабочей частью из материала с ЭПФ.

Внедрение в производство разработанной технологии механической обработки прецизионных гибких колес ВЗП с базированием на приспособлении-спутнике с рабочей частью из материала с ЭПФ позволяет существенно повысить качество космической техники, сократить трудовые и материальные затраты, повысить эффективность производства. Оценка технического эффекта от использования результатов НИР проводится путем сравнения уровней дефектности прецизионных гибких колес ВЗП изготовленных по базовому и новому технологическим процессам механической обработки. По базовой технологии операции чистового точения, шлифовки и зубофрезерования проводятся с использованием оправки с малым конусом, осуществляющей базирование не по поверхности, а по окружности.

Техническим эффектом нового процесса является снижение себестоимости агрегатов за счет уменьшения уровня дефектности гибких колес в следствие сокращения трудоемкости, материальных затрат, расходов на электроэнергию и производственных издержек.

Расчет годового экономического эффекта от внедрения нового процесса базирования с управляемым усилием закрепления производится по формуле:

$$\mathcal{E} = (PP_1 - PP_2) * (C_{ГК} + C_{сб}) * N_{Г} - K, \quad (4.14)$$

где \mathcal{E} – годовой экономический эффект, руб.; $C_{ГК}$ – себестоимость изготовления гибкого колеса, руб.; $C_{сб}$ – себестоимость работ по сборке-разборке ВЗП привода СБ, PP – уровень дефектности; $N_{Г}$ – годовая программа выпуска гибких колес ВЗП приводов солнечных батарей КА, $N_{Г}=14$ штук.

$$PP = \frac{Б}{\Phi}, \quad (4.15)$$

где $Б$ – количество продукции, возвращенной потребителем как брак,
 Φ – фактическое количество изготовленной продукции.

Уровень дефектности гибких колес ВЗП в базовом процессе согласно собранным статистическим данным $PP_1 = Б_1 / \Phi_1 = 11 / 21 = 0,5238$.

Уровень дефектности гибких колес ВЗП по результатам внедрения нового процесса базирования согласно собранным статистическим данным $PP_2 = Б_2 / \Phi_2 = 2 / 21 = 0,0952$.

K – единовременные инвестиции, в рассматриваемом случае они равны цене НИР из условия периода окупаемости инвестиций один год.

Расчет себестоимости изготовления гибкого колеса и себестоимости работ по сборке-разборке ВЗП привода СБ.

Себестоимость изготовления гибкого колеса и работ по сборке ВЗП привода C складывается из затрат на заработную плату основных рабочих с отчислениями в фонд социального страхования, затрат на основные и вспомогательные материалы, затрат на изготовление и эксплуатацию технологического оснащения, затрат на прочие общепроизводственные расходы. Себестоимость определяется по формуле:

$$C=Z_{\text{ПР}}+P_{\text{М}}+P_{\text{Т ОС}}+P, \quad (4.16)$$

где $Z_{\text{ПР}}$ - затраты на заработную плату основных рабочих с отчислениями в фонд социального страхования, руб.; $P_{\text{М}}$ – затраты на основные и вспомогательные материалы, руб.; $P_{\text{Т ОС}}$ - затраты на изготовление и эксплуатацию технологического оснащения, руб.; P - затраты на прочие общепроизводственные расходы, руб.

Затраты на заработную плату производственных рабочих с отчислениями в фонд социального страхования вычисляются по формуле:

$$Z_{\text{ПР}}=t_{\text{шт-к}}*C*k_i*K_{\text{д}}, \quad (4.17)$$

где $t_{\text{шт-к}}$ – штучно-калькуляционное время на изготовления гибкого колеса и сборку-разборку ВЗП привода СБ, н/час; C – часовая тарифная ставка 1-го разряда, руб/час; k – тарифный коэффициент; $K_{\text{д}}$ - коэффициент доплат, учитывающий размер премии (30-40%), дополнительной зарплаты (8-10%), отчисления в фонд социального страхования (35,6%).

Штучно-калькуляционное время на изготовления гибкого колеса и сборку-разборку ВЗП привода СБ по технологическому процессу 218,2 н/часа. Для АО «РКЦ «Прогресс» часовая тарифная ставка 1-го разряда составляет $C=245,0$ руб., усредненный тарифный коэффициент для производственных рабочих 4-5 разряда составляет $k_i=1.41$, коэффициент доплат составляет $K_{\text{д}}=1,9$.

Затраты на заработную плату производственных рабочих с отчислениями в фонд социального страхования составляют $Z_{\text{ПР}}=218,2*245*1,41*1,9=143216,66$ руб.

Затраты на основные и вспомогательные материалы составляют $P_{\text{М}}=0,005$ руб.

Затраты на изготовление и эксплуатацию оснастки, используемой при изготовлении гибкого колеса и сборке-разборке ВЗП привода СБ по технологическому процессу, отнесенные к годовой программе выпуска составляют

$$P_{\text{Т ОС}}=454385,35 \text{ руб.}$$

Прочие общепроизводственные расходы составляют 200% от суммы заработной платы основных рабочих и составляют $P=2*143216,66=286433,32$ руб.

Таким образом, суммарные расходы на изготовление гибкого колеса и сборку-разборку ВЗП привода СБ составят

$C=143216,66+34422,20+454385,35+286433,32=918457,53$ руб.

Расчет показателей экономической эффективности.

Экономический эффект от внедрения нового процесса, вычисленный по формуле (4.14) составит

$$\Xi = (0,5238 - 0,0952) * 918457,53 * 14 - 2805579,36 = 2705533,20 \text{ руб.}$$

Период окупаемости единовременных затрат на внедрение новой технологии составит

$$\text{Период окупаемости} = \frac{\text{Стоимость НИР}}{\text{Экономический эффект}} = \frac{2805579,36}{2705533,20} = 1,04$$

Следовательно, период окупаемости нового процесса немногим более 1 года.

4.5 Выводы по главе 4

1. Для подтверждения адекватности используемой модели разработана методика экспериментального исследования процесса функционирования образцов из сплава с эффектом памяти формы, спроектировано и изготовлено экспериментальное оборудование и оснастка, проведено исследование процесса функционирования образцов. В результате сравнения результатов численного моделирования с результатами натурного установлена адекватность аналитической и численной моделей. Таким образом, полученные модели функционирования рабочей части оснастки – втулки из материала с эффектом памяти формы могут быть использованы для проектирования технологической оснастки для прецизионной механической обработки тонкостенных деталей.

2. Опираясь на ранее проведенные теоретические и экспериментальные исследования разработана методика проектирования и технологический процесс изготовления приспособлений с силовым элементом из сплава с эффектом памяти формы. Указанная методика позволяет создавать специализированные устройства для базирования прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей методом их совместной раздачи с использованием давления силового элемента из сплава с памятью формы ТН-1 и управлять перемещениями рабочих поверхностей оснастки

для закрепления с целью обеспечения жесткости заготовки, тем самым повышая ее качество.

3. По разработанной методике было спроектировано и изготовлено приспособление, которое прошло отработку в условиях производства. Анализ результатов экспериментального исследования процесса базирования заготовки прецизионной тонкостенной детали в приспособлении в условиях производства практически подтверждает пригодность методики проектирования технологического оснастки с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы. Применение разработанной конструкции технологической оснастки позволяет создавать перемещения необходимой величины, подтверждая стабильность рабочего хода при многократном применении.

4. Разработан план управления процессом изготовления и контроля характеристик гибкого колеса волновой зубчатой передачи. Его применение в условиях производства позволяет учитывать большинство факторов, влияющих на качество продукции, и своевременно их устранять, что приводит к уменьшению затрат на контроль и изготовление продукции.

5. Проведена оценка экономической эффективности внедрения процесса механической обработки прецизионных гибких колес волновых зубчатых передач приводов солнечных батарей космического аппарата «Ресурс-П» с базированием на приспособлении-спутнике с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы. Новый процесс позволяет существенно повысить качество космической техники, сократить трудовые и материальные затраты, повысить эффективность производства. Годовой экономический эффект от внедрения в АО «РКЦ «Прогресс» составляет около 2,7 млн. рублей в ценах 2022 года, период окупаемости новой технологии немногим более 1 года.

6. Научной новизной является 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Экспериментально исследован процесс функционирования образцов-втулок из сплава с памятью формы. В результате сравнения результатов численного моделирования с результатами натурального установлена адекватность аналитической и численной моделей.

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

9. 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.

10. Применение оснастки в процессе базирования прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с управляемым перемещением закрепления и оптимизация технологического процесса механической обработки 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» (г. Самара) получить экономический эффект около 2,7 миллиона рублей за 2022 год при изготовлении гибких колес волновых зубчатых передач приводов солнечных батарей КА «Ресурс-П» (Приложение Б).

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 оснасткой;

- моделирование процесса совместного деформирования изделия и элементов технологической оснастки для оценки рисков, прогнозирования качества, видов и вероятности возникновения несоответствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автореверсивная втулка из материала с ЭПФ для прецизионного шлифования тонкостенных осесимметричных деталей** / Д.В. Назаров, О.В. Ломовской, А.Н. Плотников, А.А. Шаров. - Текст: непосредственный // Известия СНЦ РАН. Самара. 2016. Т. 18. №4 С. 1181-1185.

2. **Авторское свидетельство № 316882 А1 СССР. Генератор волновой зубчатой передачи**: опубл. 07.10.71 / М. Н. Иванов, С. А. Шувалов, В. А. Финогенов, П. К. Попов, Э. П. Амосова; заявитель Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени Высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана.

3. **Адлер, Ю. П.** Новые направления в статистическом контроле качества – метод Тагути. – М.: Знание, 1988. – 56 с.

4. **Адлер, Ю. П.** Нужна ли нам «система экономики качества»? Неужели да? [Текст] / Ю.П. Адлер, С.Н. Щепетова // Стандарты и качество. – 2001. – №12. – С. 68-70.

5. **Адлер, Ю. П.** Статистическое управление процессами: Учебное пособие / Ю. П. Адлер, В. Л. Шпер. – Москва: Издательский Дом МИСиС, 2015. – 236 с.

6. **Антология русского качества** / Под ред. Б.В. Бойцова, Ю.В. Крянева. М.: Академия проблем качества, 1997. – 427 с.

7. **Бадалова, А. Г.** Управление рисками деятельности предприятия [Текст]: Учебное пособие / А. Г. Бадалова, А.В. Пантелеев. - М.: Вузовская книга, 2015. - 234 с.

8. **Барвинок, В. А.** Внедрение стандартов ИСО 9000 на предприятиях Самарской области [Текст] / В.А. Барвинок, Ю.В. Зорин // Проблемы обеспечения качества продукции, сертификационных и метрологических услуг: Сб. докладов региональной научно-практической конференции. Самара: СГАУ, 1998, с.5-11.

9. **Барвинок, В. А.** Исследование производительности прессового оборудования с силовым приводом из сплава с эффектом памяти формы [Текст] / В. А. Барвинок, О. В. Ломовской, В. И. Богданович. // Материалы II ВНТК

«Прогрессивные технологические процессы, оборудование и оснастка для холодноштамповочного производства». – Пенза, 1994. – С.62.

10. **Барвинок, В. А.** Малогабаритное оборудование и инструмент с силовым приводом из сплава с памятью формы, предназначенные для выполнения ремонтно-монтажных работ [Текст] / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, В. С. Феоктистов, О. В. Ломовской // В кн.: Проблемы космической технологии металлов. Труды ИЭС им. Патона. – Киев: ИЭС им. Патона, 1987. – С.99-103.

11. **Барвинок, В. А.** Основные направления работ по повышению качества продукции в Поволжском регионе [Текст] / В.А. Барвинок, Ю.В. Зорин, В.Т. Ярыгин // Проблемы обеспечения качества и сертификации: Сб. трудов. / Под ред. В.А. Барвинка. М.: МЦНИ, 1996. №3-4. – С.3-9.

12. **Барвинок, В. А.** Основы обеспечения качества сложных изделий в процессе производства [Текст] / В.А. Барвинок, А.Н. Чекмарев, А.И. Рыжков // Проблемы машиностроения и автоматизации: Международный журнал. М.: МЦНТИ, 1997. №3-4. – С.70-74.

13. **Барвинок, В. А.** Повышение качества технических систем на стадии проектирования с применением метода FMEA [Текст] /В. А. Барвинок, А.Н. Чекмарев, Р.В. Буткевич, Ю.С. Клочков // Актуальные проблемы науки и образования: Труды Международного юбилейного симпозиума – Пенза: ГОУ ВПО ПГУ, 2003 – С. 70-74.

14. **Барвинок, В. А.** Сертификация и аттестация технологических процессов [Текст] / В.А. Барвинок, В.Т. Ярыгин // Актуальные проблемы сертификации продукции и услуг: Материалы Всероссийского научно-технического семинара. Самара: СГАУ, 1996, С.38-44.

15. **Барвинок, В. А.** Управление качеством путем построения оптимального уровня производства изделий / В.А. Барвинок, А.Н. Чекмарев, О.А. Ермолов // Проблемы машиностроения и автоматизации: Международный журнал. М.: МЦНТИ, 1995. №5-6. – С.3-5.

16. **Барвинок, В. А.** Физические основы моделирования и проектирования реверсивных силовых приводов из материала с эффектом памяти формы / В.А.

Барвинок, В.И. Богданович, В.С. Феоктистов – Международный центр научной и технической информации, М., 1997. – 72 с.

17. **Барвинок, В. А.** Штамповое оборудование с силовым приводом из сплава с памятью формы [Текст] / В. А. Барвинок, В. С. Феоктистов, О. В. Ломовской // Материалы ВНТК штамповщиков Западного Урала. – Пермь, 1987. – С.45-46.

18. **Белобрагин, В. Я.** Качество не знает границ [Текст] / В. Я. Белобрагин // Стандарты и качество. - 2010. - № 10. - С. 86-89.

19. **Белобрагин, В. Я.** Основы стандартизации: Учебное пособие. – 2-е издание, дополненное / В.Я. Белобрагин, А.В. Зажигалкин, Т.И. Зворыкина – М.: РИА «Стандарты и качество», 2017.

20. **Белобрагин, В. Я.** Саратовская система: вчера и сегодня [Текст] // Стандарты и качество. - 2015. - № 11. - С. 74-77.

21. **Белобрагин, В.Я.** Современные проблемы территориального управления эффективным производством и качеством продукции в условиях становления рынка. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 140 с.

22. **Белобрагин, В. Я.** Техническое регулирование на рубеже индустрии 4.0. Монография. / В.Я. Белобрагин, А.В. Зажигалкин, Т.И. Зворыкина – М.: Издательство «Научный консультант», 2019.

23. **Беляев, С. П.** Обратимый эффект памяти формы как результат термоциклической тренировки под нагрузкой [Текст]/ С. П. Беляев, С. Л. Кузьмин, В. А. Лихачев // «Проблемы прочности». – 1988. – №7. – С.50-54

24. **Беляев, С. П.** Эффект памяти формы при сложном нагружении [Текст] /С.П. Беляев, З. П. Каменцева, С. Л. Кузьмин, В. А. Лихачев и др.// «Проблемы прочности». – 1987. – №6 – С.81-84.

25. **Богатырев, А. А., Филиппов Д.Д.** Стандартизация статистических методов управления качеством. – М.: Изд-во стандартов, 1989. - 120 с.

26. **Богданович, В. И.** Применение материалов с эффектом памяти формы в производстве летательных аппаратов: учебное пособие [Текст] / В. И. Богданович, Н. П. Родин, О. В. Ломовской; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Самарский гос.

аэрокосмический ун-т им. акад. С. П. Королева". – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 63 с.

27. **Васильев, В. А.** Информационное обеспечение для управления качеством автокомпонентов / В.А. Васильев, Г.Ф. Биктимирова // Качество. Инновации. Образование. – 2015. – № 8 (123). – С. 24 – 28.

28. **Версан, В. Г.** Менеджмент качества как подсистема матричной структуры управления предприятием / В.Г. Версан // Стандарты и качество. – 2008. - №5.

29. **Версан, В. Г.** Стандарты ИСО серии 9000: закономерности развития / В.Г. Версан // Стандарты и качество. – 2008. - №1.

30. **Воронин, Г. П.** О мерах поддержки отечественной экономики / Г. П. Воронин // Стандарты и качество. – 2022. – № 4. – С. 78-79.

31. **Воронин, Г.П.** Я пришел в Госстандарт работать / Г. П. Воронин // Стандарты и качество. — 2005. — № 10. — С. 42.

32. **Гинзбург, Е. Г.** Волновые зубчатые передачи [Текст] М.: Машиностроение, 1969. 160 с.

33. **Годлевский, В. Е.** Применение статистических методов в автомобилестроении / В. Е. Годлевский, А. Н. Плотников, Г. Л. Юнак; под общ. ред. А. В. Васильчука. – Самара: Перспектива, 2003. – 196 с.

34. **ГОСТ Р 51901.1 – 2002** Менеджмент риска. Анализ риска.

35. **ГОСТ Р 51901.12-2007** Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов.

36. **ГОСТ Р 58771-2019.** Менеджмент риска. Технологии оценки риска = Risk management. Risk assessment technologies: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2019 г. N 1405-ст.

37. **ГОСТ Р 51814.2 – 2001** Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов.

38. **Деминг Э.** Выход из кризиса: новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг; пер. с. англ. [Ю. Адлер, В. Шпер]. - 6-е изд. – М.: Альпина Пабlishер, 2014. - 416 с.

39. **Денисенко, А. Ф.** Угловая точность профильных соединений / А. Ф. Денисенко, Д. В. Назаров, И. К. Рыльцев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 4(36). – С. 136-143.
40. **Диалог с руководителем компании о предупреждении отказов.** Книга 6 из серии "Диалоги консультанта". // Кочетков Е.П. - Н. Новгород: ООО СМЦ "Приоритет", 2007. - 104 с.
41. **Дмитриев, А. Я.** Робастное проектирование и технологическая подготовка производства изделий авиационной техники [Текст] / А. Я. Дмитриев, Ю.А. Вашуков, Т.А. Митрошкина – Самара: СГАУ, 2016. – 76с.
42. **Ефимов, В. В.** Спираль качества. Ульяновск: УлГТУ, 2002.
43. **Иванов, М. Н.** Волновые зубчатые передачи [Текст] М.: Высш. шк., 1981. 184 с.
44. **Иванов, М. Н.** Детали машин: Учеб. для машиностр. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1984. – 336с., ил.
45. **Интеграция производства и управления качеством продукции / В.Г. Версан, В.И. Сиськов, Л.Г. Дубицкий [и др.].** – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 320 с.
46. **Исикава, К.** Японские методы управления качеством. М.: Экономика, 1998. 236 с.
47. **Картвелишвили, В. М.** Риск-менеджмент. Методы оценки риска: учебное пособие / В. М. Картвелишвили, О. А. Свиридова. – Москва: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2017. – 120 с. - Текст: непосредственный.
48. **Кащук, В. А.** Справочник шлифовщика [Текст] / В.А. Кащук, А.Б. Верещагин —М.: Машиностроение, 1988. — 480 с: ил.— (Серия справочников для рабочих).
49. **Кожевников, Д. В.** Резание материалов [Текст]: [учеб, для вузов по направлению "Конструкт. - технол. обеспечение машиностроит. пр-в"]/Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов; под общ. ред. С. В. Кирсанова. - М.: Машиностроение, 2007. - 303 с. - (Для вузов)

50. **Кулешова, Е.В.** Управление рисками проектов: учебное пособие [Текст] / Е. В. Кулешова. - 2-е изд., доп. - Томск: Эль Контент, 2015. - 188 с.
51. **Лихачев, В. А.** Эффект памяти формы [Текст] / В. А. Лихачев, С. Л. Кузьмин, З. П. Каменцева – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. – 216с.
52. **Ломовской, О. В.** Совершенствование технологии прецизионной стыковки под сварку элементов трубопроводов летательных аппаратов за счет применения силового привода из сплава с эффектом памяти формы: специальность 05.07.02: автореферат дис. ... кандидата технических наук / Ломовской Олег Владиславович. - Самара, 2010. - 16 с.
53. **Маталин, А. А.** Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.-Л.: Машгиз, 1956. – 252 с.
54. **Менеджмент качества и сертификация:** Учебное пособие. Т.1/ Ю.П. Адлер, В.М. Григорьев, Т.М. Полховская и др. – М.: МИСиС-Центр сертификации, 2001. - 152 с.
55. **Менеджмент систем качества:** учеб, пособие М.: Изд-во стандартов, 1997.
56. **Методика проектирования силовых приводов из материала с эффектом памяти формы для ракетно-космической техники** / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, А. А. Грошев [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 6. – С. 272-277.
57. **Мигачев, Б. С.** Сертификация товаров и услуг – важнейшее средство обеспечения их безопасности для потребителей и окружающей среды (методическое пособие). – М., Издательство Академии стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – 26 с.
58. **Мигачев, Б.С.** Сравнительные и ресурсные испытания товарной продукции – новое эффективное средство защиты интересов потребителей (методическое пособие). – М., ЦИСМ, 1995. – 34 с.
59. **Мовчан, А. А.** Аналитическое решение задач о прямом и обратном превращении для сплавов с памятью формы. [Текст] / А. А. Мовчан // Механика твердого тела. – 1996. – №4, – С.136-144.

60. **Мовчан, А. А.** Выбор аппроксимации фазовой диаграммы перехода и модели исчезновения кристаллов мартенсита для сплавов с памятью формы [Текст] / А. А. Мовчан // ПМТФ. – 1995. – Т.36. – №2. – С.173-181.

61. **Мовчан, А. А.** Микромеханические определяющие уравнения для сплавов с памятью формы [Текст] / А. А. Мовчан // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1994. – №6. – С.47-53.

62. **Мовчан, А. А.** Микромеханический подход к описанию деформации мартенситных превращений в сплавах с памятью формы [Текст] / А. А. Мовчан // Изв. АН. МТТ. – 1995. – №1. – С.197-205.

63. **Модель современной процедуры FMEA** / В.П. Самохвалов, Д.А. Борисова, С.С. Материкина [и др.]. – Текст: непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. – т. 12, №4(4). – С. 817-822.

64. **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.

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

66. **О механизме мартенситной памяти в металлических материалах** [Текст] / А. С. Тихонов, А. П. Герасимов, М. Х. Шоршоров и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1976. №5, – С. 78-84.

67. **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. – № 4. – С. 419-424.

68. **Орлов, В. Н.** Диаграмма Парето и ее использование для анализа качества продукции: Методические указания / В.Н. Орлов, В.В. Марфицын – Курган: КГУ, 2012. – 21 с.

69. **Панюков, Д. И.** Проблемы применения метода PFMEA на предприятиях-поставщиках автокомпонентов / Д.И. Панюков. – Текст: непосредственный // Наука - промышленности и сервису. - Тольятти: Издательство ПВГУС, 2013. - № 8-2. - С. 530-534.

70. **Панюков, Д. И.** Роль потребителей в рамках анализа последствий потенциальных дефектов при проведении FMEA / Д.И. Панюков. - Текст: непосредственный // Наука - промышленности и сервису. - 2015. - № 10. - С. 80-83.

71. **Панюков, Д. И.** Формирование эффективной FMEA-команды / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, С.А. Шанин. - Текст: непосредственный // Стандарты и качество. - 2017. - № 7. - С. 68-72.

72. **Панюков, Д. И.** Фундаментальные основы FMEA для автомобилестроения: монография [Текст] / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский – Самара: Издательство СамНЦ РАН, 2014. – 150 с.

73. **Панюков, Д. И.** Что нужно знать при внедрении FMEA - опыт консультанта. - Текст: непосредственный // Известия Самарского научного центра РАН. Специальный выпуск. Ч. 2: Технологии управления организацией. Качество продукции и услуг. - Самара, 2006. - С.121-126.

74. **Панюков, Д. И.** Эффективное применение метода анализа видов, последствий и причин потенциальных дефектов (FMEA) в автомобилестроении: монография [Текст] / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский. – Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2016. – 202 с.

75. **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.

76. **Перспективное планирование качества продукции и план управления. APQP.** : Ссылочное руководство. Перевод с английского второго издания от июля 2008 г. – Н. Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2012. – 221 с. – Текст: непосредственный.

77. **Применение материала с эффектом памяти формы для силоприводов в различных приборах и устройствах** [Текст] / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, А. Н. Кирилин [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2010. – № 4. – С. 93-100.

78. **Прудников, О. П.** Методика и критерии селективной сборки волновых зубчатых передач приводов солнечных батарей космического аппарата / О. П. Прудников, С. В. Тюлевин, Д. В. Назаров // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2012. – № 2(42). – С. 101-106.

79. **Развитие метода FMEA-анализа** / А. А. Исаева, А. К. Астафьева, А. В. Бардина [и др.]. – Текст : непосредственный // Отраслевые аспекты технических наук. – 2012. – № 12(24). – С. 55-59.

80. **Разработка реверсивных силовых приводов из материалов с эффектом памяти формы для устройств, применяемых в узлах расчеховки космических аппаратов** [Текст] / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, О. В. Ломовской [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 4-2. – С. 301-306.

81. **Расчеты на прочность в машиностроении** [Текст] / С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев [и др.]. Том 2. – Москва: МАШГИЗ, 1958. – 975 с.

82. **Розенталь, Р. М.** Биография FMEA. Российские особенности / Р.М. Розенталь. – Текст: непосредственный // Методы менеджмента качества. – 2010. – № 9. – С. 22-27.

83. **Розенталь, Р. М.** Методика FMEA. Путь повышения качества продукции / Р.М. Розенталь. – Текст : непосредственный // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2010. – № 7. – С. 90-95.
84. **Свиткин, М. З.** Интегрированные системы менеджмента // Стандарты и качество. 2004. № 2.
85. **Современные инновационные методы структурирования качества продукции и управления рисками** [Текст] / Т. А. Митрошкина, А. Я. Дмитриев, Н. И. Лаптев, Г. Г. Богатеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 8. – С. 330-332.
86. **Справочник по сопротивлению материалов** [Текст] / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев, Отв. ред. Г.С. Писаренко 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
87. **Справочник технолога - машиностроителя.** В 2-х т. Т1 Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение-1, 2001 г. 912 с., ил.
88. **Справочное пособие директору производственного объединения (предприятия)** [Текст] / 2 Т. под ред. Г. А. Егизаряна, А. Д. Шеремета. М.: Экономика. 1978. Т. 1. 520 с.
89. **Станочные приспособления: Справочник.** В 2-х т. / Ред. совет: Б.Н. Вардашкин (пред.) и др. — М.: Машиностроение, 1984 — Т. 2 / Под ред. Б.Н. Вардашкина, В.В. Данилевского. 1984. 656 с., ил.
90. **Статистические методы повышения качества** / Под ред. Кумэ. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 304 с.
91. **Технические условия. ISO/TS16949. ANFIA. CCFA. FIEV. и др.** 2-е изд. 2002-03-01, испр. Версия 2003-12-15, 2002.
92. **Тимофеев, Г. А.** Анализ влияния ошибок изготовления деталей волновой зубчатой передачи на ее кинематическую погрешность / Г. А. Тимофеев, Ф.И. Фурсяк // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 10 (679). – С. 3-8.

93. **Тимофеев, Г. А.** Оценка влияния погрешностей изготовления зубчатых передач на качественные показатели приводов летательных аппаратов / Е.С. Новиков, П.Н. Сильченко, Г. А. Тимофеев, С.И. Красавин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 1(706). – С. 29-36.

94. **Тимофеев, Г. А.** Проектирование приводов с волновыми зубчатыми передачами для следящих систем / Г. А. Тимофеев // Вестник машиностроения. – 2015. – № 12. – С. 34-39.

95. **Тимченко, А. И.** Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений. – М.: МОССТАНКИН, 1988. – 143 с.

96. **Управление качеством продукции на основе статистических методов** / В.А. Барвинок, А.Н. Чекмарев, В.В. Шалавин, Л.А. Наумов // Проблемы сертификации и управление качеством: Материалы НТК, Ч.1, Ульяновск: Изд-во УТУ, 1998. - с.66-68.

97. **Фейгенбаум, А.** Контроль качества продукции / Сокр. Пер. с англ.; Под ред. А.В. Гличева. – М.: Экономика, 1986. – 471 с.

98. **Феоктистов, В. С.** Малогабаритная установка с силоприводом из сплава с памятью формы для калибровки-правки трубчатых деталей [Текст] / В. С. Феоктистов, О. В. Ломовской. // Материалы ВНТК Прогрессивные технологические процессы и оснастка в холодноштамповочном производстве. – Пенза, 1992, – С.85-86.

99. **Феоктистов, В. С.** Технологический инструмент с силовым приводом с памятью формы для формирования изделий из полимерных композиционных материалов [Текст]/ В. С. Феоктистов, О. В. Ломовской. // Материалы ВНТК Самолетостроение России: проблемы и перспективы. – Самара, 1998. – С.63.

100. **Филько, И. В.** Сравнительный анализ методов оценки рисков [Текст] / И. В. Филько, С. В. Филько // Учет, анализ и аудит: проблемы теории и практики. – 2016. – № 16. – С. 128-131.

101. **Харрисон, Дж. Д.** Использование сплавов системы Ti-Ni в механических и электрических соединениях. [Текст] / Дж. Д. Харрисон, Д. Е.

Ходгсон // Эффект памяти формы в сплавах/ под ред. В. А. Займовского. – М.: Металлургия, 1979. – С.429-434.

102. **Хубка, В.** Теория технических систем / Перевод с нем. В.В. Ачкасова и др.; Под ред. К.А. Люшинского. - М.: Мир, 1987.

103. **Чекмарёв, А. Н.** Статистические методы управления качеством / А.Н. Чекмарёв, В.А. Барвинок, В.В. Шалавин. М.: Машиностроение, 1999. 320 с.

104. **Шувалов, С. А.** Основные критерии работоспособности волновых зубчатых передач [Текст] // Вестник машиностроения. 1976. № 11. С. 17–20.

105. **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. – № 4. – С. 412-416.

106. **AIAG & VDA FMEA Handbook-2019 FMEA Handbook: Failure Mode and Effects Analysis (Reference Manual).**

107. **Cross W. B.** NASA CR—1433 [Текст]/ W. B. Cross, A. H. Karlotis and F. J. Stilmer// – September 1969.

108. **Dmitriev A., Mitroshkina T.** Improving the Efficiency of Aviation Products Design Based on International Standards and Robust Approaches. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 476, pp. 012009.

109. **Jackson C. M.** NASA—SP 5110 [Текст]/ C. M. Jackson, H. J. Wagner and R. J. Wasilewski// – 1972.

110. **Souza A.C., Mamiya E.N., Zouain N.** Three-dimensional model for solids undergoing stress-induced phase transformations // European Journal of Mechanics A/Solids. No. 17. 1998. pp. 789-806.

111. **Вяцкова, Н. А.** Классификация методов анализа и оценки рисков / Н. А. Вяцкова. Текст: электронный // Актуальные вопросы современной науки. - 2014. - №33. - С. 103-122. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-metodov-analiza-i-otsenki-riskov> (дата обращения: 05.04.2020).

112. **Abie, H.** Risk Analysis Methods and Practices. Privacy Risk Analysis Methodology / H. Abie, J. Borking. Текст: электронный // Norwegian Computing

Center. – 2012. -
 URL: https://www.researchgate.net/publication/259471777_Risk_Analysis_Methods_and_Practices_Privacy_Risk_Analysis_Methodology (дата обращения: 15.04.2020).

113. **MIL-F-18372** (Aer). General Specification for Design, Installation, and Test of Aircraft Flight Control Systems: has been approved Bureau of Aeronautics, Department of the Navy 31 March 1955. – Текст: электронный // Integrated Publishing, Inc.: [сайт]. – 2015. URL: <http://aircraftandairframestructuralcompone.emilspec.com/MIL-F-18372/index.html> (дата обращения: 12.05.2021).

114. **Risk Analysis and Quantification**. Текст: электронный // Comunidad de Madrid: [сайт]. – 2020. - URL: [http://www.madrid.org/cs/StaticFiles/Emprendedores/Analisis_Riesgos/pages/pdf/metodologia/4AnalisisycuantificaciondelRiesgo\(AR\)_en.pdf](http://www.madrid.org/cs/StaticFiles/Emprendedores/Analisis_Riesgos/pages/pdf/metodologia/4AnalisisycuantificaciondelRiesgo(AR)_en.pdf) (дата обращения: 14.04.2020).

115. **Risk Management Classifications**. Текст: электронный // Gallagher Healthcare: [сайт]. – 2020. - URL: <https://www.gallaghermalpractice.com/blog/post/risk-management-classifications> (дата обращения: 14.04.2020).

116. **SID-62-203-R-1**. Apollo reliability Program Plan: has been approved North American Aviation, Space and Information System Division 15 May 1963. – Текст: электронный // Internet Archive: [сайт]. – 2014. URL: https://archive.org/details/nasa_techdoc_19790077057 (дата обращения: 12.05.2021).

117. **Thakur, M.** Risk Analysis / M. Thakur. - Текст: электронный // Risk Analysis (Definition, Methods) | Qualitative & Quantitative: [сайт]. – 2020. - URL: <https://www.wallstreetmojo.com/risk-analysis> (дата обращения: 19.04.2020).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

План управления процессом изготовления и контроля характеристик гибкого колеса волновой зубчатой передачи

НОМЕР ДЕТАЛИ/	НАЗВАНИЕ ПРОЦЕССА/ ОПИСАНИЕ	ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ПР-ВА	ПАРАМЕТРЫ		КЛЮЧ. ПАРАМЕТР ВЛ, МАСС	ПРОДУКЦИЯ / ПРОЦЕСС / СПЕЦИФИКАЦИЯ /	ОЦЕНКА / ИЗМЕРЕНИЕ /	МЕТОДЫ		ПЛАН РЕАГИРОВАНИЯ	
			ПРОДУКЦИИ	ПРОЦЕССА				РАЗМЕР	ОБРАЗЕЦ ЧАСТОТА		
010	Перемещение и комплектование	Тележка	1	Соответствие количества заготовок деталей и образцов заявке	—	Количество	Визуально	100%	Каждая партия	При "По входному контролю сырья и материалов", "Идентификация и прослеживаемость в производстве", Журнал "Складского учета и движения готовой продукции", Журнал "Входной контроль и выдача в производство", "Управление несоответствиями, ИД и ПД", Журнал регистрации несоответствий	В случае возникновения несоответствий: 1. Заблокировать и идентифицировать несоответствующий материал биркой "заблокировано" с указанием причин блокировки; 2. Изолировать несоответствующий материал в буферную зону до проведения контроля качества; 3. Информировать мастера, начальника участка; 4. См. "Памятка Действия в случае возникновения нетипичных ситуаций"
			2	Фиксация перемещения материала со склада на участок мехобработки	—	Фиксация оприходования в Журнал "Складского учета и движения готовой продукции"	Визуально	100%	При каждой приемке	несоответствиями, ИД и ПД, Журнал регистрации несоответствий	В случае возникновения несоответствий: 1. Заблокировать и идентифицировать несоответствующую продукцию биркой "заблокировано" с указанием причин блокировки; 2. Изолировать несоответствующий материал в буферную зону; 3. Информировать мастера, начальника участка; 4. См. "Памятка Действия в случае возникновения нетипичных ситуаций"
020	Контроль входной	Спектрометр	1	Наличие сопроводительных документов	—	Наличие сертификата качества, сопроводительных документов	Визуально	1 раз	Каждая партия	Стандарт организации (СТО) «Входной контроль металлических материалов», «Технологическая инструкция (ТИ) входного контроля металлических материалов»	В случае возникновения несоответствий: 1. Заблокировать и идентифицировать несоответствующую продукцию биркой "заблокировано" с указанием причин блокировки; 2. Изолировать несоответствующий материал в буферную зону; 3. Информировать мастера, начальника участка; 4. См. "Памятка Действия в случае возникновения нетипичных ситуаций"
			2	Внешний вид заготовок	—	Отсутствие механических повреждений, дефектов поверхности	Визуально	100%	Каждая партия		
			3	Контроль марки материала (химического состава)	—	Провести спектральный анализ заготовок	Инструментально/ спектрометр	5%	Каждая партия		
			4	Контроль геометрических размеров	—	Провести замер диаметра и длины локови, факриные размеры заготовки образцов	Инструментально/ штангенциркуль	100%	Каждая партия		
030	Токарная	Станок токарный 16К20, патрон трехкулачковый, резец проходной, сверло	1	Геометрические размеры и шероховатость поверхности	—	В соответствии с картой поставки на термообработку	Инструментально/ штангенциркуль, калибр-проба, образец шероховатости	100%	Каждая партия	Технологическая карта, технический паспорт на СОЖ	В случае возникновения несоответствий: 1. Идентифицировать несоответствующую продукцию биркой «заблокировано» с указанием причин блокировки. 2. Изолировать несоответствующую продукцию в буферную зону; 3. Информировать мастера, начальника участка.
			2	—	Статус оборудования/настройка	Убедиться в исправности оборудования. Установить заданные режимы обработки	Визуально	1 раз	В начале обработки партии		
			3	—	Смазка/охлаждение	Применение СОЖ, приготовленной согласно ТУ, с соблюдением срока хранения	Визуально, по дате и отметке в сопроводительной документации	1 раз	Сути		
040	Фрезерная (для образцов)	Станок фрезерный БР10, тиски фрезза торцовая	1	Геометрические размеры и шероховатость поверхности	—	В соответствии с картой поставки на термообработку	Инструментально/ штангенциркуль, образец шероховатости	3 шт.	Каждая партия	Карта поставки на термообработку, технологическая карта, технический паспорт на СОЖ	В случае возникновения несоответствий: 1. Идентифицировать несоответствующую продукцию биркой «заблокировано» с указанием причин блокировки. 2. Изолировать несоответствующую продукцию в буферную зону; 3. Информировать мастера, начальника участка.
			2	—	Статус оборудования/настройка	Убедиться в исправности оборудования. Установить заданные режимы обработки	Визуально	1 раз	В начале обработки партии		
			3	—	Смазка/охлаждение	Применение СОЖ, приготовленной согласно ТУ, с соблюдением срока хранения	Визуально, по дате и отметке в сопроводительной документации	1 раз	Сути		

050	Сварная (для образцов)	Пресс механический, набор клеев	1	Маркировка	—	Нанесение ударным способом информации	Визуально	3 шт.	Каждая партия	Карта поставки на термообработку, технологическая карта	В случае возникновения несоответствий: 1. Идентифицировать несоответствующую продукцию биркой «Заблокировано» с указанием причин блокировки. 2. Изолировать несоответствующую продукцию в буферную зону; 3. Информировать мастера, начальника участка.
			2	—	Статус оборудования	Убедиться в исправности оборудования	Визуально	1 раз	В начале обработки партии		
060	Контрольная	Контрольный стол	1	Наличие сопроводительных документов	—	Наличие отметок в предъявительской	Визуально	100%	Каждая партия	Карта поставки на термообработку, технологическая карта	В случае возникновения несоответствий: 1. Идентифицировать несоответствующую продукцию биркой «Заблокировано» с указанием причин блокировки. 2. Изолировать несоответствующую продукцию в буферную зону; 3. Информировать мастера, начальника участка.
			2	Контроль геометрических размеров	—	Провести замер диаметра и длины заготовок, габаритные размеры образцов	Инструментально/ штангенциркуль, образец шероховатости	100%	Каждая партия		
070	Термообработка	Печь вакуумная	1	Твердость металла заготовок	—	В соответствии с требованиями КД	Инструментально/твердомер	1 раз	Каждый образец	Типовой технологический процесс, ОСТ "Термическая обработка заготовок (деталей) из легированных сталей", инструкция по эксплуатации печи вакуумной	В случае возникновения несоответствий: 1. Идентифицировать несоответствующую продукцию биркой «Заблокировано» с указанием причин блокировки. 2. Изолировать несоответствующую продукцию в буферную зону; 3. Информировать мастера, начальника участка.
			2	—	Температура	В соответствии с требованиями ОСТ	Инструментально/термометр	1 раз	В начале обработки партии		
			3	—	Статус оборудования	Убедиться в исправности оборудования	Визуально	1 раз	В начале обработки партии		
080	Пескоструйная	Камера струйной очистки	1	Шероховатость материала заготовок	—	В соответствии с требованиями ОСТ	Визуально/образец шероховатости	1 раз	Каждая заготовка	Типовой технологический процесс, ОСТ "Пескоструйная обработка заготовок (деталей) из легированных сталей", инструкция по эксплуатации камеры струйной очистки	В случае возникновения несоответствий: 1. Идентифицировать несоответствующую продукцию биркой «Заблокировано» с указанием причин блокировки. 2. Изолировать несоответствующую продукцию в буферную зону; 3. Информировать мастера, начальника участка.
			2	—	Размер гранул абразива	В соответствии с требованиями ОСТ	Инструментально/микрометр	1 раз	В начале обработки партии		
			3	—	Марка абразива	Применение абразива согласно ТУ	Визуально, по отметке в паспорте	1 раз	В начале обработки партии		
			4	—	Статус оборудования	Убедиться в исправности оборудования	Визуально	1 раз	В начале обработки партии		

120	Шлифовальная станок 40RBU, оправа с силовым элементом из материала с ЭПФ, круг шлифовальный	1	Геометрические размеры	—	—	В соответствии с конструкторской и технологической документацией (КД и ТД)	Инструментально/шаблоны, скоба	100%	Каждая партия	Технологическая карта, инструкция по эксплуатации оборудования, паспорт на режущий инструмент, технический паспорт на СОЖ, РМ "По применению оправок с силовым элементом из материала с ЭПФ"	В случае возникновения несоответствий: 1. Идентифицировать несоответствующую продукцию биркой «заблокировано» с указанием причин блокировки. 2. Изолировать несоответствующую продукцию в буферную зону; 3. Информировать мастера, начальника участка.
		2	Отклонение от точности	—	—	В соответствии с конструкторской и технологической документацией (КД и ТД)	Инструментально/часы индикаторного типа	100%	Каждая партия		
		3	—	Статус оборудования	—	Убедиться в исправности оборудования	Визуально	1 раз	В начале обработки партии		
		4	—	Статус инструмента	—	Убедиться в исправности инструмента	Визуально, по отметке в паспорте	1 раз	В начале обработки партии		
		5	—	Статус оправок	—	Контроль рабочего диаметра оправок при низкой температуре	Инструментально	1 раз	В начале обработки партии		
		6	—	Температура	—	Контроль температуры рабочей части оправок	Инструментально/инфракрасный пирометр "Кельвин"	100%	Каждая партия		
		7	—	Смазка/охлаждение	—	Применение СОЖ, приготовленной согласно ТУ, с соблюдением срока хранения	Визуально, по дате и отметке в сопроводительной документации	1 раз	Сутки		
130	Зубофрезерная станок-90, оправа с силовым элементом из материала с ЭПФ, фреза червячная	1	Геометрические размеры и шероховатость поверхности	—	—	В соответствии с конструкторской и технологической документацией (КД и ТД)	Инструментально/стационарный 3D сканер, образец шероховатости	100%	Каждая партия	Технологическая карта, инструкция по эксплуатации оборудования, паспорт инструмент, технический паспорт на СОЖ, РМ "По применению оправок с силовым элементом из материала с ЭПФ"	В случае возникновения несоответствий: 1. Идентифицировать несоответствующую продукцию биркой «заблокировано» с указанием причин блокировки. 2. Изолировать несоответствующую продукцию в буферную зону; 3. Информировать мастера, начальника участка.
		2	Погрешность профиля	—	—	В соответствии с конструкторской и технологической документацией (КД и ТД)	Инструментально/стационарный 3D сканер	100%	Каждая партия		
		3	Радиальное биение зубчатого венца	—	—	В соответствии с конструкторской и технологической документацией (КД и ТД)	Инструментально/центровые стойки, индикатор часового типа	100%	Каждая партия		
		4	—	Статус оборудования	—	Убедиться в исправности оборудования, провести настройку станка по параметрам	Визуально	1 раз	В начале обработки партии		
		5	—	Статус инструмента	—	Уточнить по паспорту параметры фрезы	Визуально/проверить угол подвеса и наружный диаметр	1 раз	В начале обработки партии		
		6	—	Статус оправок	—	Контроль рабочего диаметра оправок при низкой температуре	Инструментально	1 раз	В начале обработки партии		
		7	—	Температура	—	Контроль температуры рабочей части оправок	Инструментально/инфракрасный пирометр "Кельвин"	100%	Каждая партия		
		8	—	Смазка/охлаждение	—	Применение СОЖ, приготовленной согласно ТУ, с соблюдением срока хранения	Визуально, по дате и отметке в сопроводительной документации	1 раз	Сутки		
140	Контрольная	1	Внешний вид, наличие сопроводительных документов	—	—	Наличие сопроводительных документов и отметок в них	Визуально	1 раз	Каждая партия	Технологическая карта, рабочая инструкция "Контроль деталей работником БТК"	В случае возникновения несоответствий: 1. Идентифицировать несоответствующую продукцию биркой «заблокировано» с указанием причин блокировки. 2. Изолировать несоответствующую продукцию в буферную зону; 3. Информировать контрольного мастера, начальника БТК.
		2	Контроль геометрических размеров	—	—	Замер геометрических размеров, погрешностей формы	Инструментально/штатгеллец иркуль, микрометр, калибры-пробки, шаблоны, стеномер, угольник, часы индикаторного типа, стационарный 3D сканер, образец шероховатости	1 раз	Каждая партия		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Документы, подтверждающие практическую значимость исследования



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ПРОГРЕСС»
(АО «РКЦ «ПРОГРЕСС»)**

ул. Земеца, д.18, г. Самара, 443009, тел. (846) 955-13-61, факс (846) 992-65-18, E-mail: mail@samspace.ru
ОКПО 43892776, ИНН 6312139922, КПП 997850001

20.04.25 № 33/0008

На № _____ от _____

АКТ

**О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ
Д. В. НАЗАРОВА В ПРАКТИКУ АО «РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
«ПРОГРЕСС»**

Настоящим актом подтверждается, что научно-практические результаты работы Назарова Дениса Викторовича вошли в устойчивую практику применения в АО «РКЦ «Прогресс».

В практике, наиболее существенные результаты были получены при внедрении методики проектирования технологического оснащения с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы.

Подходы и рекомендации по повышению качества изготовления прецизионных гибких зубчатых колес позволили оптимизировать технологический процесс в части исполнения и контроля операции нарезания зубчатого венца. Модель обеспечения качества приводов позволила определить наиболее значимые дефекты, возникающие в процессе их производства.

В результате внедрения предложенных научно-технических результатов в 2022г. достигнут экономический эффект 2,7 млн. руб.

Настоящий акт составлен для целей защиты диссертационной работы, без права выплаты авторских отчислений, не является финансовым документом.

Заместитель
генерального директора
по производству



В.В.Пашистов

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель ректора,
директор института авиационной и
ракетно-космической техники
ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет
им. академика С.П. Королева»



И.С. Ткаченко И.С. Ткаченко

«29» 06 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы

Назарова Дениса Викторовича на тему

**«Совершенствование модели обеспечения качества изготовления
прецизионных тонкостенных деталей на примере гибких колес
волновых зубчатых передач приводов солнечных батарей космических
аппаратов» в учебный процесс**

Результаты диссертационного исследования Назарова Дениса Викторовича, представленные в виде структурной модели повышения качества конструкции волновых зубчатых передач, математической и численной моделей процесса функционирования рабочей поверхности оправки из материала с эффектом памяти формы при базировании прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей с контролируемым деформированием, методики проектирования технологической оснастки с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы внедрены в учебный процесс кафедры «Производство летательных аппаратов и управление качеством в машиностроении» при обучении студентов по направлениям подготовки 24.05.07 «Самолето- и вертолетостроение» и 27.03.02 «Управление качеством».

Заведующий кафедрой
«Производство летательных
аппаратов и управление
качеством в машиностроении»,
д.т.н., доцент

Д.В. Антипов