

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный университет»



На правах рукописи

Зырянов Виталий Андреевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СБОРНЫХ ЧЕРВЯЧНЫХ
ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩИХ ФРЕЗ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ РЕЗАНИЯ

Специальность: 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Артамонов Е.В.

Тюмень – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПРИ ЧЕРНОВОМ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	14
1.1 Проблемы чернового зубофрезерования крупномодульных зубчатых колес стандартными зуборезными червячными фрезами.....	14
1.2 Зубофрезерование колес при различных видах подач.....	31
1.3 Выбор и применение инструментальных твердых сплавов при обработке зубчатых колес.....	34
1.4 Предъявляемые требования к сборным конструкциям металлорежущих инструментов.....	38
1.5 Преимущества и недостатки сборных конструкций металлорежущих инструментов с СРТП.....	39
1.6 Информационный поиск и анализ конструкций сборных червячных фрез для обработки крупномодульных зубчатых колес.....	41
1.7 Выводы.....	51
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА СБОРНОЙ ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС.....	53
2.1 Описание основных характеристик исходного контура инструментальной рейки и процесса нарезания зубчатого колеса для $m=14$	53
2.2 Выбор формы сменных режущих твердосплавных пластин для расположения их в исходном контуре инструментальной рейки.....	56
2.3 Расчет конструкций сборных червячных фрез с СРТП.....	63
2.3.1 Выбор базовой поверхности для размещения сменных режущих твердосплавных пластин.....	63
2.3.2 Описание производящей поверхности рейки.....	64
2.3.3 Построение математической модели формообразования боковой	

поверхности зубьев колеса рейкой.....	69
2.3.4 Расчет конструкции сборной червячной фрезы с тангенциальным расположением СРТП (схема №1).....	75
2.3.5 Определение конструктивных размеров червячной фрезы с тангенциальным расположением СРТП (схема №1).....	76
2.3.6 Расчет сил закрепления СРТП в установочных пазах (схема №1).....	78
2.3.7 Расчет конструкции сборной червячной фрезы с групповой схемой резания (схема №2).....	81
2.3.8 Определение конструктивных размеров червячной фрезы с групповой схемой резания (схема №2).....	82
2.3.9 Расчет сил закрепления СРТП в установочных пазах для фрезы с групповой схемой резания (схема №2).....	84
2.4 Выводы.....	87
ГЛАВА 3. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА И НАГРУЖЕНИЯ ЗУБЬЕВ ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩИХ ФРЕЗ.....	
3.1 Алгоритм проведения имитационного моделирования процесса механической обработки.....	89
3.2 Имитационное моделирование процесса механической обработки для стандартной червячной фрезы.....	91
3.3 Имитационное моделирование процесса механической обработки для червячной фрезы с тангенциальным расположением режущих элементов (схема №1).....	96
3.4 Имитационное моделирование процесса механической обработки для сборной червячной фрезы с групповой схемой резания (схема №2).....	99
3.5 Выводы.....	109
ГЛАВА 4. РАСЧЕТЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ).....	
4.1 Основные понятия МКЭ.....	111
4.2 Методика расчета напряженно - деформированного состояния зубообрабатывающих фрез.....	113

4.3 Результаты исследования напряженно - деформированного состояния.....	118
4.4 Расчет окружной силы резания, скорости резания, числа оборотов инструмента, минутной подачи, основного времени обработки для зубообрабатывающего червячного инструмента.....	125
4.5 Выводы.....	131
ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СБОРНЫХ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ.....	133
5.1 Алгоритм расчета и проектирования сборных червячных фрез с СРТП для обработки крупномодульных зубчатых колес.....	133
5.2 Разработанная конструкция сборной червячной фрезы с тангенциальными режущими элементами (схема №1).....	135
5.3 Разработанная конструкция сборной червячной фрезы с групповой схемой резания (схема №2).....	139
5.4 Применение технологий быстрого прототипирования при создании конструкций сборных зубообрабатывающих инструментов.....	147
5.5 Выводы.....	159
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	161
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Иллюстрация процесса имитационного моделирования...	180
ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Результаты проведенного имитационного моделирования для стандартной червячной фрезы.....	183
ПРИЛОЖЕНИЕ В - Результаты проведенного имитационного моделирования для сборной червячной фрезы с тангенциальными режущими элементами.....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ Г - Результаты проведенного имитационного моделирования для сборной червячной фрезы с групповой схемой резания.....	195
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Патент РФ 2680122.....	204
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Патент РФ 2720011.....	205
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Акты внедрения результатов диссертационной работы...	206
ПРИЛОЖЕНИЕ З – Пример управляющей программы.....	211

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие фундаментальных отраслей машиностроительной отрасли, в частности, приборостроения, станкостроения и многих других является обязательным условием для многих стран. В условиях напряженной внешнеполитической обстановки и импортозамещения развитие машиностроения в Российской Федерации становится необходимым шагом. Государственная программа РФ, направленная на развитие промышленности и повышения ее конкурентоспособности, а также совершенствование вновь выпускаемых конструкций сборного червячного инструмента для механической обработки зубчатых колес больших модулей, с применением сменных режущих твердосплавных пластин (СРТП), для повышения их работоспособности и производительности является актуальной на сегодняшний день. Во многих странах, где налажено производство металлорежущего инструмента, наблюдается активный экономический прирост. Металлорежущий инструмент на сегодняшний день прошел долгий путь совершенствования от цельного до сборного, с применением сменных твердосплавных элементов, что является широким шагом вперед для развития машиностроительных предприятий.

При проектировании и изготовлении металлорежущего инструмента необходимо найти баланс свойств и качеств, обеспечивающих заданную производительность при обработке конкретного материала заготовки. Качественный и хороший инструмент позволяет быстро окупить затраты на приобретенное новое оборудование, в значительной мере повысить производительность имеющегося старого оборудования и сделать работу персонала продуктивной. Современной тенденцией при проектировании металлорежущего инструмента является: разработка и освоение производства новых марок инструментальных материалов, применение в инструменте износостойких покрытий, разработка, совершенствование конструкций и

технологичность изготовления, оптимизация геометрических параметров инструмента, применение новых более эффективных методов термической и термохимической обработки режущей части инструмента.

Совокупность данных технических решений способствует повышению эффективности производства металлорежущего инструмента, увеличению качества, производительности и снижению экономических затрат на выпускаемую продукцию. Совершенствование технологий обработки металлов резанием на сегодняшний день наиболее активно, происходят постоянные изменения. В эти изменения входят: расчёт, создание и внедрение новых технологических процессов по причине появления новых инструментальных материалов, способов изготовления металлорежущих инструментов, расширение областей применения технологического оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), производство различных роботизированных станочных комплексов и автоматизированных систем управления, управляемых ЭВМ.

Применение качественной и надежной инструментальной оснастки и приспособлений является определяющим для любой отрасли, а в машиностроении она крайне необходима. Её особое влияние на производство очень велико: в отсутствии надежной оснастки снижается производительность труда, исключается возможность автоматизации технологических процессов, повышается себестоимость труда и экономические затраты, а качество выпускаемой продукции может значительно снижаться.

На машиностроительных предприятиях особую важность приобретает металлорежущий инструмент [1]. Создание конструкций сборного металлорежущего инструмента со сменными режущими твердосплавными пластинами (далее - СРТП) считается революционным, для машиностроительных предприятий. В отличие от обычного (напайного или цельного) инструмента, инструмент с СРТП позволяет: многократно использовать державку или корпус, отсутствует необходимость пайки режущих пластин, исключается заточка, происходит сокращение времени на смену инструмента при изнашивании или поломке, повышаются режимы обработки, отсутствуют корректировки в

настройке оборудования при смене СРТП. Из всего вышесказанного отрицать экономическую и производственную выгоду при использовании сборного инструмента с СРТП просто невозможно.

Изготовление зубчатых колёс идет уже многие годы, но на сегодняшний день все ещё ведутся научные работы по усовершенствованию способов проектирования режущих инструментов для их производства.

Существуют различные способы изготовления и производства зубчатых колес, например, обкатка (червячными фрезами) и метод копирования (дисковой или пальцевой фрезой). Но все равно, регулярно появляются новые научные идеи и разработки для усовершенствования существующего инструмента. На территории Российской Федерации промышленными предприятиями, производящими металлорежущий инструмент, на сегодняшний день не предлагается сборных конструкций зуборезного инструмента с режущими элементами из инструментального твердого сплава для черновой обработки крупномодульных зубчатых колес. Благодаря внедрению такого инструмента в несколько раз повышается производительность имеющегося на предприятии оборудования, экономическая составляющая от внедрения нового металлорежущего инструмента позволяет расширять производство и закупать современное металлорежущее оборудование и создавать комфортные условия труда для операторов станочного парка, на машиностроительных предприятиях.

В представленной работе предлагается новое техническое решение, дающее возможность повысить эффективность (производительность) механической обработки крупномодульных зубчатых колес сборным инструментом со сменными пластинами из инструментального твердого сплава.

Степень разработанности. Зубофрезерование довольно трудоёмкий и сложный процесс, предъявляющий значительные требования к инструменту из-за высоких нагрузок при изготовлении. Значимой проблемой является долговечность и стойкость инструмента, так как замена инструмента при поломке или изнашивании осложняет дальнейший процесс зубофрезерования колеса, так как потребуются повторная привязка режущего инструмента и корректировка в

настройках оборудования. Помимо этого, переточка инструмента не может обеспечить качественную точность в изготовлении колеса, что может привести к дальнейшему браку. Вопросы, связанные с технологией изготовления, проектирования и эксплуатацией режущего инструмента решены в научных трудах ученых: Адама Я.И., Башкирова В.Н., Бобкова М.Н., Борискина О.И., Борисова С.В., Валикова Е.Н., Васина В.А., Веселова А.И., Волкова А. Э., Гавриленко В.А., Гулиды Э.Н., Гусева Г.В., Гречишникова В.А., Даниеляна А.М., Зорева Н.Н., Исаева А.В., Калашникова С.Н., Калашникова А.С., Канатникова Н.В., Когана И.А., Комарова В.А., Куц В.В., Лашнева С.И., Лоладзе Т.Н., Маликова А.А., Медведицкова С.Н., Мухина А.Ф., Ничкова А.Г., Ничкова А.В., Ничковой С.А., Овумяна Г.Г., Петрухина С.С., Петухова Ю.Е., Розенберга Ю.А., Сахарова Г.Н., Семенченко И.И., Сидоренко Л.А., Силича А.А., Скребнева Г.Г., Смольникова Н.Я., Стеблецова Ю.Н., Тайца Б.А., Тарапанова А.С., Федорова Ю.Н., Феофилова Н.Д., Харламова Г.А., Цвиса Ю.В., Чулина И.В., Чевычелова С.А., Шаламова В.Г., Шалина Г.М., Шунаева Б.К., Юликова М.И., Ямникова А.С., Янова Е.С., Bouzakis K., Joppa K., König W., Opitz G., и др.

Существующая степень проработанности научно – технической задачи не в полном объеме позволяет дать рекомендации по проектированию и производству сборных червячных фрез для обработки крупномодульных зубчатых колес.

Целью работы является повышение эффективности (производительности) работы сборных червячных фрез со сменными режущими твердосплавными пластинами при обработке крупномодульных зубчатых колес на основе имитационного моделирования и реализации групповой схемы резания, с расположением режущих элементов (СРТП) на базовом архимедовом червяке и численных исследований напряжений.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие научные **задачи:**

1. Анализ литературных источников и информационный поиск патентов по теме диссертационной работы, сформулировать цель и задачи исследования.

2. Имитационное моделирование процесса чернового зубофрезерования для определения граничных условий нагружения режущих элементов и проверка соответствия нарезаемого эвольвентного профиля.

3. Исследования напряженно-деформированного состояния зуба стандартной и сборной червячной фрезы.

4. Разработка рекомендаций по расчету и проектированию конструкций сборных червячных фрез со сменными режущими твердосплавными пластинами для обработки крупномодульных зубчатых колес.

5. Разработка конструкций сменных режущих твердосплавных пластин повышенной прочности для сборных червячных фрез на основе исследования напряженно-деформированного состояния.

6. Разработка алгоритма расчета и проектирования сборных инструментов с СРТП для обработки крупномодульных зубчатых колес.

7. Разработка конструкции сборной червячной фрезы с СРТП, методом технологий быстрого прототипирования, осуществить обработку зубчатого колеса.

Объектом исследования является процесс резания, реализуемый групповой схемой резания, с расположением сменных режущих твердосплавных пластин на архимедовом червяке.

Предметом исследования является взаимосвязь между групповой схемой резания при зубофрезеровании, реализуемая расположением сменных режущих пластин на архимедовом червяке и возникающими опасными главными напряжениями.

Научная новизна работы заключается в:

1. Установлении взаимосвязей в процессе обработки резанием и определение граничных условий нагружения между обрабатываемым зубчатым колесом и режущими элементами, расположенными на архимедовом червяке, с применением метода имитационного моделирования и выявлении напряженно-деформированного состояния в сменных режущих твердосплавных пластинах сборных червячных фрез.

2. Установлении взаимосвязи между неравномерностью нагружения режущих зубьев стандартной и сборной червячной фрезы и главными напряжениями растяжения σ_1 , сжатия σ_3 для снижения их величины в режущих элементах сборного инструмента, расположенных на архимедовом червяке, на основе определения формы «С» и «П» образных фрагментов сечения срезаемого слоя, с использованием метода имитационного моделирования процесса зубофрезерования, путем реализации групповой схемы резания.

3. Создании групповой схемы резания, реализуемой профильным лезвийным инструментом, комбинированная режущая кромка которого при обработке образует профиль обработанной поверхности в виде поверхности огибающей последовательно положение комбинированной режущей кромки относительно заготовки, с обеспечением равномерного фрезерования путем деления стружки и последовательного срезания припуска и, как следствие, возможностью увеличения подачи на зуб, скорости резания и, соответственно, производительности при черновой обработке.

4. Разработке графовой модели, включающей взаимосвязи между конструкторскими, технологическими и эксплуатационными решениями в сборной червячной фрезе в матричном виде с целью создания автоматизированной базы данных для расчета и проектирования зубообрабатывающего инструмента.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработаны рекомендации по выбору схемы расположения СРТП в корпусе сборных зубообрабатывающих червячных фрез для повышения эффективности (производительности) зубофрезерования крупномодульных зубчатых колес.

2. Разработаны рекомендации по расчету и проектированию сборных червячных фрез с СРТП для инструментальных фирм и предприятий машиностроения в виде алгоритма, с учетом взаимосвязей между силовыми характеристиками процесса механической обработки выбранного зубчатого колеса и возможных конструкторских и технологических решений.

3. Разработаны новые виды фронтальных и тангенциальных сменных режущих твердосплавных пластин для реализации групповой схемы резания в конструкциях сборных червячных фрез и их расположение на архимедовом червяке.

4. Созданы новые конструкции сборных червячных зубообрабатывающих фрез со сменными режущими твердосплавными пластинами, с групповой схемой расположения режущих элементов на архимедовом червяке, обеспечивающих повышение производительности обработки, защищенные патентами на изобретение: (патент РФ №2680122; №2720011).

Методология и методы исследования. Исследование процессов нагружения режущих элементов, определение площадей сечения срезаемых слоев, возникающих главных напряжений растяжения и сжатия, эквивалентных напряжений проводилось с использованием метода имитационного моделирования процесса механической обработки зубчатых колес с применением программного обеспечения ANSYS, Компас-3D, Microsoft Office.

Положения, выносимые на защиту:

1. Возможность определения граничных условий нагружения режущих элементов и проверка соответствия нарезаемого эвольвентного профиля на основе проведения имитационного моделирования процесса зубофрезерования цельных и сборных червячных фрез.

2. Взаимосвязь между срезаемыми площадями стружки зубообрабатывающим инструментом и возникающими опасными главными напряжениями в конструкциях червячных фрез.

3. Рекомендации по расчету, проектированию и эксплуатации СРТП и сборных червячных фрез в виде алгоритма, на основе исследования их напряженно-деформированного состояния и прочности.

4. Реализация групповой схемы резания отдельными СРТП при черновой обработке крупномодульных зубчатых колес сборными червячными фрезами, с последовательным срезанием припуска и обеспечением повышения эффективности (производительности) зубофрезерования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа представляет собой обоснование новых технических решений, обеспечивающих последовательное срезание и удаление части начального объема материала, с целью повышения производительности механической обработки крупномодульных зубчатых колес.

Содержание исследований соответствует научной специальности 2.5.5 - «Технология и оборудование механической и физико – технической обработки». В части: п.3 (исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций, повышение производительности и экономичности обработки) и п.4 (создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки) области исследования ее паспорта.

Степень достоверности и апробация результатов работы обеспечивается применением современных методов исследований, высокой точностью определения граничных условий процесса зубофрезерования и применения метода конечных элементов (МКЭ), современного оборудования и программного обеспечения, подтверждается корреляцией результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на: международной научно – практической конференции «Новые технологии нефтегазовому региону» (г. Тюмень 2016-2018г.), международной научно – практической конференции «Нефть и газ Западной Сибири» (г. Тюмень 2015, 2017г.), международной научно-практической конференции «Технология машиностроения и материаловедение (г. Новокузнецк 2017г.), международной конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Севастополь 2018-2021г.), II международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (г. Кемерово 2018г.), все-

русской научно – технической конференции «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем» (г. Курск 2019г.), Двенадцатой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроение России» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва 2019г.).

Всего опубликовано 15 печатных работ, из них 5 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи в научных журналах, включенных в международную реферативную базу Web of Science/Scopus, 2 патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук состоит из введения, пяти глав и выводов по ним, списка литературы из 117 наименований, 8 приложений. Диссертационная работа содержит 65 иллюстраций, 11 таблиц, общий объем работы составляет 211 страниц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПРИ ЧЕРНОВОМ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Проблемы чернового зубофрезерования крупномодульных зубчатых колес стандартными зуборезными червячными фрезами

Производство зубчатых колес идет уже много лет и очень трудно представить какой-либо механизм без этого важного элемента. Впервые зубчатые колеса были изобретены римлянами, для вращения водяных часов. Это и послужило основой для создания вращательного движения во всех существующих механизмах.

Известный изобретатель Леонардо да Винчи очень подробно изучал технологию изготовления и возможности применения зубчатых передач в своих новаторских машинах. На сегодняшний день спектр применения зубчатых колес очень велик, их используют:

- в часовых механизмах
- в автомобилестроении
- в подвижном составе железных дорог
- в сельскохозяйственной технике
- в судостроении
- в механизмах подъемников и лебедок
- в горной и пищевой промышленности
- в строительной технике
- в нефтегазовой отрасли

Тюменская область является основным нефтегазоносным регионом России и крупнейшим нефтедобывающим регионом.

Основная часть запасов углеводородов сосредоточена в автономных округах: Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком. На сегодняшний день разведано

и изучено порядка 400 месторождений сырья, с глубиной залегания от 700 метров до 4 километров.

Также Тюменская область является одним из главных импортеров нефти и газа в Европейские страны. С постоянным наращиванием объемов добычи потребность в нефтегазовом оборудовании очень велика как на новых создаваемых месторождениях, так и на уже существующих.

На всех месторождениях используются сложные технологические установки - нефтяные качалки (рис. 1.1), которые состоят из множества узлов и механизмов.

Главным механизмом которых, является редуктор Ц2НШ (рис.1.2), в них установлены зубчатые колеса. В связи с этим возникает огромная потребность в крупномодульных зубчатых колесах, ввиду возрастания объемов добычи.



Рисунок 1.1 – Нефтяная качалка

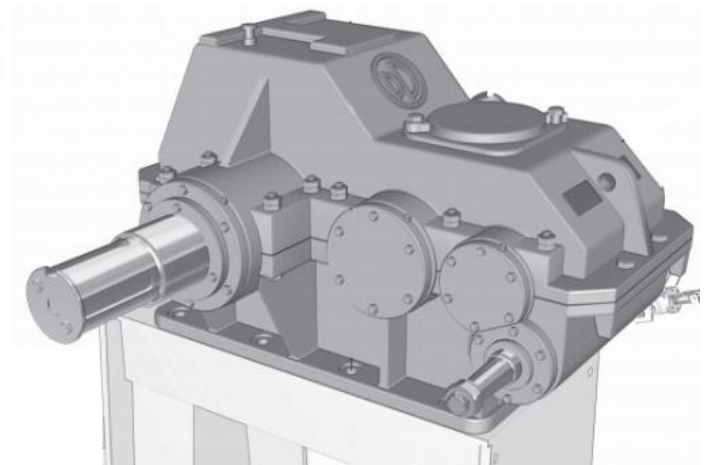


Рисунок 1.2 – Редуктор Ц2НШ

В редукторах Ц2НШ присутствуют зубчатые колеса $m=14$ (рис. 1.3), подвергающиеся зубофрезерной операции. Назначение зубчатого колеса – передача крутящего момента с электродвигателя на исполнительный механизм нефтяной качалки.

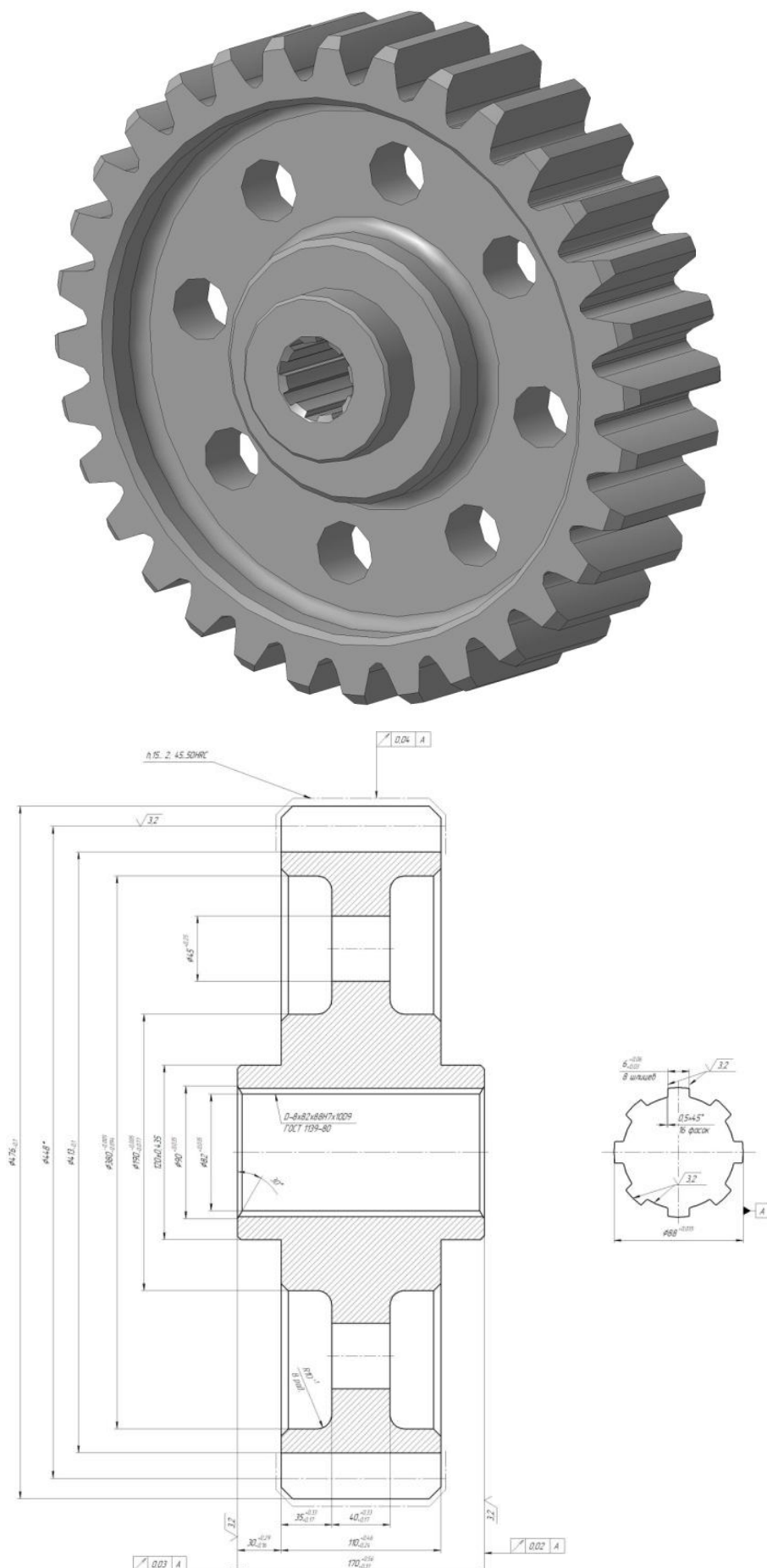


Рисунок 1.3 – Зубчатое колесо Z=32 m=14мм, применяемое в редукторах Ц2НШ

Основные характеристики зубчатого колеса приведены в таблице 1.1 – 1.7.

Таблица 1.1 – Характеристики зубчатого колеса $m=14$

Характеристика	Описание
Количество зубьев шестерни	$z = 32$
Вид шестерни	прямозубая
Смещение исходного контура	$x = 0$
Делительный диаметр	448 мм
Диаметр ступицы колеса	70 мм
Материал детали	Сталь 40Х ГОСТ 4543-71
Вес детали	43 кг
Возможные замены стали	45Х, 38ХА, 40ХН, 40ХС, 40ХФ, 40ХР

Таблица 1.2 - Химический состав в % материала 40Х

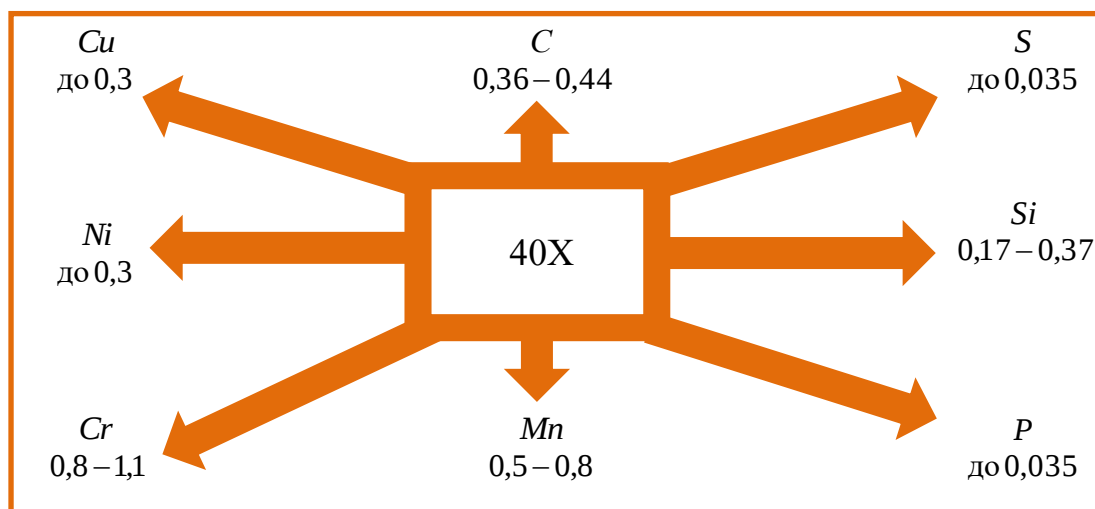


Таблица 1.3 - Механические свойства стали 40Х

Термообработка, состояние поставки	Сечение, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСУ, Дж/м ²	НВ
Пруток ГОСТ 4543-71							
Закалка 860. °С, масло. Отпуск 500. °С, вода или масло	25	780	980	10	45	59	

Таблица 1.4- Технологические свойства Стали 40Х

Температура ковки	Начала 1250, конца 800. Сечения до 350 мм охлаждаются на воздухе.
Свариваемость	Трудносвариваемая. Способы сварки: РДС, ЭШС. Необходимы подогрев и последующая термообработка. КТС - необходима последующая термообработка.

Обрабатываемость резанием	В горячекатаном состоянии при НВ 163-168, $\sigma_B = 610$ МПа K_v тв.спл. = 0.20, K_v б.ст. = 0.95.
Склонность к отпускной способности	склонна
Флокеночувствительность	чувствительна

Таблица 1.5 - Ударная вязкость, КСУ, Дж/см²

Состояние поставки, термообработка	+ 20	– 25	– 40	– 70
Закалка 850 С, масло. Отпуск 650 С.	160	148	107	85

Таблица 1.6 - Предел выносливости

σ_{-1} , МПа	τ_{-1} , МПа	n	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Термообработка, состояние стали
363		1E+6	690		
470		1E+6	940		
333	240	5E+6	690		
372					Закалка 860 С, масло, отпуск 550 С.

Таблица 1.7 - Физические свойства стали 40Х

Температура испытания, °С	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Модуль нормальной упругости, Е, ГПа	214	211	206	203	185	176	164	143	132				
Плотность, г, кг/см ³	7820	7800	7770	7740	7700	7670	7630	7590	7610	7560	7510	7470	7430
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м · °С)	41	40	38	36	34	33	31	30	27	26.7	28	28.8	
Уд. электросопротивление ($R \cdot 10^9$ Ом·м)	210	285	346	425	528	642	780	936	1100	1140	1170	1200	1230
Коэффициент линейного расширения (α , $10^{-6} 1/°C$)	11.8	12.2	13.2	13.7	14.1	14.6	14.8	12.0					
Удельная теплоемкость (С, Дж/(кг · °С))	466	508	529	563	592	622	634	664					

Для металлорежущего инструмента высокая производительность и стойкость являются одними из главных и основных характеристик. Повышение производительности и стойкости режущего инструмента, при зубообработке,

связано, с конструктивными элементами режущего инструмента. Поэтому для повышения указанных выше характеристик необходимо модернизировать или изменять конструкцию металлорежущего инструмента. Так как качественный инструмент позволяет повысить производственную эффективность и существенно понизить экономические затраты при изготовлении зубчатых колёс. На сегодняшний день существуют несколько методов изготовления зубчатых колес (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Методы изготовления и инструмент для обработки зубчатых колес

Одной из существующих проблем на сегодняшний день у машиностроительных предприятий является изготовление крупномодульных ($>12m$) зубчатых колёс. Производство зубчатых колёс является трудоёмким и сложным процессом, предъявляющим высокие требования к металлорежущему инструменту из-за возникающих высоких нагрузок в процессе механической обработки. Одной из главных проблем является долговечность и стойкость инструмента на всем этапе обработки (рис. 1.5), так как при замене инструмента в случае поломки или изнашивании дальнейшее изготовление зубчатого колеса усложняется, так как потребуются повторная привязка режущего инструмента с корректировкой в настройках оборудования.

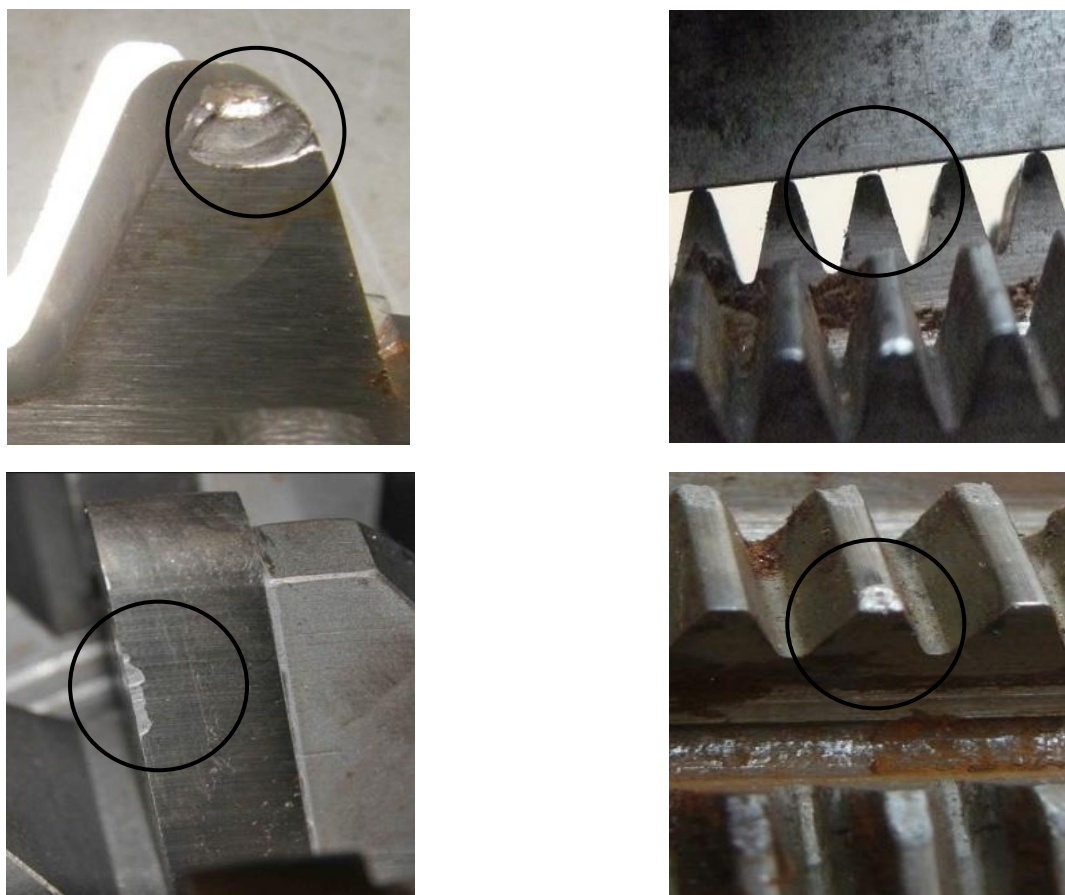


Рисунок 1.5 – Разрушение и износ зубьев червячных фрез $m=14$ в процессе обработки

Также перетачивание режущего инструмента не может обеспечивать необходимую точность в изготовлении зубчатых колес, что приводит к дальнейшему браку готового изделия [2-11]. Стандартные червячные фрезы являются однозаходным или многозаходным червяком, с заданными параметрами исходного контура ИКР, с расположением вдоль оси зуборезного инструмента продольных стружечных канавок, образующих режущие зубья с кромками, необходимыми для процесса механической обработки зубчатых колес [12].

Большинство представленных научных работ направлено на изменение конструкций червячных фрез, с целью повышения производительности зубофрезерования, повышения точности механической обработки, снижения износа металлорежущего инструмента, уменьшение количества использования инструментального материала, в частности использование твёрдых сплавов.

Применение твёрдых сплавов в режущей части металлорежущих инструментов не раз доказано с научной точки зрения различными научными

школами, его применение значительно увеличивает производительность металлорежущего инструмента и его стойкость, в сравнении с инструментом из быстрорежущей стали позволяет повысить производительность механической обработки в 2...4 раза. А также, использование инструментального твёрдого сплава дает возможность увеличить скорость резания до 200...400 м/мин. Стоимость инструментального твёрдого сплава и сложности в применении при массовом производстве, заключающиеся в сложности обработки твёрдых сплавов.

Из всего выше сказанного, для повышения технических и эксплуатационных характеристик металлорежущего инструмента можно достичь, используя оптимальную конструкцию и геометрию металлорежущего инструмента. Огромное влияние на технические и эксплуатационные характеристики режущего инструмента оказывает геометрия его режущей части.

Использование червячных фрез с оптимальным значением передних и задних углов будет способствовать повышению стойкости инструмента при зубообработке. Величины передних углов у червячных затылованных фрез обычно варьируются 0-5 градусов, задние углы 10-12 градусов. Значение небольших передних углов не может обеспечивать высокую стойкость фрез. Поэтому увеличение величины передних углов до 10-15 градусов способно повысить стойкость инструмента, однако, снижается прочность зубьев червячного инструмента. Также для повышения стойкости, возможно, повысить величину задних углов на боковых участках режущих кромок фрез.

Однако существенно увеличить величину задних углов у затылованных фрез не представляется возможным, так как это приведет к образованию сколов и, тем самым, снизит прочность инструмента. Также эффективным средством повышения стойкости фрез является использование всей ее рабочей длины, чтобы износ инструмента был равномерным. Обычно наибольшему износу подвергаются последние два-четыре режущих зуба на одном витке, которые производят обработку впадины зубчатых колес. Другие режущие зубья, располагающиеся ближе к осевому перпендикуляру, подвергаются износу в меньшей степени. Поэтому осуществляют осевые перемещения инструмента на

один или два витка для повышения стойкости фрез до снятия инструмента со станка. В данном случае стойкость инструмента повышается в 1,5 раза. На многих предприятиях осуществляются автоматические передвижения фрез на пять-семь витков, что позволяет увеличить срок службы в 4-6 раз.

Эффективным средством повышения стойкости является механическая обработка зубчатых колес с одновременным применением разных направлений подач режущего инструмента, это возможно реализовать с применением диагонального фрезерования. Данный метод обеспечивает как вертикальную подачу инструмента, так и подачу вдоль его оси, что позволяет производить обработку всей рабочей частью червячной фрезы. Этот метод позволяет достичь равномерного износа по всей длине инструмента и увеличить стойкость фрез в 3 раза по сравнению с осевыми перемещениями и понизить шероховатость поверхности зубьев колеса.

Зубофрезерование с наибольшей величиной подачи и максимальными толщинами срезаемых слоев позволяет существенно повысить производительность червячных фрез при любых способах зубофрезерования. Увеличение толщин срезаемых слоев также возможно с применением многозаходного инструмента. Применение многозаходных фрез при зубофрезеровании в сравнении с однозаходными позволяет достичь максимальной производительности механической обработки, при равной стойкости. Однако целесообразней применять многозаходные фрезы при зубофрезеровании мелко модульных зубчатых колес с количеством зубьев от 16 и больше, с обеспечением минимальных слоев срезаемого слоя. За рубежом в производстве очень часто при обработке зубчатых колес малого модуля используются 2 – 6 заходные червячные фрезы.

Однако, как и любой инструмент, многозаходные фрезы имеют и свои недостатки. Фрезы имеют меньшее число режущих кромок, обеспечивающих профилирование зубчатого колеса, что влечет за собой вероятность возникновения погрешностей профиля и нежелательной шероховатости после обработки. В прямой пропорциональности заходности фрезы происходит

увеличение угла подъема винтовой линии, что тоже приводит к погрешностям на эвольвентном профиле зубчатого колеса. Поэтому применение многозаходных фрез не рекомендуется, а иногда и невозможно при чистовом зубофрезеровании и применяется в большинстве случаев только при черновой обработке.

Не стоит забывать о важном моменте – о виде направления подачи при фрезеровании. Многие исследователи в данной области этой проблемы отмечают, что попутный вид зубофрезерования существенно снижает износ по задней поверхности зубьев фрезы. Обработка зубчатых колес с применением попутной подачи в отличие от встречной позволяет увеличить скорость на 25 – 40 % с сохранением той же стойкости инструмента. Также при попутной подаче повышается точность обработки, наблюдается снижение шероховатости на эвольвентном участке профиля колеса, а оборудование испытывает гораздо меньшие нагрузки, чем при встречной. При попутном фрезеровании происходит перераспределение нагрузки на режущие зубья инструмента. Так как режущие кромки при таком виде обработки срезают достаточно тонкие и длинные слои, что существенно отличается от получаемых слоев при встречной подаче. А уменьшение толщин срезаемых слоев и величины их площадей приводит к уменьшению сил резания и величины износа инструмента.

Исследования, проведенные А.И. Бетанели, показали изменчивость возникающих напряжений на встречном, на попутном, на симметричном виде фрезеровании в зубе червячного инструмента. Встречный вид фрезерования характеризуется нулевой толщиной среза на этапе врезания в заготовку и достигает своего максимума на выходе. В результате постоянного увеличения толщины срезаемого слоя происходит перемещение нейтральной линии вглубь режущей части инструмента и на выходе образуется область напряжений растяжения, что влечет за собой скалывание режущей части в отсутствие ударов.

Обратная картина наблюдается при попутном фрезеровании, когда инструмент начинает обработку при максимальной толщине срезаемого слоя, что сопровождается ударами во время врезания в заготовку и величина напряжений растяжений будет максимальной, что приводит к скалыванию в момент

начального врезания. А предельные толщины среза имеют максимальное значение (рис. 1.6). При повышении скорости резания предельные толщины срезаемых слоев при зубофрезеровании увеличиваются и при определенных значениях становятся больше, чем при токарной обработке (рис.1.7) [13].

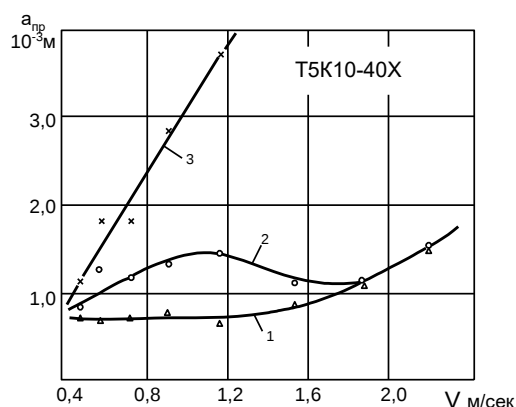


Рисунок 1.6 - Фрезерование стали 40X торцевой фрезой (HRC=33-37) 1-зубой фрезой (сплав WC-TiC-Co ; $\gamma=0^\circ$; $\beta=75^\circ$; $\alpha_n=15^\circ$; $\varphi=60^\circ$; $\varphi_1=15^\circ$): 1 - попутное не симметричное фрезерование; 2 - не полное симметричное фрезерование; 3 - встречное не симметричное фрезерование

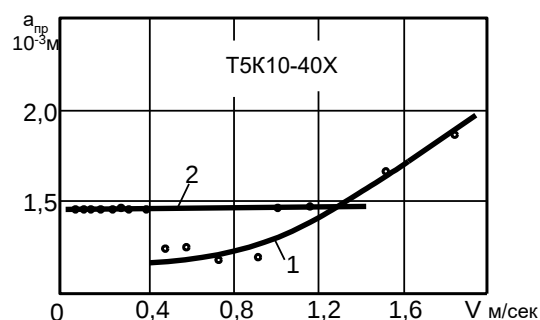


Рисунок 1.7 - Обработка стали 40X (HRC=40; сплав WC-TiC-Co ; $\gamma=0^\circ$; $\beta=60^\circ$; $\alpha_n=30^\circ$; $\varphi=60^\circ$; $\varphi_1=30^\circ$): 1- не полное симметричное фрезерование, при $V=t_0=3,0 \cdot 10^{-3}$ м; 2- обработка точением при $t=3,0 \cdot 10^{-3}$ м

Ткемиладзе Г.Н., Тотчиев Ф.Г., Лоладзе Т.Н. при исследованиях методом фотоупругости напряженно-деформированного состояния в режущем клине инструмента было установлено соответствие главных напряжений растяжений σ_1 при различных схемах процесса резания (рис.1.8).

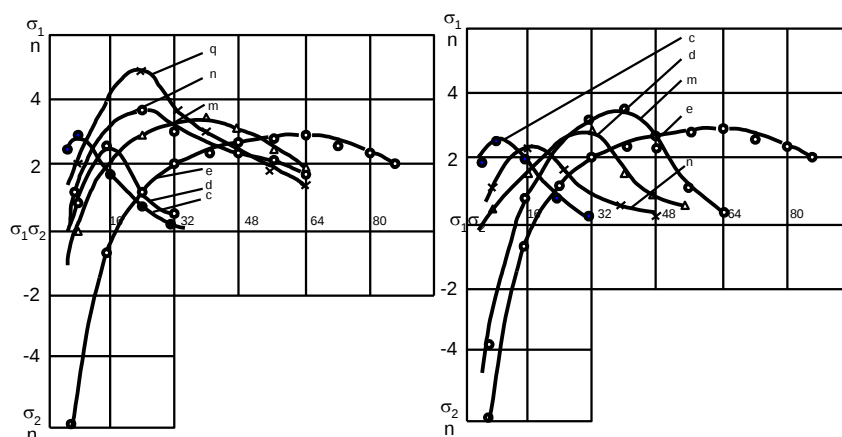


Рисунок 1.8 - Распределение главных напряжений растяжения и сжатия σ_1 , σ_3 на передней поверхности металлорежущего инструмента для разных периодов встречного (а) и попутного (б) методов фрезерования: с, d, m, n, q - периоды встречного и попутного фрезерования; е - стабилизировавшиеся резание при точении и строгании

Исследования показали, что методы обработки строганием и попутным фрезерованием σ_1 в $1,4 \div 1,6$, при встречном фрезеровании в $1,7 \div 1,8$ раза выше, чем при методе обработки точением. Согласно этому рекомендуют уменьшать на $25 \div 35\%$ для строгания, попутного фрезерования предельные толщины среза, и на 40% для встречного фрезерования, как показано на рисунке 3 по сравнению с точением [14].

Все вышеперечисленные выше методы повышения производительности зубообработки зубчатых колес происходят без изменения схемы резания. Схема резания стандартного червячного инструмента несовершенна и отличается низкой производительностью. Основным ее недостатком является неравномерное загрузку режущих элементов по винтовой линии. Зуб, который удален от межосевого перпендикуляра, срезает большие слои по сравнению с другими. При приближении к межосевому перпендикуляру зубья инструмента срезают слои меньшие по размеру.

При увеличении величины подачи в процессе обработки зубчатых колес начинают работать удаленные зубья, срезающие наибольшие срезаемые слои. Общепринятым ограничением по величине подачи считается прочность крайнего, как самого наиболее нагруженного зуба червячного инструмента. Поэтому если сделать перераспределение загрузки зубьев и часть нагрузки с крайних зубьев распределить на другие, то получается равномерная загрузка всех зубьев и режущий инструмент сможет осуществлять обработку на больших подачах. Данные исследования доказали, что червячные фрезы с распределенной нагрузкой на режущие зубья могут работать на подачах до $20-25$ мм/об, тем самым сократить время на обработку зубчатых колес [15]. Однако такие виды червячных фрез имеют и свои существенные недостатки:

- профильный участок зуба фрезы будет зависеть как от числа зубьев обрабатываемого колеса, так и от модуля, а также от величины подачи, на которой будет происходить обработка

- в качестве образующей инструмента будет являться кривая: эллиптическая или парабола, что будет вносить трудности при проектировании и изготовлении фрезы

- при работе на больших подачах на обработанной поверхности будут оставаться следы волнистостей и гребешков, что приведет к искажению эвольвентного профиля инструмента по высоте зуба

- эффективность инструмента будет снижена, из-за невозможности производить осевые перемещения, что повлияет на эксплуатационные качества фрезы

- при зубообработке будет высокая деформация стружки как у стандартных червячных фрез из-за того, что режущие кромки будут срезать слои и образовываться сложная трехэлементная стружка.

Изменение схем резания при зубообработке считается основным направлением, с целью уменьшения износа червячных фрез. Во всех схемах резания преследуется основная цель - разделение срезаемой стружки, срезаемой режущими кромками. Снижение деформации стружки достигается благодаря тому, что стружка изменяет свою форму с П-образной на более простую, что позволит снизить величины напряжений, происходящих в процессе зубофрезерования. Благодаря изменению схемы резания происходит значительное снижение износа металлорежущего инструмента.

Решением из сложившейся ситуации являются фрезы с измененной новой схемой резания. С.Н. Медведицковым предложена новая, более совершенная, схема резания, в последующем получившая название - прогрессивной схемы резания [16]. Существенным отличием от стандартных червячных фрез является то, что у нее в конструкции имеются и завышенные, и одновременно зауженные зубья, которые чередуются через один с зубьями нормального профиля (рис. 1.9). Зубообработку до 10 модуля в большинстве случаев выполняют цельными червячными фрезами по ГОСТ 9324—80. Для обработки крупномодульных зубчатых колес эффективнее применять конструкции сборных червячных фрез, а при обработке колес с модулем 10 – 16 применяются сборные конструкции

червячных фрез со вставными гребенками, позволяющие упростить процесс обработки, а также просты при изготовлении.

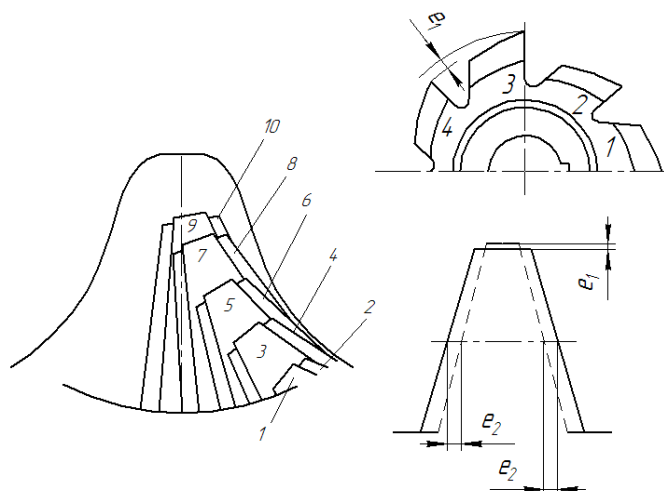


Рисунок 1.9 – Инструмент с профилем исходной производящей рейки спроектированный с прогрессивной схемой резания

Что касается гребенок, то материал режущей части изготавливают из ковальной или литой быстрорежущей стали P18 и P9. Для сверхбольших модулей (18 – 30) инструмент целесообразнее изготавливать в сварном варианте исполнения. Корпус из углеродистой стали подогревают до 450—500° градусов и к нему электродами К-5 приваривают отдельные зубья из быстрорежущей стали и производят финишную заточку и шлифование зубьев червячной фрезы.

Зубообработка с использованием червячных фрез с поворотными рейками существенно повышает эффективность, что доказано мировой практикой. Червячные фрезы имеющие цельный корпус, имеют точность, соответствующую классу А, а после некоторого периода работы снижают его до класса В. В работах О.И. Борискина, Н.Г. Стаханова, А.В. Якушенкова отмечается ряд преимуществ перед сборными червячными фрезами. К ним можно отнести технологичность конструкции, позволяющей обеспечить высокую точность при их изготовлении, увеличение производительности обработки и повышение стойкости инструмента [17].

Однако при использовании СРТП существует возможность внедрения специальных стружкоразделительных элементов на режущих пластинах, которые позволяют повысить стойкость сменных элементов, снижаются нагрузки на элементы

крепления, что позволяет повысить режимы обработки, и все это благодаря рациональному перераспределению припуска на обработку. Также в случае поломки или изнашивании одной из частей рейки или зуба, необходимо производить замену рейки полностью, а с использованием конструкций сборных червячных фрез, достаточно произвести замену одного элемента, что приводит к снижению экономических затрат при производстве. Еще одним достоинством применения сборного инструмента с СРТП является возможность обработки сложных и фасонных поверхностей, с применением сложной геометрии режущих элементов.

В научных трудах И.В. Чулина рассматривается возможность обработки деталей фасонного профиля (остряки стрелочных переводов, направляющие катапультного кресла) из труднообрабатываемых материалов сборными фасонными фрезами. В результате разработанной сборной конструкции инструмента удалось повысить его стойкость и производительность обработки, позволяющей обрабатывать не одну деталь, а несколько. При этом сократились затраты как на сам инструмент, так и снизилась себестоимость на изготовление одной детали [18].

В научных трудах А.В. Исаева рассматривается вопрос о проектировании конструкции сборной фрезы с расположенными на винтовой поверхности сменными многогранными твердосплавными пластинами. В его трудах отмечаются такие преимущества сборного инструмента как: повышение стойкости инструмента, увеличение экономии твердого сплава – за счет применения СРТП, возможность обеспечения необходимой формы передней поверхности. Расположение режущих элементов под углом к оси инструмента улучшает равномерность фрезерования, увеличивается прочность сменной многогранной пластины, а конкретно ее режущей кромки, наблюдается уменьшение нагрузки в процессе фрезерования, появляется возможность создания дополнительных благоприятных условий для стружкодробления. Благодаря применению СРТП появляется возможность создавать непрерывную винтовую линию при помощи отдельных режущих элементов за счет их смещения относительно друг друга [19].

В.А. Гречишников в своих научных работах предлагает метод формирования профиля образующей исходной поверхности для сборных

фасонных фрез со сменными режущими пластинами (СМП), расположенными вдоль винтовой линии. Им решается важная научно-техническая задача по расположению режущих элементов вдоль винтовой линии с учетом их сложного пространственного расположения в корпусе сборного инструмента. Также описывается физическая модель устройства для формирования профиля исходной инструментальной поверхности, с учетом геометрических параметров режущей части и приводится математическое описание по формированию профиля сборного инструмента, с возможностью преобразования и получения математической модели на компьютере в геометрическом виде [20].

В научных трудах М.И. Михайлова реализуется возможность при помощи сборного металлорежущего инструмента производить автоматическую смену режущих кромок на гибких производственных системах. В своих работах он отмечает, что период стойкости в условиях гибкого автоматизированного производства составляет около 10 – 15 минут. И поэтому для работы технологического оборудования необходимо оснащать инструментальные магазины резервным инструментом. Иногда количество резервного инструмента может достигать 700 – 1000 штук, что, конечно же, снижает эффективность всего производства в целом и ведет к дополнительным затратам. Но благодаря применению сборных конструкций инструмента и быстрой автоматической смене СРТП эту проблему удалось решить [21].

С.А. Чевычелов в своих научных трудах решает важную научно-техническую задачу, по повышению эффективности процесса репрофилирования головки рельс тоже при помощи фасонной (гиперболической) сборной конструкции инструмента. Важным моментом в его трудах стоит отметить выявление вида функциональных зависимостей между размерами производящей поверхности фрезы и углом наклона главной режущей кромки СРТП от параметров установки инструмента на станке [22].

В.Г. Шаламов в своих научных трудах решает проблему, возникающую при ротационном фрезеровании. Созданный им сборный режущий инструмент при реализации групповой схемы резания позволяет получить и измельчить

обрабатываемый материал до размеров волокон и порошков. Также уделяется большое значение оптимизации геометрических параметров режущего лезвия зуба фрезы. Автором отмечается, что при возникающих отклонениях от оптимальных величин геометрических параметров инструмента существенно снижается качество обработанной поверхности, производительность и стойкость инструмента в целом [23-24].

В основу работ Ничкова А.Г. положено комплексное исследование проблемы процесса обработки зубчатых колес с оптимизацией конструктивных и технологических параметров обработки, для используемых простых или комбинированных схем зубофрезерования червячным инструментом. Также уделено внимание такой важной особенности в процессе зубофрезерования, как взаимосвязь износа зубьев стандартной червячной фрезы от размеров, срезаемых ими слоев. Автором предложены способы повышения производительности фрезерования зубчатых колес на станках с числовым программным управлением благодаря поддержанию мощности оборудования на всем этапе обработки зубчатого колеса. Это достигается путем управления подачи инструмента на этапе выхода его из заготовки с сохранением наибольшей и постоянной толщины срезаемого слоя, но не превышающей допустимой. Второй способ заключается в изменении скорости вращения инструмента на этапах входа и выхода инструмента из заготовки с обеспечением постоянного и равномерного износа зубьев червячной фрезы, взаимосвязанным с теоретической экономической стойкостью фрезы. На каждом конкретном этапе обработки происходит одновременное пропорциональное изменение подачи инструмента и частоты его вращения [25-28].

Ничковой С.А. были проведены исследования в области обработки зубчатых колес заключающиеся в параметрическом управлении процессом резания при различных схемах резания, циклах обработки, а также периодах нарезания зубчатого колеса червячным зуборезным инструментом. Автором разработана и предложена методика по исследованию процесса обработки зубчатых колес, основанная на общепринятых понятиях о зоне резания и

взаимосвязи между величиной срезаемых слоев и износе зубьев в процессе работы червячной фрезы. В частности, определена динамика изменения величины срезаемых слоев на зубьях червячной фрезы, интенсивность ее износа, необходимая мощность и крутящий момент, установлена максимальная величина срезаемого слоя и периодического осевого перемещения инструмента для различных схем резания, на всех циклах и периодах обработки зубчатых колес, что дает возможность эффективного управления процесса обработки зубчатых колес [29].

1.2 Зубофрезерование колес при различных видах подач

Процесс нарезания зубчатых колес червячными фрезами производится с различными видами подач, таких как, осевой, радиальной и диагональной. При осевой подаче инструмент осуществляет движение параллельно оси заготовки (рис. 1.10а), такой способ чаще всего используют при обработке косозубых и прямозубых зубчатых колес, червяков и шлицевых валов. К недостаткам данного метода можно отнести повышенную длину врезания и выхода инструмента.

Однако длину и, соответственно, время можно уменьшить, применив червячную фрезу меньшего диаметра и радиальное врезание с перебегом и регулируемой подачей. Благодаря этому снижается технологическое время на обработку зубчатого колеса и нагрузка на режущие зубья инструмента. При обработке с радиально-осевой подачей движение инструмента происходит радиально к оси обрабатываемого зубчатого колеса до момента получения полного профиля зуба, а потом она изменяется уже на осевую (рис. 1.10б). Но данный метод зубофрезерования ограничен по причине требуемых специализированных зубофрезерных станков.

При крупносерийном и массовом производстве косозубых и прямозубых зубчатых колес при наличии специализированных зубообрабатывающих станков с применением подачи червячного инструмента под определенным углом

относительно оси обрабатываемой заготовки применяют диагональное фрезерование (рис. 1.10в). К положительным сторонам данного метода можно отнести пониженную шероховатость поверхности зубьев инструмента, благодаря чему повышается стойкость червячной фрезы и снижается износ ее режущих зубьев.

Для диагонального фрезерования рекомендуют использование инструмента с увеличенной длиной, в частности для обработки колес с широким зубчатым венцом или при долгосрочном использовании червячной фрезы. При обработке зубчатых колес на входной стороне червячной фрезы режущие зубья всегда испытывают повышенные нагрузки и увеличенный износ, чем на выходной стороне. Для снижения этих величин и увеличения срока службы инструмента периодически совершают осевые перемещения в автоматическом или ручном (периодическом) режиме. При диагональном способе нарезания зубчатых колес процесс перемещения инструмента можно совершать непрерывно в любой момент обработки.

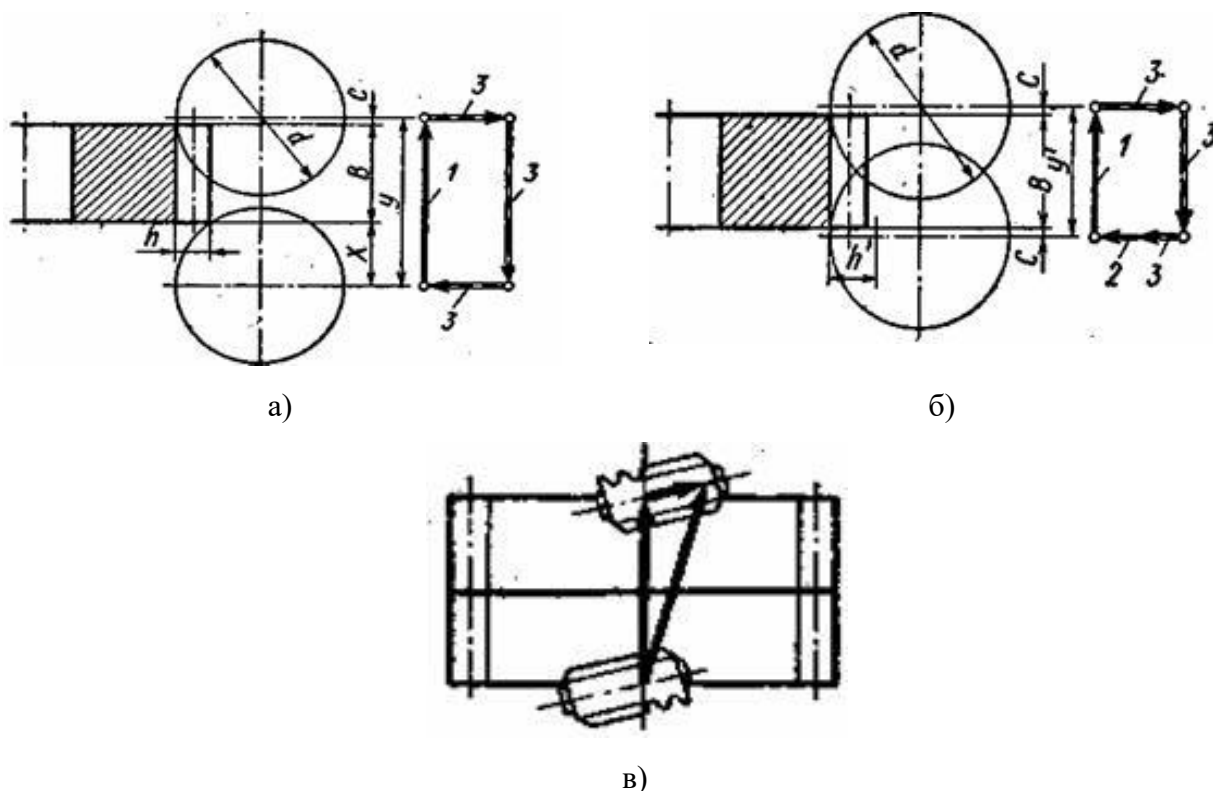


Рисунок 1.10 - Схемы видов подач при зубофрезеровании:
 а) - осевая подача; б) - радиально - осевая подача; в) - диагональная подача;
 1 - осевая подача РИ; 2 - радиальная подача РИ; 3 - холостой ход РИ

При этом потребуется осуществить необходимые настройки в коробке дифференциала станка. Для ручного (или периодического) перемещения инструмента суппорт с установленной на нем фрезой после окончания цикла обработки зубчатых колес перемещают и закрепляют на заданной величине, и осуществляют новый цикл обработки зубчатых колес. При зубофрезеровании в зависимости от направления подачи режущего инструмента относительно направления его вращения применяют попутное и встречное. Зубофрезерование направленное против движения подачи называют встречным, а по подаче – попутным фрезерованием (рис. 1.11).

Попутное зубофрезерование характеризуется максимальной величиной стружки при врезании инструмента в заготовку и стремится к нулю при выходе инструмента, при встречном – картина прямо противоположна. Попутное зубофрезерование обеспечивает благоприятные условия образования и выхода из зоны резания стружки, благодаря чему увеличивается период стойкости инструмента на 20 – 35%.

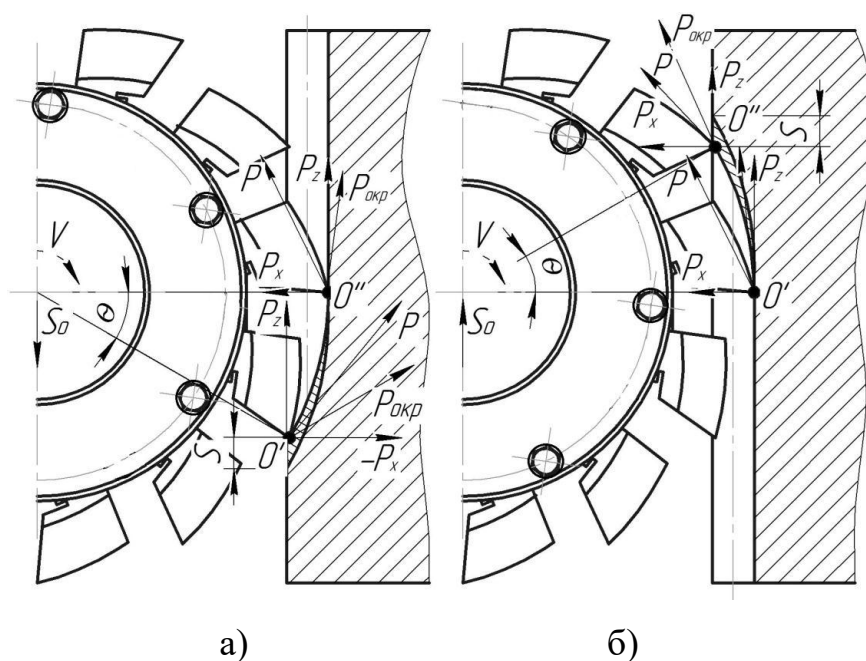


Рисунок 1.11 - Виды зубофрезерования: а) – встречное; б) – попутное

Это дает возможность увеличить режимы резания (скорость и подачу) с сохранением аналогичной величины износа зубьев червячной фрезы, но существенно снизить технологическое время на обработку, обрабатывая тоже

количество зубчатых колес. Однако для попутного вида фрезерования предъявляются требования к станкам, в частности станок должен обладать повышенной жесткостью для осуществления равномерного перемещения червячной фрезы в процессе обработки, а в коробке подач станка и паре винт – гайка должны отсутствовать зазоры. Применение того или иного вида фрезерования обычно подбирается опытным путем в каждом конкретном случае. Так для обработки чугунов лучше применять встречное фрезерование, а для чистовой обработки вязких материалов лучше применять попутное зубофрезерование, с целью снижения величины шероховатости после обработки. Зубчатые колеса с модулем 12 и более обычно обрабатывают с применением встречного направления подачи.

Огромное количество факторов и условий, влияющих на обработку зубчатых колес, вынуждают назначать режимы резания исходя из имеющегося опыта обработки подобных изделий либо после осуществления пробного нарезания колеса. Однако рекомендуемые данные по режимам обработки при зубофрезеровании стандартными червячными фрезами из быстрорежущей стали можно найти в справочной литературе [30].

1.3 Выбор и применение инструментальных твердых сплавов при обработке зубчатых колес

Для режущего инструмента главным критерием является его работоспособность, при максимальной стойкости его режущей части. В режущей части инструмента может применяться различный инструментальный сплав и выбор его зависит от обрабатываемого материала, технологической задачи, станочного оборудования, вида заготовки, предъявляемой точности и качества обрабатываемой поверхности.

Однако номенклатура выпускаемых изделий велика, с применением огромного количества материалов обрабатываемых заготовок. Все они имеют

различия по физико-механическим свойствам, что приводит к большому количеству применяемых инструментальных материалов. На сегодняшний день в производстве в качестве режущей части используют: быстрорежущие стали, твердые сплавы, сверхтвердые материалы (алмазы природные и синтетические, нитриды бора, абразивные материалы), металлокерамику [31].

Применение твердых сплавов при зубофрезеровании позволяет повысить режимы обработки в 2-4 раза. Производство твердых сплавов происходит путем прессовки карбидов титана, вольфрама, тантала, и добавления кобальтовой связки с последующим спеканием в печи при температурах 1500 – 2000 °С. К вольфрамовым сплавам относятся такие сплавы как: ВК3, ВК4, ВК6, ВК10 и являются однокарбидными. К титановольфрамовым относятся сплавы группы - Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т5К10 и являются двухкарбидными.

Твердые сплавы в сравнении с быстрорежущими сталями имеют более низкую теплопроводность (низкий коэффициент линейного расширения), высокую чувствительность к изменению температур, знакопеременным и ударным нагрузкам.

При выборе оптимальной марки твердого сплава для конкретной обработки следует иметь в виду, что при выборе инструмента с повышенным содержанием кобальта наблюдается увеличение предела прочности на изгиб, однако снижаются режущие свойства инструментального сплава. С пониженным содержанием кобальта рекомендуется применять твердые сплавы для чистовой и получистовой обработки.

Для экономии вольфрамовых запасов в стране при производстве инструмента применяют безвольфрамовые твердые сплавы. Они, безусловно, очень сильно уступают вольфрамовым по прочности, теплопроводности, ударной вязкости, но у них выше окалинотойкость, пониженное адгезионное взаимодействие с обрабатываемым металлом.

Поэтому эффективным решением в сложившейся ситуации является применение сменных режущих пластин из инструментального твердого сплава. Благодаря им можно повысить экономическую эффективность

машиностроительных предприятий, которые занимаются обработкой крупномодульных зубчатых колес. При поломке или изнашивании режущую пластину можно легко заменить новой, и продолжить дальнейшую обработку, а не заменять весь инструмент в целом.

Сменные режущие твердосплавные пластины согласно ГОСТ 19042-80 и ГОСТ 24257-80 подразделяются на следующие виды [32-33]:

- а) По назначению – режущие, опорные, стружколомающие;
- б) По форме исполнения – трехгранные, квадратные, ромбические, круглые, пятигранные, шестигранные;
- в) По конструктивному исполнению – с отверстием и без отверстия;
- г) По значению задних углов – 0,11,20 градусов;
- д) По форме передней поверхности – плоские, со стружколомающими канавками.

В соответствии с рекомендациями Международной Организации стандартов ИСО все твердые сплавы разделены на три группы (таблица 1.8). При подборе обрабатываемой пары, а именно, инструментального материала необходимо учитывать характер механической обработки, условия обработки, непрерывности резания, неравномерности припуска, обрабатываемость, наличия ударных нагрузок, твердости и вязкости материала заготовок происходит выбор, исходя из его механических свойств.

И очень часто пару инструментальный и обрабатываемый материал необходимо выбирать экспериментально. При виде обработки, для которого свойственен износ по задней поверхности (обработка чугуна, закаленных и труднообрабатываемых сталей, цветных металлов, стали специального назначения) рекомендуется применять вольфрамкарбидные сплавы.

Если в процессе обработки прогнозируется износ по передней поверхности инструмента (например, при обработке углеродистых или легированных сталей) то рекомендуется использовать титановольфрамовые карбидные сплавы. Инструментальные сплавы с пониженным содержанием титана лучше всего

подходят для обработки стальных паковок или штамповок, а также для отливок по окалине и корке.

Таблица 1.8 – Классификация твердых сплавов

Изменение свойств		Марка по ГОСТ 3882-74	Группа применения		Марки ровочн ый цвет	Материал заготовки	Вид обработки
Износос тойкост ь	Прочнос ть		основна я	подгру ппа			
		T30K4	P	P01 P10 P20 P25 P30 P40	Синий	Сталь, ковкий чугун со сливной стружкой	Чистовая
		T15K6					Черновая п- чистовая
		T14K8					Черновая
		TT20K9					
		T5K10					Черновая п- чистовая
		TT10K8-Б					Черновая
		T5K12					
		TT7K12					
		BK6-M	M	M05 M10 M20 M30 M40	Желты й	Сталь, марганцовиста я сталь, аустенитная сталь, автоматная сталь, легированный чугун, ковкий чугун	Чист, п- чист.
		TT8K6					Черновая
		TT10K8-Б					Черновая п- чистовая
		BK6-OM					Чист, п- чист.
		BK10-M					Черновая, чистовая
		BK10-OM					
		BK8					Черновая
		TT7K12					
		BK3(M)	K	K01 K05 K10 K20 K30	Красн ый	Чугун, ковкий чугун с ломаной стружкой, пластмассы, закаленная сталь, древесина цветные металлы	Чист, п- чист.
		BK6-OM					Черновая
		BK6-M					
		TT8K6					Чист, п-чист
		BK6					
		BK4					Черновая
		BK8					

Для качественной оценки испытываемых марок ИТС необходимо, чтобы величина стойкости и износа была постоянной. Благодаря тому, что скорость резания характеризует режущую способность ИТС, а максимальная подача характеризуется механическими свойствами, то такую оценку можно считать комплексной. При механической обработке встает вопрос о выборе марки

твердого сплава режущей части инструмента, и тут следует учитывать какой из факторов подача или скорость будет преобладающим, так как с повышением их режущей способности наблюдается одновременное снижение их прочности [12].

1.4 Предъявляемые требования к сборным конструкциям металлорежущих инструментов

Все режущие зубья сборных конструкций инструмента должны надежно и прочно фиксироваться в своих установочных пазах и местах. И очень часто это требование не выполняется, ввиду неплотного прилегания сопрягаемых поверхностей корпуса инструмента и режущих зубьев. Это приводит к тому, что при закреплении режущих зубьев приходится прилагать наибольшие усилия, что влечет за собой негативные деформации и коробление корпуса. Выходом из сложившейся ситуации может быть шлифование в собранном виде. На этапе конструирования и проектирования важно обеспечить рациональное расположение всех опорных поверхностей под установочные элементы и распределить равномерно силы при их закреплении. При определении количества элементов закрепления необходимо руководствоваться наименьшим количеством.

Важным требованием можно считать габаритные размеры всех деталей корпуса – они должны быть минимальны, для возможности применения наибольшего количества режущих элементов. Однако не стоит забывать о том, что слишком мелкие детали корпуса способны потеряться в процессе эксплуатации и возникнет необходимость в их повторном изготовлении. Форму режущих элементов сборной конструкции инструмента следует выбирать технологичной при изготовлении, с обеспечением необходимой жесткости и прочности.

Важным, но иногда и проблематичным является требование по возможности компенсации износа в процессе эксплуатации инструмента в радиальном и осевом направлении. Регулировка режущих элементов должна быть

точной, с наименьшим временем простоя инструмента и оборудования, с возможностью свободного доступа к регулировочным винтам и обеспечивать необходимое количество переточек (при возможности).

Для сокращения экономических затрат корпус инструмента должен быть пригоден для многократного применения, быть износостойким и прочным. В современном инструменте очень часто режущие элементы закрепляются в корпусе при помощи болтов или винтов. Важно чтобы к элементам крепления и отверстиям для закрепления относились бережно, так как в случае повреждения корпуса инструмента он становится непригодным для эксплуатации. Корпус инструмента должен обладать достаточной твердостью, это же и касается установочных пазов и поверхностей для исключения возможных прогибов с установленными в них режущими элементами. Это исключит их преждевременный выход из строя, выкрашивание или излом в процессе эксплуатации.

Рекомендуется, чтобы корпус инструмента можно было использовать под обработку различных материалов, с целью сокращения их номенклатуры при крупносерийном и массовом производстве. А установочные пазы для режущих элементов имели возможность установки в них СРТП с различной (модифицированной) геометрией.

1.5 Преимущества и недостатки сборных конструкций металлорежущих инструментов с СРТП

На сегодняшний день ведущими зарубежными инструментальными фирмами, такие как Ingersoll, Sandvik Coromant, CERATIZIT, Kennametala, Mitsubishi и многими другими применяется большая номенклатура различных червячных фрез, таких как: цилиндрические, дисковые, торцевые, концевые, червячные и другие. В современных конструкциях фрез пользуются популярностью использование СРТП, так как это позволяет увеличить стойкость

инструмента, повысить точность механической обработки, с возможностью использования более прочных сменных режущих твердосплавных пластин.

Появление СРТП можно считать новой эрой в обработке металлов резанием, однако, существующие производственные мощности увеличиваются и возникают новые проблемы и потребности, которые необходимо решать. При производстве зубчатых колёс большого модуля наблюдается значительное увеличение нагрузок на инструмент. По результатам исследований проводимых ВНИИ инструмента, при внедрении сборного инструмента с СРТП, было доказаны его неоспоримые преимущества. В результате получена эффективность, такая как: увеличенная стойкость режущей пластины, снижение расхода твердых сплавов при производстве, увеличивается производительность труда на предприятиях, снижаются трудоемкость изготовления инструмента (рис. 1.12).

Возможность размещения большего количества режущих элементов в корпусе инструмента является одним из наиболее важных преимуществ сборных инструментов для обработки зубчатых колес. Отсюда происходит увеличение минутной подачи и сокращение времени на обработку партии деталей, что в совокупности влияет на производительность труда.

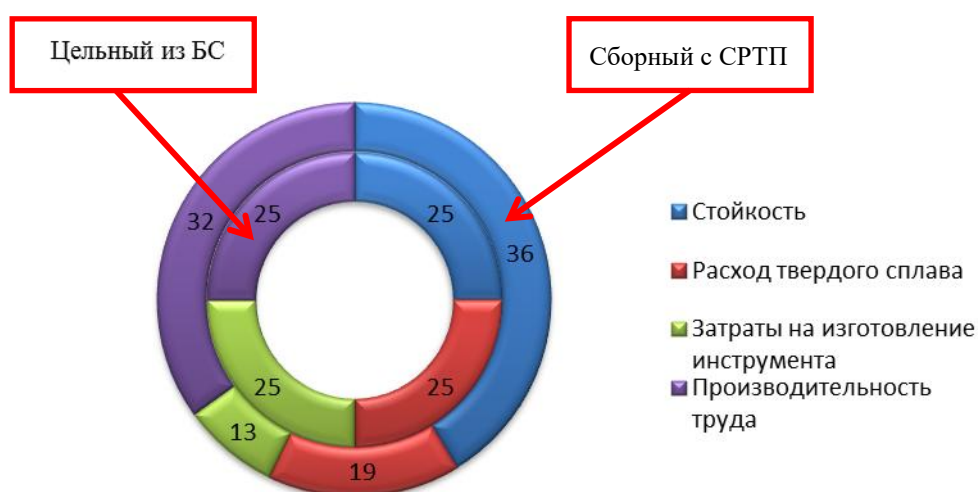


Рисунок 1.12 – Преимущества сборного инструмента с СРТП в сравнении с затылованным из БС

Однако, несмотря на все выше перечисленные положительные качества сборного инструмента ему свойственны и недостатки, в результате которых его повсеместное применение ограничено. Это в первую очередь связано с выбором

типа инструмента при каждом виде обработки и отсутствием нормативной базы и рекомендаций по расчету и проектированию сборных конструкций червячных фрез. Также из-за применения в инструменте элементов крепления, не обеспечивается плотное прилегание сопрягаемых деталей, в том числе наблюдается пониженная виброустойчивость, в отличие от монолитного цельного инструмента.

Характеристика виброустойчивости особенно важна при использовании минералокерамики и инструментальных твердых сплавов, так как эти сплавы работают на высоких скоростях, и боятся разрушения из-за своей хрупкости. Поэтому этот параметр необходимо учитывать как на этапе проектирования сборного инструмента, так и на стадии его последующего изготовления и эксплуатации. На сегодняшний день существует большое многообразие различных форм СРТП и различных конструкций инструмента. И, к сожалению, нет и не разработано системного подхода к применению тех или иных форм (геометрии РИ) для конкретных условий обработки, а также параметров установки режущих элементов в корпусе инструмента.

1.6 Информационный поиск и анализ конструкций сборных червячных фрез для обработки крупномодульных зубчатых колес

Фреза CoroMill 176 со сменными пластинами (рис.1.13) — это экономически более эффективная альтернатива перетачиваемым червячным фрезам из быстрорежущей стали. Необходимость повышения надежности процесса зубофрезерования привела к этому важному технологическому изменению — переходу с фрез из быстрорежущей стали на фрезы со сменными пластинами. Способность фрезы CoroMill 176 работать с более высокой скоростью резания в сочетании с удобной сменой пластин сокращает время цикла обработки и делает ее первой при выборе для высокопроизводительной обработки зубчатых колёс с диапазоном модулей 4–10 мм.



Рисунок 1.13 - Фреза CoroMill 176

CoroMill 176 предлагается в качестве модульного решения. Этот инструмент обеспечивает высокую жесткость системы при зубофрезеровании, обладая такими преимуществами модульной системы, как универсальность и сокращение времени простоя станка.

Преимущества инструмента заключаются в следующем:

- Сокращение общих затрат на изготовление одного зубчатого колеса по сравнению с инструментами из быстрорежущей стали
- Высокие скорости резания
- Класс точности В по DIN 3968
- Повышенная стойкость инструмента, сокращение времени простоя оборудования
- Большое количество эффективных зубьев фрезы уменьшает время обработки зубчатого колеса
- Простая и точная установка режущих пластин с легким доступом к крепёжным винтам

Область применения инструмента:

- Зубчатые колеса для промышленных трансмиссий, тяжелых транспортных средств, ветроэнергетических установок
- Черновая, получистовая и чистовая обработка
- Зубофрезерные станки, многоцелевые станки, пятикоординатные станки
- Профили зубьев и шлицев согласно требованиям заказчика
- Возможна обработка материалов высокой твердости
- Предлагаются режущие пластины с протуберанцем или без [34].

Фреза CoroMill 177 — это червячная фреза с СРТП для обработки зубчатых колес с большими модулями (рис.1.14). Конструкция фрезы оптимизирована для достижения высокой производительности при изготовлении зубчатых колес, используемых в редукторах и трансмиссиях для ветровой энергетики и других областей тяжелой промышленности.

Эта фреза рассчитана на работу с высокой скоростью резания и подачей при сохранении надежности процесса обработки.

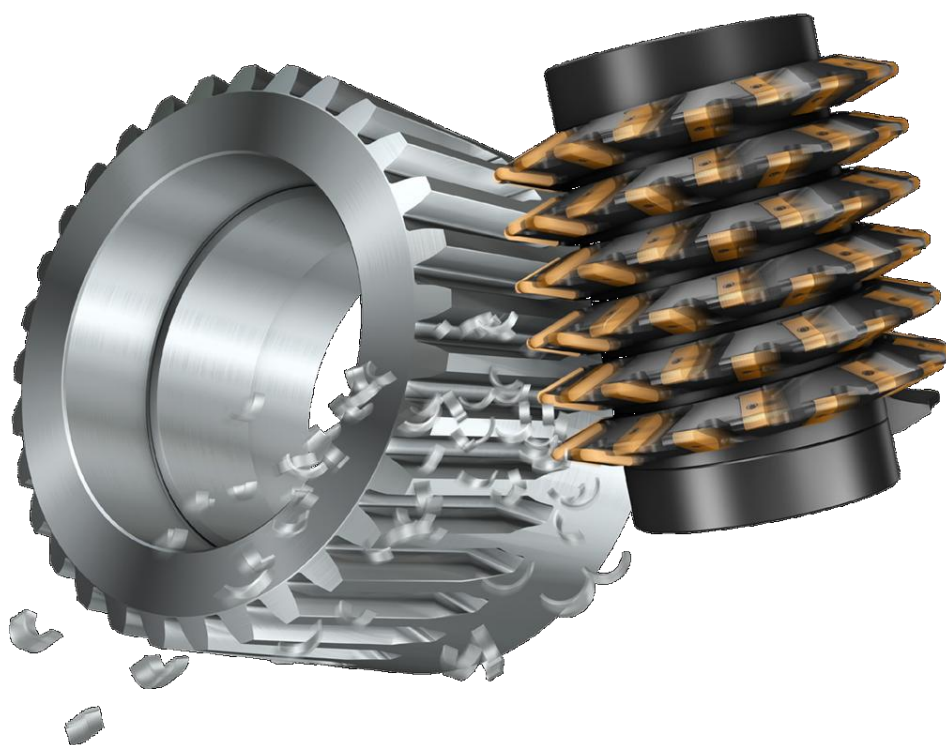


Рисунок 1.14 - Фреза CoroMill 177

Преимущества инструмента заключаются в следующем:

- Надежные и стабильные посадочные гнезда под режущие пластины обеспечивают надежную обработку

- Простая и точная установка режущих пластин с легким доступом к крепёжным винтам
 - Высокая стойкость инструмента и низкий уровень затрат на изготовление детали благодаря использованию передовых марок твердого сплава
 - Высокоточная конструкция корпуса фрезы обеспечивает высокое качество обрабатываемой детали
 - Возможность работы с очень высокими скоростями резания и подачами
- Область применения инструмента:
- Прямозубые и косозубые шестерни
 - Обработка опорно-поворотных сегментов
 - Зубчатые колеса, используемые в редукторах и трансмиссиях для ветровой энергетики и других отраслей тяжелой промышленности
 - Доступны режущие пластины с протуберанцем или без [34].

Червячная фреза Ingersoll (рис.1.15) позволяет эффективно обрабатывать зубчатые колеса с модулем равным 6 и выше. С применением сменных режущих твердосплавных пластин позволяет добиться высокой производительности при высоких скоростях резания.

Червячный инструмент Ingersoll состоит из отдельных сегментов - установленных последовательно и образуют единый корпус. При больших обрабатываемых поверхностях потребуется надежное позиционирование режущих элементов в инструменте. Эти сегменты соединяются винтами через две заглушки. Погрешность при производстве одного витка сегмента сводится к минимуму, следовательно, точность в собранном виде червячной фрезы увеличивается.

Сегменты Ingersoll сконструированы как единый инструмент: из них собирается режущий инструмент нужной длины – предельно простая конструкция. Кроме того, это гарантирует простую сборку и разборку. Новая разработанная геометрия сменных режущих пластин, с отверстием, повернутых под углом для закрепления винтом, при этом замена режущих пластин стала значительно проще.

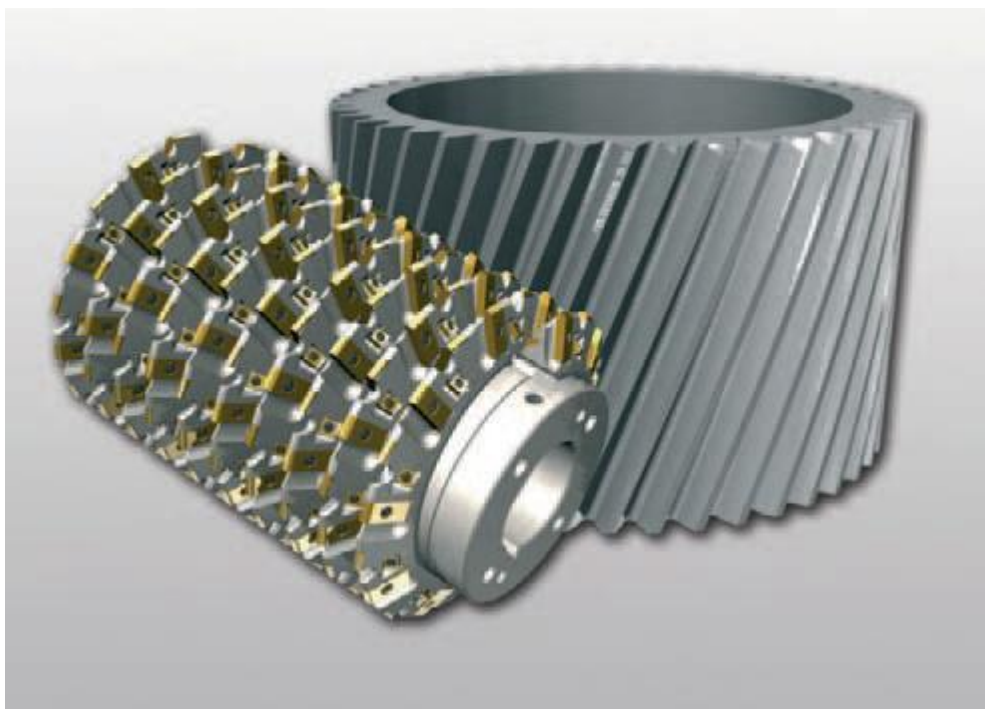


Рисунок 1.15 - Червячная фреза ВР II

Для замены сменных режущих твердосплавных пластин используется стандартный ключ даже когда инструмент в сборе на станке. Также важное преимущество повернутого отверстия – самостоятельное и точное позиционирование режущих элементов при завинчивании винта.

Неверное или неправильное закрепление режущей пластины невозможно. Корпус инструмента позволяет закрутить винт на большую глубину за счет завинчивания под углом, соответственно, происходит надежное закрепление пластины, не изнашивается посадочное гнездо пластины и увеличивается срок службы инструмента [35].

Патент РФ 2693578 - Изобретение относится к машиностроению и может быть использовано в конструкциях сборного металлорежущего инструмента (рис.1.16).

Червячно-модульная фреза содержит корпус, на наружной цилиндрической поверхности которой выполнена винтовая канавка, в которой установлены своими винтовыми выступами кассеты. Кассеты крепятся к корпусу посредством болтов. Режущие пластинки имеют отверстия и закреплены винтами в пазах, выполненных по обеим сторонам кассет.

Обеспечивается точность фрезы не ниже точности цельных фрез из быстрорежущей стали, повышается производительность обработки, скорость резания, снижается шероховатость обработанной поверхности.

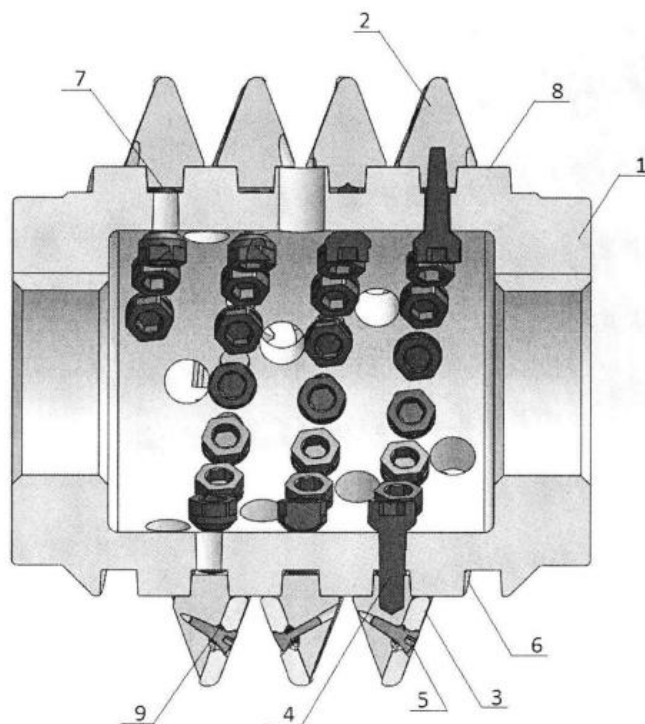


Рисунок 1.16 - Пат. РФ 2693578, Пиженков Е.Н., Подгорбунских В.М.

Главными отличительными признаками предлагаемой конструкции являются:

- Режущие кромки пластин прототипа располагаются на конической поверхности, а в предлагаемой конструкции - на винтовой поверхности.
- Задний угол на радиусной режущей кромке у прототипа обеспечивается поворотом всей пластины на заданный угол, а в предлагаемой конструкции задний угол заложен в форму самой режущей пластины.

Предлагаемая конструкция содержит техническое решение сложной технической задачи, а именно получение сборной червячно-модульная фреза с СТП, по точности не ниже точности аналогичных цельных ЧМФ из быстрорежущей стали. Решение этой задачи позволяет, во-первых, повысить производительность труда при нарезании зубчатых колес в 3-5 раз путем повышения скорости резания, во-вторых, снизить шероховатость рабочих поверхностей нарезаемых зубьев за счет возможности реализации наиболее

благоприятной геометрии режущих пластин для различных обрабатываемых материалов, в-третьих, нарезать зубья на зубчатых колесах из закаленной стали за счет более высокой твердости режущих пластин, в-четвертых, повысить надежность и ремонтпригодность червячно-модульной фрезы за счет возможности легкой замены изношенных пластин и поврежденных кассет, в том числе перестановкой крайних пластин и кассет в середину фрезы, в-пятых, применяя пластины и кассеты различных профилей и конструкций, можно на одном корпусе получать различные по назначению фрезы (для нарезки зубчатых колес различного профиля, цепных звездочек, шлицевых валов с эвольвентным и прямоугольным профилем) [36].

Патент РФ 187253 - Полезная модель (рис.1.17) относится к области обработки зубчатых колес и может быть использована при создании оптимальных в конструктивном и технологическом отношении сборных конструкций червячных фрез со сменными режущими пластинами.

Червячная сборная фреза содержит корпус со сменными пластинами (зубьями), имеет узлы осевой фиксации и зажима сменных пластин.

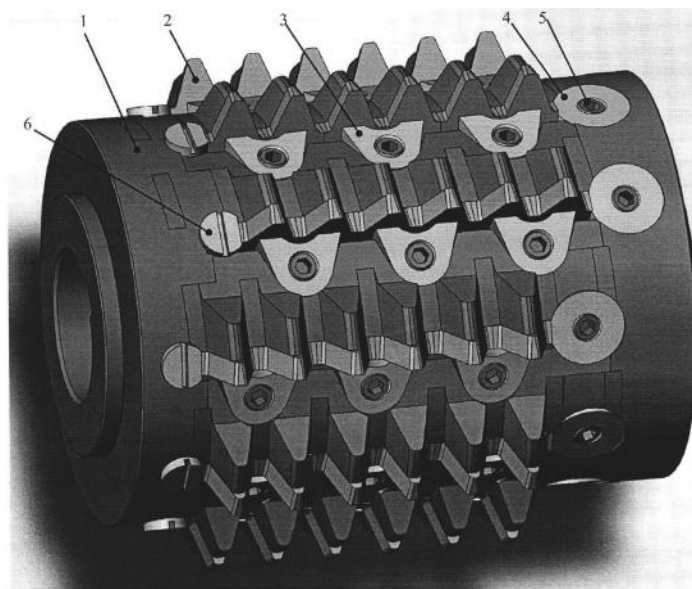


Рисунок 1.17 - Пат. РФ 187253 Ничков А.В., Ничков А.Г.

С целью упрощения конструкции фрезы и повышения точности регулирования положения сменных зубьев на цилиндрической поверхности корпуса с одной стороны установлены упорные элементы - штифты,

расположенные на винтовой линии и осевым шагом зубьев фрезы, а с другой стороны корпуса соосно с рядом сменных зубьев установлены клинья, также расположенные на винтовой линии и осевым шагом зубьев фрезы.

Технической задачей, на решение которой направлено заявляемое изобретение, является упрощение конструкции сборной фрезы и повышения точности регулирования положения сменных зубьев за счет установки на цилиндрической поверхности корпуса с одной стороны упорных элементов - штифтов, расположенных на винтовой линии и осевым шагом зубьев фрезы, а с другой стороны корпуса соосно с рядом сменных пластин установлены клинья, также расположенные по винтовой линии и с осевым шагом зубьев фрезы. [37].

Патент РФ 181245 - Полезная модель (рис.1.18) относится к области механической обработки зубчатых колес и может быть использована для создания оптимальных в конструктивном и технологическом отношении червячных фрез со сменными режущими пластинами.

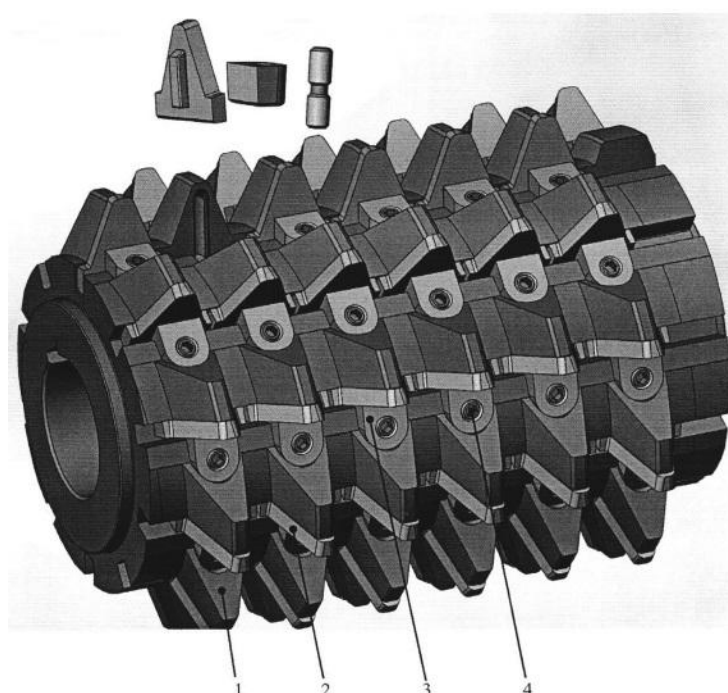


Рисунок 1.18 - Пат. РФ 181245 Ничков А.В., Ничков А.Г.

Фреза червячная сборная со сменными пластинами, содержащая корпус, канавки для установки сменных пластин и отвода стружки, клинья для зажима пластин, отличающаяся тем, что на зубьях корпуса выполняются прямобоочные пазы, а

на сменной пластине – прямобоочный выступ, посредством которого сменная пластина вставляется в паз зуба фрезы и зажимается клином посредством винтов с дифференциальной резьбой.

Предлагаемая конструкция червячной модульной фрезы лишена большинства из перечисленных технологических трудностей. Червяк, выполненный на корпусе инструмента, не участвует в зацеплении с обрабатываемой заготовкой, и к нему не предъявляются высоких требований по точности и шероховатости вообще.

Применение сменных твердосплавных пластин не предполагает переточку инструмента, - следовательно, отпадает необходимость в его затыловании. Точность работы инструмента является не результатом сочетания множества факторов, а зависит лишь от погрешности взаимного расположения пазов, выполненных на передних поверхностях зубьев корпуса фрезы и точности их исполнения, что фактически является гораздо более простой задачей, чем выполнение сложной геометрии в целом, а также от точности изготовления самих твердосплавных пластин, технологический процесс изготовления которых, несмотря на специальный профиль, является стандартным и отработанным, и точность изготовления зависит от производственной культуры завода-производителя. В результате при изготовлении инструмента отсутствует проблема выполнения сложных высокоточных криволинейных и винтовых поверхностей, а требуется лишь точно изготовить базовые пазы, что существенно упрощает производственный процесс.

Так как стружечная канавка направлена параллельно оси инструмента, то в процессе фрезерования и шлифования стружечной канавки не требуется непрерывного поворота заготовки, согласованного с продольным перемещением режущего инструмента либо шлифовального круга, либо серии трудоемких делительных поворотов инструмента при фрезеровании базовых пазов на передних поверхностях зубьев корпуса. При этом также не предъявляются высокие требования по точности делительных поворотов заготовки при помощи делительной головки, так как базовые пазы, определяющие положение пластин, выполняются последовательно по винтовой линии с шагом спирали червяка

фрезы, а значит, при их изготовлении не возникает систематическая накопленная погрешность, определяющая точность шага зубьев инструмента [38].

Основными поставщиками и изготовителями червячных фрез (монолитных и сборных) являются зарубежные фирмы - Klingelnberg, Fette, Saazor, Ingersoll - Германия, Samputensili – Италия, Sandvik Coromant - Швеция. В Российской Федерации на сегодняшний день основными поставщиками инструмента являются - ОАО «Московский инструментальный завод», ОАО «Свердловский инструментальный завод» (г. Екатеринбург), ООО «ПромИнструмент Санкт-Петербург» (г. Санкт-Петербург), ООО «Белгородский завод фрез» (г. Белгород), ЗАО «Волгоградский инструментальный завод» (г. Волгоград), ОАО «Ижевский инструментальный завод» (г. Ижевск), ОАО «Киржачский инструментальный завод» (Владимирская обл.), АО "ИТО-Туламаш" (г. Тула) и др. Однако, каждая из конструкций имеет свой ряд недостатков. В результате проведенного информационного поиска была создана классификация (таблица 1.9) зубообрабатывающего инструмента.

Таблица 1.9 – Информационный поиск

Выбор конструкции сборного зубообрабатывающего инструмента на основании информационного поиска							
Повышение надежности работы инструмента				Расширение технологических возможностей инструмента			
Повышение стойкости	Повышение надежности крепления СРП	Повышение виброустойчивости	Увеличение срока службы	Упрощение технологии изготовления	Повышение производительности	Повышение точности	Снижение себестоимости
№2068323 №195840 №1007868 №206455 №986661 №814610 №942913 №2507041	№1794603 №285470 №1785489 №380408 №1276450 №979044 №1098698 №1098696 №380408	№2080218 №1189608 №2079397 №967699 №1047625 №1699732 №1098698 №2650365 №2147496	№1801069 №1808539 №2102201 №2102202 №1634405 №2068323 №1808538 №338316	№1047625 №1276450 №1440623 №1505695 №971599 №1306659 №1276449 №338316 №1699732 №547302 №2412027	№1282997 №1643143 №1002112 №2147496 №1349912 №2147495 №1090258 №94010447 №2134184 №195840	№814610 №1049208 №1643143 №982861 №95100392 №118452 №1349912 №967699 №1794603 №184112 №95100402 №1093446 №2080218 №942913 №94013109 №1689000 №1809797 №87528 №1189608	№1002112 №940131109 №1276450 №448088

В результате было выявлено два основных направления инструментов для обработки зубчатых колес: повышение надежности работы инструмента и расширение технологических возможностей инструмента.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что на сегодняшний день применение сборных конструкций инструмента с СРТП позволяет достичь наибольшей эффективности при фрезеровании и решить множество возникающих проблем при обработке сложных и фасонных поверхностей.

Машиностроительным предприятиям в Российской Федерации ведущими отечественными и зарубежными инструментальными фирмами не поставляется сборный червячный инструмент с СРТП для обработки крупномодульных зубчатых колес ввиду его отсутствия. Многие годы предприятия вынуждены производить зубофрезерование стандартными червячными фрезами и терять экономическую выгоду.

А заводы изготовители не имеют достаточного опыта и научных основ для создания алгоритмов проектирования сборного инструмента, работоспособных и эффективных конструкций инструмента с оптимальной геометрией, и расположением СРТП в исходной контуре инструментальной рейки.

Поэтому с развитием технического прогресса и в соответствии с государственной программой «Развития промышленности и повышения ее конкурентоспособности» на всей территории Российской Федерации задача по разработке и совершенствованию сборных конструкций червячного инструмента для нарезания крупномодульных зубчатых колес, с применением режущих элементов из инструментальных твердых сплавов (ИТС), для существенного повышения работоспособности и производительности является актуальной на сегодняшний день.

1.7 Выводы

1. На основании анализа работ Бетанели А.И., Лоладзе Т.Н., Медведицкова С.Н., Ничкова А.Г., Ничковой С.А., Ткемиладзе Г.Н., Тотчиева Ф.Г. было

выявлено, что при зубофрезеровании стандартными червячными фрезами происходит их быстрый износ и разрушение, ввиду возникающих высоких нагрузок в процессе механической обработки.

2. На основании анализа работ Гречишникова В.А., Исаева А.В., Канатникова Н.В., Ничкова А.В., Петухова Ю.Е., Семенченко И.И., Стеблецова Ю.Н., Тарапанова А.С., Чулина И.В., Чевычелова С.А., Шаламова В.Г., Янова Е.С., Bouzakis К. сделан вывод о том, что с целью повышения эффективности механической обработки крупномодульных зубчатых колес необходимо применять сборные конструкции инструмента.

3. Информационный анализ по теме повышение эффективности сборных червячных зубообрабатывающих фрез на основе имитационного моделирования и выбора рациональной схемы резания показал, что тема изучена не в полном объеме, ввиду сложности процесса зубофрезерования, а также российскими и иностранными инструментальными производителями, в свободном доступе не поставляются конструкции сборного червячного инструмента с модифицированной схемой резания при обработке зубчатых колес большого модуля, что делает выбранную тематику исследования актуальной.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА СБОРНОЙ ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

2.1 Описание основных характеристик исходного контура инструментальной рейки и процесса нарезания зубчатого колеса для $m=14$

Для разработки новой конструкции сборной червячной фрезы [39-54] для обработки зубчатых колес $m=14$ необходимо разработать ее эскизный проект и расположить сменные режущие твердосплавные пластины на архимедовом инструментальном червяке. Проектирование червячной фрезы необходимо начинать с построения исходного контура инструментальной рейки.

Эвольвентная поверхность обрабатываемой заготовки формируется благодаря соответствующему зуборезному инструменту. В стандарте на исходный контур инструментальной рейки описываются и регламентируются все основные параметры зуборезного инструмента. При изготовлении зубчатого колеса оно должно быть обработано инструментом с точно таким же исходным контуром инструментальной рейки. В соответствии с этим различают два типа исходных контуров – рабочий и производящий, их основные параметры также закреплены в стандарте (рис. 2.1а). В основе режущего инструмента лежит производящий контур, а в основе уже зубчатой рейки лежит рабочий контур. В процессе обработки зубчатого колеса происходит срезание материала из впадины между зубьями заготовки режущими поверхностями инструмента, что иллюстрирует рисунок 2.1а. и показывает, как образовывается рабочий контур при помощи производящего, показаны параметрические характеристики исходного контура, изображен радиус кривизны переходной кривой (ρ_f), а также угол профиля исходного контура (α) и радиальный зазор (c). Реечный инструмент представляет собой частный случай зубчатого колеса, с числом зубьев обращаемых в бесконечность, а начальная окружность колеса обращается в

прямую линию и называется начальной прямой. В процессе работы реечной передачи начальная прямая производит перекачивание без скольжения по начальной окружности (рис. 2.16).

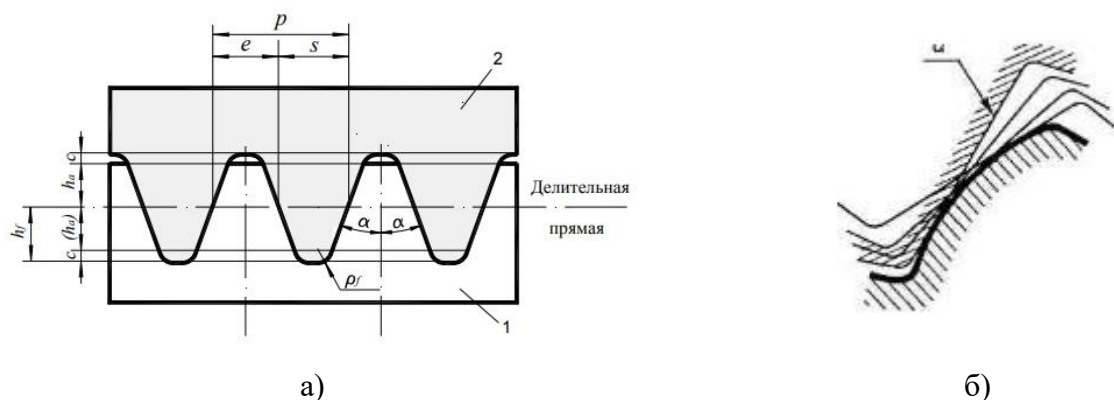


Рисунок 2.1 – Процесс нарезания зубчатого колеса

В основу метода обкатки при нарезании зубчатых колес положено зацепление эвольвентной зубчатой шестерни и рейки, где последняя выполняет функции режущего инструмента. Постоянное изменение положения прямолинейной режущей кромки инструментальной рейки относительно нарезаемого зуба позволяет производить обработку. В результате чего осуществляется движение обкатки между заготовкой (вращается вокруг своей оси) и инструментальной рейкой (с возвратно-поступательным движением), а данный метод получил название - нарезание по методу обкатки. Зубчатую рейку можно получить из зубчатого колеса путем увеличением его радиуса до бесконечности и все кривые, очерчивающие контур венца зубчатого колеса, переходят в свое предельное состояние и преобразуются в прямые линии, кроме переходной кривой. В конечном счете, делительная окружность будет делительной прямой, окружности вершин и впадин также будут прямыми, параллельными с делительной прямой, а переходная кривая вырождается в дугу окружности радиуса ρ_f .

Все основные параметры для исходного контура инструментальной рейки приведены в ГОСТ. Однако там нет конкретных значений каждого параметра, а лишь приведены их коэффициенты для каждого модуля, благодаря чему путем умножения на величину модуля производятся вычисления. В ГОСТ 13755–81 на

исходный контур инструментальной рейки для эвольвентного зацепления основополагающими являются следующие значения:

$\alpha = 20^\circ$ – угол профиля исходного контура.

$h_a = 1,0$ – коэф. делительной высоты головки зуба;

$c = 0,25$ – коэф. радиального зазора;

$p_f = 0,334$ – коэф. радиуса переходной кривой;

С целью снижения объемов трудоемкости расчетов, а также контроля колес при зубофрезеровании вводит параметр – модуль зубьев m_y – линейную величину в π раз меньшую окружного шага:

$$m_y = \frac{p_y}{\pi} \quad (2.1)$$

тогда

$$d_y = m_y z \quad (2.2)$$

Модуль является самым главным геометрическим параметром для всех нарезаемых зубчатых колес. Модуль является величиной отношения окружного шага к числу π . Если шаг на разных окружностях одного и того же зубчатого колеса не одинаковый, то и модуль различен. Модуль является основой при расчетах всех геометрических параметров зубчатого колеса при производстве. Расчетным является модуль по делительной окружности и имеет на ней стандартное значение m . Для всех модулей стандартом предусматривается значение равное рациональному числу, имеет размерность длины и обозначается в миллиметрах. Для зубчатых колес зацепление происходит по делительным окружностям и для прямозубых зависимость между ними определяется формулой:

$$p = \pi m \quad (2.3)$$

Толщина зуба (s) и ширина впадины (e) составляют основу шага зубьев и для колес, производимых без смещения исходного контура ширина впадины равняется толщине зуба:

$$s = e = \frac{\pi m}{2} \quad (2.4)$$

Из всего выше сказанного, в соответствии с ГОСТ 13755–81 производим математический расчет и построение исходного контура инструментальной рейки в программном обеспечении Компас – 3D (рис.2.2).

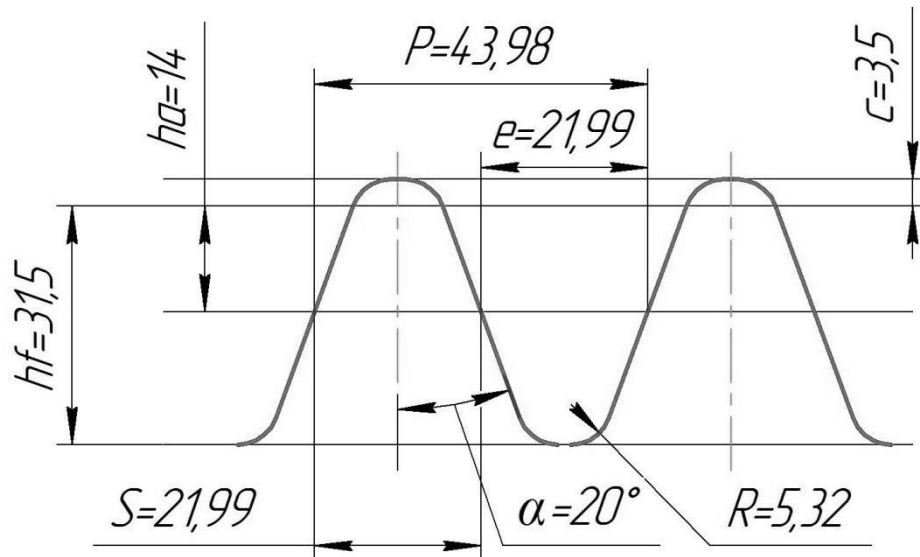


Рисунок 2.2 – Исходный контур инструментальной рейки для $m = 14$

После завершения расчета и построения исходного контура инструментальной рейки можно переходить к расположению сменных режущих твердосплавных пластин на архимедовом инструментальном червяке.

2.2 Выбор формы сменных режущих твердосплавных пластин для расположения их в исходном контуре инструментальной рейки

При реализации новой схемы расположения режущих твердосплавных элементов в корпусе инструмента было принято решение разделить припуск на механическую обработку с целью уменьшения площадей сечения срезаемого слоя. Эффективным решением по повышению прочности и работоспособности режущих пластин [55-67] и изменению вида срезаемых слоев является применение режущих элементов с увеличенным углом ε . Исходя из классификации форм СРТП по направлениям повышения функциональной эффективности [68-69] (рис.2.3)

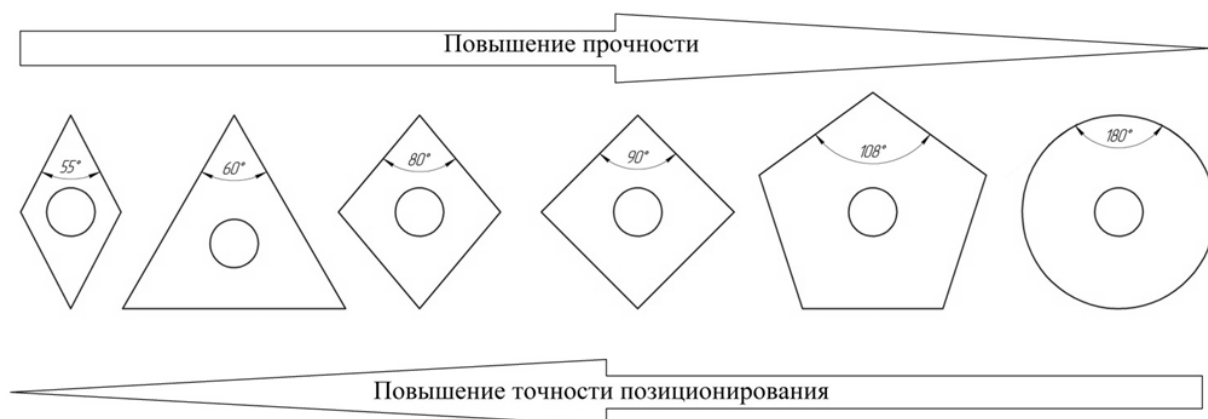
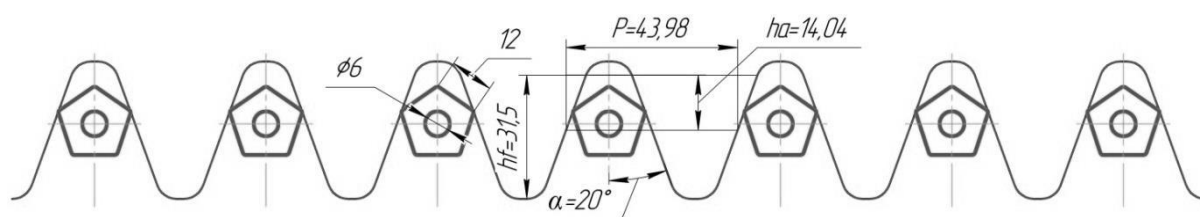
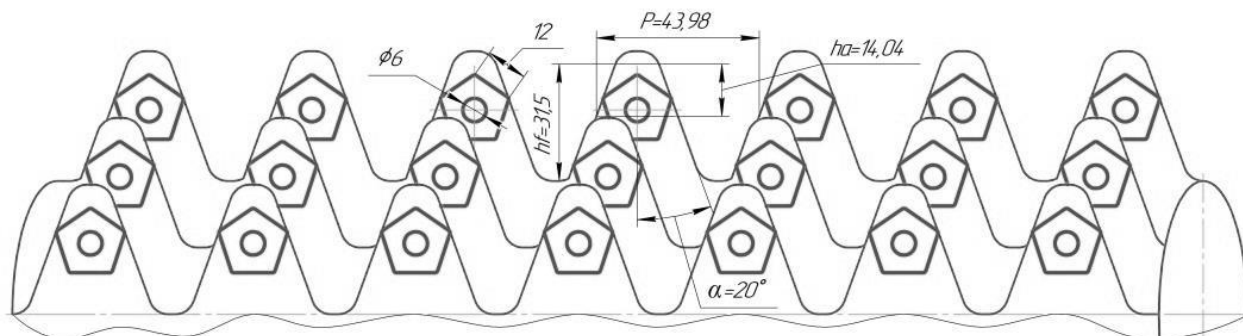


Рисунок 2.3 – Классификация форм СРТП по направлению повышения функциональной эффективности

При помощи программного обеспечения Компас – 3D были разработаны и спроектированы новые схемы расположения сменных режущих пластин. В имеющийся исходный контур инструментальной рейки $m=14$ необходимо расположить сменный режущий элемент. Попробуем расположить сменную 5-ти гранную пластину с углом $\varepsilon=108^\circ$ фронтально (рис. 2.4).



Расположение 5-ти гранных пластин в исходном контуре инструментальной рейки

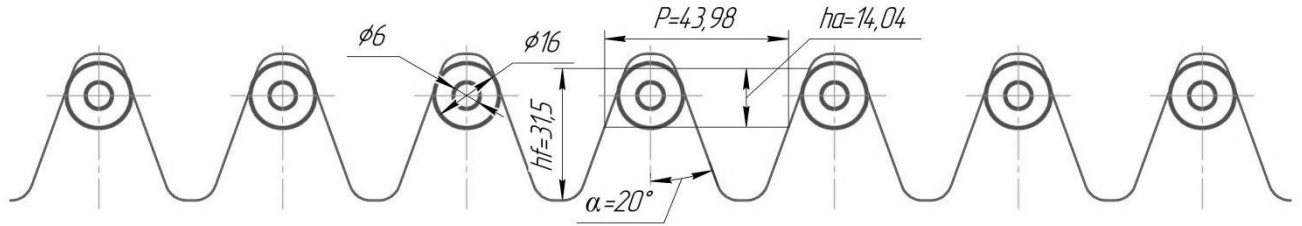


Расположение 5-ти гранных пластин на инструментальном червяке

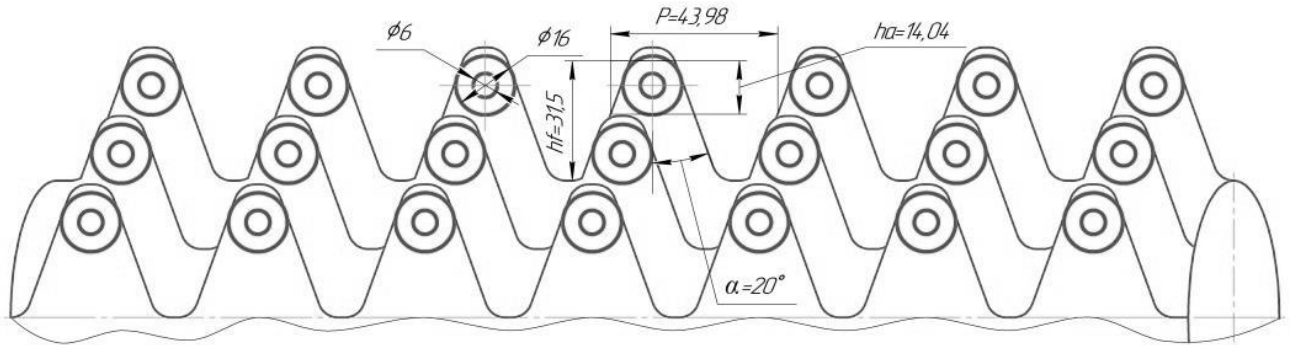
Рисунок 2.4 – Возможности расположение 5-ти гранных пластин в исходном контуре инструментальной рейки и инструментальном червяке

Данная схема расположения режущих элементов на инструментальной рейке имеет свои недостатки. После обработки потребуется последующая обработка с большими величинами срезаемого слоя.

Поэтому было принято решение применить круглую пластину с углом $\varepsilon=180^\circ$ и расположить ее в исходный контур инструментальной рейки фронтально (рис.2.5).



Расположение круглых пластин в исходном контуре инструментальной рейки



Расположение круглых пластин на инструментальном червяке

Рисунок 2.5 – Возможности расположение круглых пластин в исходном контуре инструментальной рейки и инструментальном червяке

Данная схема расположения режущих элементов на инструментальной рейке также имеет свои недостатки. После обработки инструментом с подобным расположением режущих элементов в корпусе инструмента потребуются дальнейшая обработка с большими величинами срезаемого слоя и припуском на обработку. Также круглую пластину с углом $\varepsilon=180^\circ$ достаточно сложно закрепить в корпусе инструмента.

Выходом из сложившейся ситуации является применение фрез с новой, более совершенной, схемой резания. В поисках решений [70-77] по созданию принципиально нового инструмента, с целью поиска оптимального способа крепления режущих пластин, модификации инструмента и снижения нагрузок в процессе обработки заслуживают внимания результаты исследований, приведенные на рисунке 2.6 [78].

На рисунке наглядно представлено то, что влияние толщины пластины на напряженное состояние более значимо, чем ее длина.

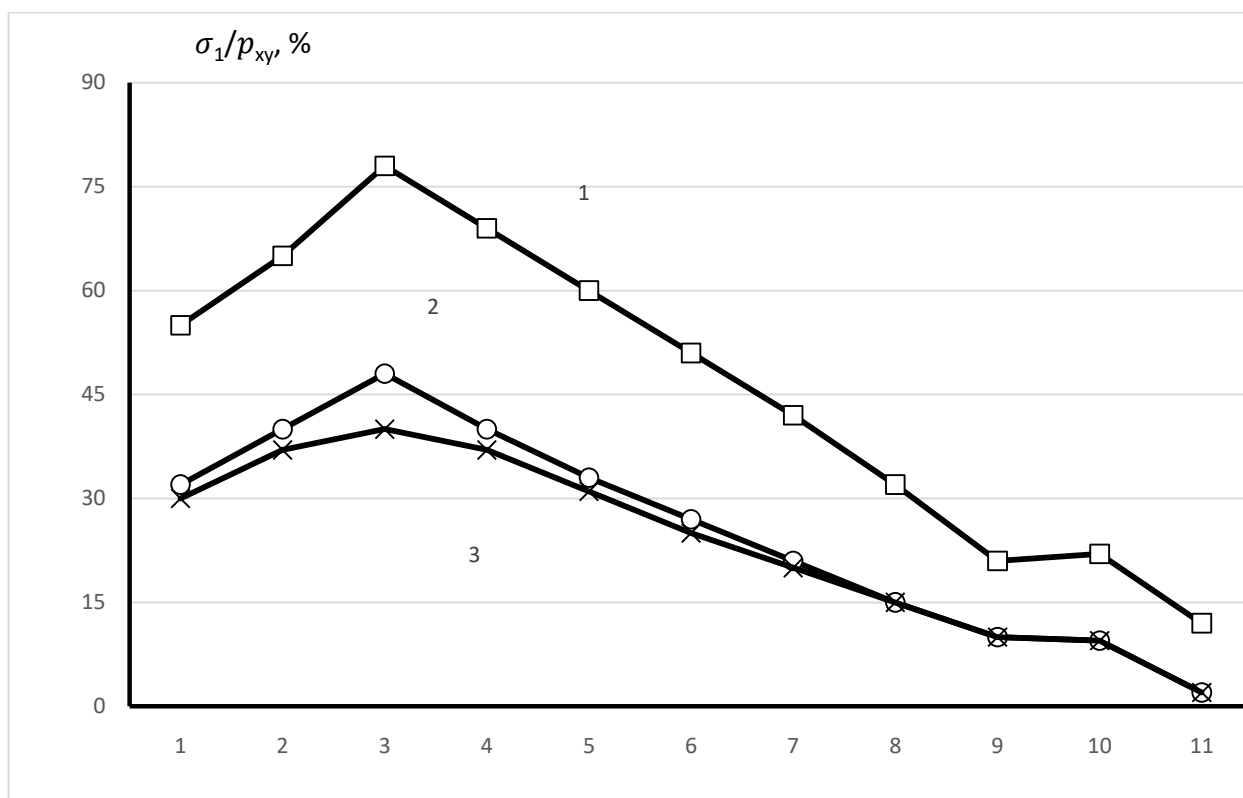


Рисунок 2.6 - Зависимость главных напряжений растяжений от геометрических размеров пластины. 1) $l=11$ мм; $S=3,18$ мм; 2) $l=16,5$ мм; $S=4,76$ мм; 3) $l=22$ мм; $S=4,76$ мм;

Однако не следует забывать об экономической составляющей и стоимости инструментального твердого сплава, из которого изготавливаются сменные режущие пластины. Следовательно, увеличение толщины пластины не всегда оправданно.

Поэтому при создании сборной фрезы для обработки зубчатых колес, по нашему мнению, целесообразно применять тангенциальное расположение режущих пластин в корпусе инструмента.

Данный метод позволяет сэкономить использование инструментального твердого сплава, обеспечить стабильность позиционирования сменных режущих твердосплавных пластин (СРТП) в корпусе инструмента, улучшить сход стружки из зоны резания, обеспечить легкий доступ при поломке к крепежным винтам при замене режущих пластин.

На рисунке 2.7 представлены различные схемы расположения сменных режущих элементов в корпусе инструмента.

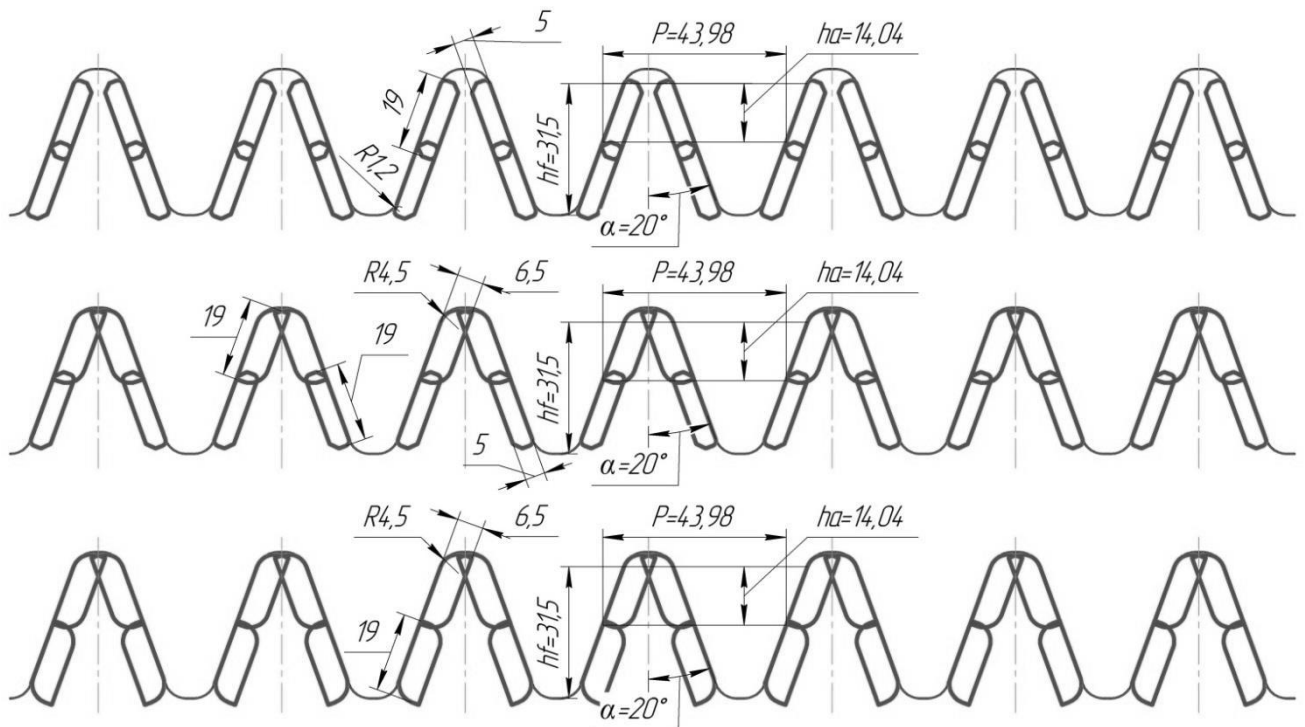
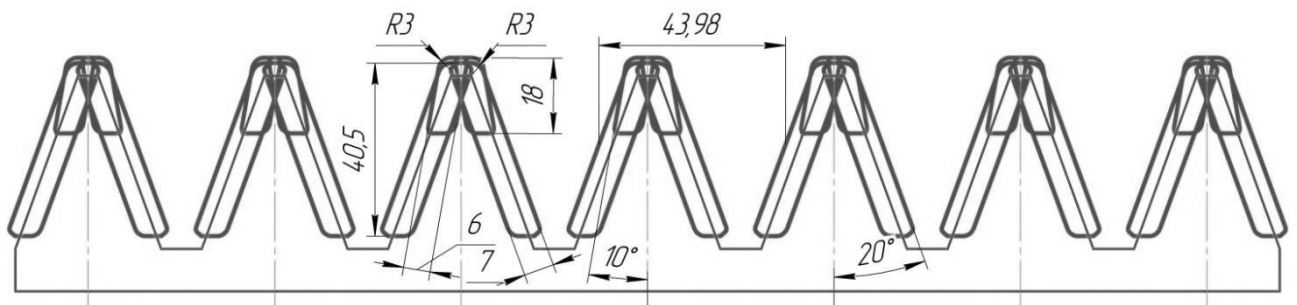


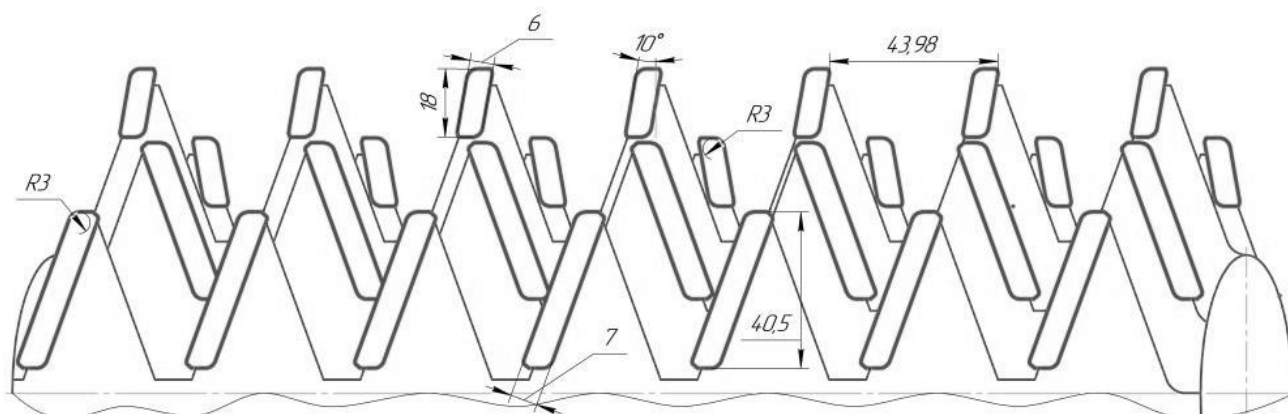
Рисунок 2.7 – Возможность тангенциального расположения сменных режущих твердосплавных пластин в исходном контуре инструментальной рейки

На рисунке 2.8 представлена схема с возможностью тангенциального расположения сменных режущих твердосплавных элементов в корпусе инструмента с различными углами установки режущих элементов на эвольвентном профиле инструментальной рейки.

В ней режущие элементы имеют разную размерность, что позволит экономить инструментальный твердый сплав (условно назовем данную схему – схема №1).



Тангенциальное расположения СРТП в исходном контуре инструментальной рейки с различными углами расположения режущих элементов



Тангенциальное расположения СРТП на инструментальном червяке с различными углами расположения режущих элементов

Рисунок 2.8 – Возможность тангенциального расположения СРТП в исходном контуре инструментальной рейки и на инструментальном червяке с различными углами расположения режущих элементов (схема №1)

Данная схема позволит поделить припуск на обработку при помощи двух видов отдельных режущих элементов: основные – для фрезерования впадины зуба, и боковые – для формирования эвольвентной поверхностей зубчатого колеса. Также при разработке эскизных проектов и выборе схемы расположения сменных режущих твердосплавных пластин в корпусе инструмента прорабатывался вопрос об одновременном применении фронтально расположенных и тангенциально расположенных режущих элементов (рис. 2.9).

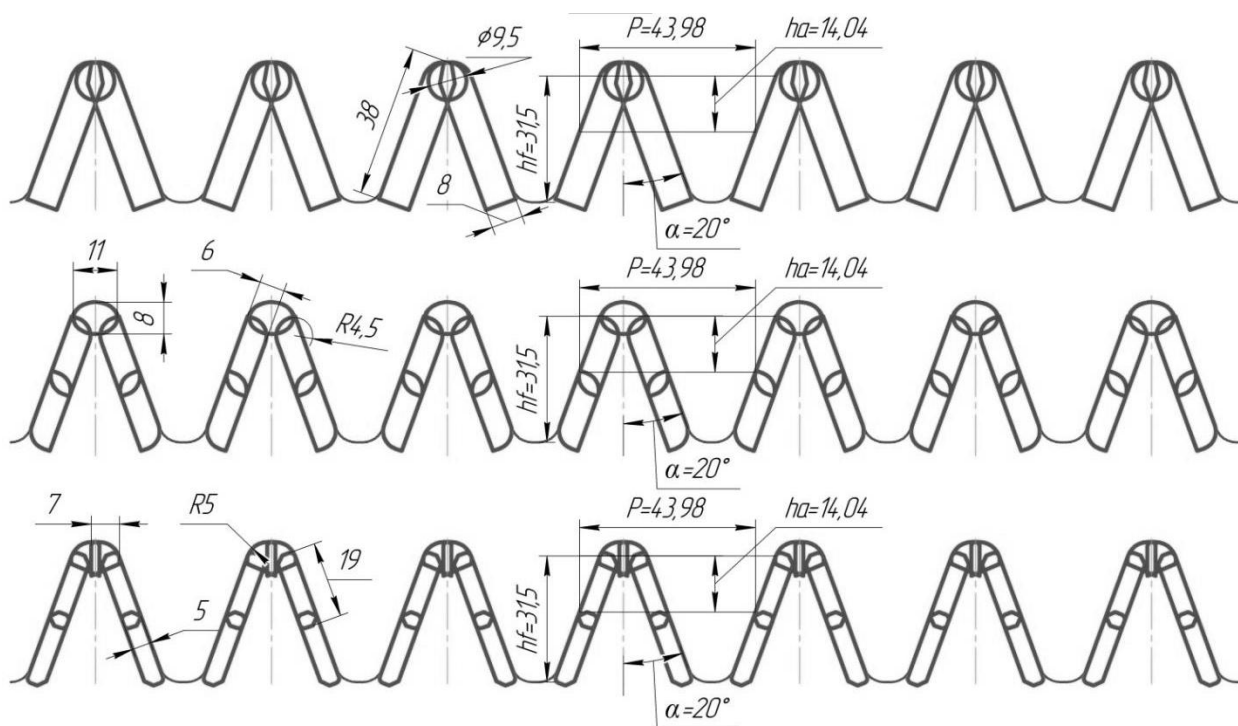
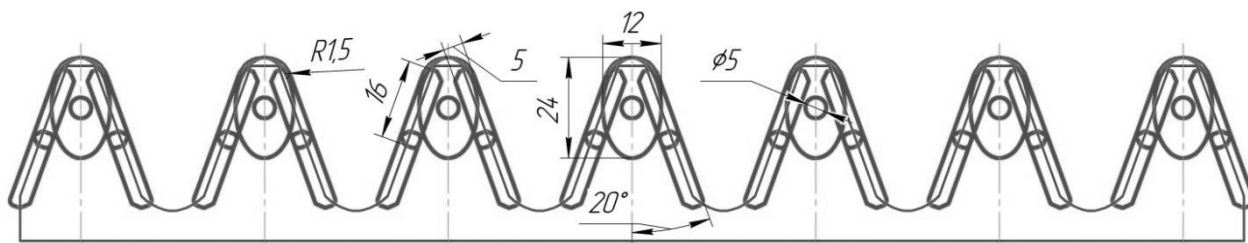
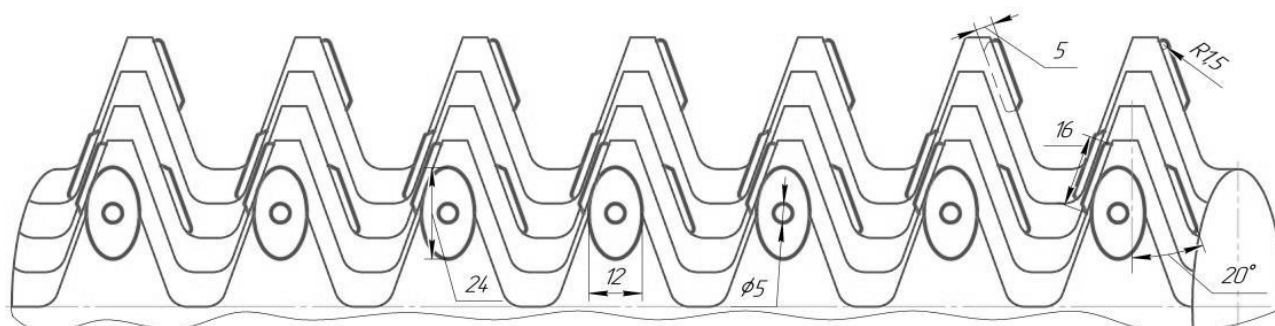


Рисунок 2.9 – Возможность одновременного применение фронтально и тангенциально расположенных СРТП в корпусе инструмента

Представленные выше схемы расположения СРТП безусловно имеют свои достоинства и свои недостатки. Однако главным недостатком данных схем является проблема закрепления фронтально расположенной круглой пластины предназначенной для формирования впадины зубчатого колеса. Поэтому, исходя из классификации форм СРТП по направлениям повышения функциональной эффективности (рис.2.3) была выбрана режущая пластина с округлыми формами, а, именно, эллипсная. В результате была спроектирована схема расположения твердосплавных пластин с: основными – эллипсными пластинами расположенными радиально в корпусе инструмента и служащие для фрезерования впадины зубчатого колеса, и боковые – режущие элементы расположенные тангенциально, для формирования эвольвентных поверхностей зуба колеса. В последующем автором дано название данной схемы расположения СРТП в корпусе инструмента – групповая схема резания. Данная схема (условно назовем данную схему – схема №2) применена по аналогии со схемами резания, применяемыми при протягивании (рис.2.10).



Возможность группового расположения сменных режущих твердосплавных пластин в исходном контуре инструментальной рейки



Возможность группового расположения сменных режущих твердосплавных пластин на инструментальном червяке

Рисунок 2.10 – Расположение режущих элементов в корпусе инструмента с применением групповой схемы резания (схема №2)

В результате при обработке крупномодульных зубчатых колес инструментом с подобным расположением сменных режущих твердосплавных элементов будет, происходит последовательное срезание припуска на обработку с впадины и эвольвентных поверхностей зубчатого колеса [79-83].

Из всего выше сказанного было принято решение взять две схемы (схема №1 и №2 - рис. 2.8 и 2.10) расположения сменных режущих твердосплавных пластин и произвести для них исследования, с целью установления наиболее эффективного расположения СРТП в корпусе зубообрабатывающего инструмента.

2.3 Расчет конструкций сборных червячных фрез с СРТП

2.3.1 Выбор базовой поверхности для размещения сменных режущих твердосплавных пластин

Режущие элементы (зубья) червячных зуборезных (в т.ч. и сборных) фрез базируются на поверхностях витков различных типов червяков и являются основным червяком. К основным видам червяков можно отнести эвольвентный, конволютный и архимедов и используются в червячных зуборезных фрезах. Точная форма геометрии основного червяка гарантирует правильность зацепления между зубчатым колесом и червяком. Ввиду того что правильное зацепление получается только у эвольвентного червяка с зубчатым колесом, то его и применяют в качестве базового для точного профилирования червячных зуборезных фрез. Так как в торцовом сечении данный червяк имеет эвольвентный профиль, а в нормальном и осевом получается сложный криволинейный профиль к виткам червяка. В результате только при расположении режущих кромок на поверхности витков данного червяка будет обеспечиваться правильное и точное профилирование червячных зуборезных фрез. Отсюда возникают большие технологические сложности ввиду сложности профилирования подобных типов

червяков в червячных фрезах. Поэтому инструментальные фирмы в большинстве случаев при производстве изготавливают зубообрабатывающий червячный инструмент, в основу которого положен, архимедов или конволютный червяк.

Архимедов червяк, имеет очень похожий и наиболее приближенный к эвольвентному, но отличающийся трапециевидным прямолинейным профилем в осевом и криволинейным профилем в торцовом сечении по архимедовой спирали. Эта особенность позволяет осуществлять изготовление и контроль зубообрабатывающих червячных фрез с архимедовым червяком без каких-либо трудностей. Также червячные фрезы с архимедовым червяком целесообразно профилировать для чистовых и прецизионных фрез.

Конволютный червяк в нормальном сечении будет иметь прямолинейный трапециевидный профиль по витку или во впадине витков, а в осевом сечении криволинейный профиль. Несмотря на то, что конволютный червяк имеет некоторые технологические преимущества по сравнению с архимедовым, однако для шлифования витков инструмента требуется специальное профилирование для шлифовального круга. Именно поэтому на производстве в машиностроении фрезы с конволютным червяком применяют очень редко, исключение составляет отрасль приборостроения.

Из всего вышесказанного и оценки положительных и отрицательных качеств каждого их червяка в данной работе было принято решение осуществлять профилирование сборных конструкций зубообрабатывающих фрез с применением архимедова червяка.

2.3.2 Описание производящей поверхности рейки

Для математического описания поверхности производящей рейки возьмем за основу производящую рейку с обобщенным исходным профилем (контуром) в нормальном сечении (рисунок 2.11). Если все участки производящей поверхности (ПП) будут в одной системе координат и жестко связаны с рейкой $S_p (X_p, Y_p, Z_p)$,

то можно будет записать математически теоретическую поверхность профиля зуба зуборезной фрезы в виде огибающей i -тых участков поверхности производящей зуборезной рейки. Для получения правой системы координат необходимо: совместить с делительной прямой ось Y_p , перпендикулярную оси X_p , а ось Z_p расположить вдоль зуба рейки [115].

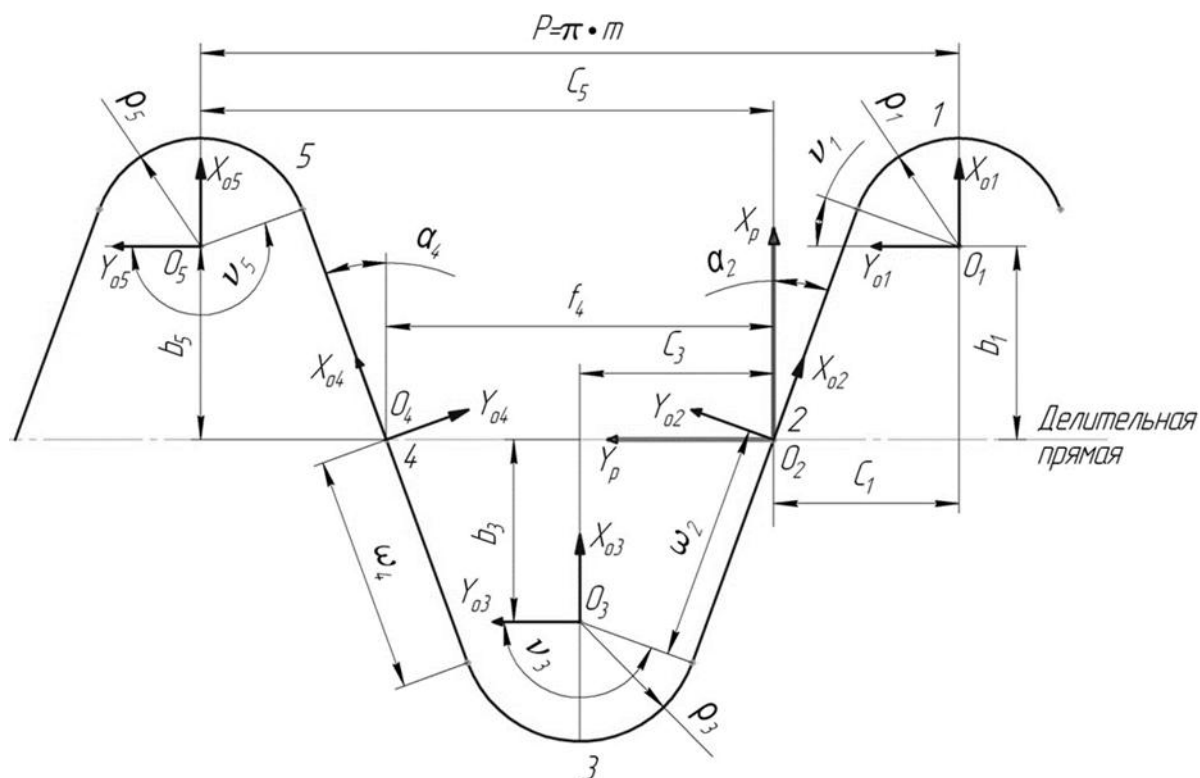


Рисунок 2.11 – Обобщенный исходный контур

На рисунке 2.11 приняты следующие обозначения:

ρ_i – радиус кривизны i -того участка нормального профиля зуба колеса;

ϑ_i – криволинейная координата ПП, которая отсчитывается от положительного направления оси Y_{O_i} в системе координат S_{O_i} до радиуса кривизны по часовой стрелке;

b_i – абсцисса точки пересечения i -того участка с делительной прямой рейки;

c_i – ордината положения центра кривизны i -того участка в системе координат рейки;

α_0 – угол профиля прямолинейного участка;

ω_i – расстояние от начала прямолинейного участка до делительной прямой; O_i – центр кривизны i -го участка;

h_a – высота головки зуба исходного контура (ИК);

h_f – высота ножки зуба ИК;

$P=\pi \cdot m$ – шаг зуба ИК по делительной прямой;

S_d – толщина зуба ИК по делительной прямой;

цифрами в кружочках обозначены номера участков.

Уравнение каждого i -го криволинейного участка зуба производящей рейки в системе координат S_{oi} представляется в виде [115]:

$$\left. \begin{aligned} X_{oi} &= \rho_i \cdot \sin \vartheta_i; \\ Y_{oi} &= \rho_i \cdot \cos \vartheta_i; \\ Z_{oi} &= k_i; \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где, k_i – независимая прямолинейная координата производящей поверхности рейки.

Уравнения каждого i -го участка ПП зубьев рейки в системе координат S_p можно записать, используя матричное преобразование [116]:

$$\tilde{r}_{pi} = \tilde{A}_{p-oi} \cdot \tilde{r}_{oi}; \quad (2.6)$$

где, $\tilde{r}_{pi}$ – вектор, полученный из проекций ПП рейки, записанной в системе координат S_p ;

$\tilde{r}_{oi}$ – вектор, полученный из проекций ПП рейки в системе координат инструмента (СКИ);

$\tilde{A}_{p-oi}$ – матрица для перехода от вспомогательной системы координат S_{oi} к общей системе координат S_p .

Матрица перехода – произведение элементарных матриц перехода. Под элементарной матрицей перехода понимается такая матрица, которая учитывает элементарное действие, состоящее либо из поворота вокруг одной из осей, либо перемещение вдоль одной из осей.

Получим уравнение, описывающее 1 участок ПП зуба рейки в системе координат S_p . После вводим дополнительную систему координат $S_{p'}$ ($X_{p'}, Y_{p'}, Z_{p'}$). Координатные оси направим так, как показано на рисунке 2.12.

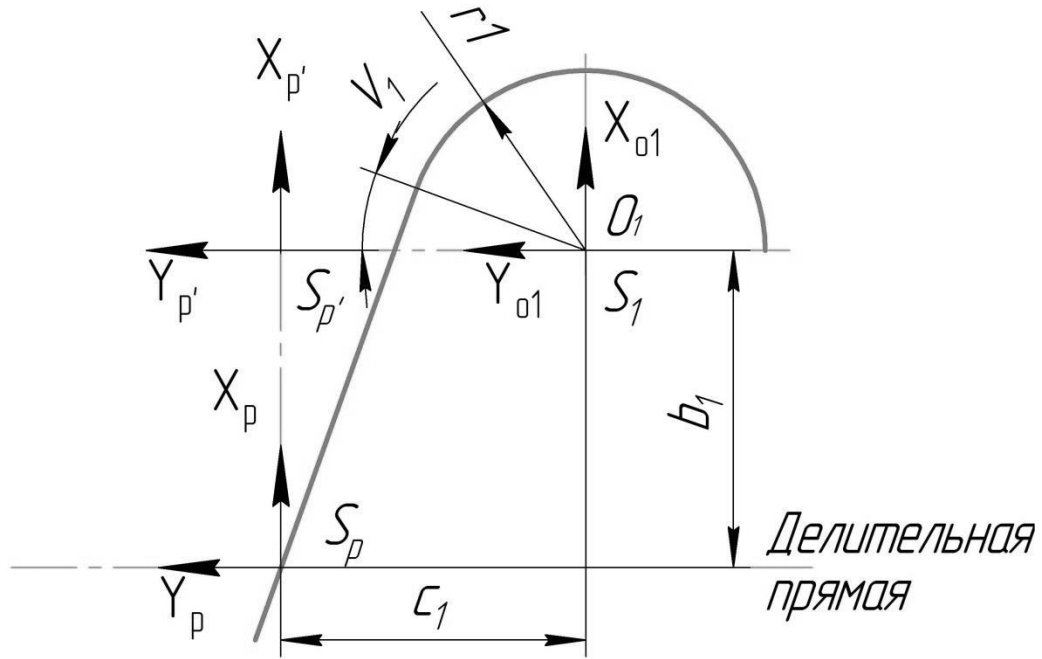


Рисунок 2.12 – Положение вспомогательных систем координат для первого участка

Тогда уравнение, описывающее первый участок ПП зуба рейки в матричном виде, будет выглядеть следующим образом:

$$\tilde{r}_{p1} = \tilde{A}_{p1} \cdot \tilde{r}_{01} \quad (2.7)$$

Матрицу для перехода можно представить в виде произведения элементарных матриц:

$$\tilde{A}_{p1} = \tilde{A}_{pp'} \cdot \tilde{A}_{p'1} \quad (2.8)$$

где $\tilde{A}_{pp'}$ – элементарная матрица для перехода из системы координат $S_{p'}$ в систему координат S_p ;

$\tilde{A}_{p'1}$ – элементарная матрица для перехода из системы координат S_1 в систему координат $S_{p'}$

Матрица для перехода из системы координат S_j в систему координат S_i в общем виде:

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \cos(x_i \wedge x_j) & \cos(x_i \wedge y_j) & \cos(x_i \wedge z_j) & a \\ \cos(y_i \wedge x_j) & \cos(y_i \wedge y_j) & \cos(y_i \wedge z_j) & b \\ \cos(z_i \wedge x_j) & \cos(z_i \wedge y_j) & \cos(z_i \wedge z_j) & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Переход из системы координат S_1 в систему координат $S_{p'}$ осуществляется за счет перемещения на расстояние c_1 вдоль оси $Y_{p'}$ (рисунок 2.12).

Элементарная матрица перехода $\tilde{A}_{p'1}$ имеет вид:

$$\tilde{A}_{p'1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & c_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Переход из системы координат $S_{p'}$ в систему координат S_p осуществляется за счет перемещения на расстояние b_1 вдоль оси X_{O1} (рисунок 2.12). Элементарная матрица перехода $\tilde{A}_{pp'}$ имеет вид:

$$\tilde{A}_{pp'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Воспользовавшись известным правилом перемножения матриц [116], получим матрицу перехода $\tilde{A}_{p1}$:

$$\tilde{A}_{p1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & 1 & 0 & -c_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

С учетом выражения (2.5) матрица-столбец, полученная из проекций ПП рейки для первого участка примет вид:

$$\tilde{r}_{O1} = \begin{pmatrix} \rho_1 \cdot \sin \vartheta_1 \\ \rho_1 \cdot \sin \vartheta_1 \\ k_1 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Перемножив выражения (2.12) и (2.13), получим уравнения производящей поверхности рейки для первого участка:

$$\left. \begin{aligned} X_{p1} &= \rho_1 \cdot \sin \vartheta_1 + b_1; \\ Y_{p1} &= \rho_1 \cdot \cos \vartheta_1 - c_1; \\ Z_{p1} &= k_1; \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Аналогично можно получить уравнения для всех остальных участков исходного контура. Знак перед слагаемым будет зависеть от направления перемещения вдоль координатной оси при осуществлении элементарного перехода.

В общем виде уравнения криволинейных участков производящей поверхности, представленные в системе координат S_p , запишем следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} X_{pi} &= \rho_i \cdot \sin \vartheta_i + b_i; \\ Y_{pi} &= \rho_i \cdot \cos \vartheta_i - c_i; \\ Z_{pi} &= k_i; \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

2.3.3 Построение математической модели формообразования боковой поверхности зубьев колеса рейкой

Теоретическая поверхность зуба формируется производящей рейкой, которая производит движение относительно зубчатого колеса по методу огибания с одним независимым параметром.

Поверхность зуба колеса математически можно представить [116]:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{r}_{ki} &= \widetilde{A}_{kp} \cdot \widetilde{r}_{pi} \quad a) \\ \bar{e}_{pi} \cdot \bar{V}_{pi} &= 0 \quad б) \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

где, $\tilde{r}_{ki}$ – вектор, полученный из проекций координат боковой поверхности зуба колеса;

$\widetilde{A}_{kp}$ – матрица для перехода из системы координат рейки в систему координат колеса;

$\widetilde{r}_{pi}$ – матрица-столбец, составленная из проекций ПП рейки;

$\bar{e}_{pi}$ – орт нормали к ПП рейки;

$\bar{V}_{pi}$ – вектор скорости относительного движения в СКИ.

При составлении матрицы для перехода из системы координат рейки в систему координат колеса рассмотрим геометро-кинематическую схему зацепления колеса с производящей рейкой (рисунок 2.13).

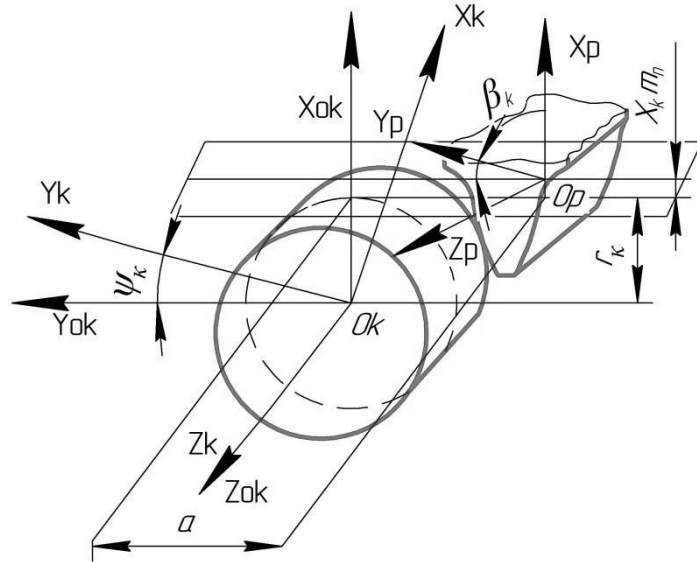


Рисунок 2.13 – Геометро-кинематическая схема зацепления колеса с производящей рейкой

На рисунке 2.13 показано относительное расположение ПП и зубчатого колеса с соответствующими системами координат. Система координат, будет жестко связана с рейкой S_p , система координат, будет жестко связана с колесом S_k , а система координат S_{Ok} связана со стойкой.

На рисунке введены следующие обозначения:

$x_k \cdot m_n$ – коэффициент смещения ИК колеса ($x_k \cdot m_n = X_k$);

ψ_k – угол поворота колеса;

β_k – делительный угол наклона линии зуба колеса;

r_k – делительный радиус колеса.

Получим матрицу для перехода из системы координат рейки в систему координат колеса. Введем дополнительные системы координат $S_1 (X_1, Y_1, Z_1)$ и $S_2 (X_2, Y_2, Z_2)$. Координатные оси направим так, как показано на рисунке 2.14.

При переходе из системы координат рейки в систему координат колеса нужно совершить четыре элементарных перехода. Тогда матрица перехода будет являться произведением четырех элементарных матриц:

$$\tilde{A}_{kp} = \tilde{A}_{kOk} \cdot \tilde{A}_{Ok1} \cdot \tilde{A}_{12} \cdot \tilde{A}_{2p} \quad (2.17)$$

$$\tilde{A}_{ok1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & r_k + X_k \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Переход из системы координат S_{Ok} в систему координат S_k осуществляется за счет поворота на угол ψ_k вокруг оси Z_{Ok} .

Элементарная матрица перехода $\tilde{A}_{kok}$ имеет вид:

$$\tilde{A}_{kok} = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Переход из системы координат S_2 в систему координат S_1 осуществляется за счет смещения на расстояние $-a$ в положительном направлении оси Y_2 .

Элементарная матрица перехода $\tilde{A}_{12}$ имеет вид:

$$\tilde{A}_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Переход из системы координат S_p в систему координат S_2 осуществляется за счет поворота на угол β_k вокруг оси X_p .

Элементарная матрица перехода $\tilde{A}_{2p}$ имеет вид:

$$\tilde{A}_{2p} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_k & \sin\beta_k & 0 \\ 0 & -\sin\beta_k & \cos\beta_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Выполнив произведение элементарных матриц, получим матрицу перехода в следующем виде:

$$\tilde{A}_{kp} = \begin{pmatrix} \cos\psi_k & -\sin\psi_k \cdot \cos\beta_k & -\sin\psi_k \cdot \sin\beta_k & a \cdot \sin\psi_k + \cos\psi_k \cdot (r_k + X_k) \\ \sin\psi_k & \cos\psi_k \cdot \cos\beta_k & \cos\psi_k \cdot \sin\beta_k & a \cdot (-\cos\psi_k) + \sin\psi_k \cdot (r_k + X_k) \\ 0 & -\sin\beta_k & \cos\beta_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Вектор скорости относительного движения найдем, воспользовавшись методикой, изложенной в работе [117]:

$$V_{pi} = \dot{\psi} \cdot \tilde{A}_{kp}^{-1} \cdot \frac{d\tilde{A}_{kp}}{d\psi_k} \cdot \tilde{r}_{pi} \quad (2.23)$$

Введем обозначение матрицы относительной скорости по параметру ψ_k :

$$\tilde{A}_{pk} \cdot \frac{d\tilde{A}_{kp}}{d\psi_k} = \tilde{C}_{\psi_k} \quad (2.24)$$

Матрицу $\tilde{A}_{pk}$, обратную матрице перехода $\tilde{A}_{kp}$ получим, воспользовавшись методикой описанной в работе [116]:

Имеем матрицу вида:

$$\tilde{A}_{i,j} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

Матрица, обратная матрице $\tilde{A}_{i,j}$ определяется из выражения (2.25):

$$\tilde{\tilde{A}}_{j,i} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} & b_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{32} & b_{24} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & b_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

Элементы матрицы b_{ij} определяются по формуле:

$$b_{ij} = -(a_{1i} \cdot a_{1j} + a_{2i} \cdot a_{2j} + a_{3i} \cdot a_{3j}) \quad (2.27)$$

Опустив промежуточные преобразования, имеем матрицу $\tilde{A}_{pk}$, обратную матрице перехода $\tilde{A}_{kp}$:

$$\tilde{A}_{pk} = \begin{pmatrix} \cos \psi_k & \sin \psi_k & 0 & -(r_k + X_k) \\ -\sin \psi_k \cdot \cos \beta_k & \cos \psi_k \cdot \cos \beta_k & -\sin \beta_k & a \cdot \cos \beta_k \\ -\sin \psi_k \cdot \sin \beta_k & \cos \psi_k \cdot \sin \beta_k & \cos \beta_k & a \cdot \sin \beta_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

Продифференцировав матрицу для перехода из системы координат рейки в систему координат колеса по параметру ψ_k , получим:

$$\frac{d\tilde{A}_{kp}}{d\psi_k} = \begin{pmatrix} -\sin \psi_k & -\cos \beta_k \cdot \cos \psi_k & -\sin \beta_k \cdot \cos \psi_k & a \cdot \cos \psi_k - X_k \cdot \sin \psi_k \\ \cos \psi_k & -\cos \beta_k \cdot \sin \psi_k & -\sin \beta_k \cdot \sin \psi_k & a \cdot \sin \psi_k + X_k \cdot \cos \psi_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Перемножив $\tilde{A}_{pk} \cdot \frac{d\tilde{A}_{kp}}{d\psi_k}$, получим матрицу $\tilde{C}_{\psi_k}$ в виде:

$$\tilde{C}_{\psi_k} = \begin{pmatrix} 0 & -\cos \beta_k & -\sin \beta_k & a \\ \cos \beta_k & 0 & 0 & X_k \cdot \cos \beta_k \\ \sin \beta_k & 0 & 0 & X_k \cdot \sin \beta_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

Раскрывая скалярное произведение векторов уравнения зацепления 2.16б, следуя М.Л. Ерихову, представим в следующей форме:

$$\left\{ \begin{matrix} e_{pxi} & e_{pyi} \\ X_{pi} & Y_{pi} \end{matrix} \right\}_{C_{12}} + \left\{ \begin{matrix} e_{pxi} & e_{pzi} \\ X_{pi} & Z_{pi} \end{matrix} \right\}_{C_{13}} + \left\{ \begin{matrix} e_{pyi} & e_{pzi} \\ Y_{pi} & Z_{pi} \end{matrix} \right\}_{C_{23}} + e_{pxi}c_{14} + e_{pyi}c_{24} + e_{pzi}c_{34} = 0 \quad (2.31)$$

где $c_{12}, c_{13}, c_{23}, c_{14}, c_{24}, c_{34}$ - соответствующие элементы матрицы $\tilde{C}_{\psi_k}$;

e_{pi} - проекции орта нормали к соответствующим участкам производящей поверхности рейки в виде проекции – 2,32.

Согласно Ф.Л. Литвину проекции орта нормали к соответствующим участкам производящей поверхности рейки:

$$e_{pxi} = \sin \vartheta_i; e_{pyi} = \cos \vartheta_i; e_{pzi} = 0 \quad (2.32)$$

Подставив в уравнение (2.31) проекции орта нормали (2.32), координаты ПП рейки (2.15), соответствующие элементы матрицы $\tilde{C}_{\psi_k}$, получим уравнение зацепления в виде:

$$c_i \cdot \sin \vartheta_i \cdot \cos \beta_k - (b_i + X_k) \cdot \cos \beta_k \cdot \cos \vartheta_i + k_i \cdot \sin \beta_k \cdot \sin \vartheta_i - a \cdot \sin \vartheta_i = 0 \quad (2.33)$$

Выразим из уравнения зацепления (2.33) параметр k_i :

$$k_i = -c_i \cdot \operatorname{ctg} \beta_k + (b_i + X_k) \cdot \operatorname{ctg} \beta_k \cdot \operatorname{ctg} \vartheta_i + \frac{a}{\sin \beta_k} \quad (2.34)$$

Перемножив матрицу для перехода из системы координат рейки в систему координат колеса ($\widetilde{A}_{kp}$), матрицу-столбец, составленную из проекции ПП рейки ($\widetilde{r}_{pi}$) и подставив выражение (2.34), получим уравнения боковой поверхности зуба колеса в системе координат инструмента (СКИ) [116]:

$$\left. \begin{aligned} X_{ki} &= (\rho_i \cdot \sin \vartheta_i + b_i + r_k + X_k) \cdot \cos \psi_k - (\rho_i \cdot \sin \vartheta_i + b_i + X_k) \cdot \cos \beta_k \cdot \operatorname{ctg} \vartheta_i \cdot \sin \psi_k & \text{а);} \\ Y_{ki} &= (\rho_i \cdot \sin \vartheta_i + b_i + r_k + X_k) \cdot \sin \psi_k + (\rho_i \cdot \sin \vartheta_i + b_i + X_k) \cdot \cos \beta_k \cdot \operatorname{ctg} \vartheta_i \cdot \cos \psi_k & \text{б);} \\ Z_{ki} &= \rho_i \cdot \cos \vartheta_i \cdot \sin \beta_k + (b_i + X_k) \cdot \cos \beta_k \cdot \operatorname{ctg} \beta_k \cdot \operatorname{ctg} \vartheta_i - \frac{c_i}{\sin \beta_k} + a \cdot \operatorname{ctg} \beta_k & \text{в)} \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

В результате была получена математическая модель формообразования зубчатого колеса с помощью производящей рейки методом огибания с одним независимым параметром в системе координат инструмента, представленную выражением (2.35) и (2.16).

2.3.4 Расчет конструкции сборной червячной фрезы с тангенциальным расположением СРТП (схема №1)

1. Расчётный профильный угол исходного контура инструментальной рейки в нормальном сечении:

$$a_u = a_o = 20 \quad (2.36)$$

2. Модуль нормальный: $m_u = 14$ (мм)

3. Шаг по нормали:

$$t_u = \pi m_u \quad (2.37)$$

где

$$\pi = 3,14;$$

$m = 14$ (мм) – модуль нормальный.

$$t_u = \pi \cdot m_u = 3,14 \cdot 14 = 43,98 \text{ (мм)}$$

4. Расчётная толщина зуба по нормали:

$$S_u = t_u - (S_{o1} + \Delta S) \quad (2.38)$$

где

$t_u = 43,98$ (мм) – шаг по нормали;

$S_{o1} = 7,854$ (мм) – толщина зуба по нормали на делительной окружности;

$\Delta S = 1,4$ мм – величина припуска под последующую чистовую обработку.

$$S_u = t_u - (S_{o1} + \Delta S) = 15,708 - (7,854 + 1,4) = 6,454 \text{ (мм)}$$

5. Расчётная высота головки зуба фрезы:

$$h_u' = h'' = h - h' \quad (2.39)$$

где

$h = 31,5$ (мм) – расчетная высота зуба;

$h' = 17,5$ мм – расчетная высота ножки зуба.

$$h_u' = h'' = h - h' = 35 - 17,5 = 14 \text{ (мм)}$$

6. Высота зуба фрезы:

$$h_u = h + 0,3m \quad (2.40)$$

где

$h = 31,5$ (мм) – расчетная высота зуба;

$m = 14$ (мм) – модуль нормальный.

$$h_u = h + 0,3m = 31,5 + 0,3 \cdot 14 = 35,7 \text{ (мм)}$$

2.3.5 Определение конструктивных размеров червячной фрезы с тангенциальным расположением СРТП (схема №1)

1. Наружный диаметр червячной фрезы:

$$D_{eu} = 283 \text{ (мм)} [84-87]$$

2. Передний угол инструмента:

$$\gamma = 12^\circ$$

3. Диаметр посадочного отверстия фрезы:

$$d = (0,2...0,45) \cdot D_{eu} \quad (2.41)$$

где

$D_{eu} = 283$ (мм) – наружный диаметр червячной фрезы.

$$d = (0,2...0,45) \cdot D_{eu} = 0,3 \cdot 283 = 84,9 \text{ (мм)}$$

4. Общая длина инструмента:

$$L = L_p + 2 \cdot l_{ку} \quad (2.42)$$

где

L_p – длина режущей части;

$l_{ку} = 25$ (мм) – длина упорных частей корпуса

$$L_p = L_{\min} + 2 \cdot l_{кл} \quad (2.43)$$

$$L_p = 263,96 + 2 \cdot 25 = 313,96 \text{ (мм)}$$

5. Количество реек червячной фрезы принимаем $z = 6$

6. Средний диаметр червячной фрезы:

$$d_{cp} = D_{eu} - 2h_u' \quad (2.44)$$

где

$D_{eu} = 283$ (мм) – наружный диаметр фрезы;

$h_u' = 14$ (мм) – расчётная высота головки зуба червячной фрезы.

$$d_{cp} = D_{eu} - 2h_u' = 283 - 28 = 255 \text{ (мм)}$$

7. Угол подъёма витков на начальной окружности:

$$\omega = \arcsin\left(\frac{m_u \cdot a}{d_{cp}}\right) \quad (2.45)$$

где

$m_u = 14$ (мм) – модуль нормальный;

$a = 1$ – число заходов червячной фрезы;

$d_{cp} = 255$ (мм) – средний диаметр фрезы.

$$\omega = \arcsin\left(\frac{m_u \cdot a}{d_{cp}}\right) = \arcsin\left(\frac{14 \cdot 1}{255}\right) = 3^\circ 14' 71''$$

8. Направление витков червячной фрезы – правое

9. Угол установки инструмента на станке:

$$\psi = \omega = 3^\circ 14' 71''$$

2.3.6 Расчет сил закрепления СРТП в установочных пазах (схема №1)

1. Радиальная сила, которая действующая на СРТП:

$$F_r = m \cdot a_r \quad (2.46)$$

где

$m_1 = 0,026(\text{кг})$ – масса основной СРТП;

$m_2 = 0,079(\text{кг})$ – масса боковой СРТП;

a_r – радиальное ускорение.

$$a_r = \frac{V^2}{R_1^2} \cdot R^2 \quad (2.47)$$

где

$V = 160(\text{м/мин}) = 2,7(\text{м/с})$ – скорость резания;

$R = 130(\text{мм}) = 0,13(\text{м})$ – расстояние от оси сборной фрезы до центра масс СРТП;

$R_1 = 0,08(\text{м})$ – радиус вершинной кромки сборной червячной фрезы.

$$a_r = \frac{V^2}{R_1^2} \cdot R^2 = \frac{2,7^2}{0,08^2} \cdot 0,13^2 = 19,25(\text{м/с}^2)$$

Радиальная сила для основной СРТП:

$$F_{r_1} = 0,026 \cdot 19,25 = 0,5(\text{Н})$$

Радиальная сила для боковой СРТП:

$$F_{r_2} = 0,079 \cdot 19,25 = 1,5(\text{Н})$$

2. Сила, направленная вдоль СРТП

$$F_1 = \frac{F_r}{\cos(10^\circ)} \quad (2,48)$$

где

$F_{r_1} = 0,5(H); F_{r_2} = 1,5(H)$ – радиальная сила, действующая на СРТП.

$$F_1 = \frac{F_{r_1}}{\cos(10^\circ)} = \frac{0,5}{\cos(10^\circ)} = 0,51(H)$$

$$F_2 = \frac{F_{r_2}}{\cos(10^\circ)} = \frac{1,5}{\cos(10^\circ)} = 1,53(H)$$

3. Условие зажима

$$F_1 / F_2 \leq F_{mp} \quad (2,49)$$

где

$F_{r_1} = 0,5(H); F_{r_2} = 1,5(H)$ – сила, направленная вдоль СРТП

4. Определение силы нормального давления

$$F_{mp} = \mu \cdot N \quad (2,50)$$

где

$\mu = 0,05$ – коэффициент трения скольжения;

N – сила нормального давления

$$N = \frac{F_1}{\mu} \quad (2,51)$$

где

$F_{r_1} = 0,5(H); F_{r_2} = 1,5(H)$ – силы, направленные вдоль СРТП;

$\mu = 0,05$ – коэффициент трения скольжения.

Для основной СРТП:

$$N_1 = \frac{F_1}{\mu} = \frac{0,51}{0,05} = 10,2(H)$$

$$F_{mp} = \mu \cdot N_1 = 0,05 \cdot 10,2 = 0,51(H)$$

$$F_1 / \leq F_{mp}$$

$0,51 \leq 0,51$ – условие выполняется

Для боковой СРТП:

$$N_2 = \frac{F_2}{\mu} = \frac{1,53}{0,05} = 30,6(H)$$

$$F_{mp} = \mu \cdot N_2 = 0,05 \cdot 30,6 = 1,53(H)$$

$$F_2 / \leq F_{mp}$$

$1,53 \leq 1,53$ – условие выполняется

5. Усилие зажима

$$F_3 = N \cdot \sin(10^\circ) \quad (2,52)$$

где

$N_1 = 10,2(H)$ – сила нормального давления на маленькую СРТП.

$N_2 = 30,6(H)$ – сила нормального давления на большую СРТП.

$$F_{3_1} = N_1 \cdot \sin(10^\circ) = 10,2 \cdot \sin(10^\circ) = 1,78(H)$$

$$F_{3_2} = N_2 \cdot \sin(10^\circ) = 30,6 \cdot \sin(10^\circ) = 5,31(H)$$

6. Момент, который необходимо приложить к винту

$$M = F_3 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\beta + \rho) \quad (2,53)$$

где

$F_{3_1} = 1,78(H)$ – усилие зажима для основной СРТП;

$F_{3_2} = 5,31(H)$ – усилие зажима для боковой СРТП;

$d_2 = 6(мм) = 0,006(м)$ – средний диаметр резьбы винта;

β – угол подъёма винтовой линии резьбы винта;

ρ – приведённый угол трения.

$$\beta = \operatorname{arctg} \cdot \frac{P}{\pi \cdot d_2} \quad (2,54)$$

где

$P = 1(\text{мм/об})$ – шаг резьбы;

$\pi = 3,14$;

$d_2 = 6(\text{мм}) = 0,006(\text{м})$ – средний диаметр резьбы винта;

$$\beta = \arctg \cdot \frac{P}{\pi \cdot d_2} = \frac{1}{3,14 \cdot 0,006} = 3^{\circ}03'$$

$$\rho = \arctg(f') \quad (2,55)$$

где

$f' = 0,25$ – приведённый коэффициент трения.

$$\rho = \arctg(f') = \arctg(0,25) = 14^{\circ}$$

$$M_1 = F_{3_1} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tg(\beta + \rho) = 1,78 \cdot \frac{0,006}{2} \cdot \tg(3^{\circ}03' + 14^{\circ}) = 1,63(\text{Н} \cdot \text{мм})$$

$$M_2 = F_{3_2} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tg(\beta + \rho) = 5,31 \cdot \frac{0,006}{2} \cdot \tg(3^{\circ}03' + 14^{\circ}) = 4,88(\text{Н} \cdot \text{мм})$$

2.3.7 Расчет конструкции сборной червячной фрезы с групповой схемой резания (схема №2)

1. Расчётный профильный угла исходного контура инструментальной рейки в нормальном сечении:

$$a_u = a_d = 20 \quad (2.56)$$

2. Модуль нормальный: $m_u = 14$ (мм)

3. Шаг по нормали:

$$t_u = \pi m_u \quad (2.57)$$

где

$\pi = 3,14$;

$m = 14$ (мм) – модуль нормальный.

$$t_u = \pi \cdot m_u = 3,14 \cdot 14 = 43,98 \text{ (мм)}$$

4. Расчётная толщина зуба по нормали:

$$S_u = t_u - (S_{o1} + \Delta S) \quad (2.58)$$

где

$t_u = 43,98 \text{ (мм)}$ – шаг по нормали;

$S_{o1} = 7,854 \text{ (мм)}$ – толщина зуба по нормали на делительной окружности;

$\Delta S = 1,4 \text{ мм}$ – величина припуска под последующую чистовую обработку.

$$S_u = t_u - (S_{o1} + \Delta S) = 43,98 - (7,854 + 1,4) = 34,726 \text{ (мм)}$$

5. Расчётная высота головки зуба фрезы:

$$h_u = h'' = h - h' \quad (2.59)$$

где

$h = 31,5 \text{ (мм)}$ – расчетная высота зуба;

$h' = 17,5 \text{ мм}$ – расчетная высота ножки зуба.

$$h_u = h'' = h - h' = 31,5 - 17,5 = 14 \text{ (мм)}$$

6. Высота зуба фрезы:

$$h_u = h + 0,3m \quad (2.60)$$

где

$h = 31,5 \text{ (мм)}$ – расчетная высота зуба;

$m = 14 \text{ (мм)}$ – модуль нормальный.

$$h_u = h + 0,3m = 31,5 + 0,3 \cdot 14 = 35,7 \text{ (мм)}$$

2.3.8 Определение конструктивных размеров червячной фрезы с групповой схемой резания (схема №2)

1. Наружный диаметр червячной фрезы:

$$D_{eu} = 276 \text{ (мм)}$$

2. Передний угол инструмента:

$\gamma = 5^\circ$ – боковые и эллипсные пластины

3. Диаметр посадочного отверстия фрезы:

$$d = (0,2...0,45) \cdot D_{eu} \quad (2.61)$$

где

$D_{eu} = 276$ (мм) – наружный диаметр червячной фрезы.

$$d = (0,2...0,45) \cdot D_{eu} = 0,3 \cdot 276 = 82,5 \text{ (мм)}$$

4. Общая длина инструмента:

$$L = L_p + 2 \cdot l_{ку} \quad (2.62)$$

где

L_p – длина режущей части;

$l_{ку} = 25$ (мм) – длина упорных частей корпуса

$$L_p = L_{\min} + 2 \cdot l_{кл} \quad (2.63)$$

$$L_p = 307,87 + 2 \cdot 25 = 357,87 \text{ (мм)}$$

5. Количество реек червячной фрезы принимаем $z = 25$

6. Средний диаметр червячной фрезы:

$$d_{cp} = D_{eu} - 2h_u' \quad (2.64)$$

где

$D_{eu} = 276$ (мм) – наружный диаметр фрезы;

$h_u' = 14$ (мм) – расчётная высота головки зуба червячной фрезы.

$$d_{cp} = D_{eu} - 2h_u' = 276 - 28 = 248 \text{ (мм)}$$

7. Угол подъёма витков на начальной окружности:

$$\omega = \arcsin\left(\frac{m_u \cdot a}{d_{cp}}\right) \quad (2.65)$$

где

$m_u = 14$ (мм) – модуль нормальный;

$a = 1$ – число заходов червячной фрезы;

$d_{cp} = 248$ (мм) – средний диаметр фрезы.

$$\omega = \arcsin\left(\frac{m_u \cdot a}{d_{cp}}\right) = \arcsin\left(\frac{14 \cdot 1}{248}\right) = 3^\circ 14' 71''$$

8. Направление витков червячной фрезы – правое

9. Угол установки инструмента на станке:

$$\psi = \omega = 3^\circ 14' 71''$$

2.3.9 Расчет сил закрепления СРТП в установочных пазах для фрезы с групповой схемой резания (схема №2)

1. Радиальная сила, которая действующая на СРТП:

$$F_r = m \cdot a_r \quad (2.66)$$

где

$m_1 = 0,025$ (кг) – масса боковых СРТП;

$m_2 = 0,078$ (кг) – масса эллипсной СРТП;

a_r – радиальное ускорение.

$$a_r = \frac{V^2}{R_1^2} \cdot R^2 \quad (2.67)$$

где

$V = 160$ (м / мин) = $2,7$ (м / с) – скорость резания;

$R = 130$ (мм) = $0,13$ (м) – расстояние от оси сборной фрезы до центра масс СРТП;

$R_1 = 0,08$ (м) – радиус вершинной кромки сборной червячной фрезы.

$$a_r = \frac{V^2}{R_1^2} \cdot R^2 = \frac{2,7^2}{0,08^2} \cdot 0,13^2 = 19,25 \text{ (м / с}^2\text{)}$$

Радиальная сила для боковой СРТП:

$$F_{r_1} = 0,025 \cdot 19,25 = 0,5(H)$$

Радиальная сила для эллипсной СРТП:

$$F_{r_2} = 0,078 \cdot 19,25 = 1,5(H)$$

2. Сила, направленная вдоль СРТП

$$F_1 = \frac{F_r}{\cos(10^\circ)} \quad (2,68)$$

где

$F_{r_1} = 0,5(H); F_{r_2} = 1,5(H)$ – радиальная сила, действующая на СРТП.

$$F_1 = \frac{F_{r_1}}{\cos(10^\circ)} = \frac{0,5}{\cos(10^\circ)} = 0,51(H)$$

$$F_2 = \frac{F_{r_2}}{\cos(10^\circ)} = \frac{1,5}{\cos(10^\circ)} = 1,53(H)$$

3. Условие зажима

$$F_1 / F_2 \leq F_{mp} \quad (2,69)$$

где

$F_{r_1} = 0,5(H); F_{r_2} = 1,5(H)$ – сила, направленная вдоль СРТП

4. Определение силы нормального давления

$$F_{mp} = \mu \cdot N \quad (2,70)$$

где

$\mu = 0,05$ – коэффициент трения скольжения;

N – сила нормального давления

$$N = \frac{F_1}{\mu} \quad (2,71)$$

где

$F_{r_1} = 0,5(H); F_{r_2} = 1,5(H)$ – силы, направленные вдоль СРТП;

$\mu = 0,05$ – коэффициент трения скольжения.

Для боковой СРТП:

$$N_1 = \frac{F_1}{\mu} = \frac{0,51}{0,05} = 10,2(H)$$

$$F_{mp} = \mu \cdot N_1 = 0,05 \cdot 10,2 = 0,51(H)$$

$$F_1 / \leq F_{mp}$$

$0,51 \leq 0,51$ – условие выполняется

Для эллипсной СРТП:

$$N_2 = \frac{F_2}{\mu} = \frac{1,53}{0,05} = 30,6(H)$$

$$F_{mp} = \mu \cdot N_2 = 0,05 \cdot 30,6 = 1,53(H)$$

$$F_2 / \leq F_{mp}$$

$1,53 \leq 1,53$ – условие выполняется

5. Усилие зажима

$$F_3 = N \cdot \sin(10^\circ) \quad (2,72)$$

где

$N_1 = 10,2(H)$ – сила нормального давления на боковую СРТП.

$N_2 = 30,6(H)$ – сила нормального давления на эллипсную СРТП.

$$F_{3_1} = N_1 \cdot \sin(10^\circ) = 10,2 \cdot \sin(10^\circ) = 1,78(H)$$

$$F_{3_2} = N_2 \cdot \sin(10^\circ) = 30,6 \cdot \sin(10^\circ) = 5,31(H)$$

6. Момент, который необходимо приложить к винту

$$M = F_3 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\beta + \rho) \quad (2,73)$$

где

$F_{3_1} = 1,78(H)$ - усилие зажима для боковой СРТП;

$F_{3_2} = 5,31(H)$ – усилие зажима для эллипсной СРТП;

$d_2 = 6(мм) = 0,006(м)$ – средний диаметр резьбы винта;

β – угол подъёма винтовой линии резьбы винта;

ρ – приведённый угол трения.

$$\beta = \arctg \cdot \frac{P}{\pi \cdot d_2} \quad (2,74)$$

где

$P = 1(\text{мм} / \text{об})$ – шаг резьбы;

$\pi = 3,14$;

$d_2 = 6(\text{мм}) = 0,006(\text{м})$ – средний диаметр резьбы винта;

$$\beta = \arctg \cdot \frac{P}{\pi \cdot d_2} = \frac{1}{3,14 \cdot 0,006} = 3^{\circ}03'$$

$$\rho = \arctg(f') \quad (2,75)$$

где

$f' = 0,25$ – приведённый коэффициент трения.

$$\rho = \arctg(f') = \arctg(0,25) = 14^{\circ}$$

$$M_1 = F_{3_1} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \text{tg}(\beta + \rho) = 1,78 \cdot \frac{0,006}{2} \cdot \text{tg}(3^{\circ}03' + 14^{\circ}) = 1,63(\text{Н} \cdot \text{мм})$$

$$M_2 = F_{3_2} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \text{tg}(\beta + \rho) = 5,31 \cdot \frac{0,006}{2} \cdot \text{tg}(3^{\circ}03' + 14^{\circ}) = 4,88(\text{Н} \cdot \text{мм})$$

2.4 Выводы

1. Определено оптимальное соотношение режущих элементов в корпусе сборных инструментов, благодаря предложенным различным компоновкам схем расположения сменных режущих твердосплавных пластин на архимедовом червяке.

2. С целью уменьшения неравномерности загрузки зубьев фрезы и снижения опасных напряжений растяжения, приведено обоснование применения новых схем расположения сменных режущих твердосплавных пластин в корпусе сборных инструментов.

3. Определены конструктивные размеры сборных червячных фрез.

4. Полученное уравнение i -го криволинейного участка зуба производящей рейки в системе координат инструмента, а также созданная математическая модель формообразования зубчатого колеса с помощью производящей рейки методом огибания с одним независимым параметром позволяет автоматизировать процесс создания сборных конструкций зубообрабатывающего инструмента.

ГЛАВА 3. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА И НАГРУЖЕНИЯ ЗУБЬЕВ ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩИХ ФРЕЗ

3.1 Алгоритм проведения имитационного моделирования процесса механической обработки

Используя метод графического имитационного моделирования, удастся наглядно проиллюстрировать процесс работы зубообрабатывающего инструмента при механической обработке зубчатого колеса и детально изобразить площади сечения срезаемого слоя, работа выполняется в программной среде КОМПАС-3D [88-92].

Величины площадей срезаемых слоев дадут картину нагружения режущих зубьев, а также покажут, когда и в какой момент возникает максимальное нагружение.

Для корректности получаемых результатов необходимо правильно расположить в пространстве заготовку зубчатого колеса и сам инструмент.

Имитационное моделирование будет производиться:

а) Для стандартной червячной фрезы $m=14$, число режущих зубьев на каждой рейке = 7, количество реек = 10, число зубьев колеса = 32.

Подача инструмента осуществляется вертикально с последующим врезанием зубьев в заготовку.

б) Для сборной червячной фрезы с тангенциально расположенными режущими элементами (схема №1) $m=14$, число зубьев на рейке = 6, число реек = 22, число зубьев колеса = 32.

На станке используется вертикальная подача относительно оси заготовки.

в) Для сборной червячной фрезы с групповой схемой резания (схема №2) $m=14$, число зубьев на рейке = 7, число реек = 25, число зубьев колеса = 32.

Применяется вертикальная подача на зубофрезерном станке относительно оси обрабатываемой детали.

Алгоритм имитационного моделирования представлен ниже:

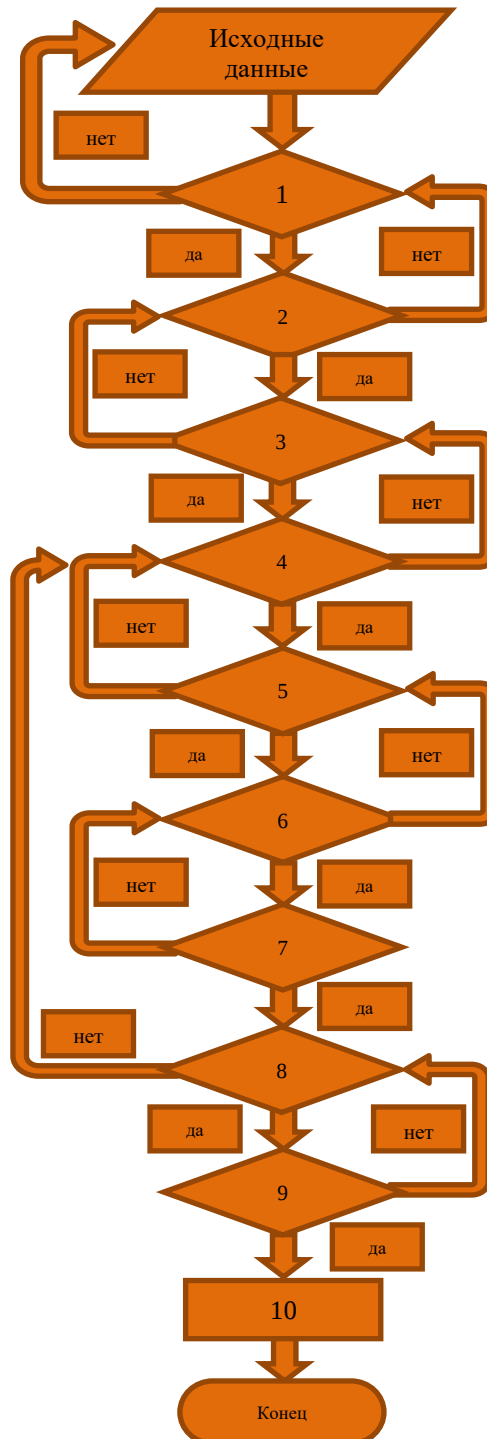


Иллюстрация процесса имитационного моделирования представлена в приложении А.

3.2 Имитационное моделирование процесса механической обработки для стандартной червячной фрезы

1. Производится поворот заготовки колеса S_k исходя из рассчитанного углового шага. Данная величина будет характеризовать величину поворота обрабатываемой детали при каждом последующем врезании СРТП.

$$S_k = \frac{S_\delta}{z} \cdot \frac{1}{n} \quad (3,1)$$

где

z – число зубьев колеса;

n – число зубьев в витке.

$$S_k = \frac{S_\delta}{z} \cdot \frac{1}{n} = \frac{360}{32} \cdot \frac{1}{10} = 1,125^\circ$$

2. Подача на зуб рассчитывается по формуле:

$$S_z = \frac{S}{n} \quad (3,2)$$

где

S_z – подача на зуб

n – число зубьев на витке червячной фрезы

$$S_z = \frac{S}{n} = \frac{3}{10} = 0,3 \text{ (мм/об)}$$

В процессе имитационного моделирования процесса механической обработки зубчатого колеса (режимы обработки и исходные данные: $Z_f=10$; $M=14$; $S=3$ мм/об; $S_z=0,3$ мм/зуб; $Z_k=32$) производится вычисление площадей срезаемых слоев передней поверхностью каждого режущего элемента сборного инструмента, ввиду наблюдаемых максимальных нагрузок в момент врезания червячного инструмента. Величина силы резания находятся в прямой зависимости от площади сечения срезаемого слоя [93-104].

Фрагменты площадей сечения срезаемого слоя представлены на рисунке 3.1.

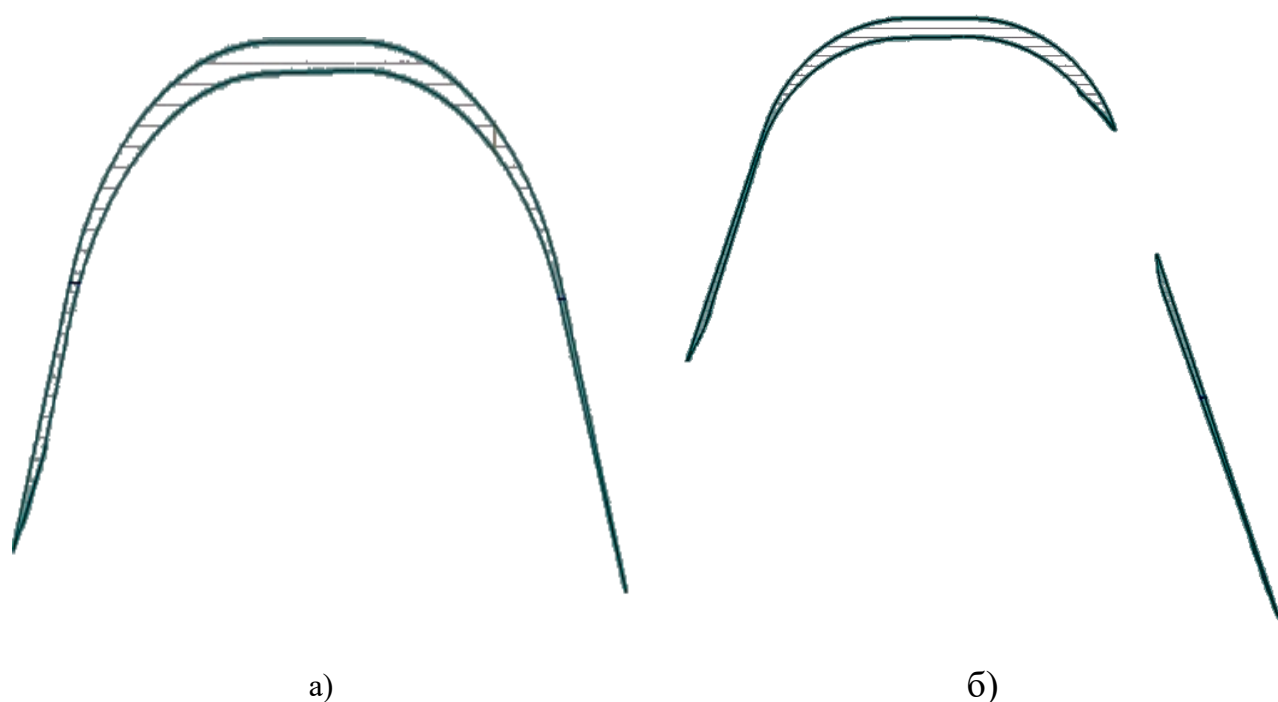


Рисунок 3.1 - Фрагменты площадей срезаемых слоев

В результате проведённого имитационного моделирования процесса механической обработки был получен контур обработанного зубчатого колеса, и наложен на профиль по ГОСТ 13755–81. Он находится в его границах и готов для последующей чистовой обработки, максимальная величина припуска для чистовой обработки будет составлять 1,6 мм.

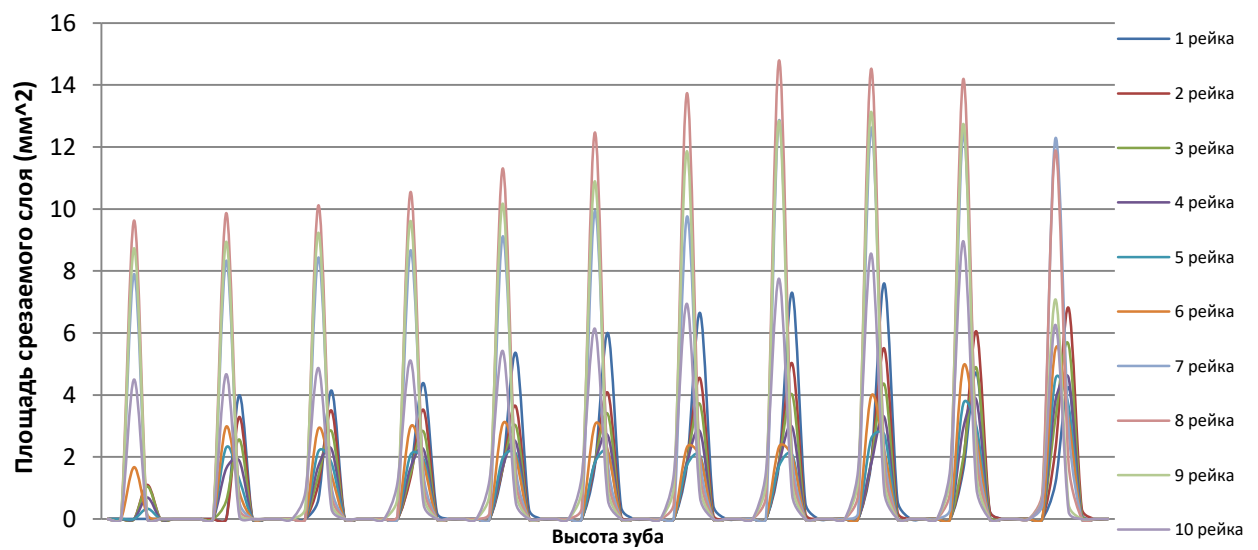
Результаты проведенного имитационного моделирования представлены в приложении Б.

Имитационное моделирование позволило установить момент, когда зуб стандартной червячной фрезы наиболее загружен.

Это происходит на этапе зубофрезерования, когда червячная фреза находится в процессе обработки на глубине – 22,8 мм. Величина максимальной площади сечения срезаемого слоя достигает $14,86 \text{ мм}^2$.

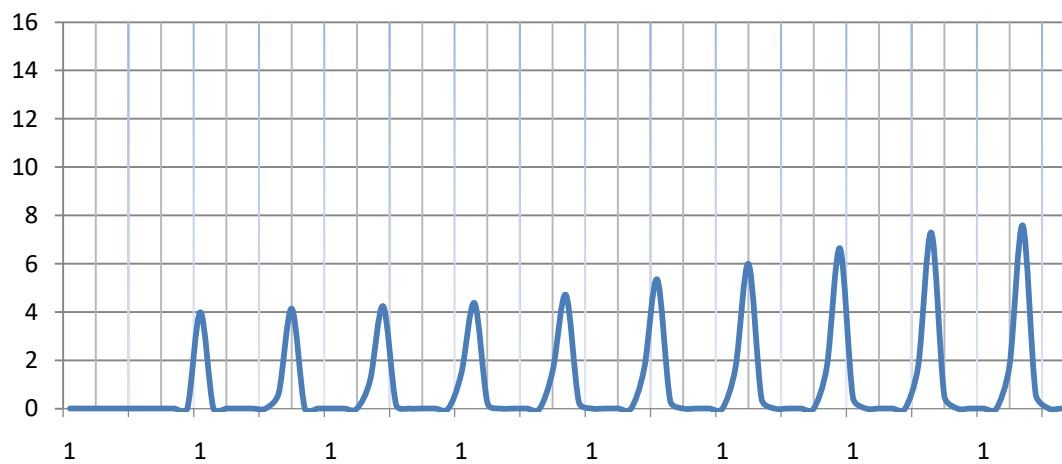
По результатам полученных данных площадей сечения срезаемого слоя построены графики зависимости величины площадей сечений срезаемых слоев при имитационном моделировании движений инструмента (рис.3.2).

Суммарное нагружение реек стандартной червячной фрезы

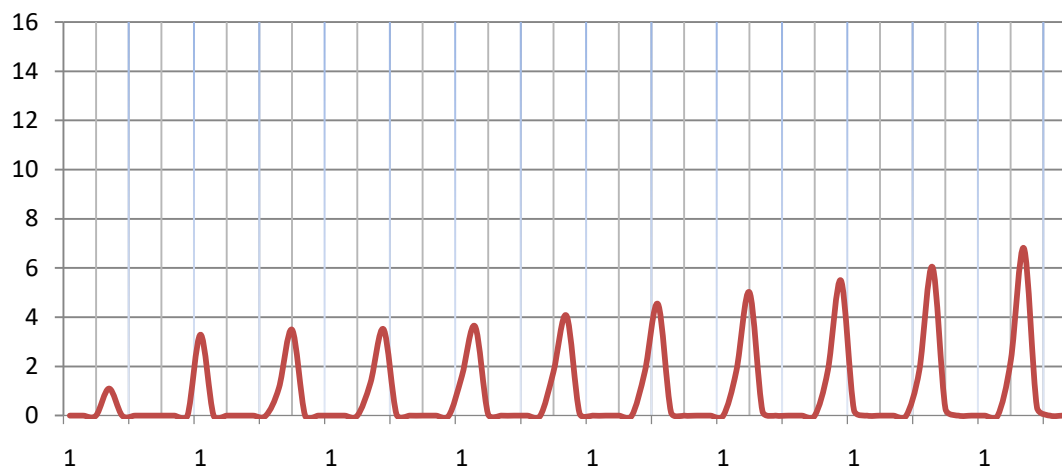


Загружение по отдельным рейкам

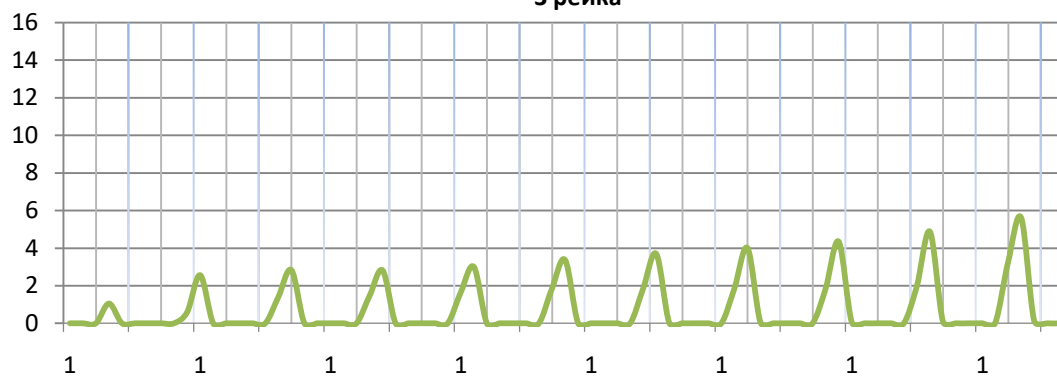
1 рейка



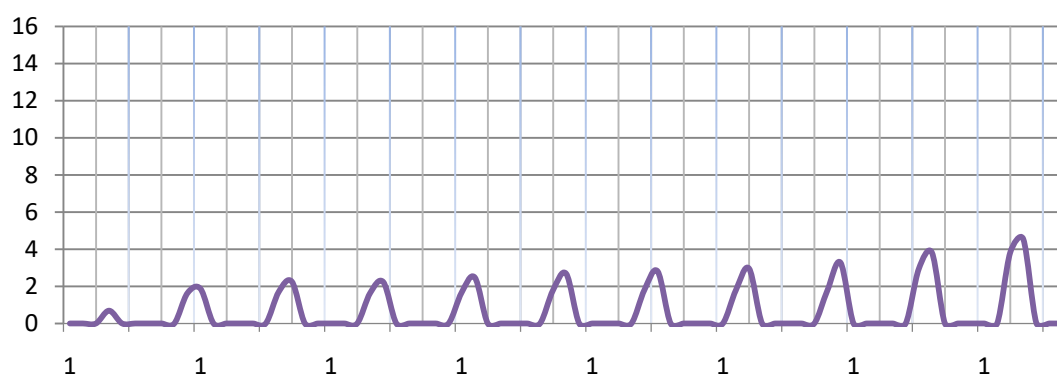
2 рейка



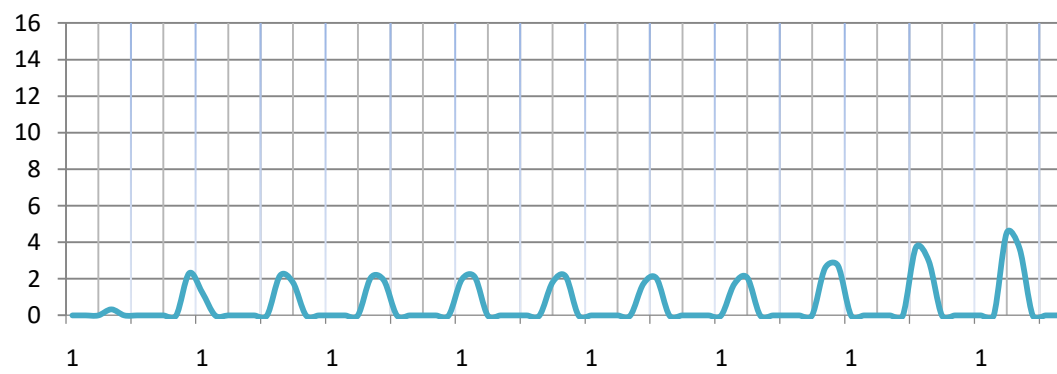
3 рейка



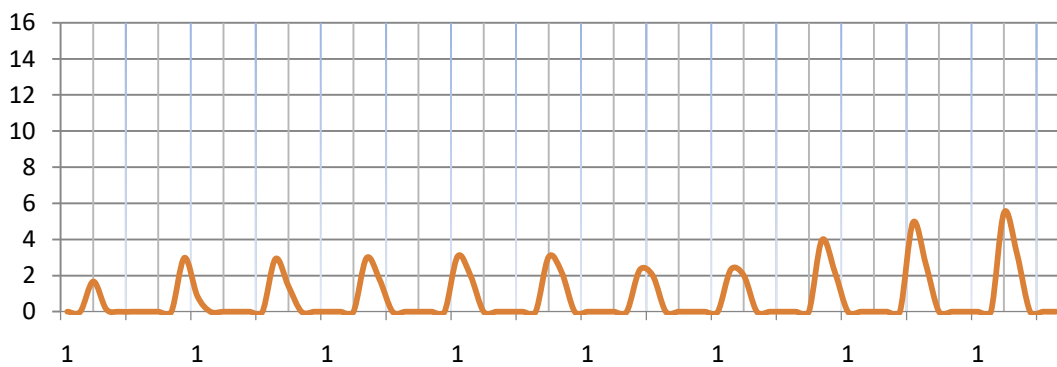
4 рейка



5 рейка



6 рейка



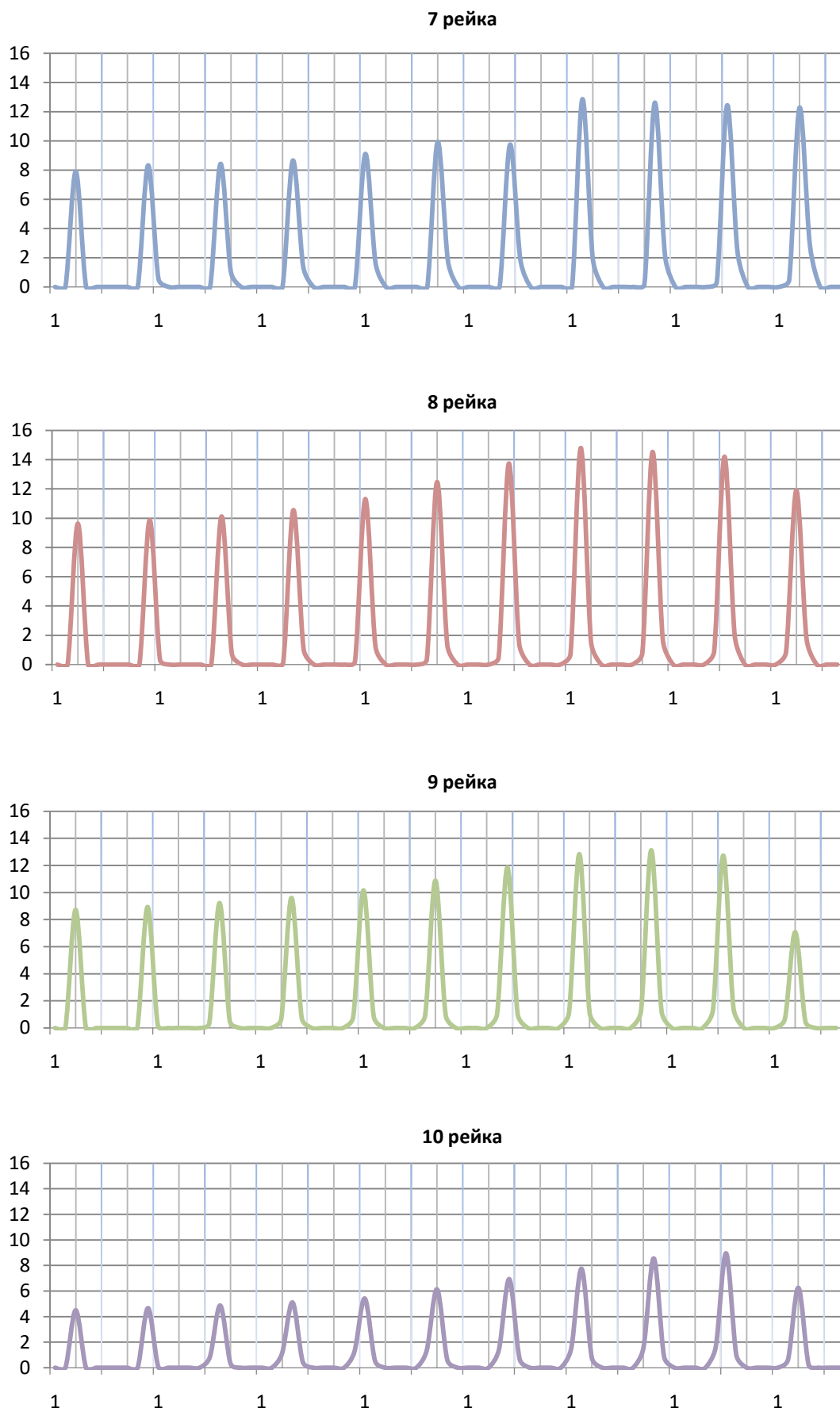


Рисунок 3.2 – Графики зависимости величины площадей срезаемых слоев от момента касания заготовки до окончания работы инструмента (высота зуба)

3.3 Имитационное моделирование процесса механической обработки для червячной фрезы с тангенциальным расположением режущих элементов (схема №1)

1. Производится поворот заготовки колеса S_k исходя из рассчитанного углового шага. Данная величина будет характеризовать величину поворота обрабатываемой детали при каждом последующем врезании СРТП.

$$S_k = \frac{S_\delta}{z} \cdot \frac{1}{n} \quad (3,3)$$

где

z – число зубьев колеса;

n – число режущих элементов на витке.

$$S_k = \frac{S_\delta}{z} \cdot \frac{1}{n} = \frac{360}{32} \cdot \frac{1}{22} = 0,511^\circ$$

2. Подача на зуб инструмента рассчитывается по формуле:

$$S_z = \frac{S}{n} \quad (3,4)$$

где

S_z – подача на зуб

n – число режущих элементов на витке фрезы

$$S_z = \frac{S}{n} = \frac{3}{22} = 0,13 (\text{мм/об})$$

В процессе имитационного моделирования процесса механической обработки зубчатого колеса (режимы обработки и исходные данные: $Z_f=22$; $M=14$; $S=3$ мм/об; $S_z=0,13$ мм/зуб; $Z_k=32$) производились измерения площадей срезаемого слоя передней поверхностью каждого режущего зуба инструмента, потому что максимальные значения возникают в момент врезания. Значения величина силы резания при зубообработке находятся в прямой зависимости от

площади сечения срезаемого слоя. Фрагменты площадей сечения срезаемых слоев представлены на рисунке 3.3.

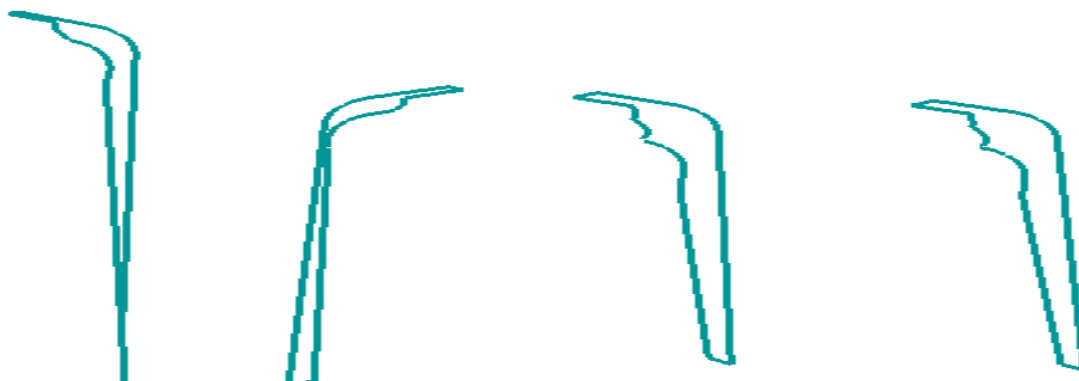


Рисунок 3.3 – Получаемые фрагменты площадей сечений срезаемых слоев

В результате проведенного имитационного моделирования процесса механической обработки был получен контур обработанного зубчатого колеса, и наложен на профиль по ГОСТ 13755–81.

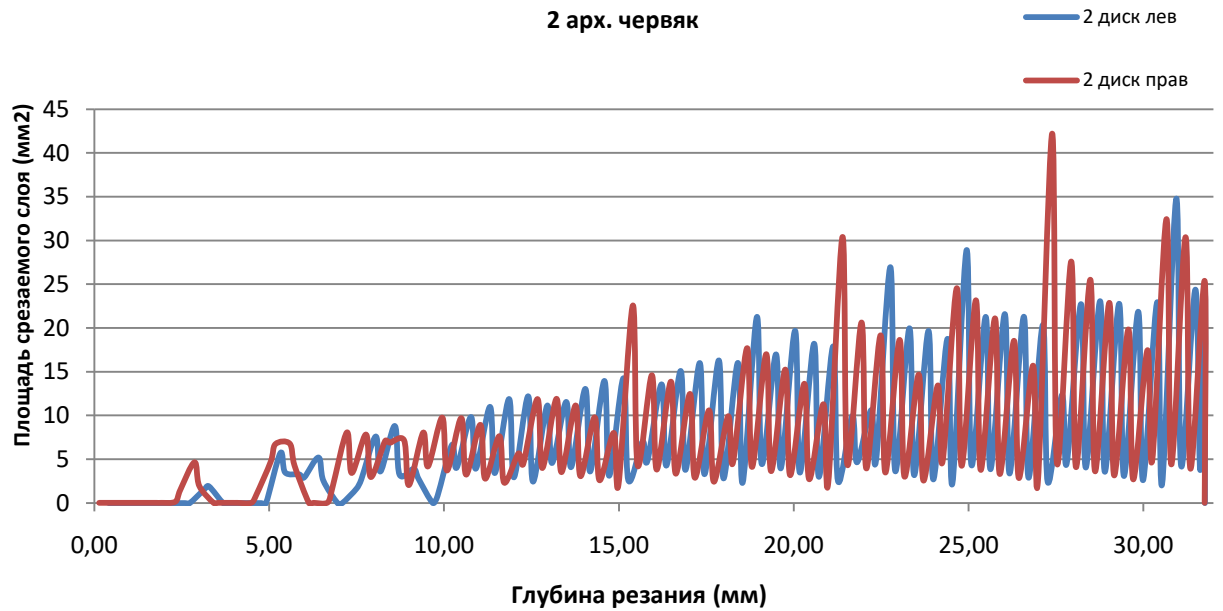
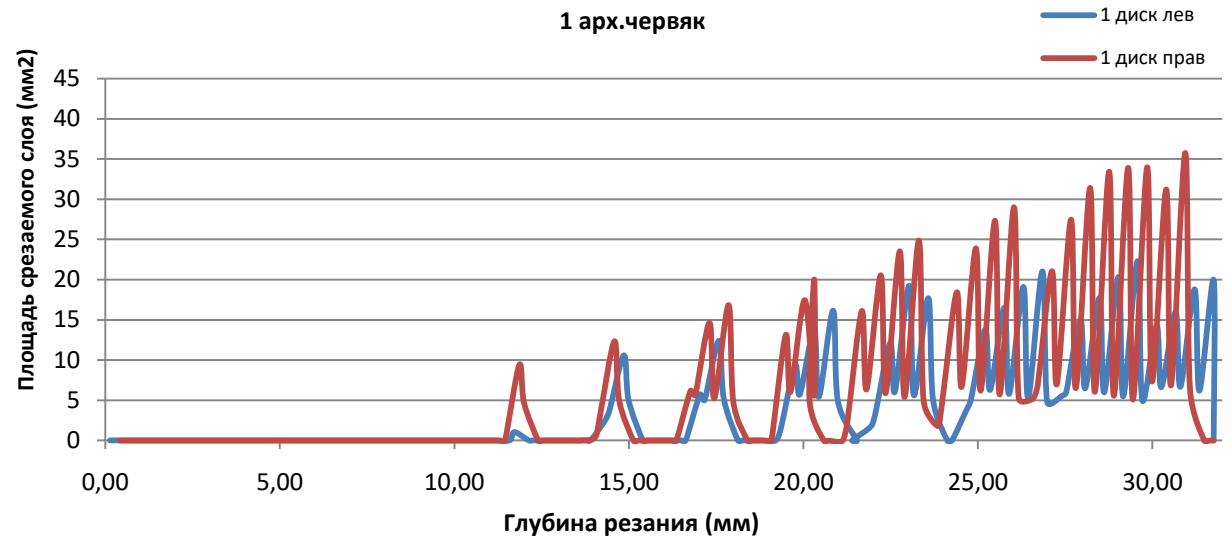
Он находится в его границах и готов для последующей чистовой обработки, максимальное величина припуска для чистовой обработки будет составлять 1,4 мм.

Результаты проведенного имитационного моделирования отражены в приложении В.

Имитационное моделирование позволило установить момент, когда зуб сборной червячной фрезы с тангенциальными режущими элементами наиболее загружен. Это происходит на этапе зубофрезерования, когда червячная фреза находится в процессе обработки на глубине – 27,4 мм.

Результатам величин площадей сечений срезаемых слоев отображены на графиках зависимости величины площадей срезаемых слоев от перемещения червячного инструмента.

Из-за особенности конструкции и расположения сменных режущих элементов в корпусе фрезы графики нагружения были построены по каждому архимедову червяку отдельно, графики нагружения для 5 и 6 архимедова червяка, не представлены, так как имеют нулевые величины срезаемых слоев (рис.3.4).



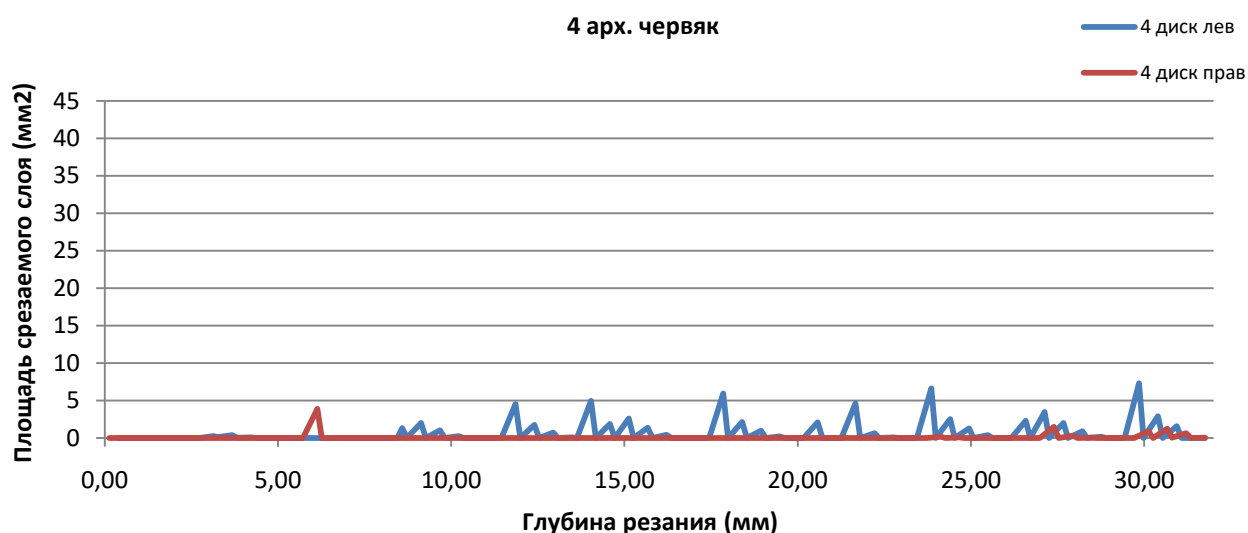


Рисунок 3.4 – Графики зависимости величины площадей срезаемых слоев (нагрузки) от перемещения инструмента

В результате проведенного моделирования получены зависимости величин площадей, сечения срезаемых слоев и стало ясно, что тангенциальная схема расположения сменных режущих элементов в сборной червячной фрезе позволила разделить припуск на обработку и уйти от образования трехэлементных фрагментов срезаемого слоя. Однако полностью не решилась проблема с образованием срезаемых слоев одновременно с прямолинейными и криволинейными участками. Что в последующем будет негативно сказываться на образовании стружки сложной формы и возникающими проблемами вывода ее из зоны резания. Также в определенные моменты зубофрезерования режущие элементы фрезы с тангенциальным расположением срезают большие величины по сравнению со стандартной червячной фрезой.

3.4 Имитационное моделирование процесса механической обработки для сборной червячной фрезы с групповой схемой резания (схема №2)

1. Производится поворот заготовки колеса S_k исходя из рассчитанного углового шага. Данная величина будет характеризовать величину поворота обрабатываемой детали при каждом последующем врезании СРТП.

$$S_k = \frac{S_\delta}{z} \cdot \frac{1}{n} \quad (3,5)$$

где

z – число зубьев колеса;

n – число режущих сменных элементов на одном витке сборной фрезы.

$$S_k = \frac{S_\delta}{z} \cdot \frac{1}{n} = \frac{360}{32} \cdot \frac{1}{25} = 0,45^\circ$$

2. Подача на зуб инструмента рассчитывается по формуле:

$$S_z = \frac{S}{n} \quad (3,6)$$

где

S_z – подача на зуб инструмента

n – число режущих сменных элементов на одном витке сборной фрезы

$$S_z = \frac{S}{n} = \frac{3}{25} = 0,12 (\text{мм/об})$$

В процессе имитационного моделирования процесса механической обработки зубчатого колеса (режимы обработки и исходные данные: $Z_f=25$; $M=14$; $S=3$ мм/об; $S_z=0,12$ мм/зуб; $Z_k=32$) производились исчисления площадей срезаемых слоев по передней поверхности каждого режущего элемента, ввиду важности этого значения, так как в момент врезания в них возникают максимальные величины главных напряжений, а значение силы резания при зубообработке находится в прямой зависимости от площади сечения срезаемого слоя. Фрагменты площадей сечений срезаемых слоев и результат имитационного моделирования представлены на рисунке 3.5-3.6.

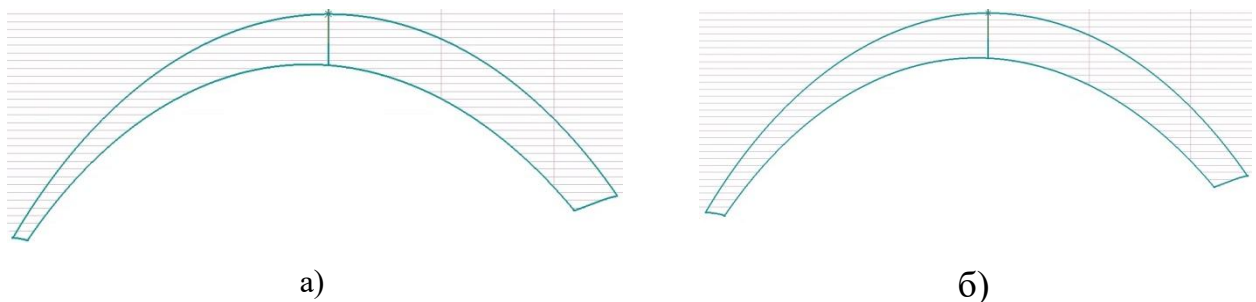


Рисунок 3.5 - Фрагменты площадей сечений срезаемого слоя

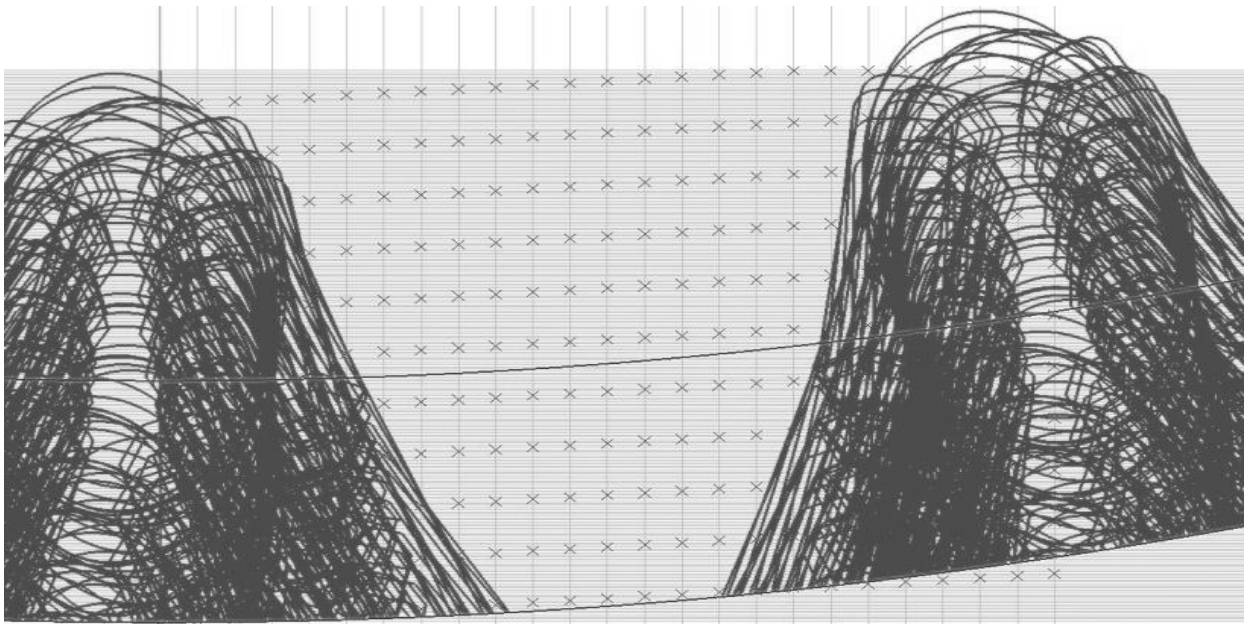


Рисунок 3.6 – Результат имитационного моделирования процесса механической обработки зубчатого колеса

В результате проведённого имитационного моделирования процесса механической обработки был получен контур обработанного зубчатого колеса, и наложен на профиль по ГОСТ 13755–81.

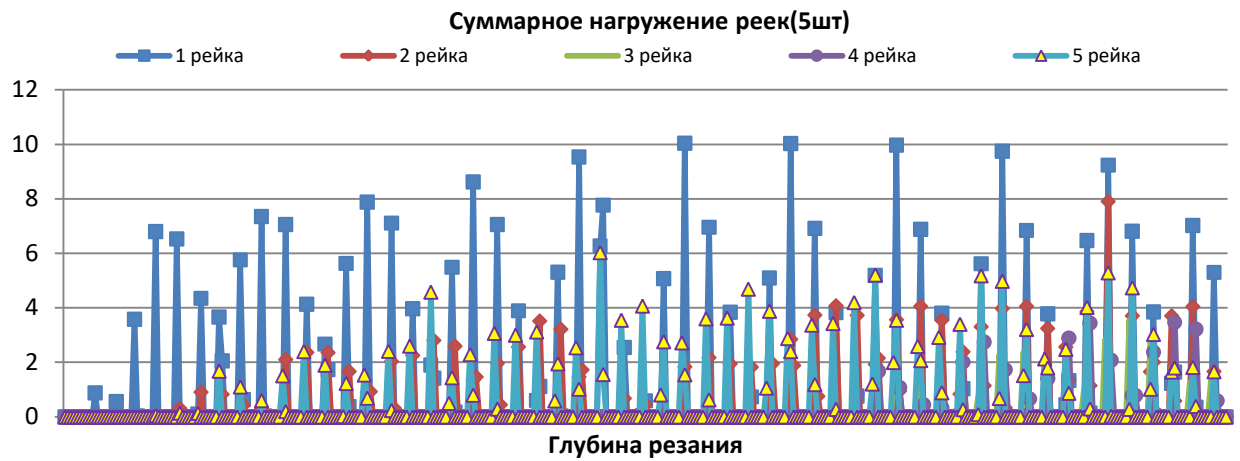
Он находится в его границах и готов для последующей чистовой обработки, максимальное величина припуска для чистовой обработки будет составлять 1,2 мм.

Результаты проведенного имитационного моделирования отражены в приложении Г.

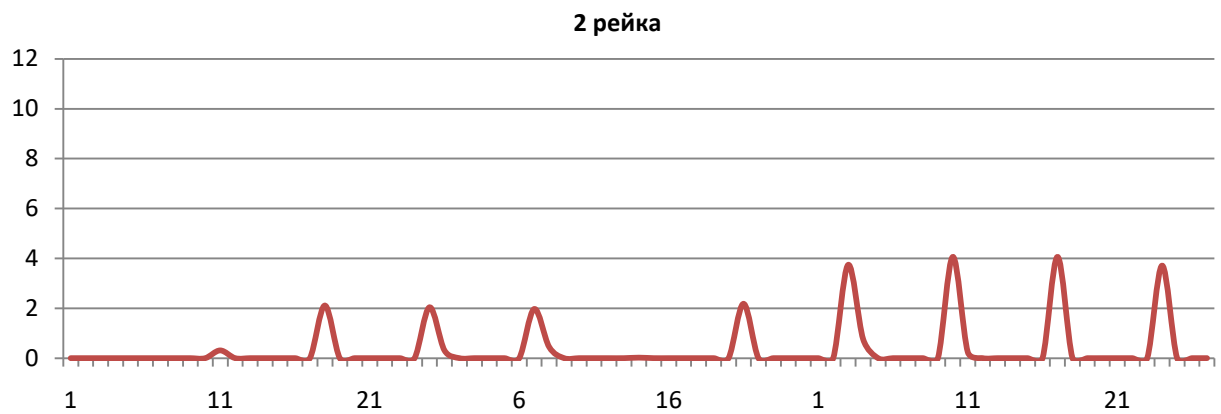
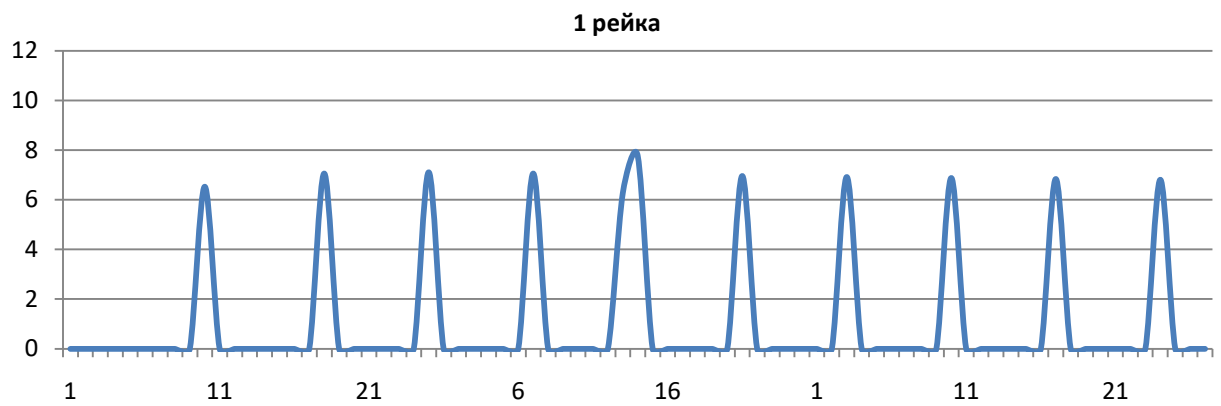
Имитационное моделирование позволило установить момент, когда зуб сборной червячной фрезы с групповой схемой резания наиболее загружен. Это происходит на этапе зубофрезерования, когда червячная фреза находится в процессе обработки на глубине – 17,4 мм.

Величина максимальной площади сечения срезаемого слоя достигает 9,27 мм².

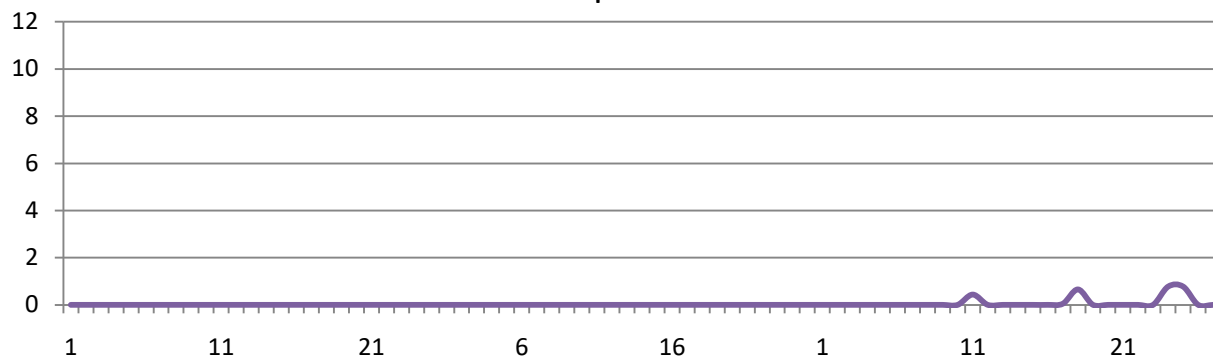
Величины площадей сечений срезаемых слоев режущими элементами сборной червячной фрезы нашли свое отражение в виде графиков зависимости площадей срезаемого слоя от величины вертикального перемещения инструмента (рис.3.7).



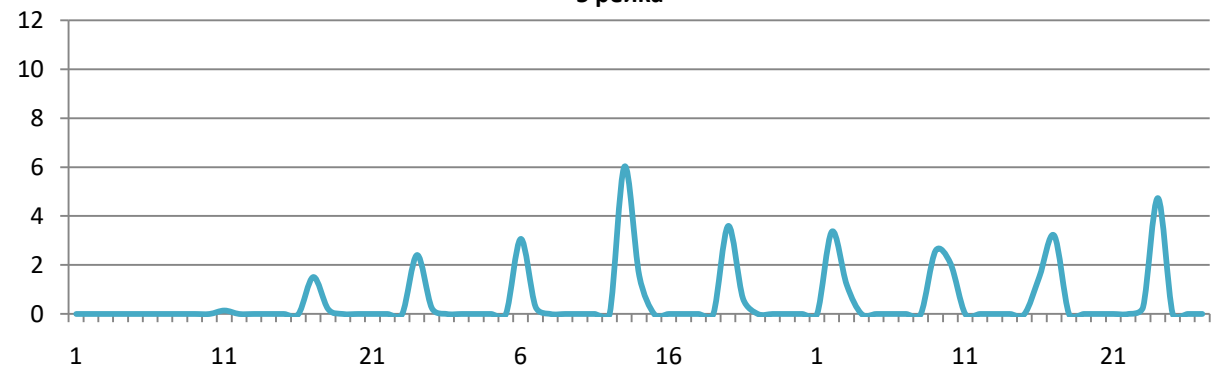
Нагружение по отдельным рейкам



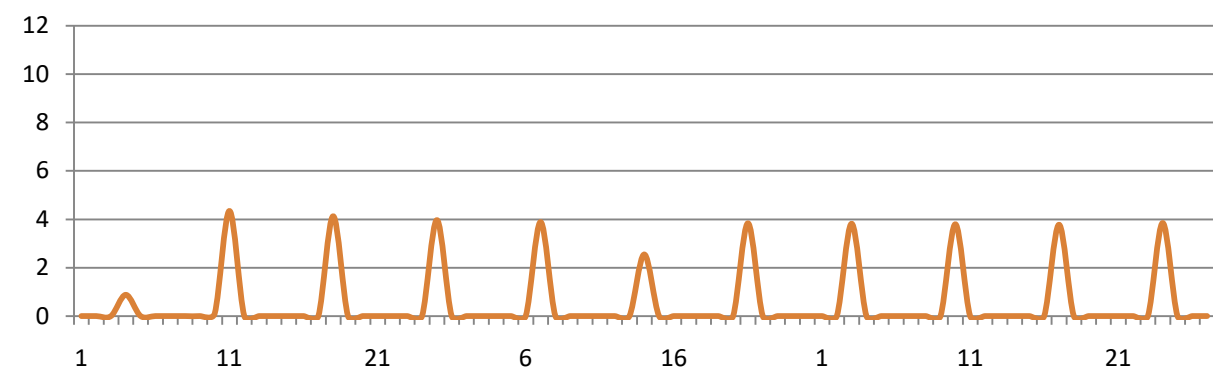
4 рейка



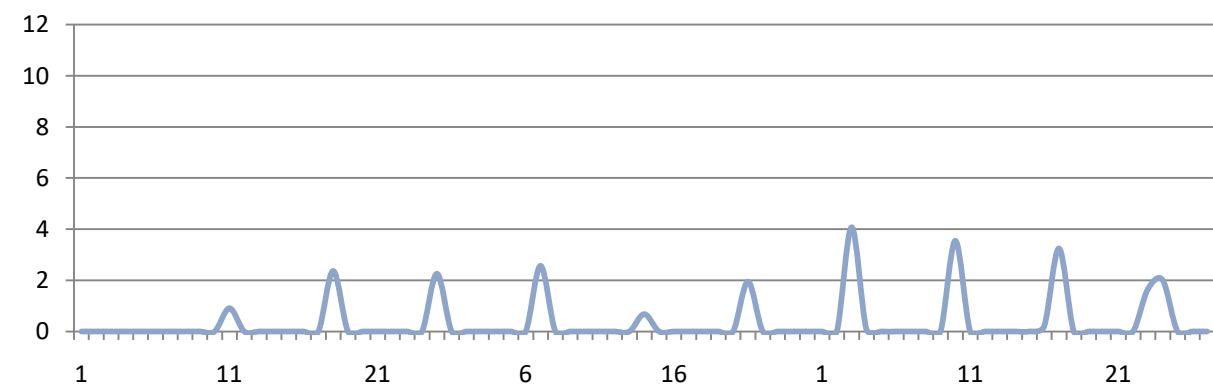
5 рейка



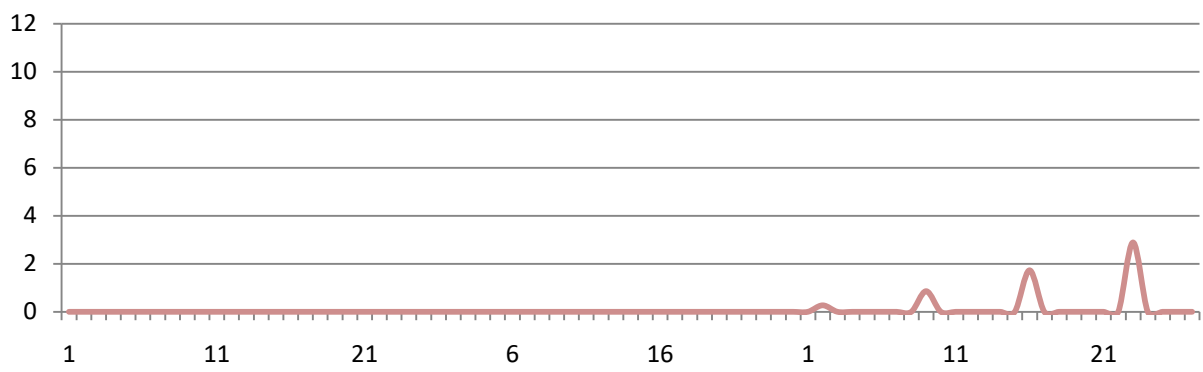
6 рейка



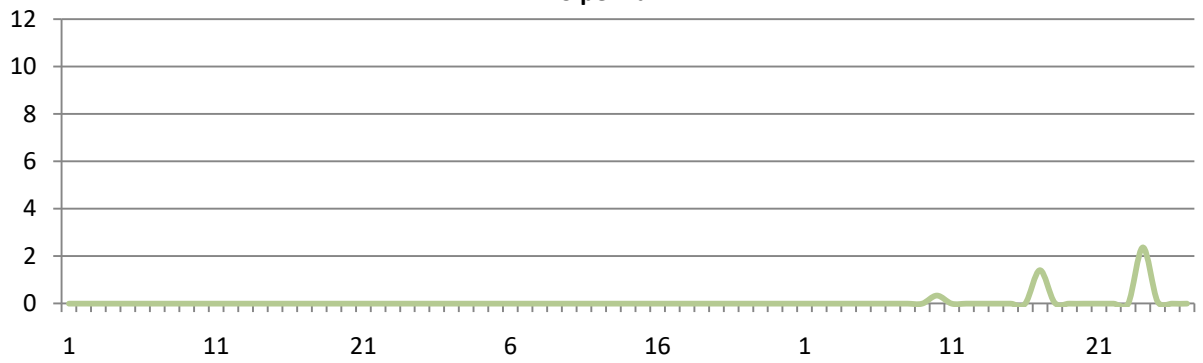
7 рейка



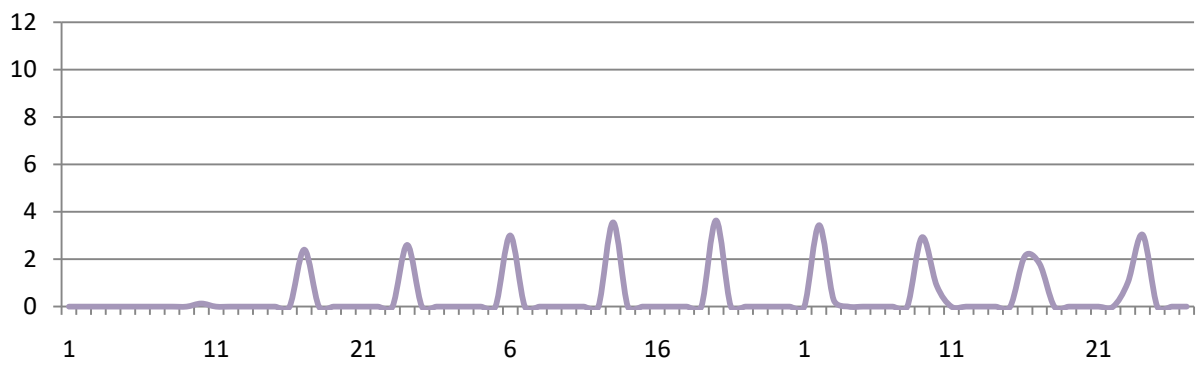
8 рейка



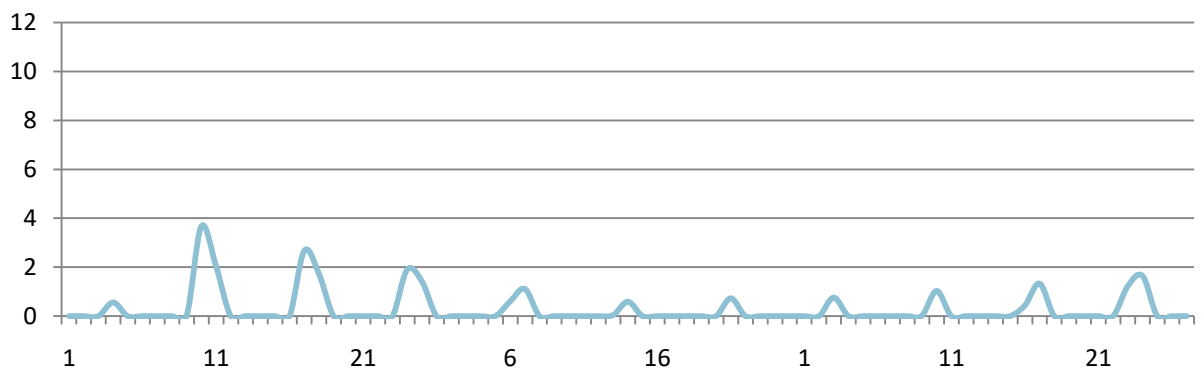
9 рейка



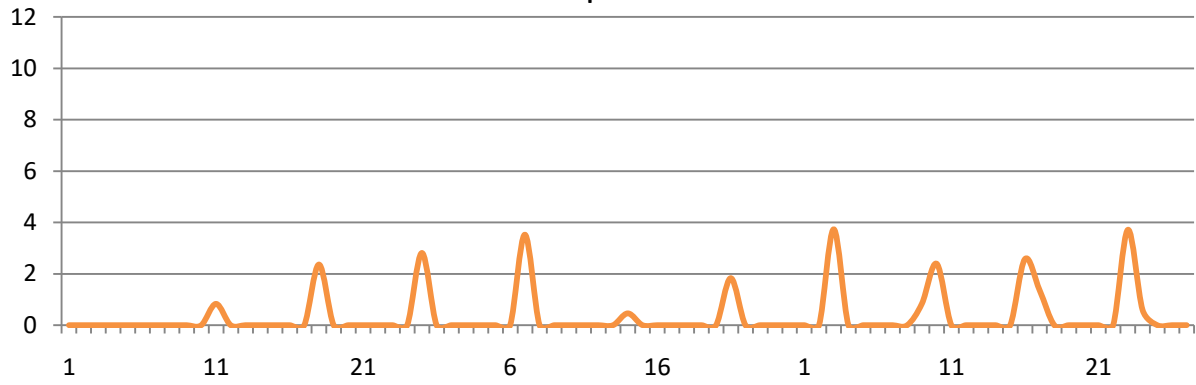
10 рейка



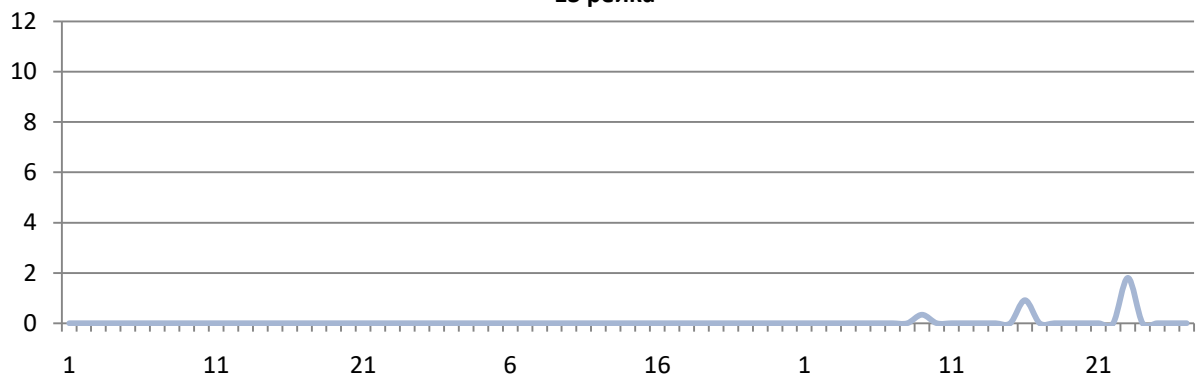
11 рейка



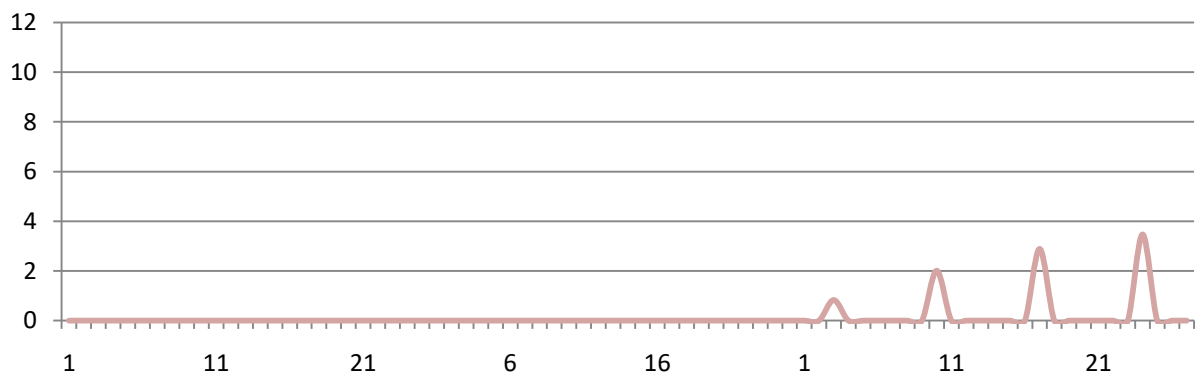
12 рейка



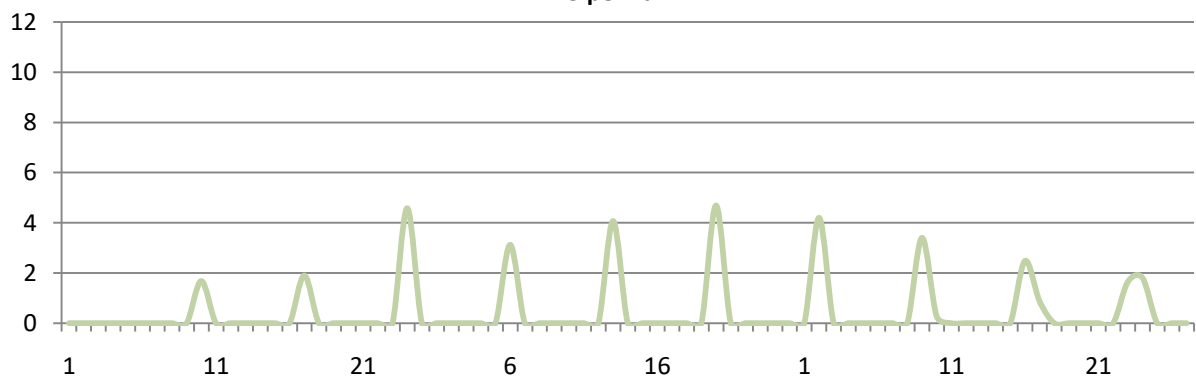
13 рейка



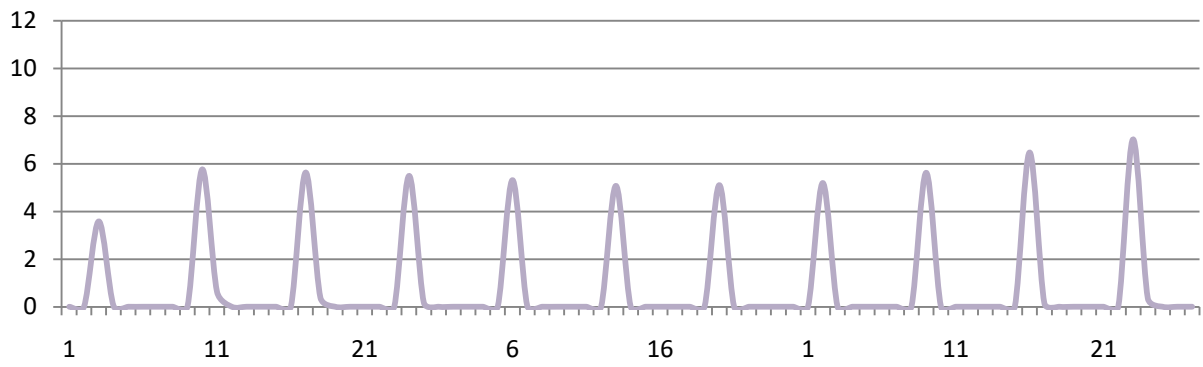
14 рейка



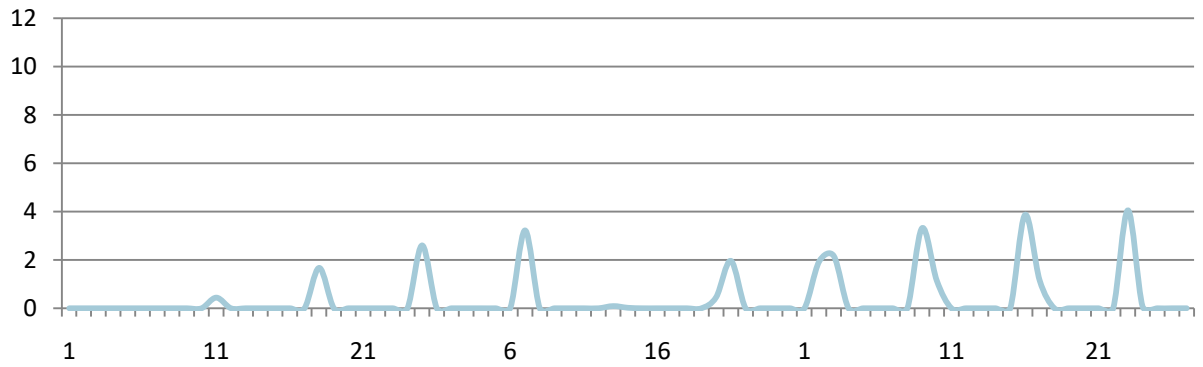
15 рейка



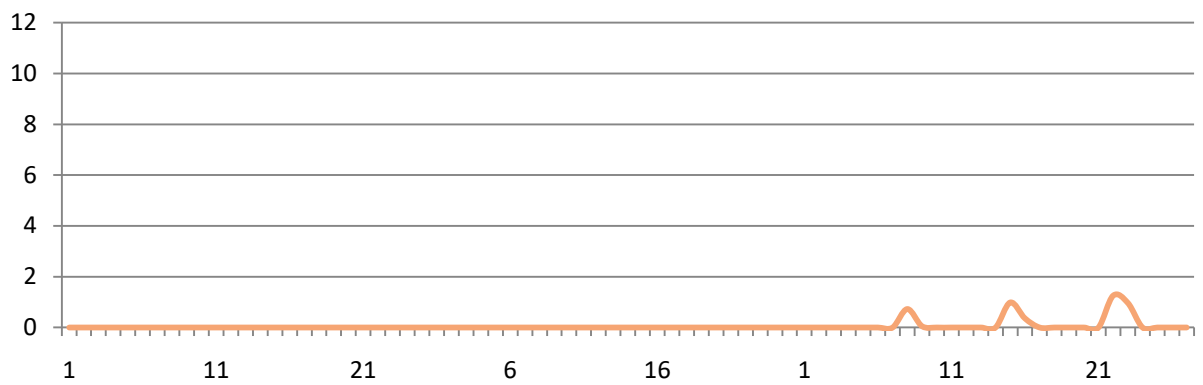
16 рейка



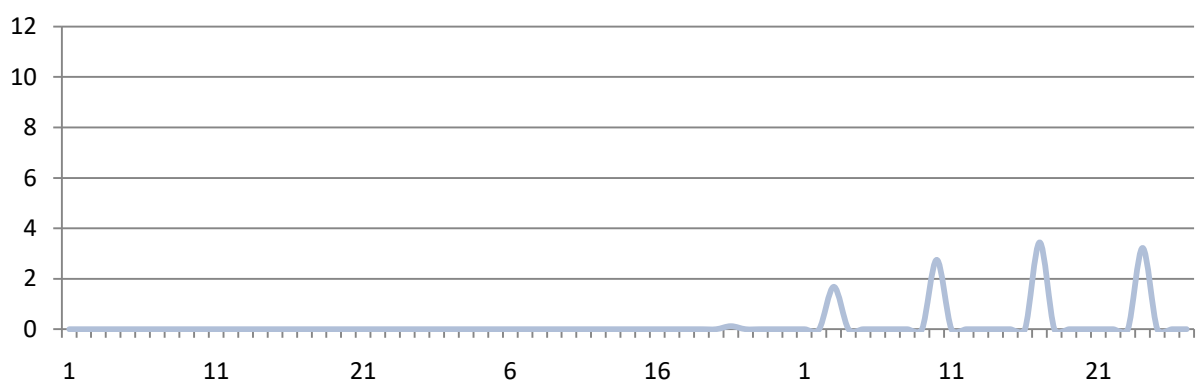
17 рейка



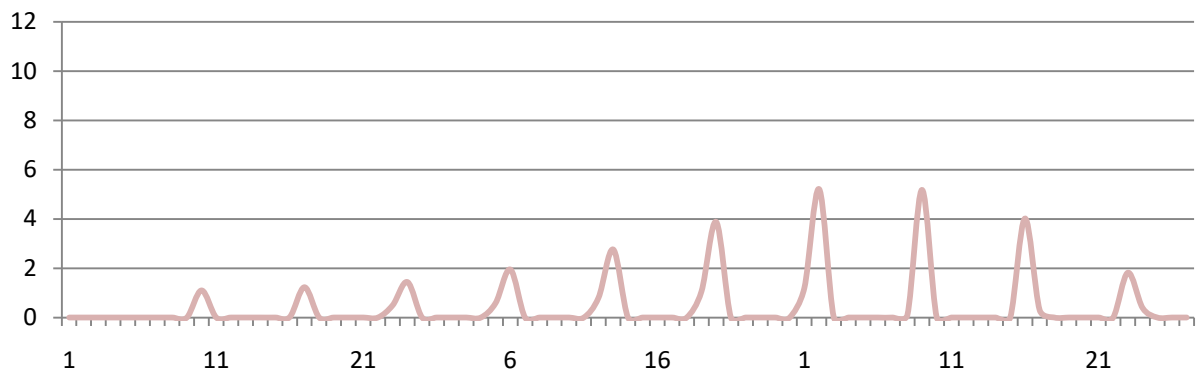
18 рейка



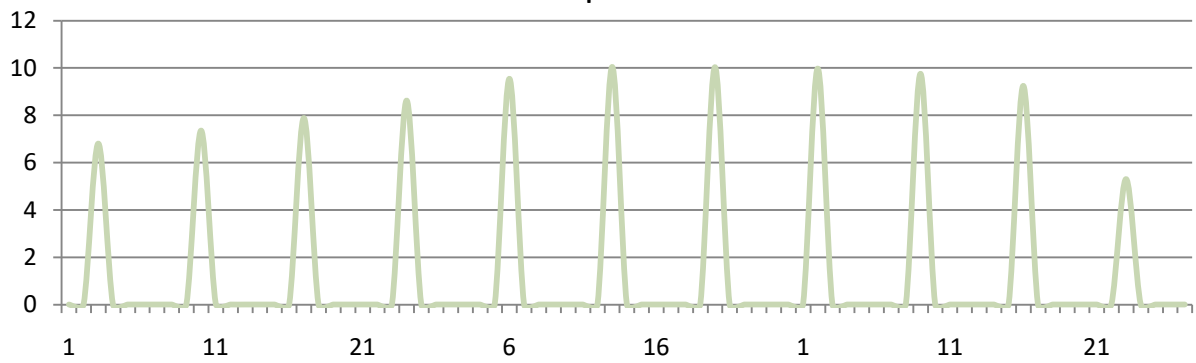
19 рейка



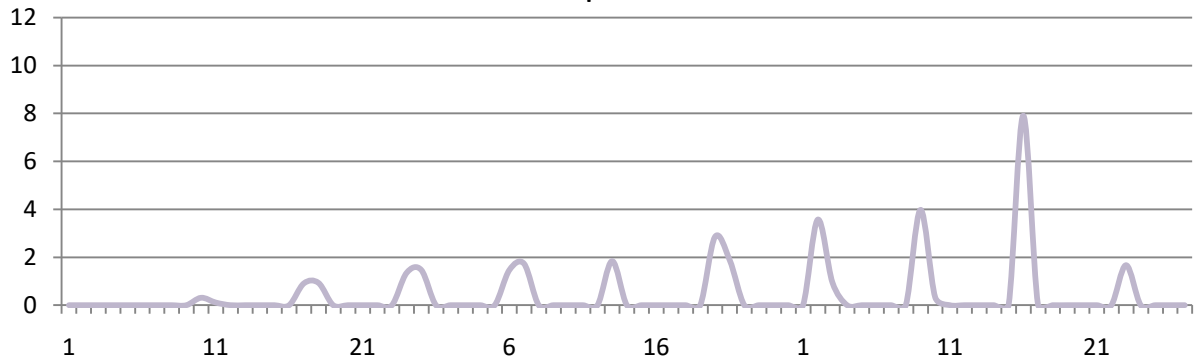
20 рейка



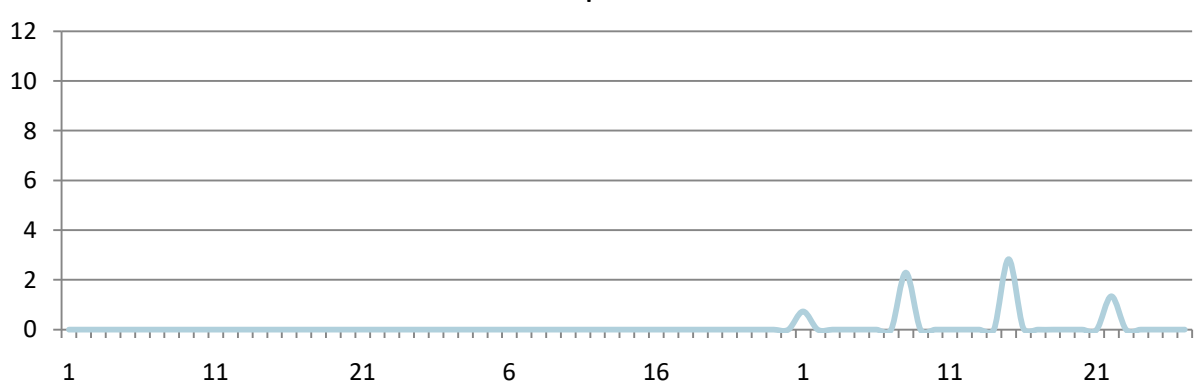
21 рейка

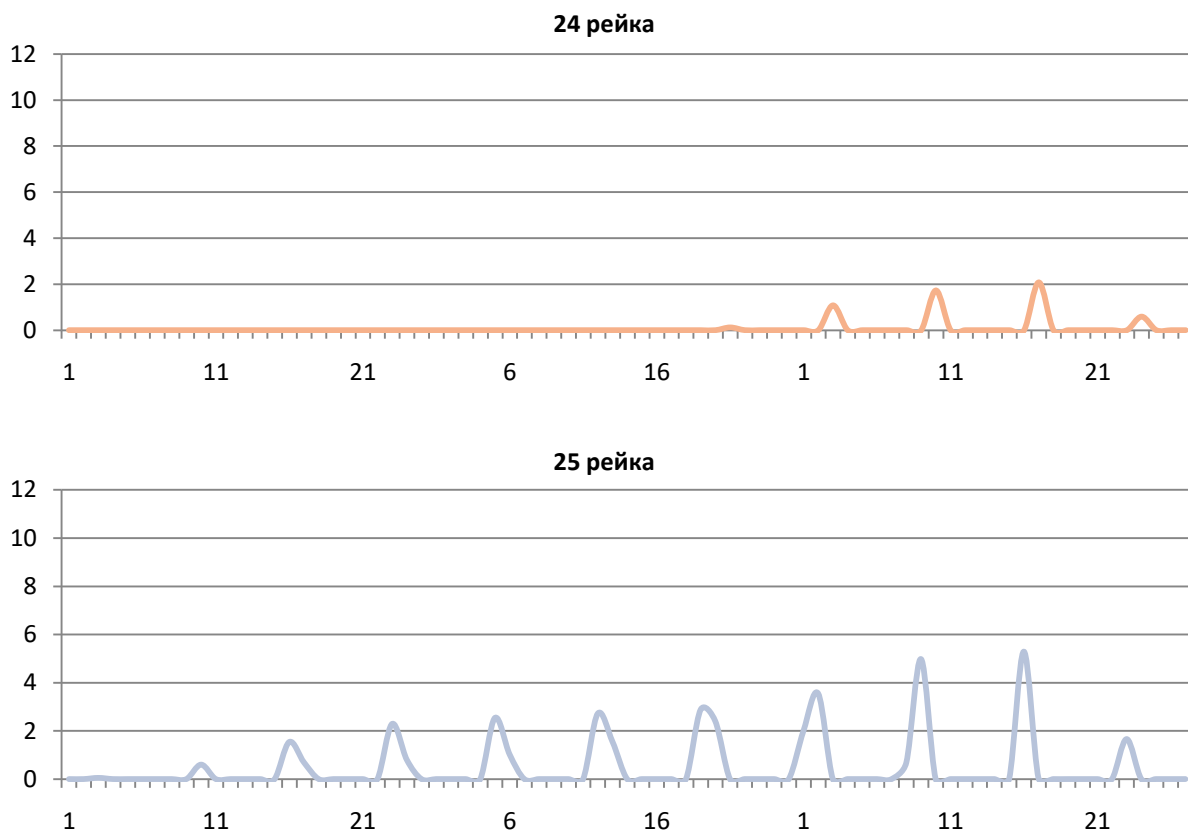


22 рейка



23 рейка





1 рейка	<i>Эллипсные пластины</i>	14 рейка	<i>Нижние левые пластины</i>
2 рейка	<i>Верхние левые пластины</i>	15 рейка	<i>Верхние правые пластины</i>
3 рейка	<i>Нижние правые пластины</i>	16 рейка	<i>Эллипсные пластины</i>
4 рейка	<i>Нижние левые пластины</i>	17 рейка	<i>Верхние левые пластины</i>
5 рейка	<i>Верхние правые пластины</i>	18 рейка	<i>Нижние правые пластины</i>
6 рейка	<i>Эллипсные пластины</i>	19 рейка	<i>Нижние левые пластины</i>
7 рейка	<i>Верхние левые пластины</i>	20 рейка	<i>Верхние правые пластины</i>
8 рейка	<i>Нижние правые пластины</i>	21 рейка	<i>Эллипсные пластины</i>
9 рейка	<i>Нижние левые пластины</i>	22 рейка	<i>Верхние левые пластины</i>
10 рейка	<i>Верхние правые пластины</i>	23 рейка	<i>Нижние правые пластины</i>
11 рейка	<i>Эллипсные пластины</i>	24 рейка	<i>Нижние левые пластины</i>
12 рейка	<i>Верхние левые пластины</i>	25 рейка	<i>Верхние правые пластины</i>
13 рейка	<i>Нижние правые пластины</i>		

Рисунок 3.7 – Графики зависимости величины площадей срезаемых слоев (нагрузки) от перемещения зубообрабатывающей фрезы при имитационном моделировании с групповой схемой расположения режущих элементов

По результатам имитационного моделирования стало ясно, что предположение о том, что групповая схема резания (схема №2) позволяет последовательно срезать припуск на обработку благодаря применению двух видов

сменных режущих твердосплавных пластин: основные – эллипсные пластины расположенные радиально в корпусе инструмента и служат для фрезерования впадины зубчатого колеса, и боковые – режущие элементы расположенные тангенциально, для формирования эвольвентных поверхностей зуба колеса было верным. Применение эллипсных пластин для фрезерования впадины зуба позволяют добиться неизменности площадей срезаемых слоев (рис. 3.8).

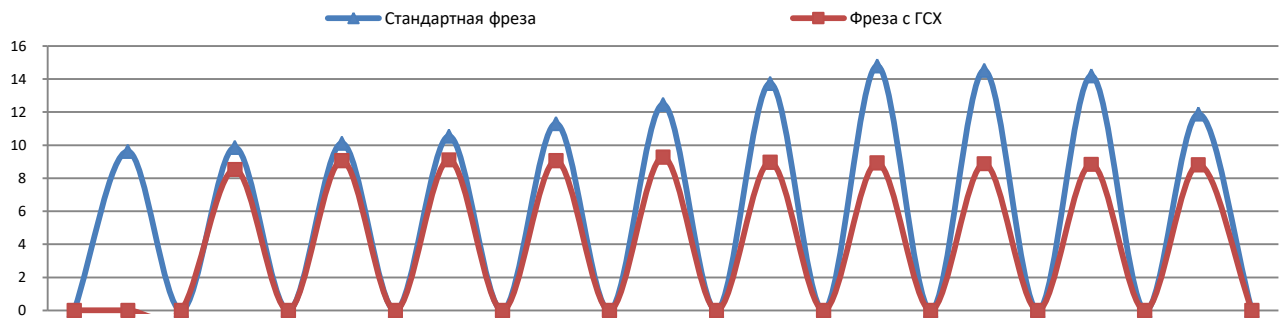


Рисунок 3.8 – Сравнительный график изменения площадей сечений срезаемого слоя (нагрузки) стандартной червячной фрезы и сборной червячной фрезы с групповой схемой резания

Уменьшаются площади сечения срезаемого слоя, а применение большего количества режущих пластин на архимедовом инструментальном червяке позволяет снизить величину подачи на режущую пластину и обеспечивается равномерность фрезерования, а также снижаются величины ударных нагрузок на режущие элементы сборного инструмента.

3.5 Выводы

1. Разработан алгоритм проведения имитационного моделирования процесса механической обработки зубчатых колес червячными фрезами.
2. Установлено, что имитационное моделирование позволяет определить площади сечений срезаемых слоев, и является базой для дальнейших расчетов граничных условий нагружения сменных режущих твердосплавных пластин (СРТП) зубообрабатывающих фрез.

3. Установлена неравномерность (различные площади срезаемых слоев) загрузки режущих зубьев стандартной червячной фрезы, которая составила 35%.

4. Установлено, что применение новой схемы (схема №2) расположения сменных режущих элементов на архимедовом червяке позволяет реализовать групповую схему резания при формировании канавок между зубьями, разделить припуск на обработку, уменьшить площади сечений срезаемых слоев – в 1,5 – 2 раза, тем самым снизить силы резания в процессе зубофрезерования.

ГЛАВА 4. РАСЧЕТЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ)

4.1 Основные понятия МКЭ

Материальное тело при применении метода конечных элементов будет являться исходным объектом, в результате чего происходит его разбиение на отдельные конечные элементы (КЭ) (рис.4.1) с формированием сетки из отдельных элементов. Внутри любого элемента, а также в границах участка есть возможность создания других узловых точек. Конечно-элементной, моделью деформируемого тела будет являться совокупность взаимосвязей КЭ и узлов, а модель охватывающая область конкретного исследуемого объекта принято называть дискретной моделью.

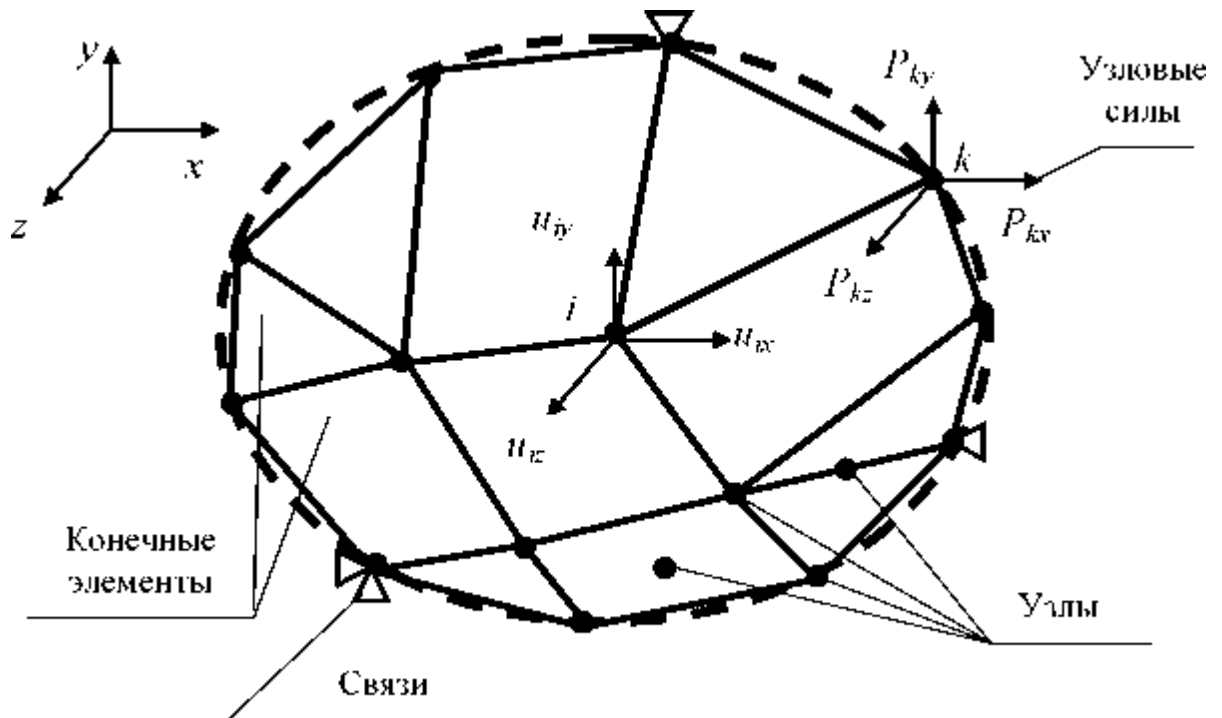


Рисунок 4.1 – Конечный элемент

Исходя из типа и вида напряженно-деформированного состояния, а также формы тела исследуемого объекта выбирают тип и форму конечного элемента.

Стержневой КЭ в большинстве случаев применяют для решения задач при одноосном моделировании НДС на изгиб и кручение. Когда задача касается плоского напряженного или плоского деформированного состояния разумно будет применение плоского двумерного конечного элемента. Если необходимо провести анализ объемного напряженного состояния, в таких случаях как исследование призмы, тетраэдра или шестигранника то рекомендуют использовать объемный трехмерный конечный элемент. Форма кольца в большинстве случаев применяется при осесимметричном НДС. Применение плоского конечного элемента лучше всего подходит для расчета НДС оболочек и пластин, также возможно применение оболочечного конечного элемента. С целью более точного отображения НДС, а также в зонах, где ожидается большая концентрация напряжений, рекомендуется применять более мелкие конечные элементы с масштабированием сетки.

В программной среде ANSYS пользователю предлагаются различные свойства каждого из элементов. Если стоит задача произвести расчет стержневого ферменного конечного элемента, то важным критерием расчета будет площадь поперечного сечения, расчет будет производиться по методу троса, однако не стоит забывать, что данный элемент будет работать только на растяжение и обязательно указать это в свойствах расчета НДС. Важной особенностью, от которой зависит получаемый результат при расчетах плоских, изгибаемых и оболочечных конечных элементов является их толщина и вид НДС – плоское напряженное, осесимметричное или плоское деформированное. Все элементы и узлы после разбивки нумеруются глобально во всей модели, так и локально внутри каждого из элементов, если это необходимо пользователю. Общая нумерация узлов должна быть понятна и не трудоемка, для того чтобы не усложнять дальнейшие расчеты, поэтому рекомендуется придерживаться известных алгоритмов оптимизации. Не стоит забывать и о взаимосвязи между общими номерами узлов и массивом связей всех элементов, между общими и местными номерами узлов.

Для качественного расчета физических величин в теле необходимо указывать и задавать физико-механические характеристики исследуемого объекта. Задачи, связанные с деформированием тела потребуют величины значения коэффициент Пуассона и модуля упругости, а для пластического течения потребуется введение диаграмм деформирования, которые в последующем подвергнутся аппроксимации мультилинейными и билинейными кривыми. Введение ряда температур и коэффициента теплового расширения необходимо, если тело подвергается неравномерному нагреву. Если решаемая задача является динамической, то не следует забывать о коэффициенте вязкого демпфирования и плотности материала, из которого изготовлено тело.

При решении стационарных задач теплопроводности для каждого конкретного материала необходим коэффициент теплопроводности, а для нестационарных дополнительно указывается теплоемкость и плотность, при нелинейных задачах по функциям температуры определяются физические свойства.

Такое состояние тела, при котором оно характеризуется конечным числом независимых параметров, определяемое в базовых узлах конечного элемента является степенью свободы тела. При решении задач на деформирование учитываются величины перемещений этих узлов, включая угловые перемещения, а в задачах теплопроводности степень свободы характеризует температуру отдельных узлов [105-110].

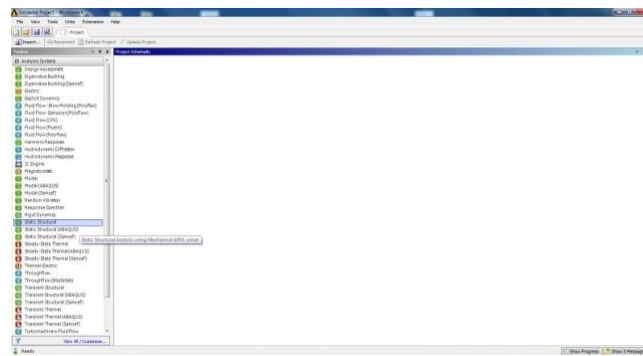
В данной работе расчет методом конечных элементов (МКЭ) производился при помощи программного обеспечения ANSYS.

4.2 Методика расчета напряженно - деформированного состояния зубообрабатывающих фрез

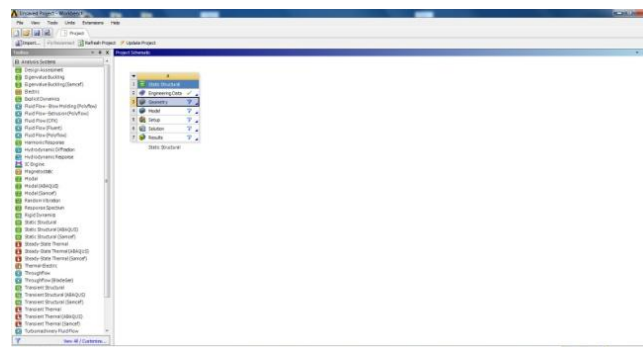
По результатам имитационного моделирования проведенного в программе Компас – 3D и полученным фрагментам площадей сечения срезаемого слоя для

стандартной червячной фрезы, сборной червячной фрезы с тангенциально расположенными режущими элементами и сборной червячной фрезы с групповой схемой резания были произведены расчеты напряженно – деформированного состояния (НДС) для режущих элементов, с использованием программного пакета ANSYS.

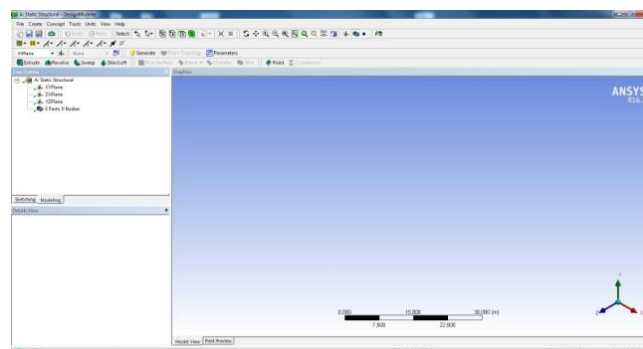
Для примера произведем расчет НДС для зуба стандартной червячной фрезы $m=14$ изготовленного по ГОСТ 9324 – 80.



Для расчета НДС необходимо выбрать вкладку Static Structural.

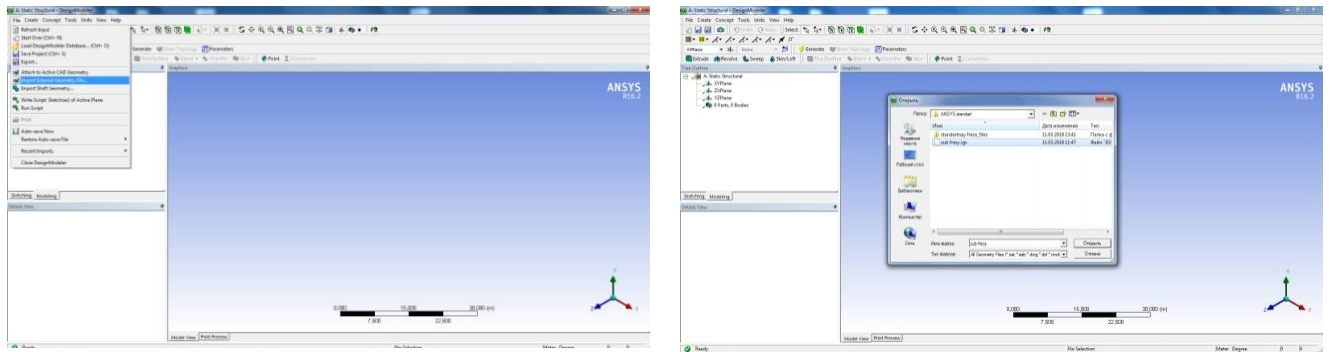


Далее необходимо создать или импортировать геометрическую фигуру, для которой будет производиться расчет, выбирается раздел Geometry.

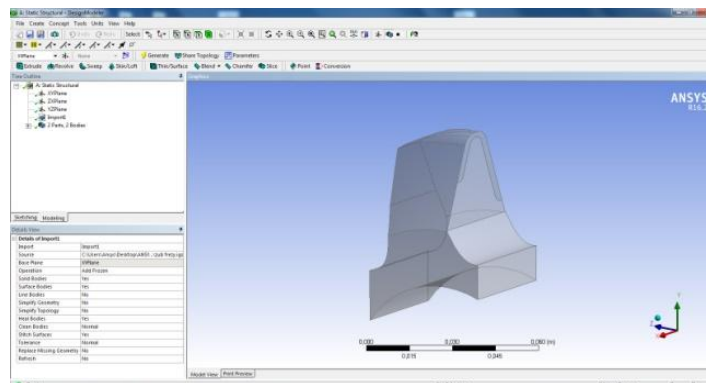


После чего открывается окно подпрограммы DesignModeler, в которую создается или импортируется модель. В нашем случае производится импорт

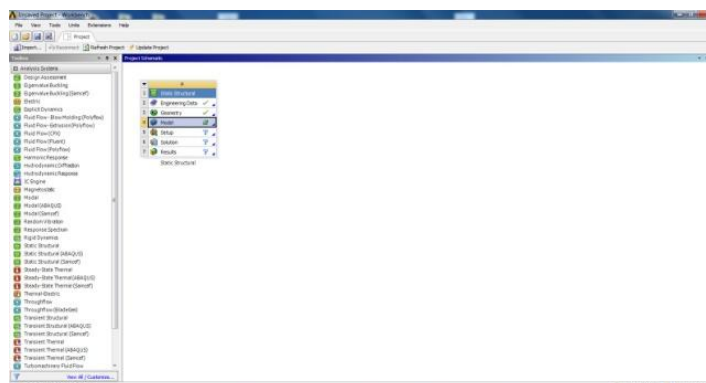
модели при помощи команды Import External Geometry File.



Файл модели предварительно создан в программе Компас – 3D с заранее очерченной площадью сечения срезаемого слоя, полученного в результате имитационного моделирования.

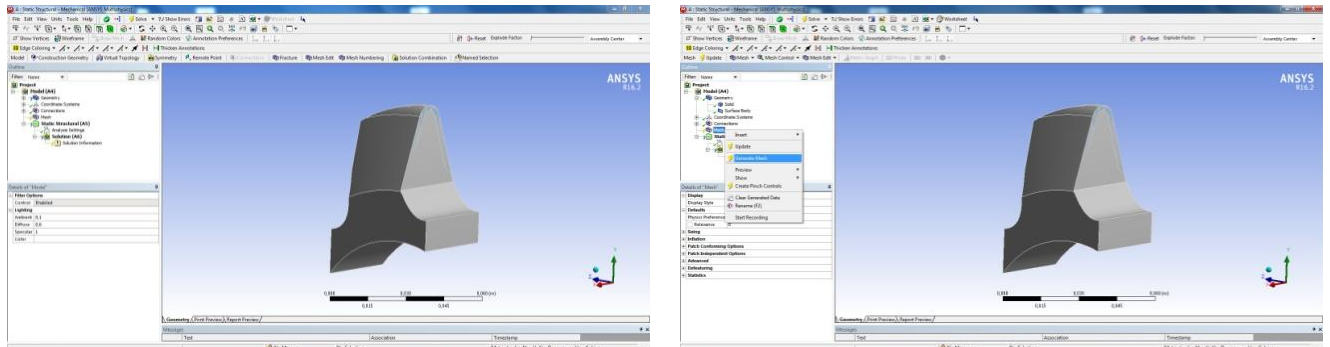


Для выполнения команды необходимо произвести генерацию модели при помощи команды Generate. По окончании необходимо окно подпрограммы DesignModeler закрыть и вернуться на начальный экран. Далее необходимо произвести задание граничных условий во вкладке Model.



В данном случае происходит открытие окна подпрограммы Static Structural – Mechanical, в которой необходимо произвести разбивку модели на отдельные части – конечные элементы. По результатам разбивки формируется сетка из

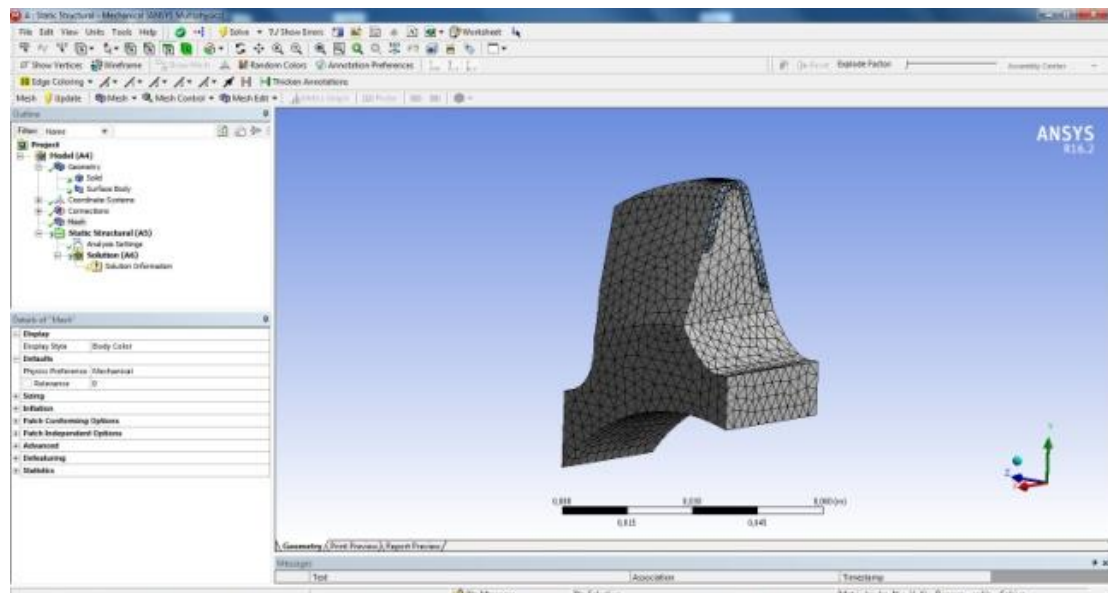
границ элементов. Для выполнения данной операции необходимо выбрать команду Mesh – Generate Mesh.



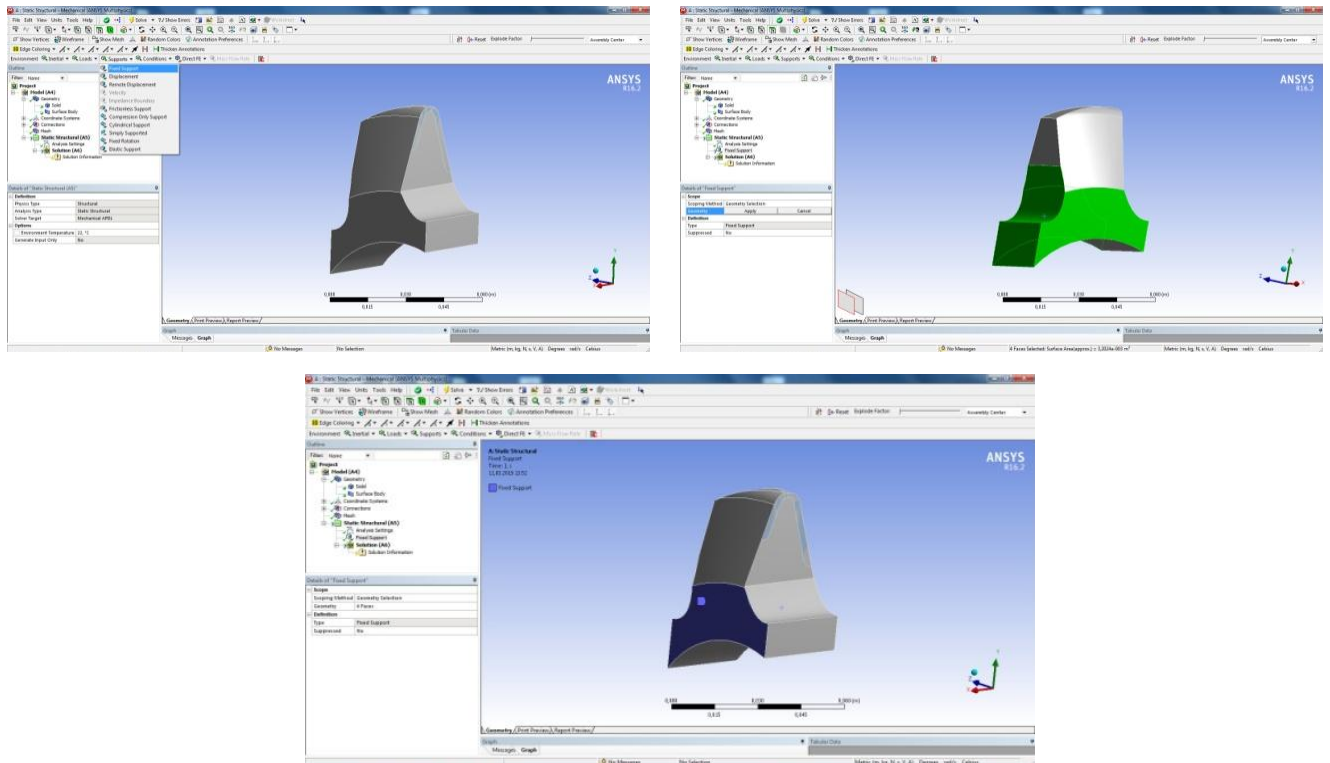
После чего программное обеспечение производит разбивку модели на КЭ. Для нахождения нужной плотности сетки в трехмерной модели реализована возможность уменьшения или ее увеличения при помощи команды Relevance, плотность варьируется от -100 до +100.

Если разбивка тела происходит в автоматическом режиме, то плотность сетки равна нулю.

Именно такой способ нахождения и подбора оптимальной плотности сетки дает возможность решать различные тестовые задачи.



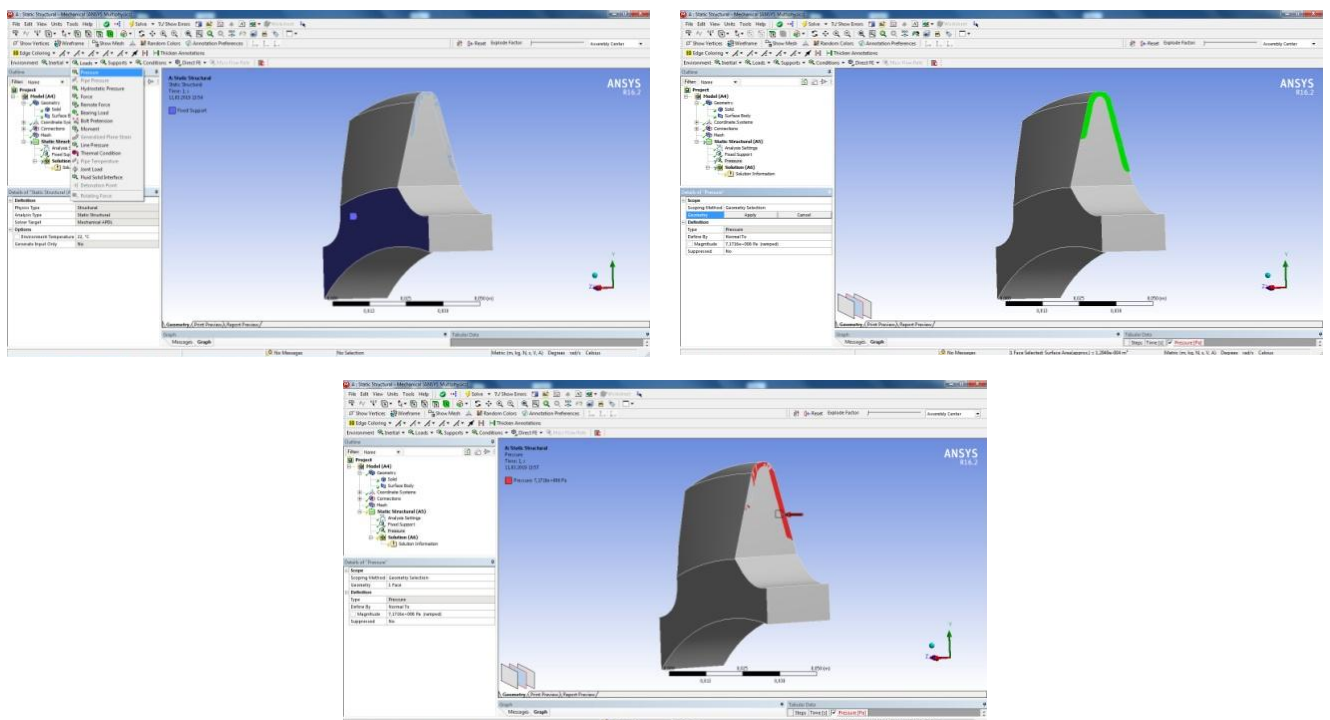
После разбиения модели на КЭ можно приступить к закреплению модели. В разделе Static Structural во вкладке Supports выбирается команда Fixed Support и указываются те поверхности, на которых будет происходить закрепление модели.



Далее происходит приложение нагрузки на площадь сечения среза, полученного в результате имитационного моделирования.

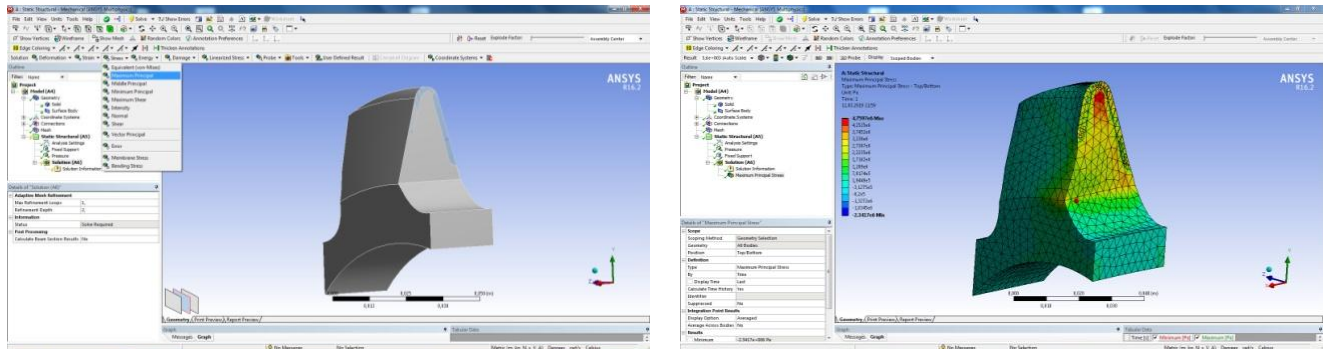
В разделе Static Structural во вкладке Loads выбирается команда Pressure и задается величина нагрузки (в Па).

Для выполнения операции выбирается команда Apply.



Для получения картин изолиний напряжений σ_1 и σ_3 необходимо выбрать

раздел Solution в дереве программы, во вкладке Stress выбрать команду Maximum Principal.



Результаты величин напряжений σ_1 и σ_3 представлены на шкале отображения.

4.3 Результаты исследования напряженно - деформированного состояния

В данном разделе представлены полученные результаты НДС для зуба стандартного червячного зуборезного инструмента и конструкции сборной червячной фрезы с групповым расположением режущих элементов.

На рисунке 4.1 изображены полученные картины главных напряжений σ_1 и σ_3 для зуба стандартной червячной фрезы $m=14$ по ГОСТ 9324 – 80.

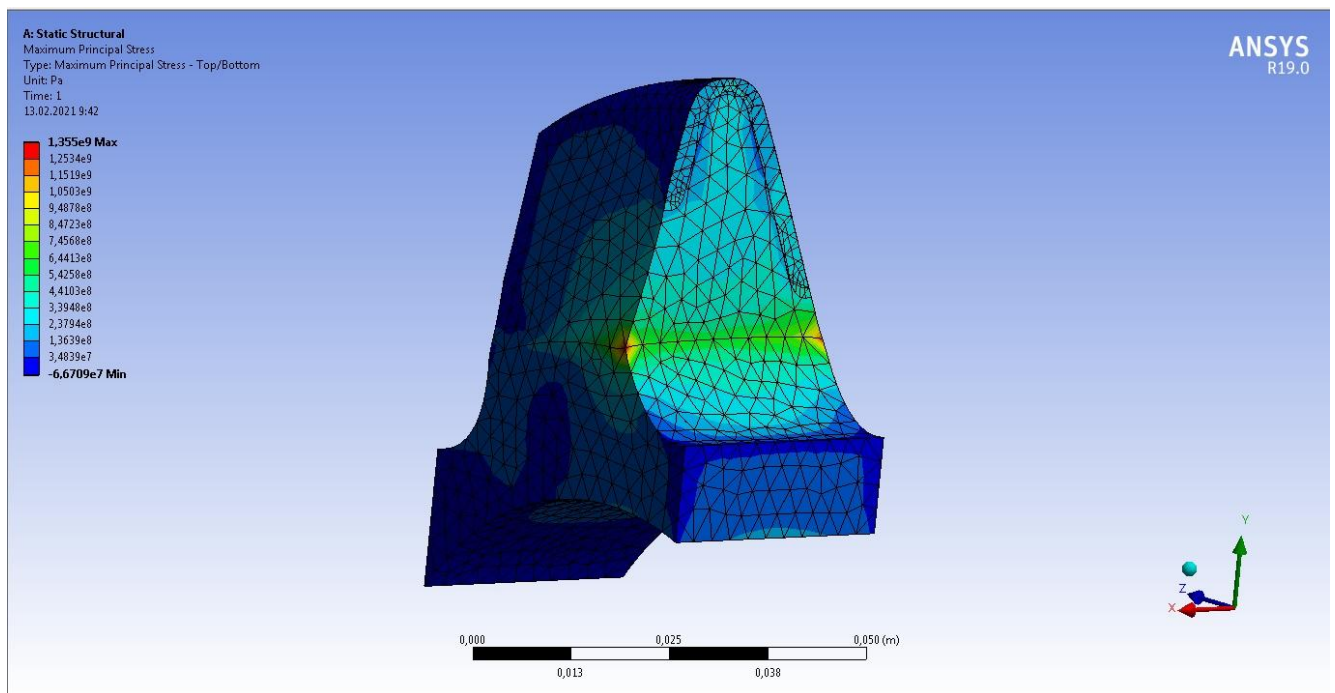


Рисунок 4.1 – Картины распределения главных напряжений в зубе стандартной червячной фрезы $m=14$

Зоны растяжения и зоны сжатия находятся на режущих кромках зуба стандартной червячной фрезы. Наибольшие величины напряжений наблюдаются у зуба стандартной червячной фрезы у основания, это объясняется отгибом инструмента в процессе обработки, т.к. величина плеча будет равняться высоте зуба.

Что касается величин напряжений растяжения в зоне контакта и за зоной контакта, то их значения варьируются от 610 до 800 МПа на высоте зуба от 0 до 30 мм.

На рисунке 4.2 представлены полученные картины главных напряжений σ_1 и σ_3 для эллипсного элемента сборной червячной фрезы с групповым расположением режущих элементов.

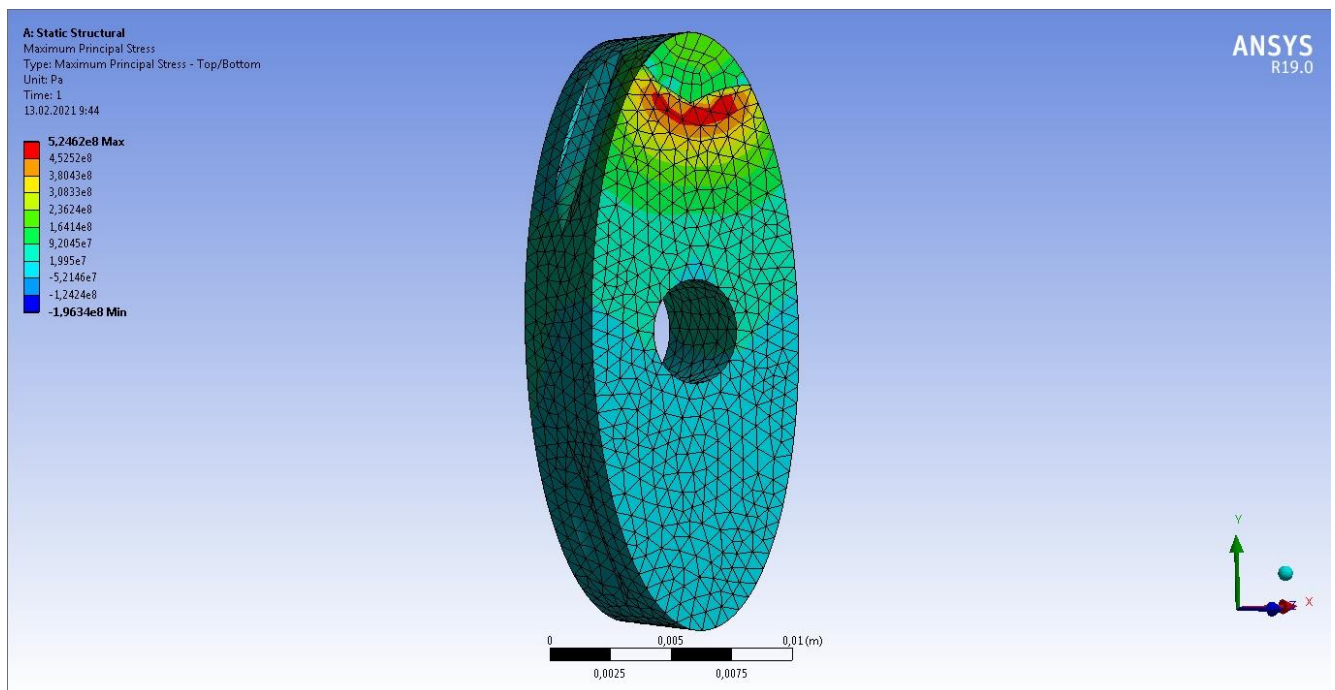


Рисунок 4.2 – Картины распределения главных напряжений в эллипсном режущем элементе сборного инструмента для $m=14$

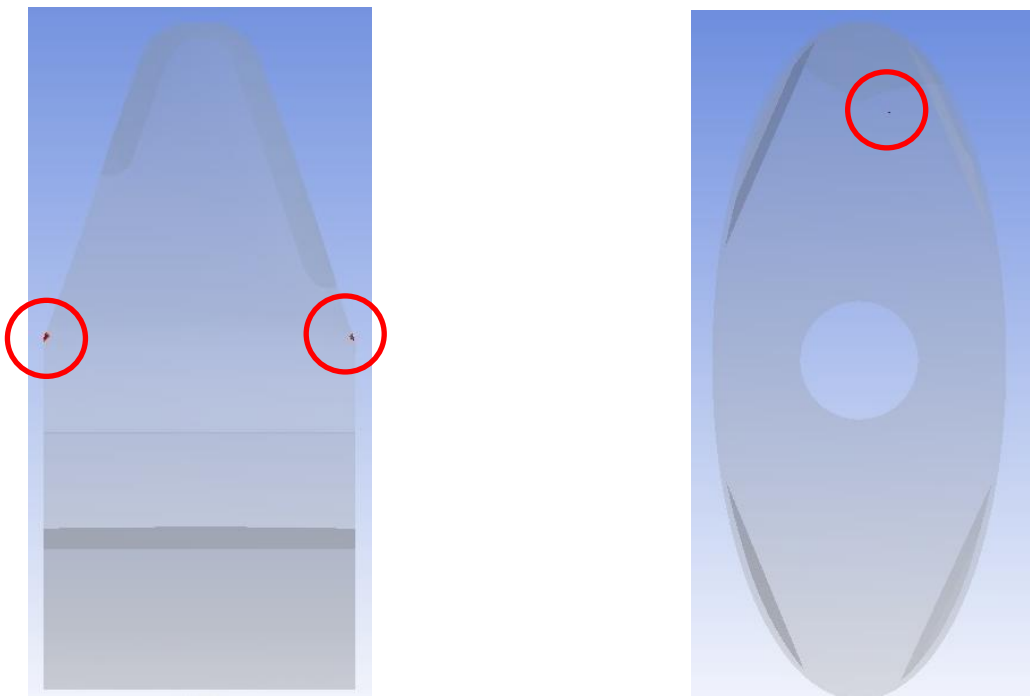
Для эллипсного элемента сборной червячной фрезы максимальные напряжения растяжения достигают своего максимума вне зоны контакта и достигают порядка 500 МПа.

Однако длина распределения этих величин относительно высоты режущего элемента будет всего лишь от 2 до 5 мм (рис 4.3).



Рисунок 4.3 - Зависимости распределения главных напряжений на передней поверхности зуба стандартной и эллипсного режущего элемента сборной червячной фрезы $m=14$

Проведем анализ возникновения этих напряжений по мере внедрения зуба стандартной червячной фрезы и эллипсного режущего элемента сборной червячной фрезы в обрабатываемый материал (рис 4.4).

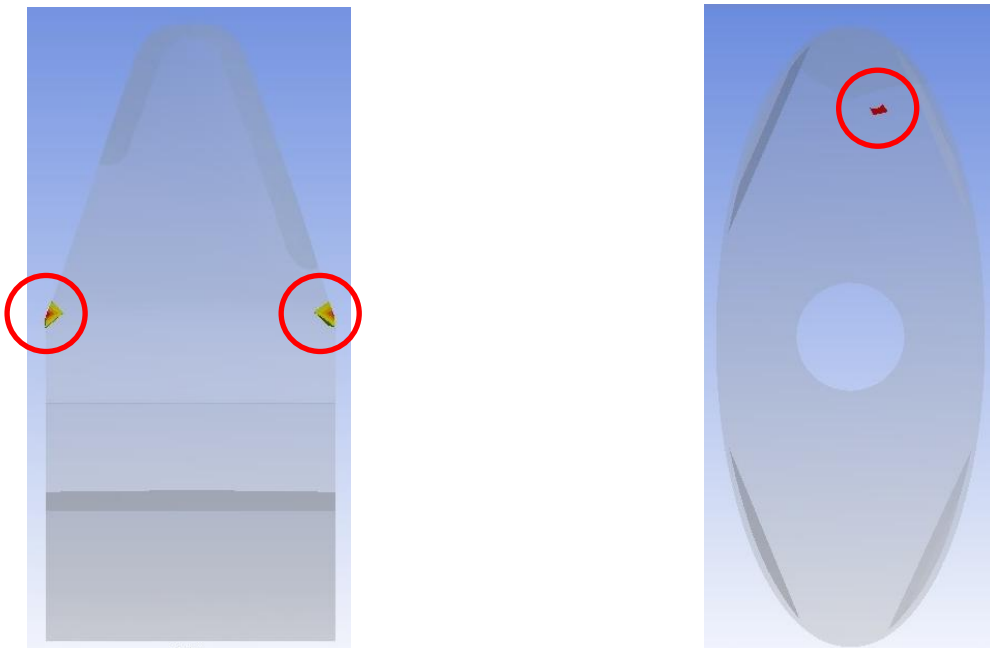


На этапе касания режущими частями (в дальнейшем при анализе рисунка 4.4 будем называть так зуб стандартной червячной фрезы и эллипсный режущий

элемент сборной фрезы с групповой схемой резания) инструмента заготовки обрабатываемого колеса происходит возникновение самых максимальных опасных напряжений растяжения.

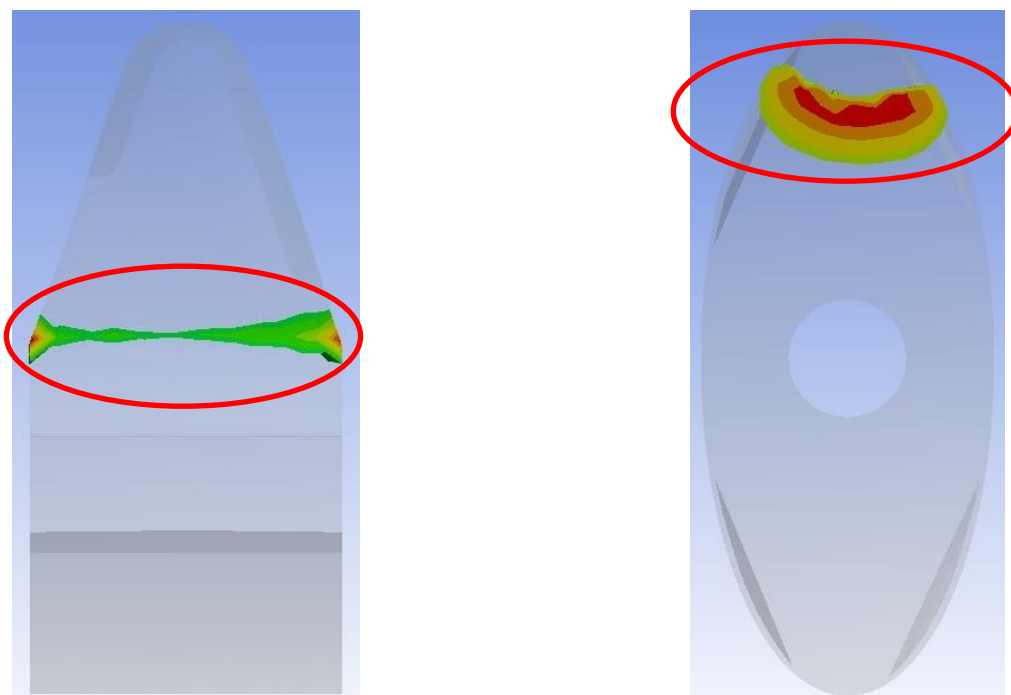
Однако характер их распределения различен. Для зуба стандартной червячной фрезы эти напряжения возникают у основания зуба, что будет способствовать некоторому отгибу инструмента в процессе последующего внедрения в заготовку.

А на эллипсном элементе эти напряжения возникают непосредственно за пятном контакта.

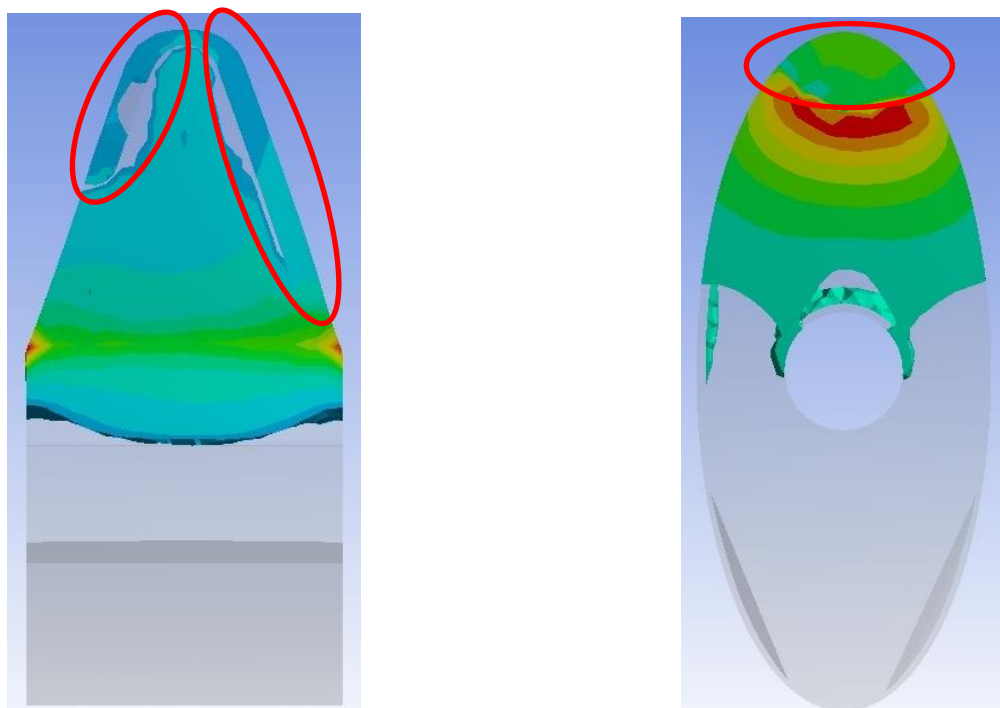


При дальнейшем внедрении режущих частей инструментов в заготовку происходит волнообразное распределение напряжений растяжения относительно очагов зарождения первоначальных напряжений в момент касания.

Однако характер их распределения также различен – для зуба стандартной червячной фрезы напряжения продолжают возникать у основания зуба, а для эллипсного элемента сборной червячной фрезы они по-прежнему за пятном контакта.



Последующее внедрение режущих частей инструментов показывает уже не точечный характер распределения напряжений растяжения, а областной (областями). Для зуба стандартной червячной фрезы наблюдается усиление распространения напряжений у основания зуба, а для эллипсного элемента напряжения по-прежнему распространяются за пятном контакта.



На этапе перед выходом режущих частей инструментов из заготовки обрабатываемого зубчатого колеса происходит полная загрузка передней

поверхности режущих частей согласно площадям срезаемых слоев, установленных в главе 3.

Стоит отметить, что величины напряжений в зоне контакта для зуба стандартной червячной фрезы будут равняться 300 МПа и 480 МПа для эллипсного элемента.

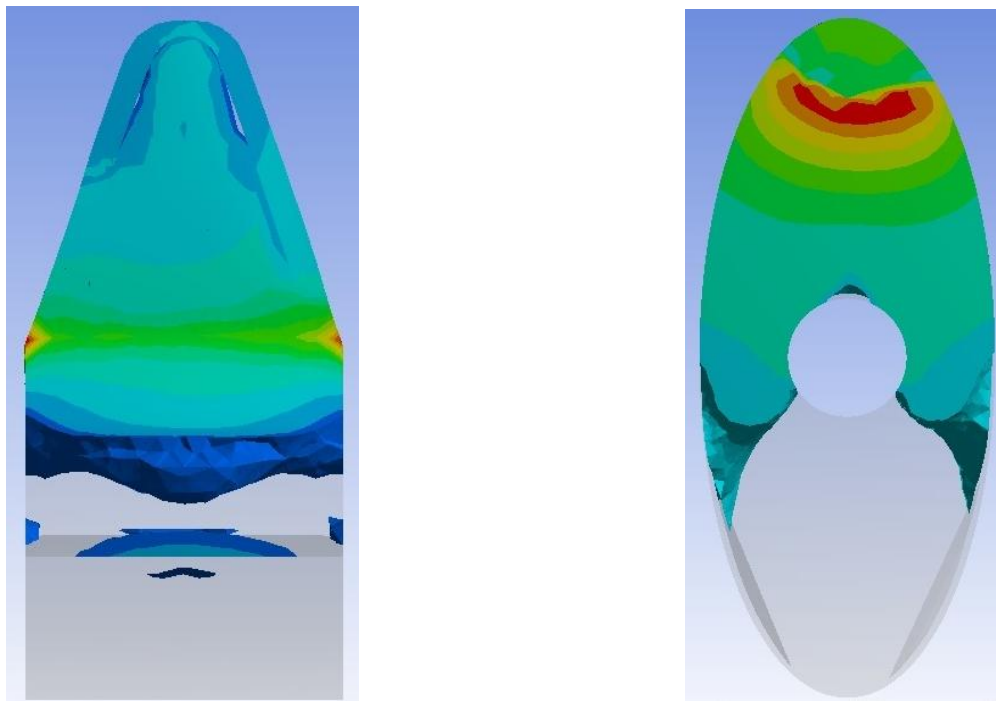
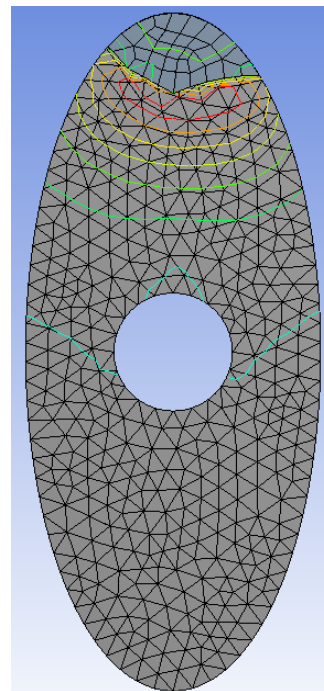
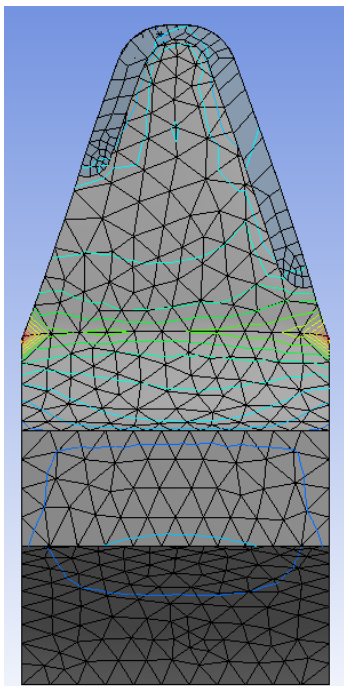


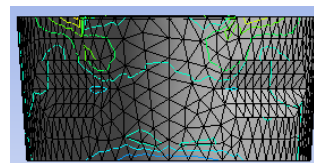
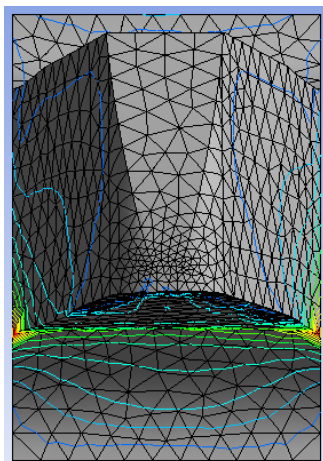
Рисунок 4.4 – Анализ возникновения напряжений растяжения в зубе стандартной червячной фрезы и эллипсном режущем элементе сборной червячной фрезы от момента врезания до выхода из заготовки обрабатываемого колеса

На заключительном этапе в момент выхода режущих частей из обрабатываемой заготовки зубчатого колеса можно наблюдать суммарные картины напряжений растяжения для зуба стандартной червячной фрезы и эллипсного элемента для сборной червячной фрезы с групповой схемой резания.

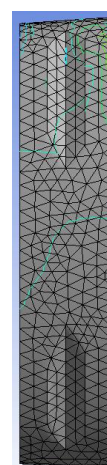
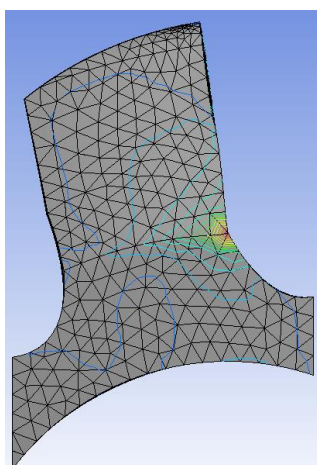
На рисунке 4.5 представлены сравнительные картины изолиний главных напряжений для зуба стандартной червячной фрезы и эллипсного элемента из групповой схемы резания сборной червячной фрезы.



Вид спереди



Вид сверху



Вид сбоку

Рисунок 4.5 – Картины изолиний напряжений растяжения для зуба стандартной и эллипсного элемента сборной червячной фрезы

Исходя из полученных результатов НДС можно сделать вывод, что благодаря реализации групповой схемы резания происходит последовательное срезание отдельными режущими элементами, расположенными как радиально, так и тангенциально, каждый срезает свои части обрабатываемого материала зубчатого колеса. Также применение эллипсной пластины с увеличенным углом ε при вершине по сравнению с зубом стандартной червячной фрезы повышает ее прочность, а, следовательно, снижаются величины опасных напряжений σ_1 в 1,5-2 раза. Таким образом, применение групповой схемы зубофрезерования оказывает влияние на уменьшение значений главных напряжений в СРТП.

4.4 Расчет окружной силы резания, скорости резания, числа оборотов инструмента, минутной подачи, основного времени обработки для зубообрабатывающего червячного инструмента

Произведем расчет окружной силы резания для стандартной червячной фрезы [111].

Расчет окружной силы P (Н), создающей крутящий момент на фрезе, можно вычислить по формуле:

$$P = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot N_z}{v} \text{ (Н)} \quad (4.1)$$

Из формулы 4.1 остается неизвестным N_z , что будет являться эффективной мощностью при зубофрезеровании, тогда:

$$N_z = \frac{0,124 \cdot s^{0.9} \cdot m^{1.7}}{D_u} \text{ (кВт)} \quad (4.2)$$

где

s – подача (мм/об)

m – модуль (мм)

D_u – наружный диаметр фрезы (мм)

v – скорость резания

Отсюда:

$$N_9 = \frac{0,124 \cdot 0,6^{0,9} \cdot 14^{1,7}}{190} = 0,036595 (\text{кВт}) \quad (4.3)$$

$$P = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 0,036595}{50} = 43,91 (\text{Н}) \quad (4.4)$$

Аналогичным образом произведем расчет для конструкции сборной червячной фрезы с группой схемой резания: значения модуля будут такими же, как и стандартной червячной фрезы, тогда

$$N_9 = \frac{0,124 \cdot 0,6^{0,9} \cdot 14^{1,7}}{276} = 0,025192 (\text{кВт}) \quad (4.5)$$

$$P = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 0,025192}{50} = 30,23 (\text{Н}) \quad (4.6)$$

В результате приведенных расчетов для стандартной червячной фрезы и сборной червячной фрезы при одинаковых величинах скорости резания, модуля инструмента и диаметрального размера инструмента можно сделать вывод, что величина окружной силы резания для стандартной червячной фрезы будет больше в 1,5 раза по сравнению со сборной червячной фрезой.

Проанализируем возможное влияние значений окружной силы от скорости резания при черновом зубофрезеровании крупномодульных зубчатых колес. В качестве примера рассмотрим стандартную червячную фрезу из материала Р6М5 и эллипсный элемент сборной червячной фрезы из материала ВК8. Для удобства вычислений результаты занесем в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Данные для графика зависимости окружной силы от скорости резания

	Стандартная червячная фреза	Эллипсный элемент
S (мм)	0,6	0,6
m (мм)	14	14
D_н (мм)	190	276
N₉ (кВт)	0,036595	0,025192
v (м/мин)	P(Н)	P(Н)

Продолжение таблицы 4.1

0	-	-
10	219,57006	151,1533022
20	109,78503	75,57665109
30	73,19002001	50,38443406
40	54,892515	37,78832555
50	43,914012	30,23066044
60	36,59501	25,19221703
70	31,36715143	21,59332888
80	27,4462575	18,89416277
90	24,39667334	16,79481135
100	21,957006	15,11533022
110	19,96091455	13,74120929
120	18,297505	12,59610852
130	16,89000462	11,62717709
140	15,68357572	10,79666444
150	14,638004	10,07688681
160	13,72312875	9,447081387
170	12,91588588	8,891370717
180	12,19833667	8,397405677
190	11,55631895	7,955436957
200	10,978503	7,557665109

По полученным результатам, представленным в таблице 4.1, произведем построение графика зависимости окружной силы резания от скорости резания (рис.4.6).

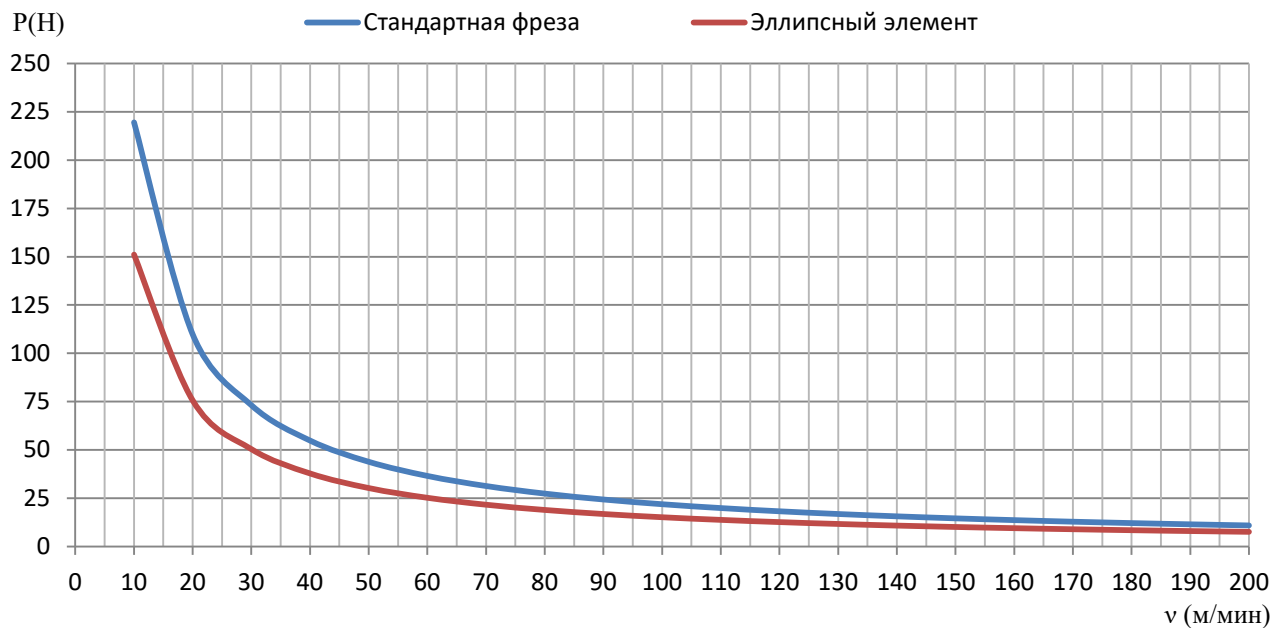


Рисунок 4.6 – График зависимости окружной силы резания от скорости резания

Полученные зависимости наглядно показывают снижение величины окружной силы у эллипсного элемента по сравнению с зубом стандартной червячной фрезы. Также не стоит забывать и о физико-механических характеристиках инструментальных материалов, т.к. стандартный зуб червячной фрезы, изготовленный из материала Р6М5 уже не способен работать на скоростях свыше 80 м/мин. А эллипсный элемент сборной червячной фрезы из материала ВК8 способен вести обработку в диапазоне скоростей от 150 до 200 м/мин. Тем самым получается, что при скорости резания 80 м/мин стандартной червячной фрезой величина окружной силы резания будет составлять 27,4 Н, а при скорости резания 200 м/мин эллипсным элементом 7,55 Н.

Произведем выбор оптимальной скорости резания для стандартной и сборной червячной фрезы. Как известно выбор подачи и скорости резания рекомендовано выбирать из соображений модуля нарезаемого колеса, режущего и обрабатываемого материала, жесткости инструмента и оборудования. В нашем же случае для стандартной червячной фрезы при назначении скорости резания воспользуемся рекомендациями из справочника технолога-машиностроителя. В нем рекомендовано назначать скорости резания для стандартных фрез из материала Р6М5 равную 50-80 м/мин. А для инструментального твердого сплава

ВК8 скорость резания можно брать до 200 м\мин. Исходя, из исходных данных произведем расчет числа оборотов стандартной и сборной червячной фрезы.

Число оборотов n для стандартной червячной фрезы:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = 83,8 \text{ об} \setminus \text{мин} \quad (4.7)$$

Число оборотов n для сборной червячной фрезы:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = 173,08 \text{ об} \setminus \text{мин} \quad (4.8)$$

Исходя из рекомендуемой подачи на зуб S_z (рекомендуемая подача на зуб для Р6М5 стандартной червячной фрезы выбиралась 0,06-0,07 мм; для ВК8 сборной червячной фрезы выбиралась 0,12-0,18 мм) для каждого из инструментов определим величину минутной подачи для стандартной и сборной червячной фрезы.

Минутная подача для стандартной червячной фрезы:

$$S_m = 0,06 \cdot 10 \cdot 83,8 = 50,28 \text{ мм} \setminus \text{мин} \quad (4.9)$$

Минутная подача для сборной червячной фрезы:

$$S_m = 0,12 \cdot 5 \cdot 173,08 = 103,84 \text{ мм} \setminus \text{мин} \quad (4.10)$$

Результаты приведенных расчетов для наглядности отобразим в виде рисунка 4,7.

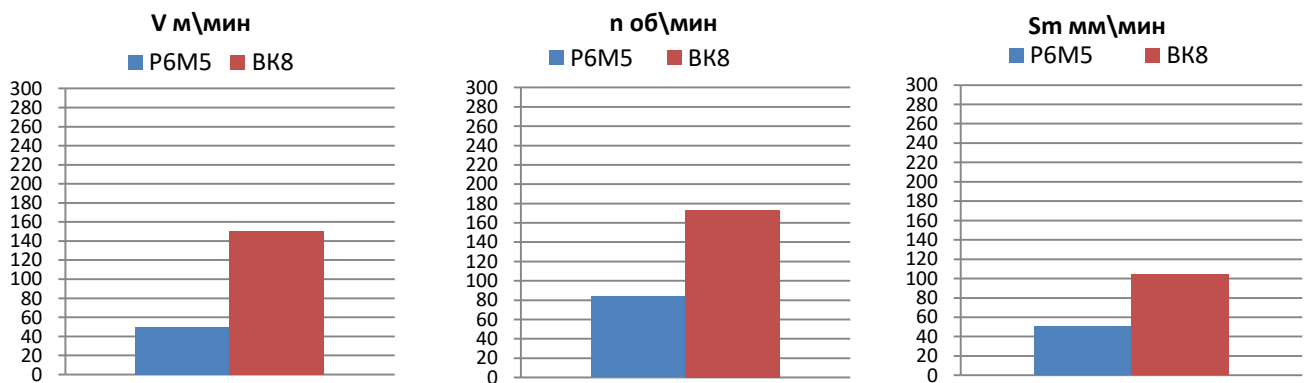


Рисунок 4.7 – Сравнительных график показателей эффективности механической обработки

На основании полученных данных произведем расчет основного времени на обработку зубчатого колеса для стандартной червячной фрезы и сборной червячной фрезы с групповым расположением сменных режущих твердосплавных пластин.

За основу расчетов воспользуемся формулой:

$$T_o = \frac{L \cdot i \cdot z}{n \cdot S_o \cdot q} \quad (4.11)$$

где, для прямозубых колес

$$L = B + l_1 + l_2 \quad (4.12)$$

где, L – расчетная длина рабочего хода инструмента (мм)

l_1 – величина врезания инструмента (мм)

l_2 – величина перебега инструмента (мм)

B – расчетная ширина обрабатываемой поверхности (мм)

i – число проходов инструмента

S_o – подача на оборот шпинделя (мм/об)

q – число одновременно обрабатываемых деталей

Произведем расчет основного времени для стандартной червячной фрезы:

$$T_o = \frac{L \cdot i \cdot z}{n \cdot S_o \cdot q} = \frac{(110 + 95 + 95) \cdot 1 \cdot 32}{83 \cdot 0,6 \cdot 1} = 190,912(\text{мин}) \quad (4.13)$$

Произведем расчет основного времени для сборной червячной фрезы:

$$T_o = \frac{L \cdot i \cdot z}{n \cdot S_o \cdot q} = \frac{(110 + 138 + 138) \cdot 1 \cdot 32}{173 \cdot 0,6 \cdot 1} = 118,941(\text{мин}) \quad (4.14)$$

По полученным данным произведем расчет зависимости скорости резания от основного времени обработки детали для каждого из инструментов, исходные данные занесем в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Данные для графика зависимости скорости резания от основного времени.

То (мин)	Р6М5	190	173	159	146	136	125	119													
	ВК8	356	324	297	274	254	237	223	209	198	187	178	169	162	155	148	142	137	132	127	123
V (м/мин)		50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
																					150

По результатам, представленным в таблице 4.2, построим график зависимости скорости резания от основного времени обработки детали для каждого из инструментов (рис.4.8).

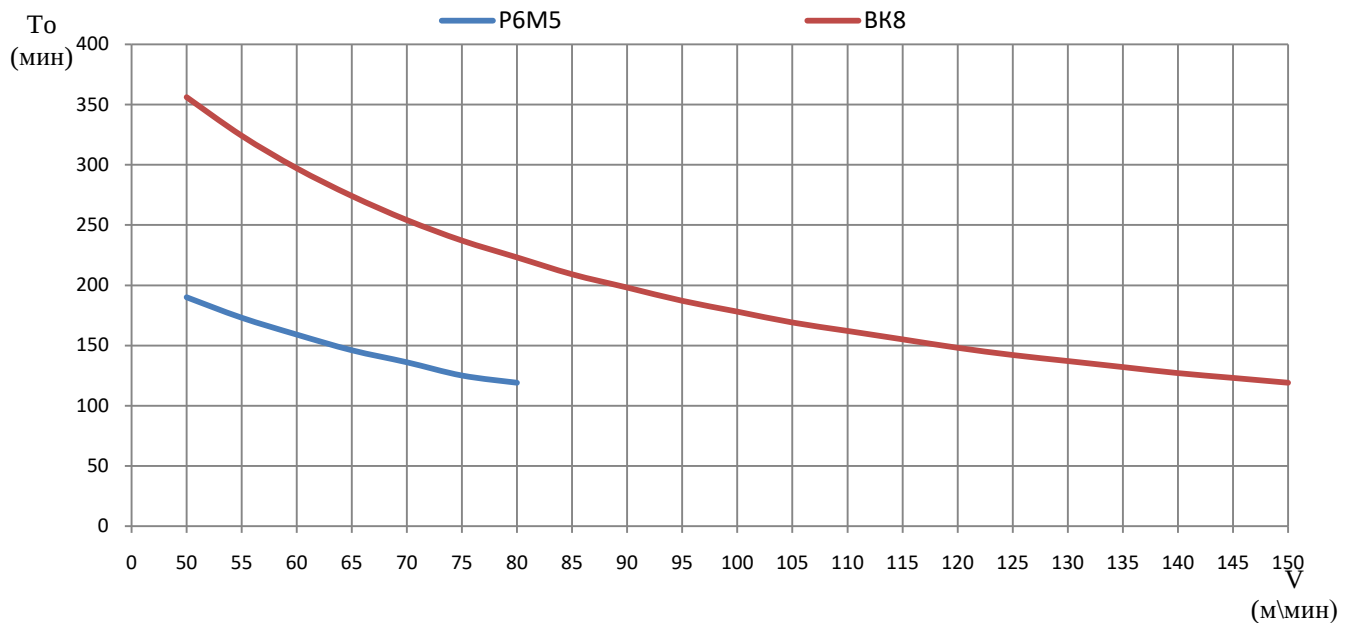


Рисунок 4.8 – График зависимости скорости резания от основного времени обработки

График зависимости скорости резания от основного времени обработки наглядно показывает, что снижение времени на обработку одной детали для сборной червячной фрезы будет наблюдаться от 90 м/мин и выше, по сравнению со стандартной червячной фрезой. При скорости резания 150 м/мин сборная червячная фреза будет обрабатывать зубчатое колесо на 71 минуту быстрее, чем стандартная червячная фреза.

В результате применения сборного инструмента с реализованной групповой схемой резания обеспечивается повышение эффективности (производительности) механической обработки в части увеличения скорости резания, подачи и как следствие производительности труда на 20-25%, а также снижение величин окружных сил резания в 3-4 раз, обеспечивающее увеличенный период стойкости режущих элементов при групповом расположении режущих элементов в конструкции сборной червячной фрезы.

4.5 Выводы

1. Установлено методом конечных элементов (с помощью ПО ANSYS) напряженно - деформированное состояние режущих зубьев стандартной

червячной фрезы и эллипсного элемента сборной червячной фрезы с групповой схемой резания, а также получены картины изолиний главных напряжений по передней поверхности зубообрабатывающего инструмента.

2. Величина опасных напряжений растяжений σ_1 в зубе стандартной червячной фрезы в 1,5 – 2 раза выше, чем в конструкции сборной червячной фрезы с групповой схемой резания.

3. Картина изолиний главных напряжений показывает возможность повышения эффективности (производительности) механической обработки зубчатых колес путем повышения скорости резания до 120 м/мин и путем увеличения общей подачи в 1,5 – 2 раза до допустимых значений величин опасных напряжений растяжения в зубе фрезы.

4. Зависимость окружной силы резания от скорости резания позволяет прогнозировать повышение эффективности механической обработки сборным червячным инструментом на основе физико-механических характеристик материала режущей части с обеспечением допустимых силовых характеристик.

ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СБОРНЫХ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ

5.1 Алгоритм расчета и проектирования сборных червячных фрез с СРТП для обработки крупномодульных зубчатых колес

На основе результатов исследования изложенных ранее разработана методика выбора расчета СРТП и процесс проектирования сборных червячных фрез для крупномодульных зубчатых колес.

Суть разработанной методики расчета и проектирования сборных червячных фрез с СРТП заключается в следующем: на основании модуля нарезаемого колеса, режимов обработки, вида обрабатываемого материала и марки твердого сплава СРТП определяются требования, предъявляемые к сборному инструменту. В которых учитываются прочность, возможность увеличения работоспособности инструмента и СРТП, технологические требования к изделию. После всего этого можно приступить непосредственно к созданию сборной червячной фрезы. Исходя, из режимов обработки выбирается вид и расположение режущих элементов в корпусе инструмента.

Геометрические параметры СРТП выбираются в зависимости от модуля нарезаемого колеса с применением современных пакетов лицензионных программ. Соблюдая требования к креплению и базированию СРТП в корпусе инструмента, определяется тип базирования и закрепления.

Габаритные размеры получаемого инструмента следует соблюдать с учетом технического задания и пожеланий предприятия (заказчика). Результаты расчета напряженно - деформированного состояния в СРТП дают возможность определить коэффициент запаса их прочности. Если значение коэффициента запаса прочности получилось меньше заданного, то необходимо внести ряд

изменений в геометрические и конструктивные параметры СРТП и произвести повторный расчет.

В случае успешно решенной задачи при помощи специализированного программного обеспечения производится проектирование конструкции сборной червячной фрезы и СРТП с соблюдением технологичности изготовления. По результатам проектирования оформляются интеллектуальные права на СРТП и инструмент в целом. После чего производится разработка технической документации на изготовление инструмента на предприятии (рис.5.1).

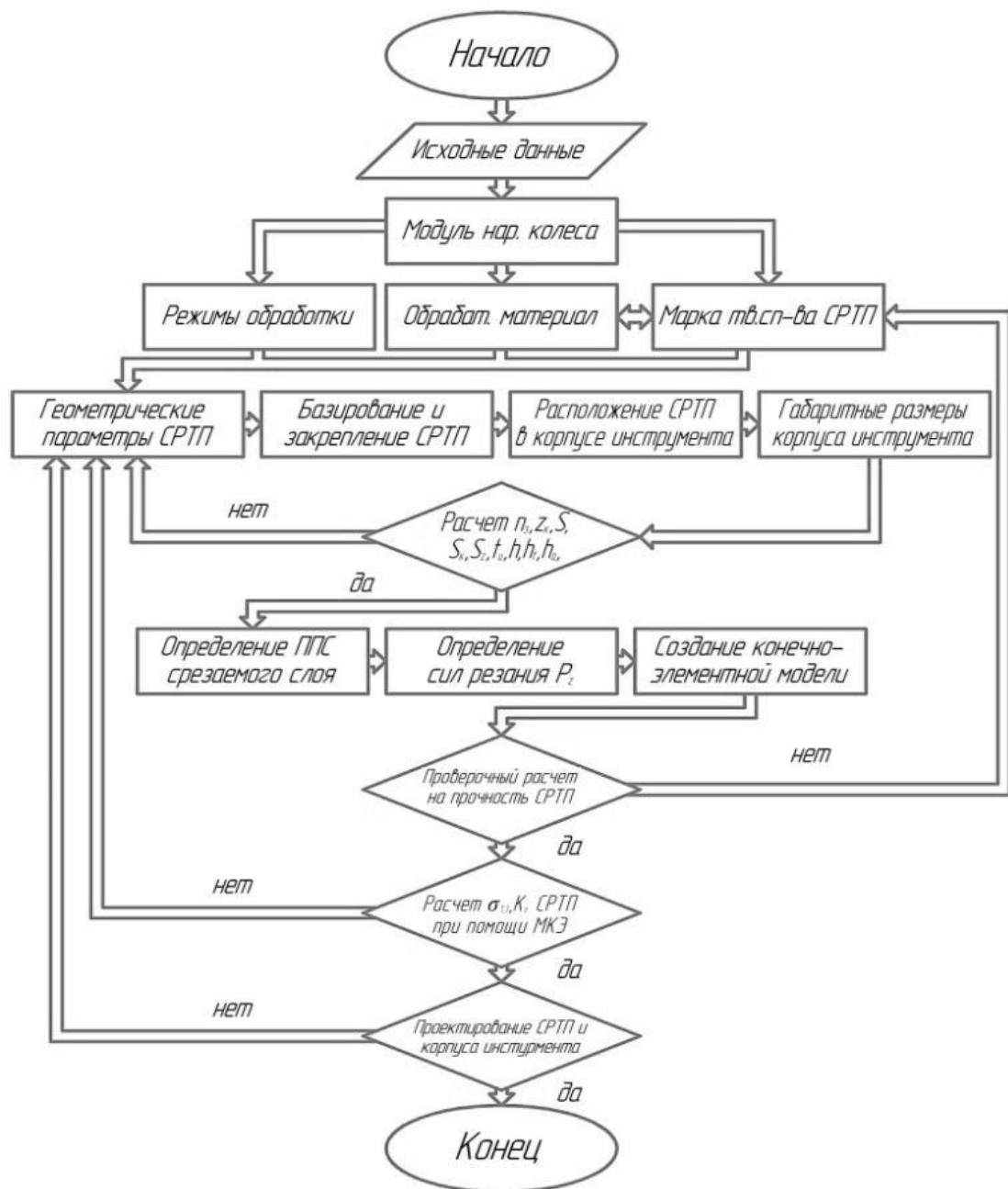


Рисунок 5.1 – Алгоритм расчета и проектирования сборных червячных фрез с СРТП

5.2 Разработанная конструкция сборной червячной фрезы с тангенциальными режущими элементами (схема №1)

На основании разработанной схемы расположения режущих элементов в исходном контуре инструментальной рейки (ИКР) (рис.5.2 – 5.3) была спроектирована конструкция сборной червячной фрезы с тангенциальными режущими элементами в программном продукте Компас – 3D.

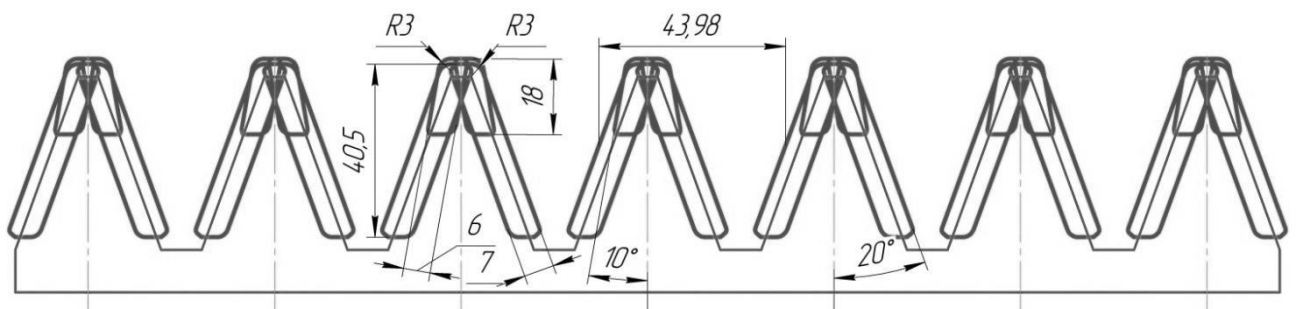


Рисунок 5.2 – Тангенциальное расположения СРТП в исходном контуре инструментальной рейки с различными углами расположения режущих элементов

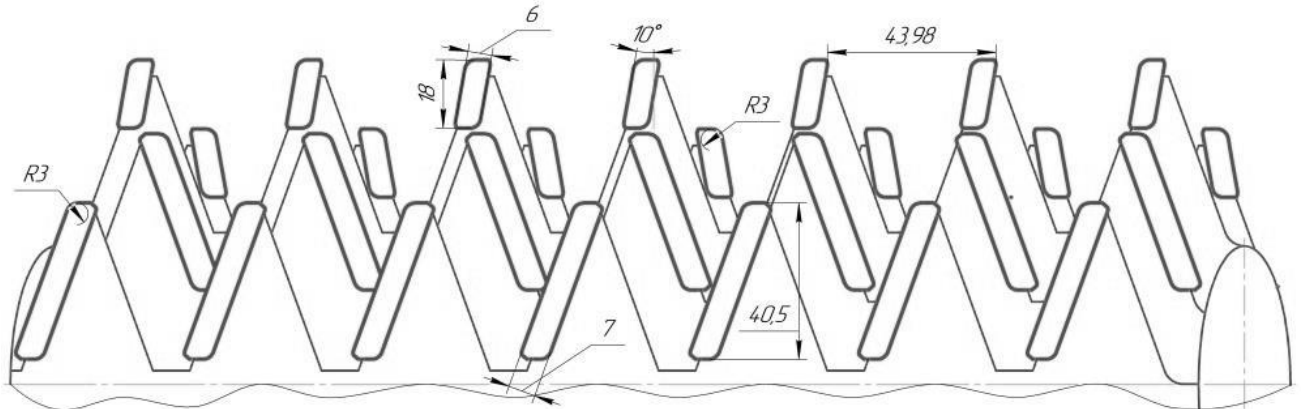
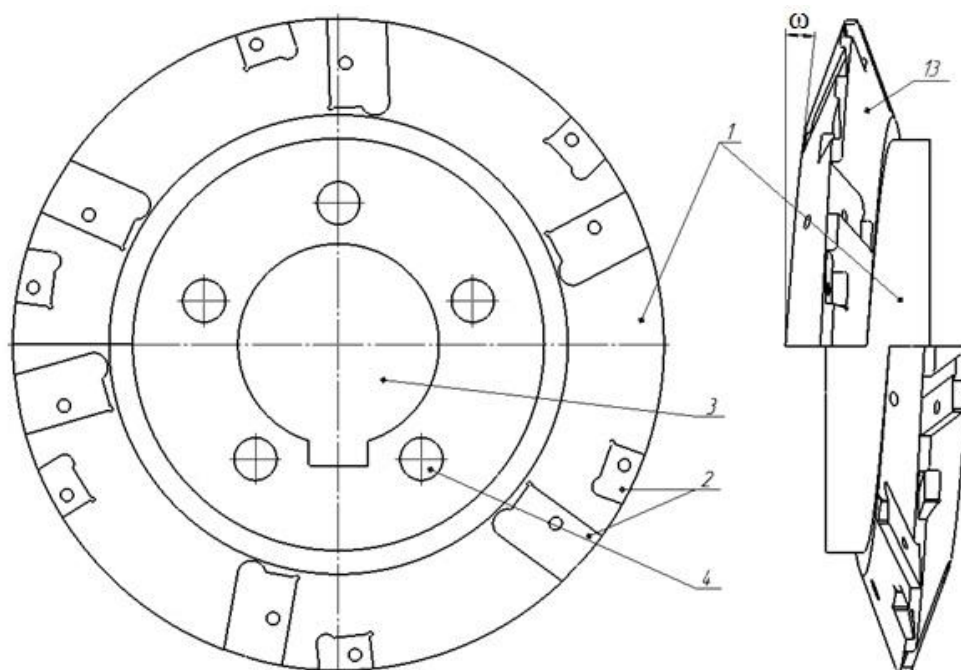


Рисунок 5.3 – Тангенциальное расположения СРТП на инструментальном червяке с различными углами расположения режущих элементов

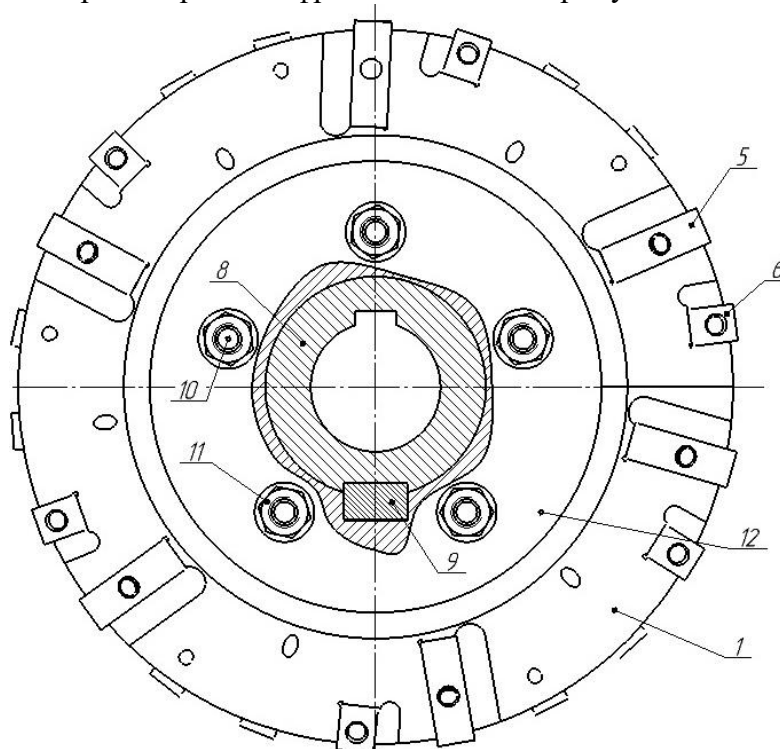
Сборная червячная фреза состоит из отдельных дисков 1, корпус которых образует винтовую поверхность 13, которая имеет определенный угол подъема ω , имеющих тангенциальные пазы 2 с опорными поверхностями для расположения в них режущих элементов, отверстие 3 для расположения втулки со шпоночным пазом, и пять сквозных отверстий 4 для шпилек, на каждом диске закреплены боковые 5 и основные 6 режущие пластины, базирующиеся в угловых пазах при помощи винтов 7. Для исключения возможности проворота дисков корпуса фрезы

во время фрезерования инструмент оснащен втулкой 8 и призматической шпонкой 9 со шпоночным пазом. Диски собираются на втулке и шпонке и стягиваются пятью шпильками 10, на концах которых имеются гайки 11. По краям корпуса имеются две цилиндрические проставки 12 для наилучшего закрепления дисков сборной червячной фрезы (рис.5.4).

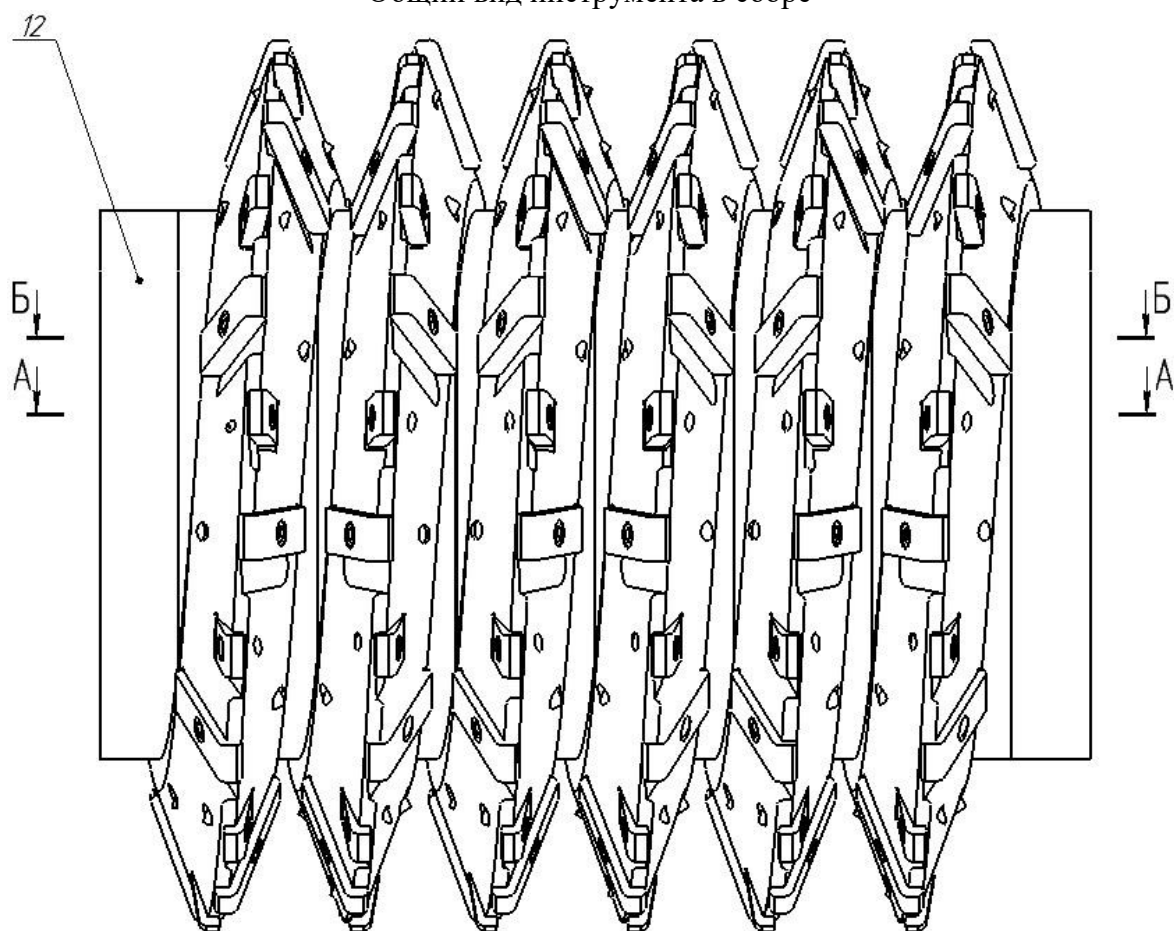
Корпус диска фрезы



Корпус диска сборной червячной фрезы со сменными режущими элементами в сборе

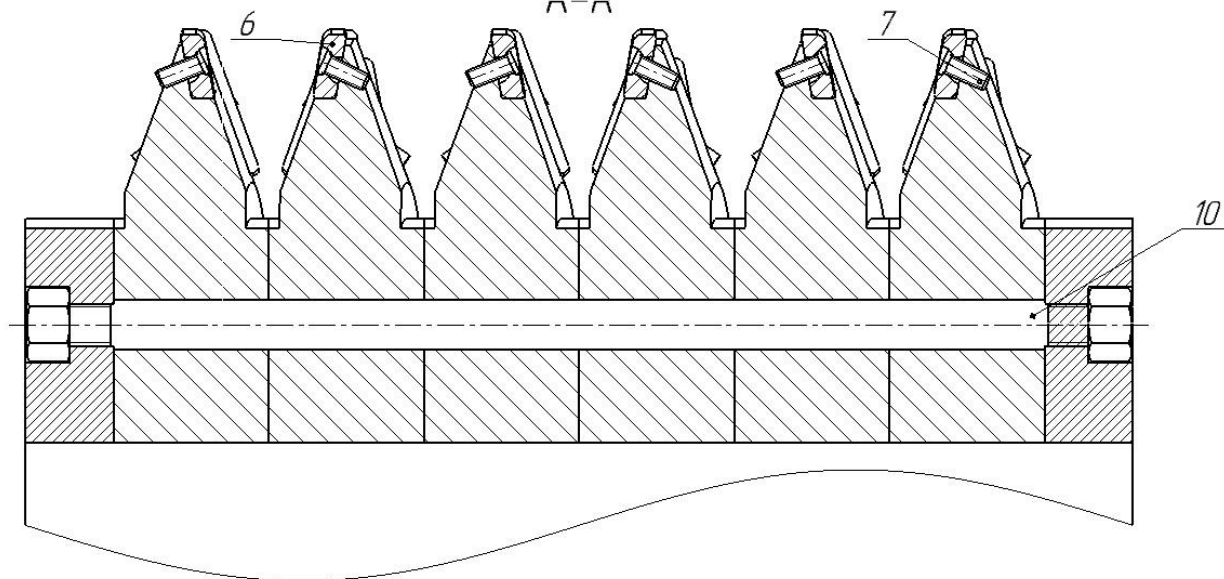


Общий вид инструмента в сборе

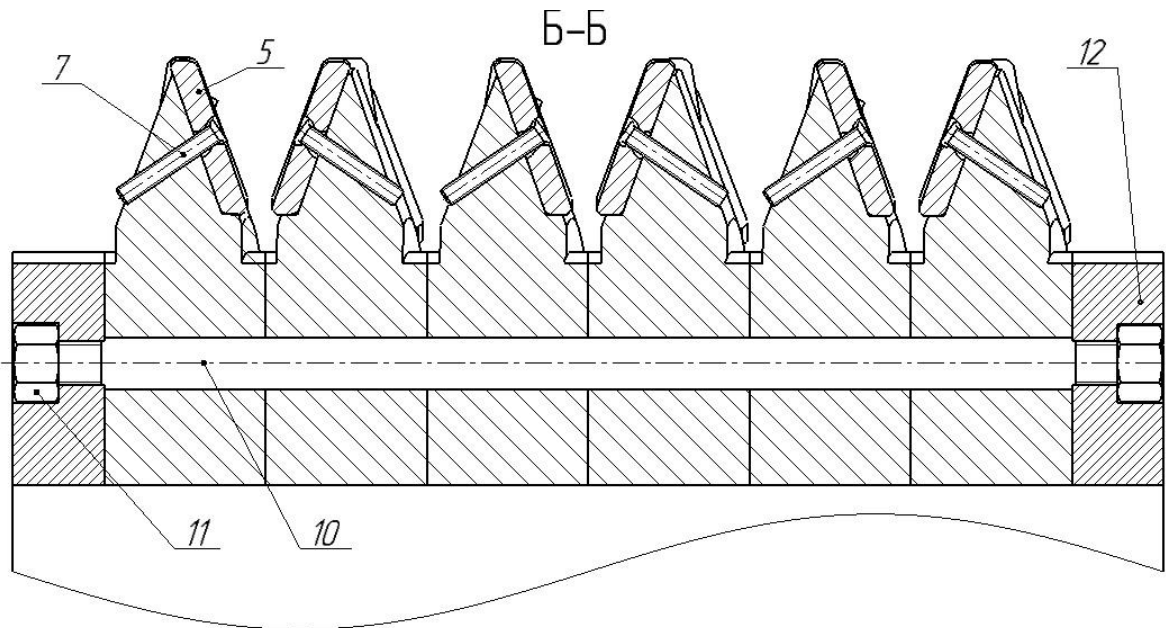


Сечение А-А корпуса сборной червячной фрезы

А-А



Сечение Б-Б корпуса сборной червячной фрезы



3D модель сборной червячной фрезы

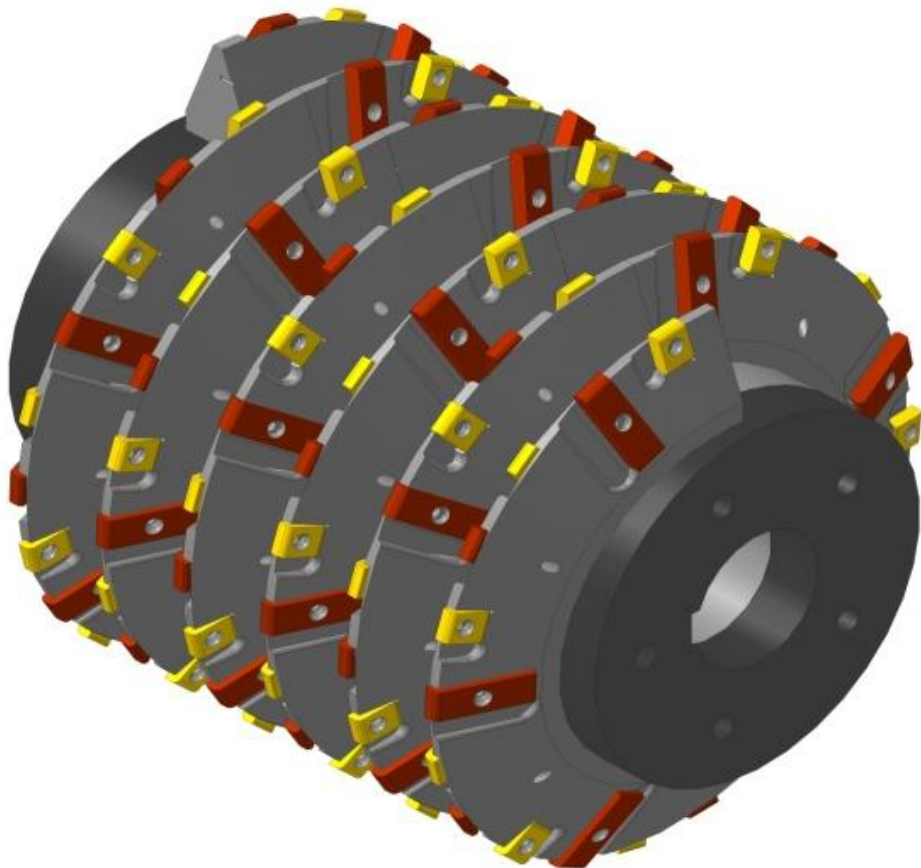


Рисунок 5.4 – Конструкция сборной червячной фрезы с тангенциальными режущими элементами (патент на изобретение № 2680122)

Разработанная сборная червячная фреза, технологична в изготовлении, так как все базирующие поверхности под режущие твердосплавные пластины и шпоночные пазы спроектированы таким образом, что к ним обеспечивается

свободный доступ для финишного шлифования. Вследствие технологичности конструкции инструмента и применению твердосплавных пластин увеличивается работоспособность и надежность сборной червячной фрезы.

По результатам работы оформлены интеллектуальные права на данную конструкцию и получен патент на изобретение № 2680122 [112] (приложение Д).

5.3 Разработанная конструкция сборной червячной фрезы с групповой схемой резания (схема №2)

На основании проведенных исследований и разработанной схемы расположения режущих элементов в ИКР (рис.5.5 – 5.6) была спроектирована конструкция сборной зубообрабатывающей червячной фрезы с групповой схемой резания в программном продукте Компас – 3D.

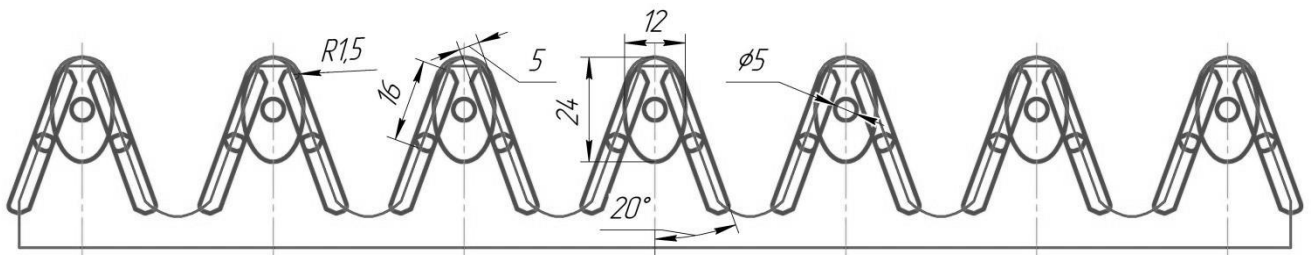


Рисунок 5.5 - Групповое расположение сменных режущих твердосплавных пластин в исходном контуре инструментальной рейке

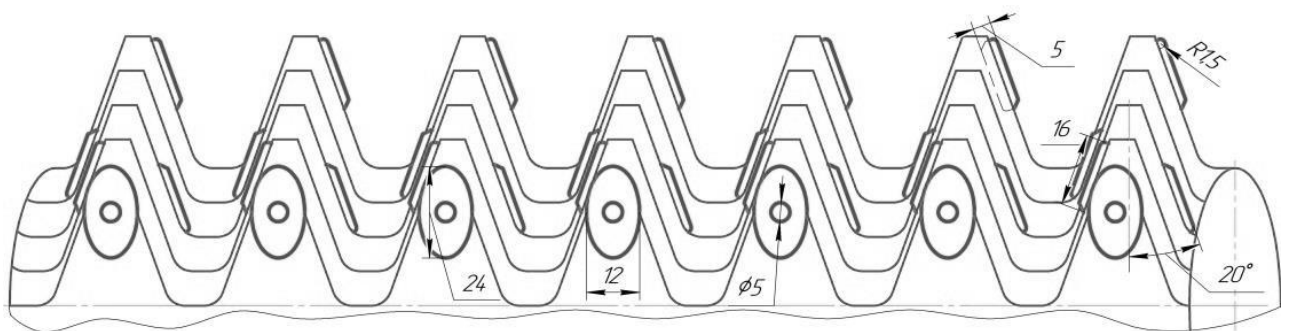


Рисунок 5.6 - Групповое расположение сменных режущих твердосплавных пластин на архимедовом червяке

С целью ускорения процедуры проектирования, а также итоговой проверки по размещению режущих элементов в исходном профиле инструментальной рейки на основании алгоритма (рис.5.1) в программной среде Microsoft Excel было разработано приложение. В приложении реализована возможность автоматизированного расчета (на основании исходных данных) основных параметров зубчатого колеса, сборного червячного инструмента, необходимых данных для имитационного моделирования, а также на основании импортированных координат из программного продукта Компас-3D производится отрисовка расположения режущих элементов в ИКР, с целью контроля и правильности установки (рис.5.7)

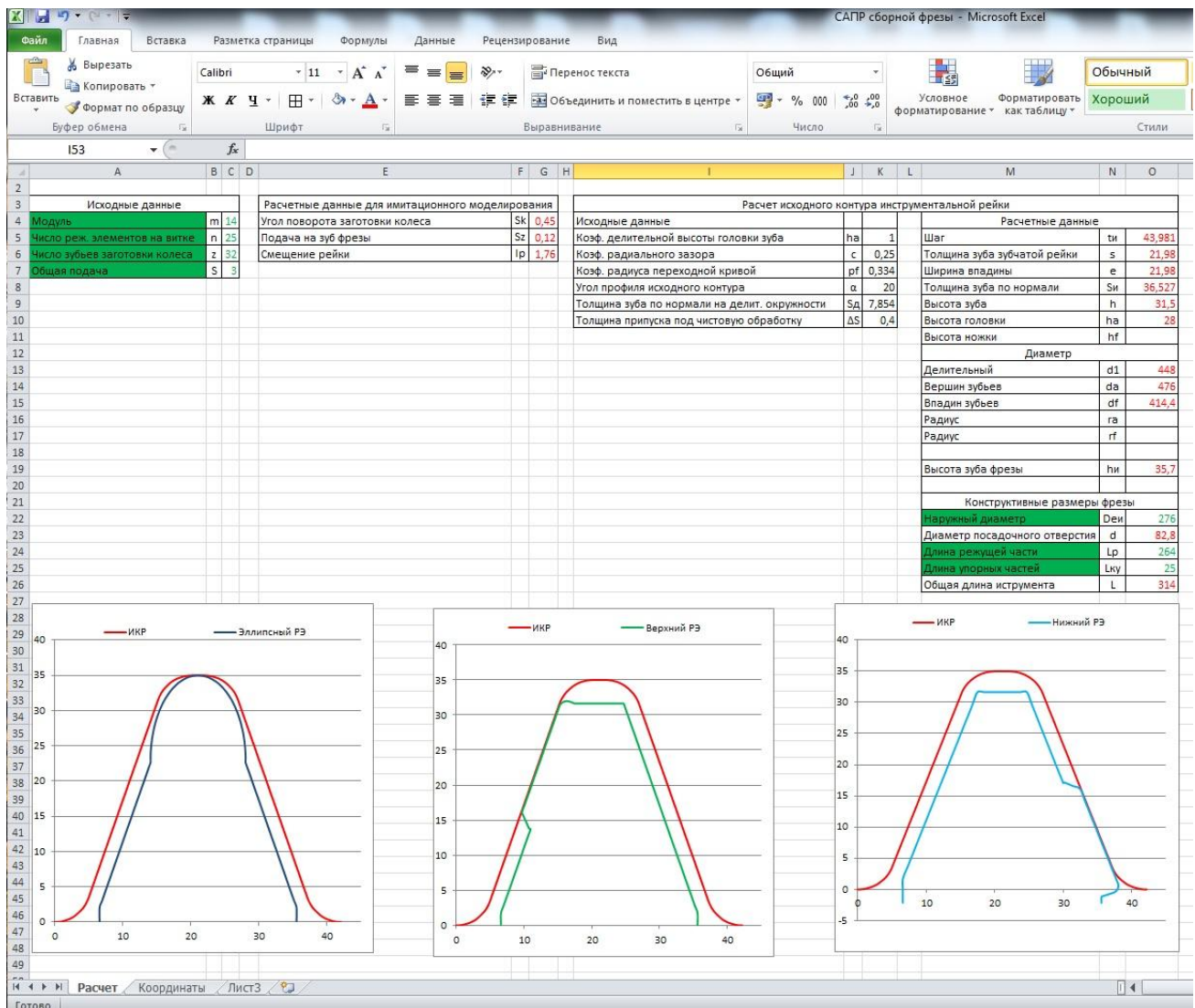


Рисунок 5.7 – САПР сборной червячной фрезы

Рисунок 5.8 - Графовая модель конструкции сборной червячной фрезы с групповой схемой расположения РЭ

Данный граф состоит из двух основных частей, которые представлены в виде вершин $РЧ_{X1}$ – режущая часть, $КЧ_{X2}$ – корпусная часть.

Режущая часть ($РЧ_{X1}$) характеризуется основным параметром как режущие элементы ($РЭ_{X11}$). Которые в свою очередь подразделяются на режущие элементы фронтальные ($РЭФ_{X111}$) и режущие элементы тангенциальные ($РЭТ_{X112}$). К режущим элементам фронтальным ($РЭФ_{X111}$) относятся режущие элементы эллипсные ($РЭЭ$), в количестве от $РЭЭ_{X111n1}$ до $РЭЭ_{X111n35}$, а также другие параметры – $РЭЭ_{X111i}$.

К режущим элементам тангенциальным ($РЭТ_{X112}$) относятся:

- режущие элементы тангенциальные верхние левые ($РЭТВЛ_{X1121}$), в количестве от $РЭТВЛ_{X1121n1}$ до $РЭТВЛ_{X1121n35}$, а также другие параметры $РЭТВЛ_{X1121i}$

- режущие элементы тангенциальные нижние правые ($РЭТНП_{X1122}$), в количестве от $РЭТНП_{X1122n1}$ до $РЭТНП_{X1122n35}$, а также другие параметры $РЭТНП_{X1122i}$

- режущие элементы тангенциальные нижние левые ($РЭТНЛ_{X1123}$), в количестве от $РЭТНЛ_{X1123n1}$ до $РЭТНЛ_{X1123n35}$, а также другие параметры $РЭТНЛ_{X1123i}$

- режущие элементы тангенциальные верхние правые ($РЭТВП_{X1124}$), в количестве от $РЭТВП_{X1124n1}$ до $РЭТВП_{X1124n35}$, а также другие параметры $РЭТВП_{X1124i}$.

Корпусная часть ($КЧ_{X2}$) характеризуется основными параметрами как диски фрезы - $ДФ_{X21}$, шпоночной втулкой – $ШВ_{X22}$, в которой имеется шпоночный паз – $ШП_{X221}$, цилиндрическими проставками по краям инструмента – $ЦП_{X23}$, которых имеется в количестве от $ЦП_{X23n1}$ до $ЦП_{X23n2}$, а также другие параметры – $ЦП_{X23i}$ и четырьмя шпильками $4Ш_{X24}$, в количестве от $4Ш_{X24n1}$ до $4Ш_{X24n4}$, на концах которых имеются гайки – $Г_{X241}$, в количестве от $Г_{X241n1}$ до $Г_{X241n8}$ и другие параметры $4Ш_{X24i}$, $Г_{X241i}$.

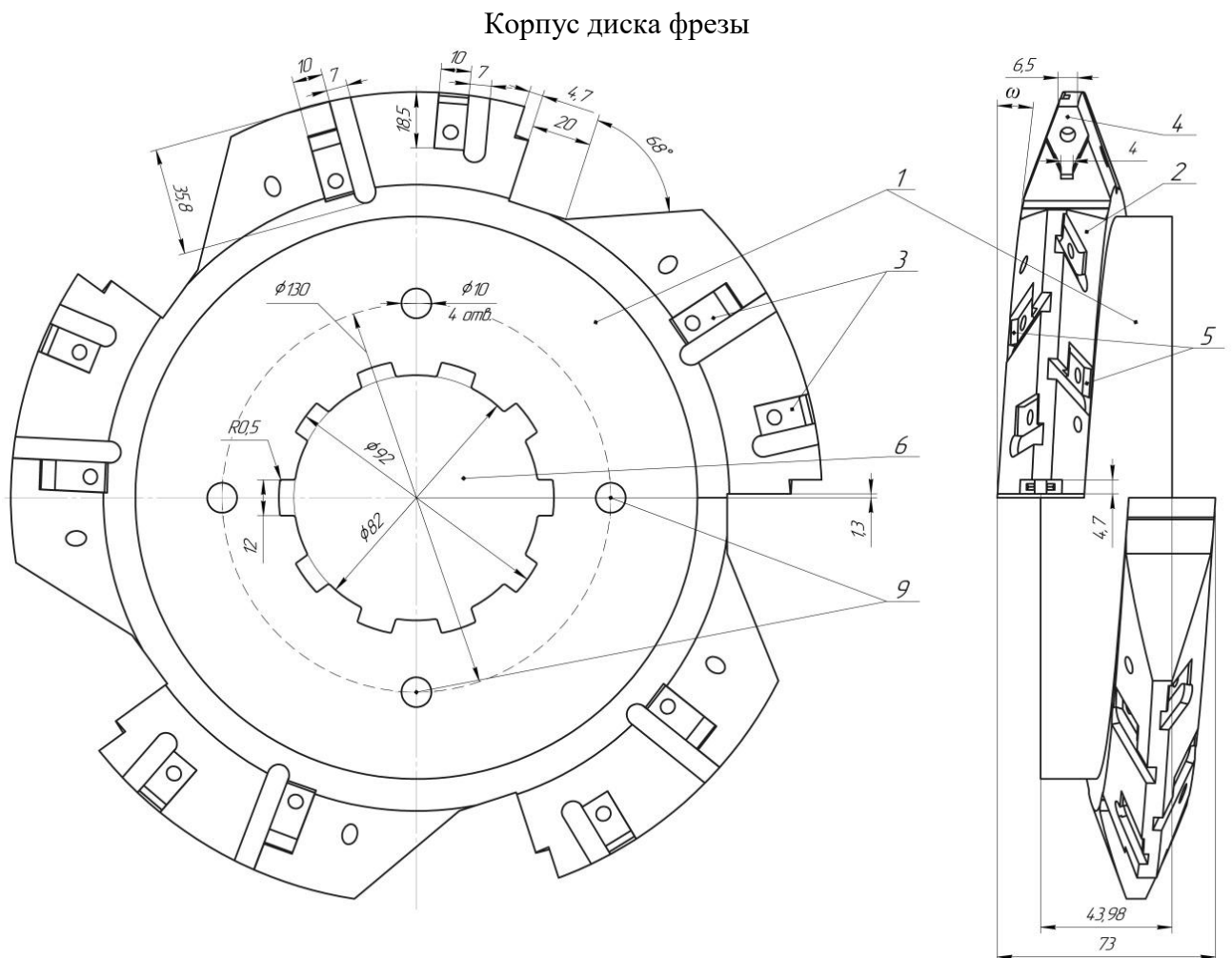
Диски фрезы - $ДФ_{X21}$ имеют обширный список параметров и взаимосвязей, позволяющих повысить эффективность механической обработки

крупномодульных зубчатых колес. Диски фрезы - $ДФ_{X21}$ представлены в количестве от $ДФ_{X21n1}$ до $ДФ_{X21n7}$. На каждом диске фрезы имеются радиальные пазы $РДП_{X2111}$ - $РДП_{X2171}$ с опорными поверхностями $ОпП_{X21111}$ - $ОпП_{X21711}$, в количестве $ОпП_{X21111n1}$ - $ОпП_{X21111n5}$, $ОпП_{X21211n1}$ - $ОпП_{X21211n5}$, $ОпП_{X21311n1}$ - $ОпП_{X21311n5}$, $ОпП_{X21411n1}$ - $ОпП_{X21411n5}$, $ОпП_{X21511n1}$ - $ОпП_{X21511n5}$, $ОпП_{X21611n1}$ - $ОпП_{X21611n5}$, $ОпП_{X21711n1}$ - $ОпП_{X21711n5}$, а также другие параметры $ОпП_{X21111i}$ - $ОпП_{X21711i}$. Также на каждом диске фрезы имеются отверстия для закрепления режущих элементов $ОЗ_{X21112}$ - $ОЗ_{X21712}$, в количестве $ОЗ_{X21112n1}$ - $ОЗ_{X21112n5}$, $ОЗ_{X21212n1}$ - $ОЗ_{X21212n5}$, $ОЗ_{X21312n1}$ - $ОЗ_{X21312n5}$, $ОЗ_{X21412n1}$ - $ОЗ_{X21412n5}$, $ОЗ_{X21512n1}$ - $ОЗ_{X21512n5}$, $ОЗ_{X21612n1}$ - $ОЗ_{X21612n5}$, $ОЗ_{X21712n1}$ - $ОЗ_{X21712n5}$, а также другие параметры $ОЗ_{X21112i}$ - $ОЗ_{X21712i}$. Помимо радиальных пазов на дисках фрезы имеются тангенциальные пазы $ТгП_{X2112}$ - $ТгП_{X2172}$ с опорными поверхностями $ОпП_{X21121}$ - $ОпП_{X21721}$, в количестве $ОпП_{X21121n1}$ - $ОпП_{X21121n20}$, $ОпП_{X21221n1}$ - $ОпП_{X21221n20}$, $ОпП_{X21321n1}$ - $ОпП_{X21321n20}$, $ОпП_{X21421n1}$ - $ОпП_{X21421n20}$, $ОпП_{X21521n1}$ - $ОпП_{X21521n20}$, $ОпП_{X21621n1}$ - $ОпП_{X21621n20}$, $ОпП_{X21721n1}$ - $ОпП_{X21721n20}$, а также другие параметры $ОпП_{X21121i}$ - $ОпП_{X21721i}$. Также на каждом диске фрезы имеются отверстия для закрепления режущих элементов $ОЗ_{X21122}$ - $ОЗ_{X21722}$, в количестве $ОЗ_{X21122n1}$ - $ОЗ_{X21122n20}$, $ОЗ_{X21222n1}$ - $ОЗ_{X21222n20}$, $ОЗ_{X21322n1}$ - $ОЗ_{X21322n20}$, $ОЗ_{X21422n1}$ - $ОЗ_{X21422n20}$, $ОЗ_{X21522n1}$ - $ОЗ_{X21522n20}$, $ОЗ_{X21622n1}$ - $ОЗ_{X21622n20}$, $ОЗ_{X21722n1}$ - $ОЗ_{X21722n20}$, а также другие параметры $ОЗ_{X21122i}$ - $ОЗ_{X21722i}$.

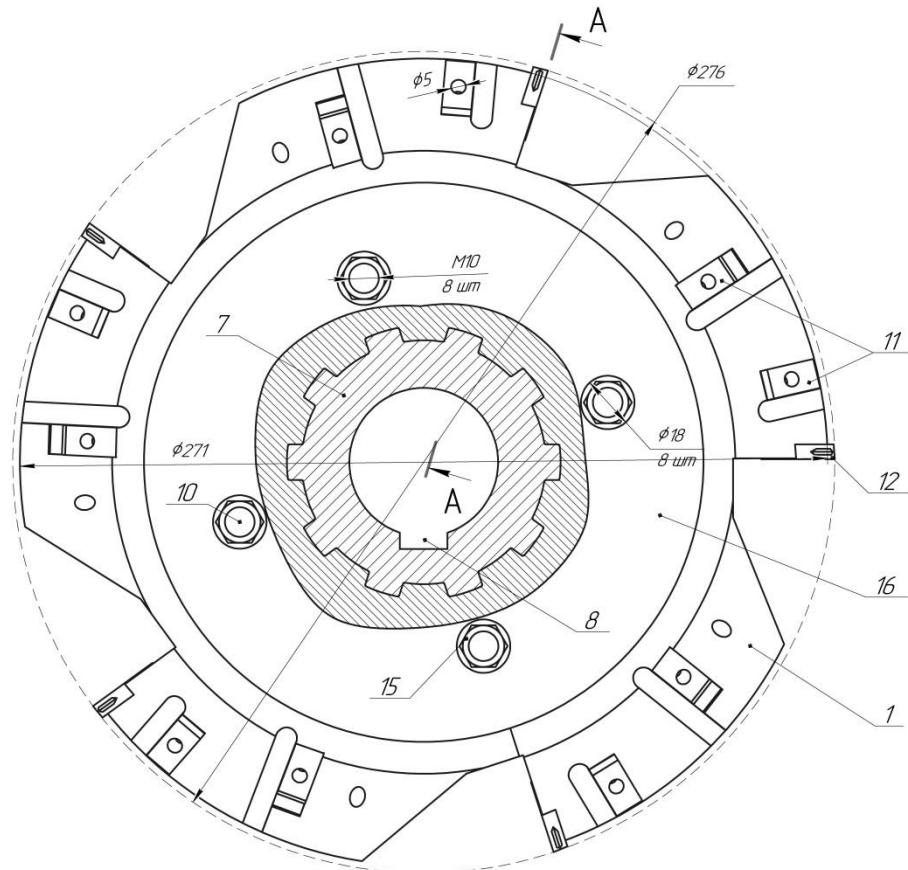
Представленная графовая модель конструкции сборной червячной фрезы позволяет описать возможные варианты конструкций сборного инструмента, разложить по отдельным элементам любую его часть, для получения полного представления о конструкции и устройстве инструмента, произвести оценку его работоспособности и технологичности его конструкции, выстроить логическую схему технического решения, а также представить всю информацию в матричном виде для дальнейшего создания автоматизированной базы данных сборного инструмента. Также существующая модель графа по мере необходимости может дополняться другими конструктивными элементами и составляющими частями (параметрами, условиями).

Сборная червячная фреза состоит из отдельных дисков 1, в сборе образующих корпус с винтовой поверхностью 2, имеющая определенный угол подъема ω , с тангенциальными 3 и радиальными пазами 4 с опорными поверхностями 5 для расположения в них режущих элементов, отверстие 6 для расположения шлицевой втулки 7 со шпоночным пазом 8, и четыре сквозных отверстия 9 для шпилек 10, на каждом диске закреплены боковые 11 и основные 12 режущие пластины, базирующиеся в угловых пазах 13 при помощи винтов 14.

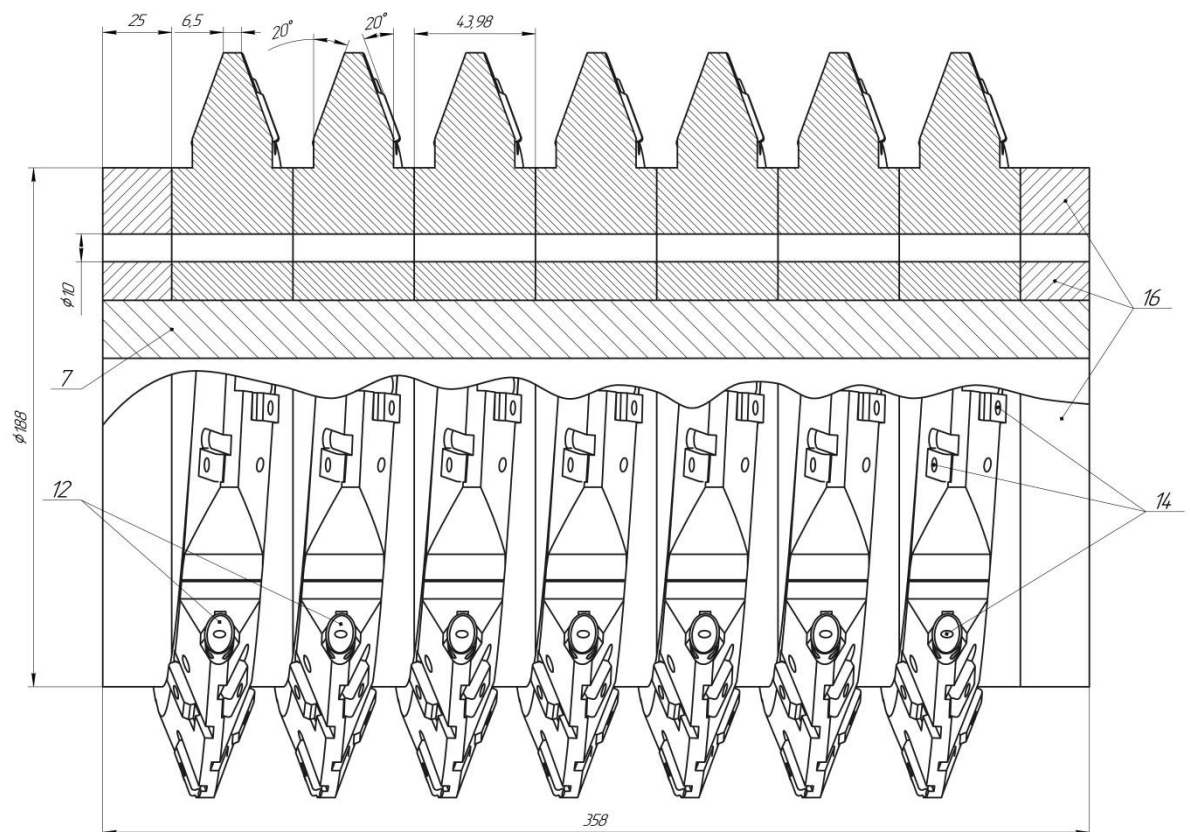
Для исключения возможности перемещения дисков корпуса относительно оси инструмента во время фрезерования фреза оснащена шлицевой втулкой 7. Диски собираются на шлицевой втулке 7, оснащенной шпоночным пазом, и стягиваются четырьмя шпильками 10, на концах которых имеются гайки 15. По краям корпуса имеются две цилиндрические проставки 16 для наилучшего закрепления дисков сборной червячной фрезы (рис.5.9).



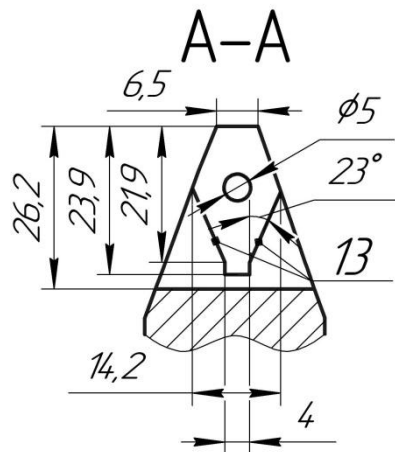
Корпус диска сборной червячной фрезы со сменными режущими элементами в сборе



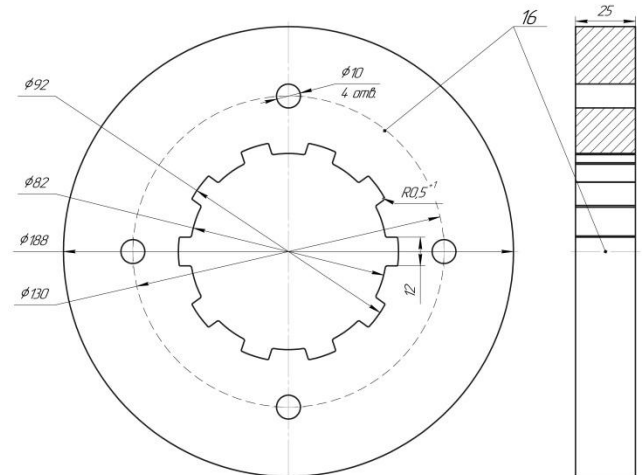
Общий вид инструмента в сборе



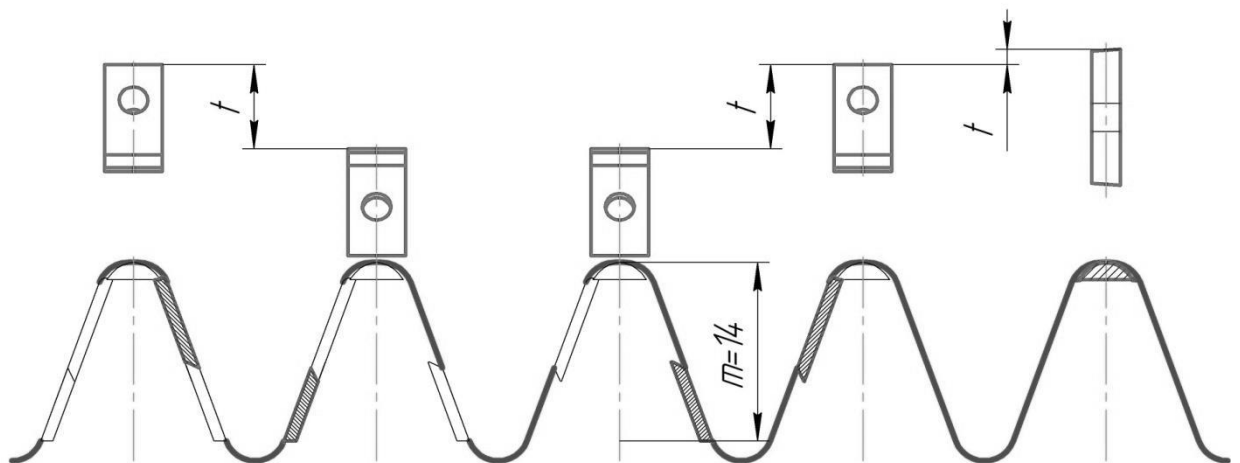
Паз для установки эллиптической СРТП



Цилиндрическая проставка



Реализация групповой схемы резания



3D модель и конструкция сборной червячной фрезы

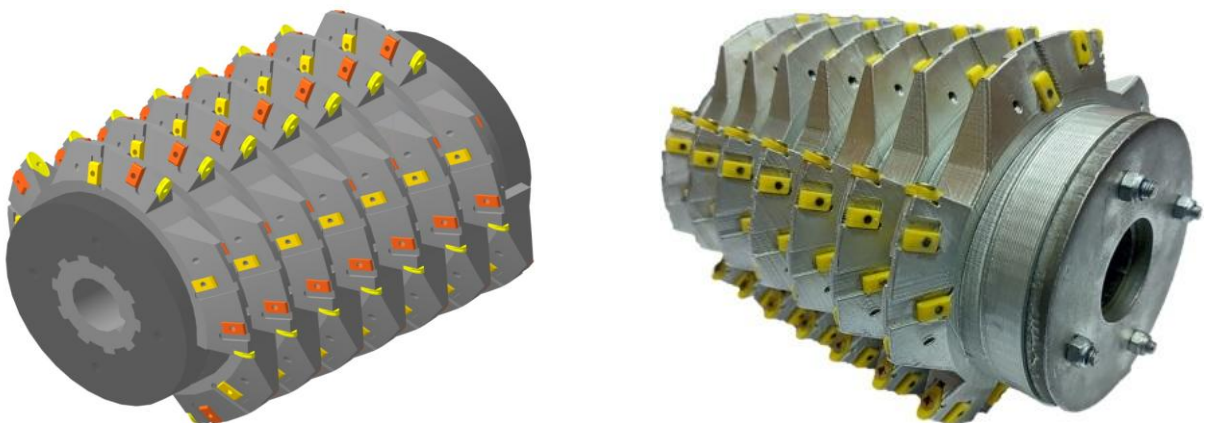


Рисунок 5.9 – Конструкция сборной червячной фрезы с групповым расположением РЭ (патент на изобретение № 2720011)

Реализация групповой схемы резания достигается путем применения большего количества основных и боковых режущих пластин на архимедовом инструментальном червяке, позволяющих последовательно срезать припуск на обработку и уменьшить величину подачи на режущую пластину, обеспечить равномерность фрезерования, а также снизить величину ударных нагрузок на режущие элементы сборного зубообрабатывающего инструмента. Благодаря технологичности конструкции инструмента и применению в конструкции сменных режущих твердосплавных пластин при групповой схеме резания повышается стойкость и надежность сборной червячной фрезы.

Таким образом, разработанная сборная червячная фреза является технологичной в изготовлении и обслуживании, благодаря применению одного вида (по геометрическим размерам) тангенциально расположенных режущих пластин, с возможностью их взаимозаменяемости путем поворота в случае поломки или износа одной режущей кромки. Опорные и базирующие поверхности под режущие твердосплавные пластины выполнены с условием обеспечения свободного доступа инструмента при финишной обработке фрезы [113].

По результатам работы оформлены интеллектуальные права на данную конструкцию патент РФ № 2720011 (Приложение Е), а также получены акты о внедрении материалов диссертации на предприятиях АО «Кировградский завод твердых сплавов», ПАО «Тюменские моторостроители», АО «Ишимский механический завод», АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады» (Приложение Ж).

5.4 Применение технологий быстрого прототипирования при создании конструкций сборных зубообрабатывающих инструментов

В настоящее время технологический процесс не стоит на месте, передовые цифровые технологии совершенствуются с каждым днем во всех уголках мира, что позволяет использовать новинки в различных сферах жизни человека.

В настоящее время аддитивные технологии являются перспективными и передовыми, этапы развития технологий быстрого прототипирования представлены на рисунке 5.10.

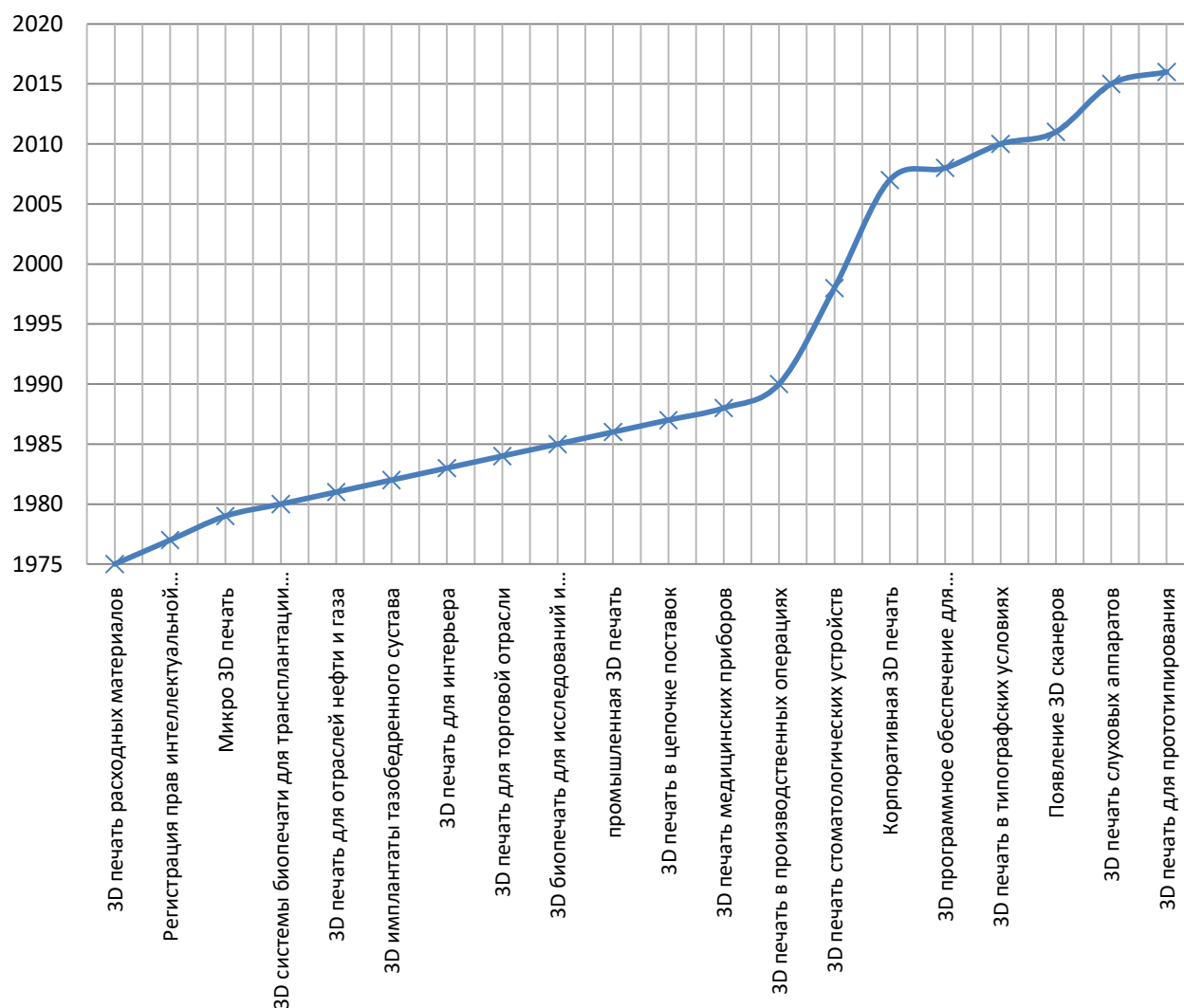


Рисунок 5.10 – Этапы развития технологий быстрого прототипирования в мире

Аддитивные технологии (Additive Manufacturing — от слова «аддитивность» — прибавляемый) — это послойное наращивание и синтез объекта с помощью компьютерных 3D-технологий. Ч. Халл в 1986 году изобрел и сконструировал первый стереолитографический трехмерный принтер.

В современной промышленности существует несколько разных процессов, в результате которых моделируется 3D-объект: UV-облучение, экструзия, струйное напыление, сплавление, ламинирование. Соответственно, существует огромное

количество материалов, используемых в аддитивных технологиях: воск, полиамиды, жидкие фотополимеры, разного рода полистирол, металлические порошки, порошки гипсовые.

Аддитивные технологии прочно и основательно заняли свое место, повсеместно внедряются во все сферы жизни.

Они способствуют производству множества полезных вещей для быта, безопасности и здоровья человека. 3D-технологии уже много лет активно используются при создании ювелирных украшений (рис. 5.11 а), в автомобильной промышленности (рис. 5.11 б), палеонтологии (рис. 5.11 в), в географических информационных системах (рис. 5.11 г), архитектуре и дизайне (рис. 5.11 д), медицине (рис. 5.11 е) и многих других отраслях [114].



а)



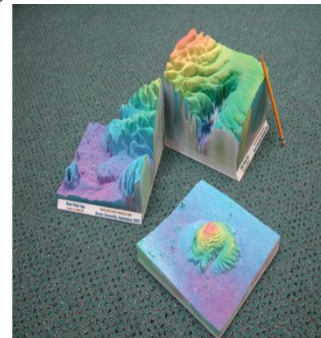
б)



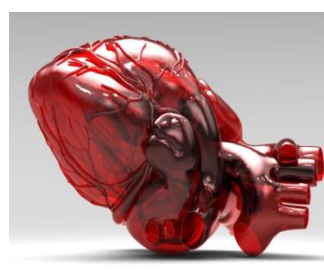
в)



г)



д)



е)

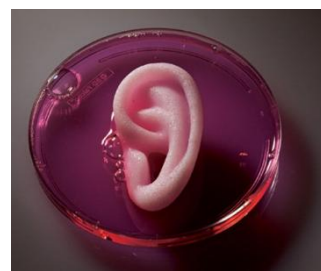


Рисунок 5.11 – Возможности применения технологий быстрого прототипирования в различных сферах деятельности

В рамках настоящей работы было принято решение активно использовать аддитивные технологии с целью быстрой проработки эскизных проектов конструкций сборных зубообрабатывающих инструментов.

Изготовление подобным образом сборных инструментов дает возможность оценить реальность исполнения конструкции и технологичность инструмента.

В качестве примера рассмотрим процесс изготовления и испытания конструкции сборного долбяка для обработки зубчатых колес.

Изначально конструкция инструмента была спроектирована в программном продукте Компас-3D и изготовлена его 3D модель (рис 5.12).

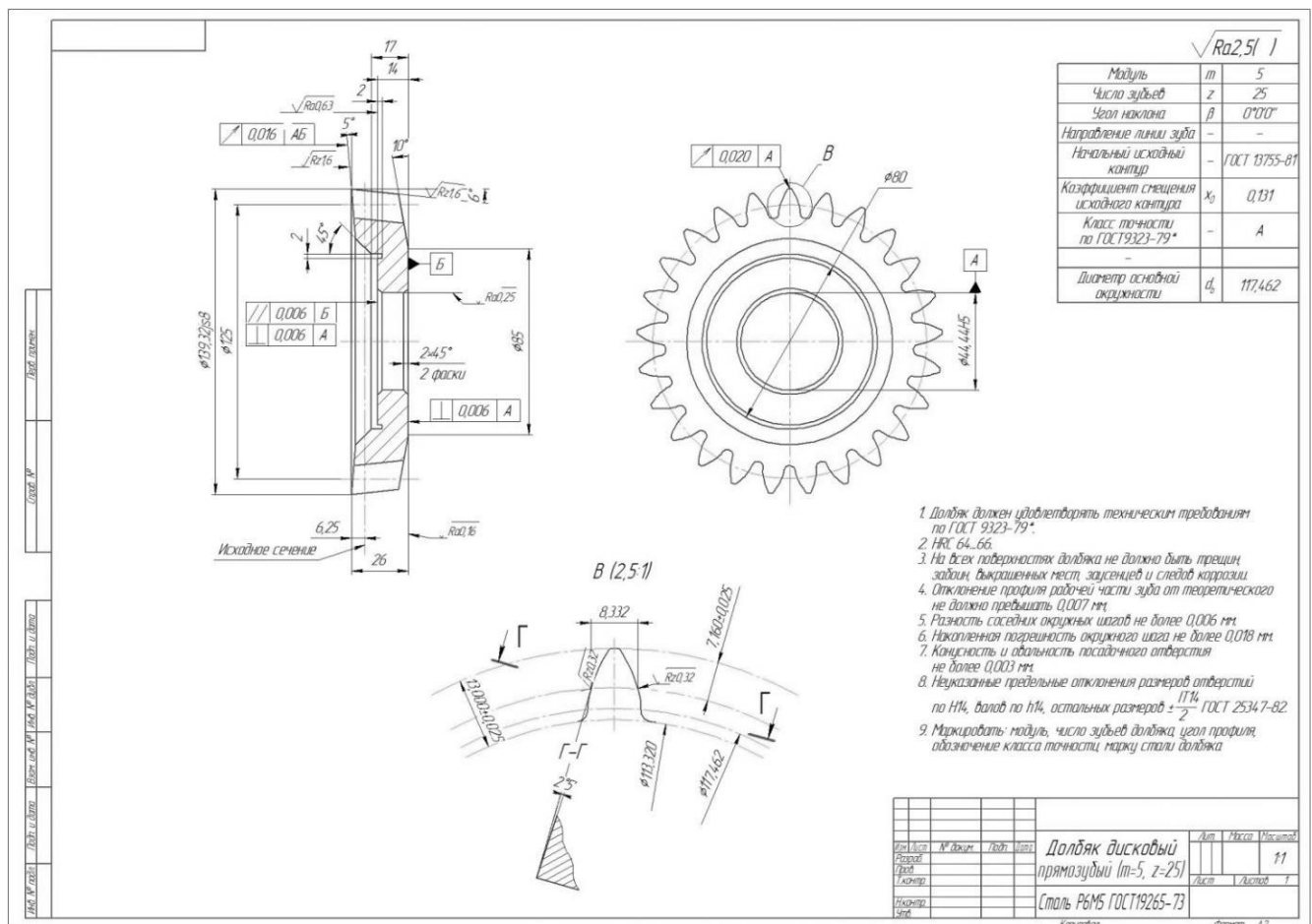


Рисунок 5.12 – Чертеж конструкции сборного долбяка

Далее на основании полученной 3D модели было произведено изготовление конструкции сборного инструмента с применением технологий быстрого прототипирования (рис. 5.13).

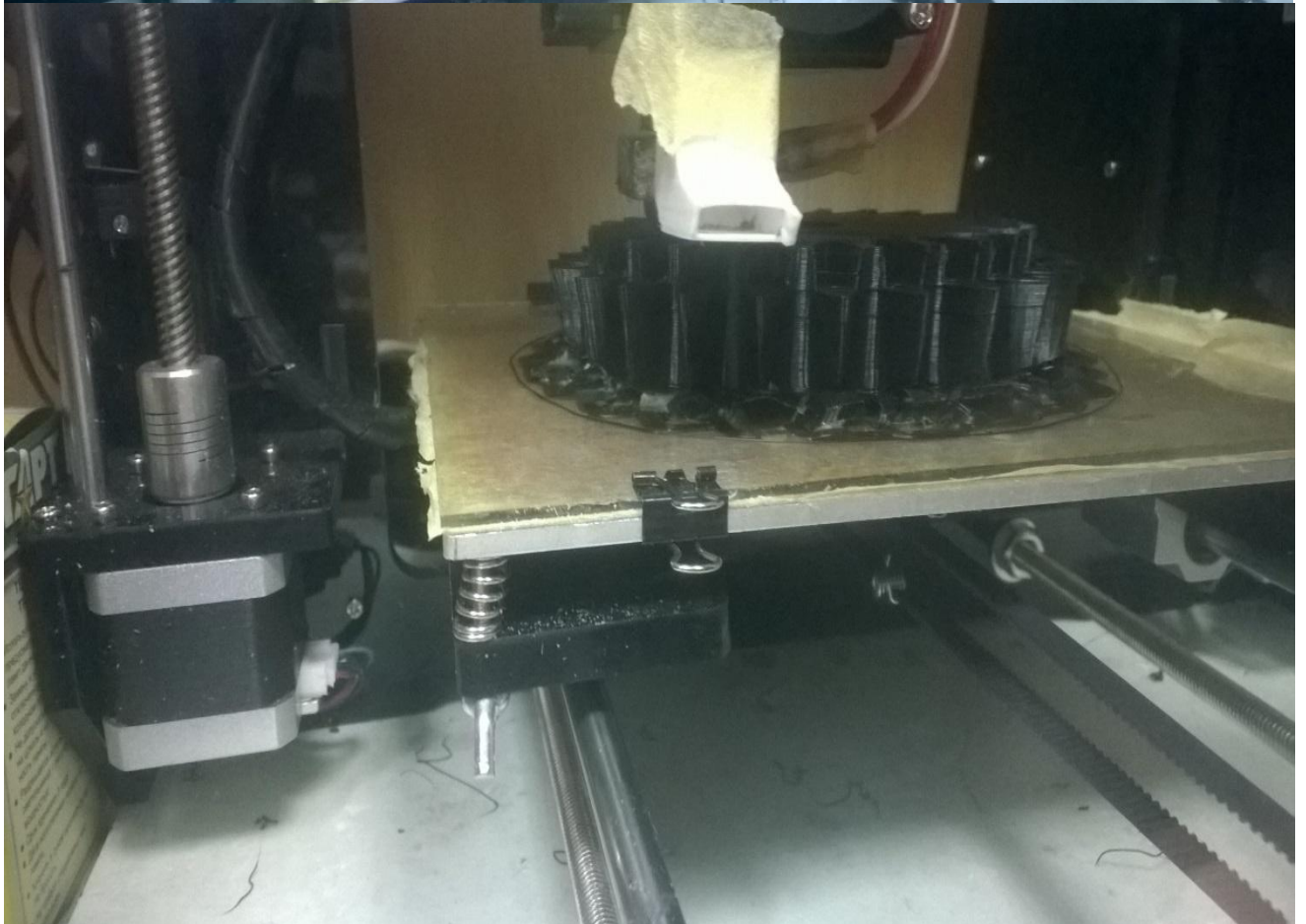
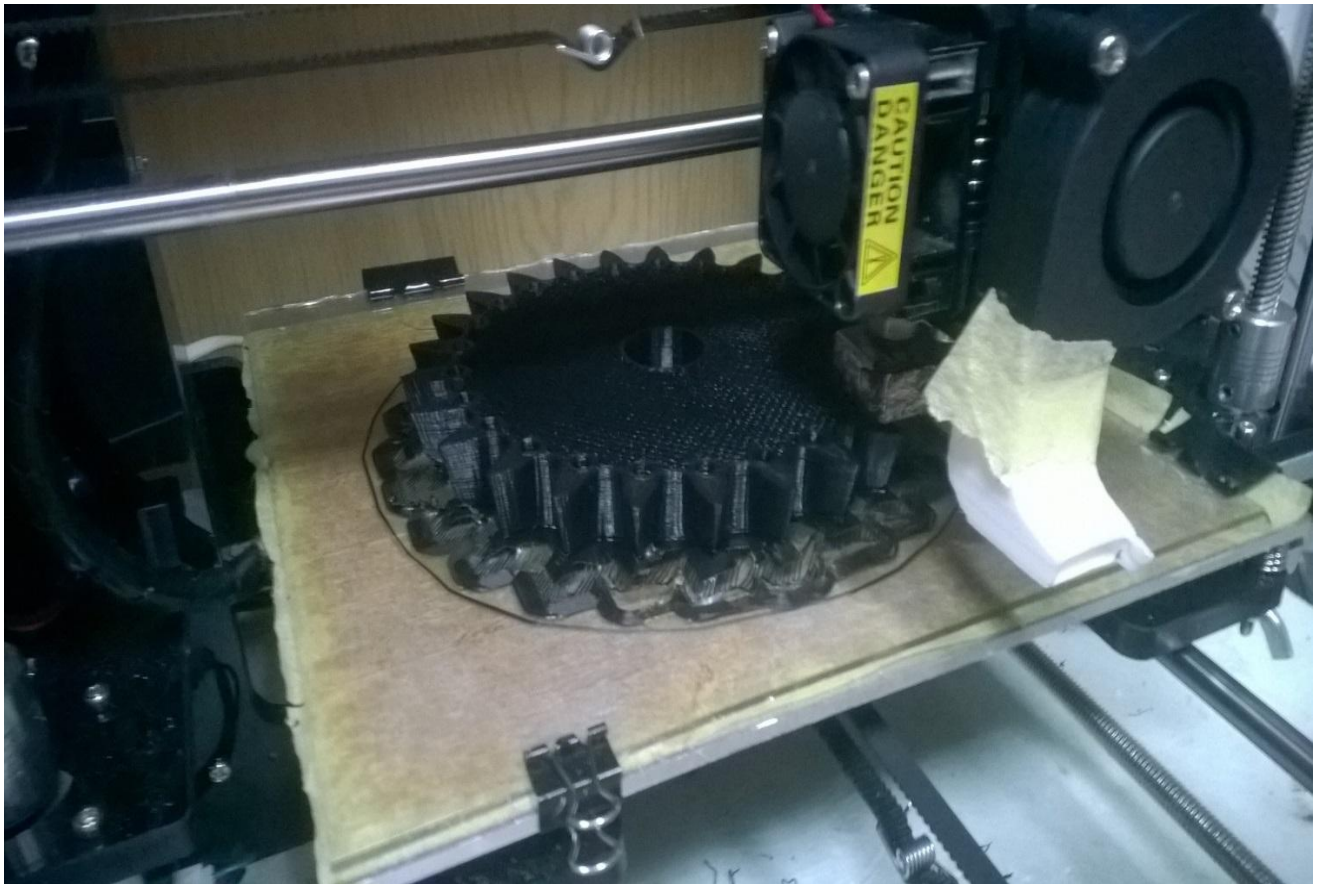




Рисунок 5.13 – Изготовление сборной конструкции долбяка с применением технологий быстрого прототипирования

Преимущества подобной технологии изготовления очевидны. Благодаря применению специальных программ (слайсеров) существует возможность изготовления подобных конструкций без огромного количества чертежей и конструкторской документации, достаточно лишь иметь 3D модель будущего изделия. Также нет необходимости в сложных математических расчетах по определению пространственного положения корпуса инструмента, режущих элементов или, к примеру, установочных пазов под них. Процесс изготовления инструмента начинается с импорта 3D модели из любой системы автоматизированного проектирования, например Компас 3D или SolidWorks. Далее происходит размещение 3D модели (заготовки) относительно рабочего поля (рабочей зоны станка) в программе Reperier (рис.5.14).

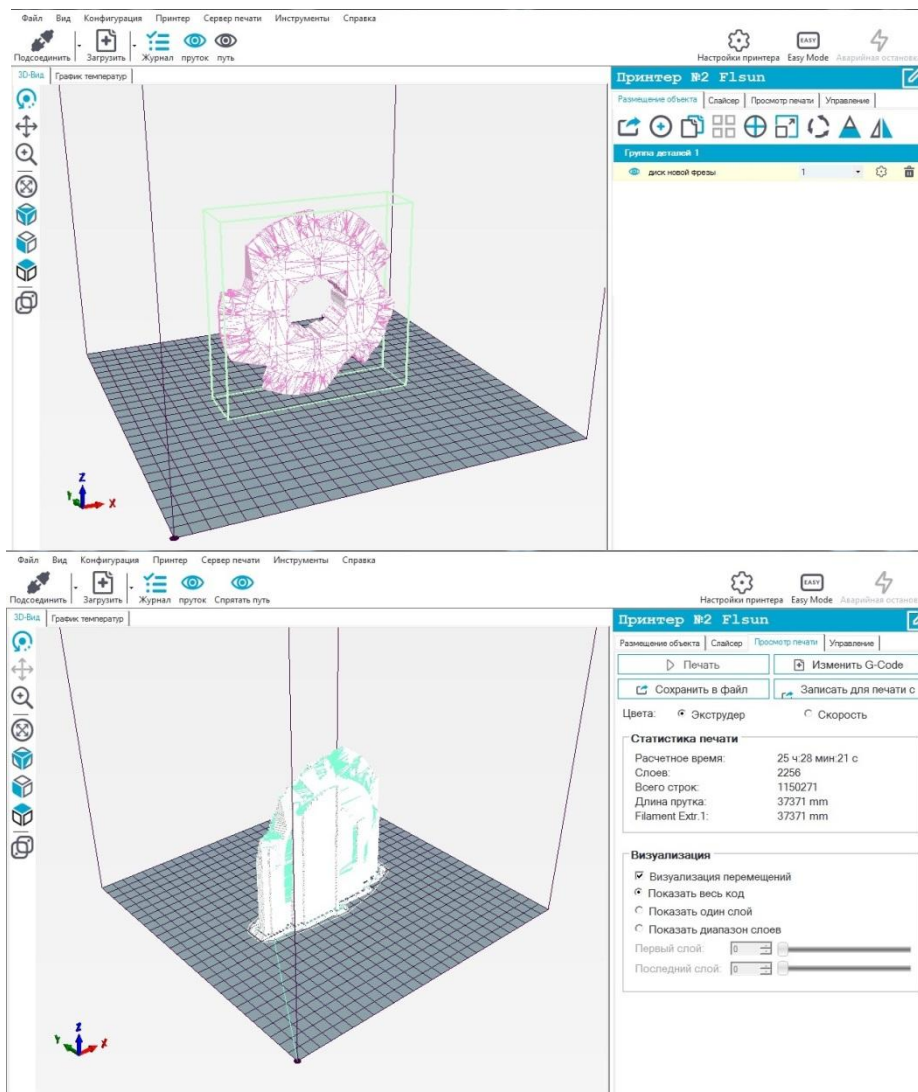


Рисунок 5.14 – Использование программы Reperier при изготовлении сборных конструкций инструментов с применением технологий быстрого прототипирования

В последующем в автоматическом режиме рассчитывается технологический процесс изготовления корпуса (или других элементов) сборного инструмента и прописывается G-code. Также существует возможность дальнейшего использования данного кода (G-code) уже на реальном промышленном оборудовании при изготовлении инструмента, т.к. язык программирования при технологии быстрого прототипирования полностью соответствует ISO 7 bit (пример G-code представлен в Приложении 3).

После окончания изготовления данный инструмент был подвергнут испытаниям на промышленном оборудовании кафедры «Станки и инструменты» ТИУ, а именно был установлен на зубодолбежный станок 5M14 и осуществлен процесс нарезания зубчатого колеса (рис.5.15).





Рисунок 5.15 – Нарезание зубчатого колеса долбяком

Аналогичным образом был произведен процесс изготовления конструкции сборной червячной фрезы с групповым расположением режущих элементов (рис. 5.16).

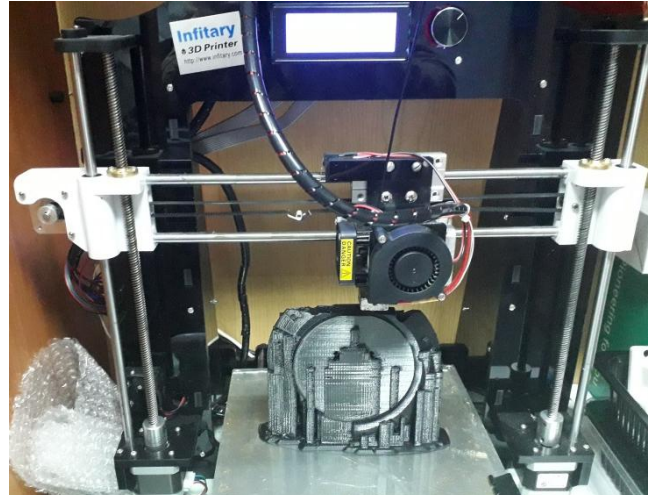
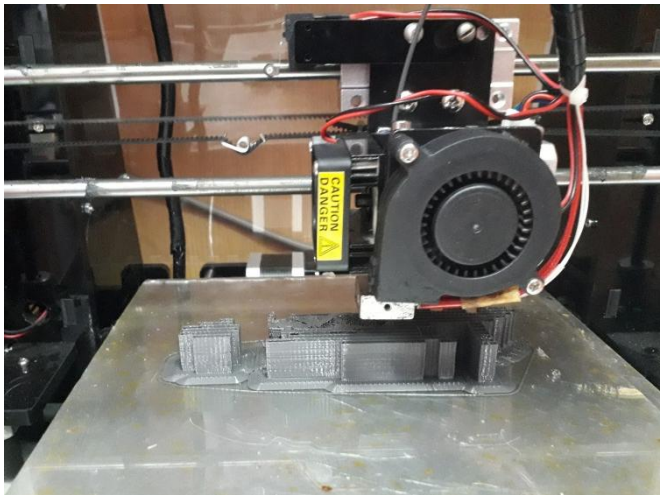


Рисунок 5.16 – Процесс изготовления конструкции сборной червячной фрезы с групповым расположением режущих элементов с применением технологий быстрого прототипирования

В дальнейшем по подобию с конструкцией сборного долбяка была произведена установка сборной червячной фрезы на станок модели 5Е32 и осуществлен процесс нарезания (режимы обработки и исходные данные: $Z_f=25$; $M=14$; $S=3$ мм/об; $S_z=0,12$ мм/зуб; $Z_k=32$) зубчатого колеса (рис. 5.17).



Рисунок 5.17 – Процесс нарезания зубчатого колеса разработанной сборной червячной фрезой с групповым расположением режущих элементов

Готовое изделие зубчатого колеса было помещено на координатно-измерительную машину (КИМ) с целью, установления соответствия эвольвентного профиля ГОСТу (рис. 5.18).

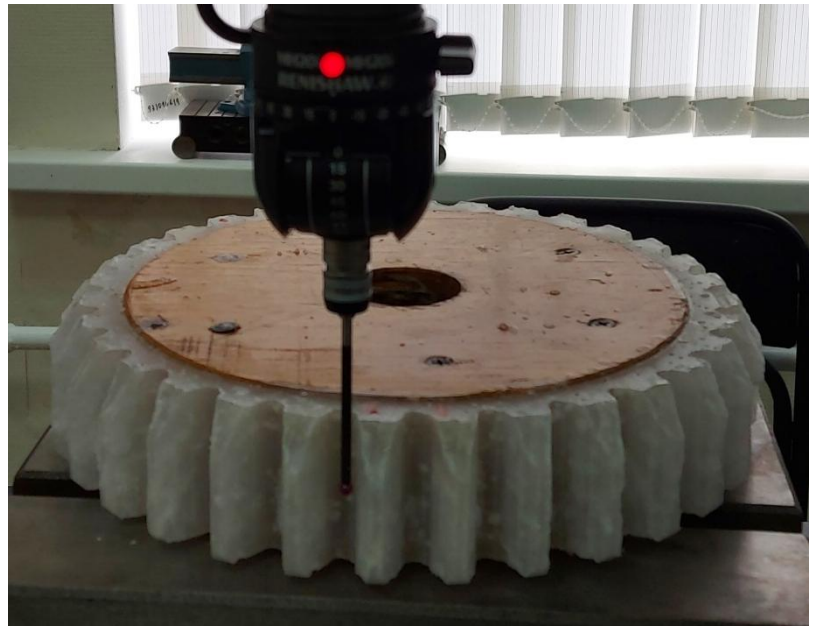
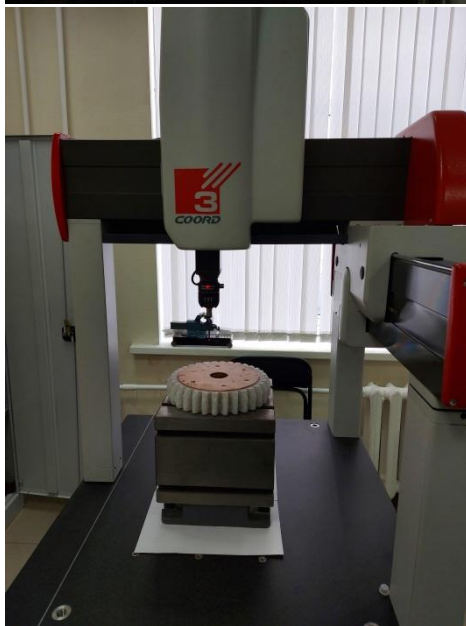
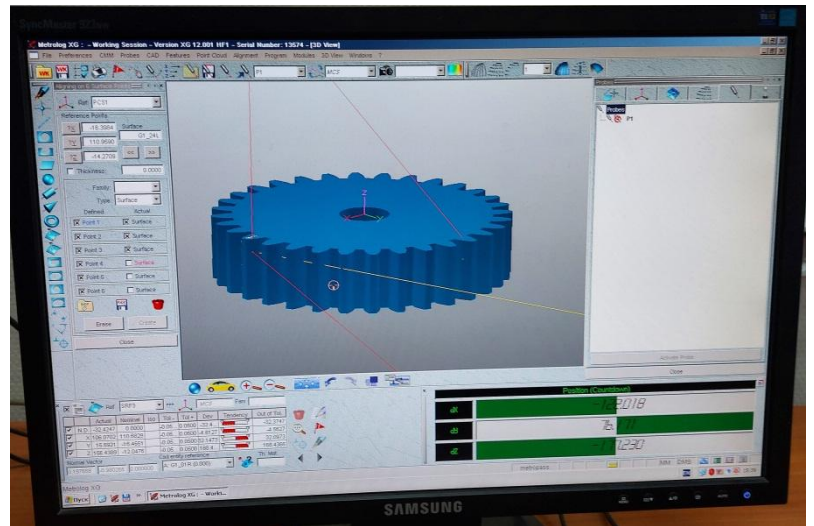


Рисунок 5.18 – Процесс измерения зубчатого колеса на координатно-измерительной машине, зубофрезерование которого осуществлялось разработанной сборной червячной фрезы с групповым расположением режущих элементов

В результате проведенных измерений на координатно – измерительной машине Coord 3 стало известно, что максимальные отклонения достигают величины 1,248 мм, что в условиях остаточного припуска 1,2 мм (допуск 0,05 мм) на последующую чистовую обработку является допустимым (рис. 5.19).

Измерение отклонений профиля всех зубьев (левая и правая сторона профиля)

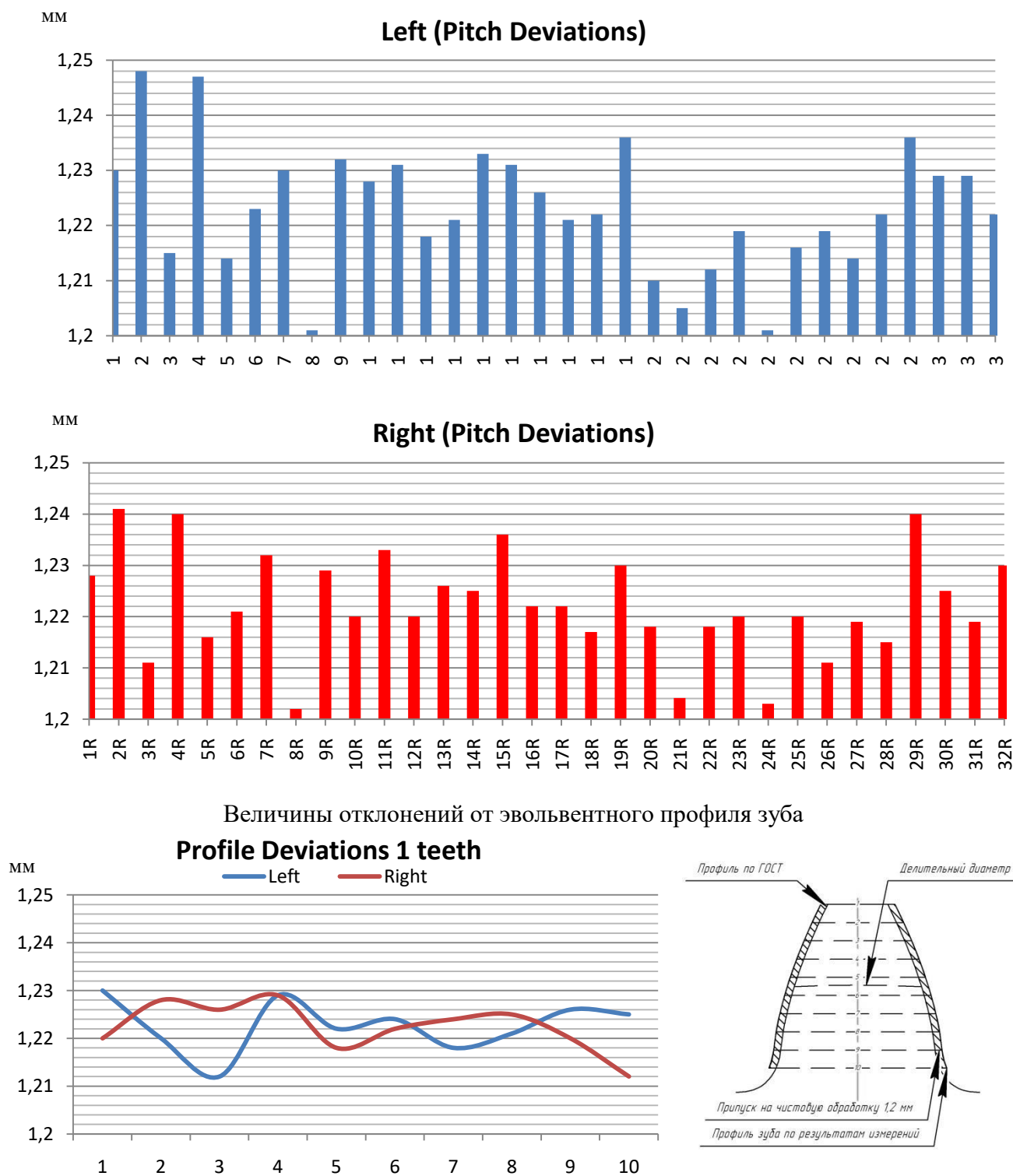


Рисунок 5.19 – Результаты измерения эвольвентного профиля зубчатого колеса

Результат измерений полного эвольвентного профиля одного выбранного зуба показал, что максимальная величина отклонений достигает величины - 1,129 мм от величины припуска на последующую чистовую обработку, что

является допустимым в рамках технологического процесса обработки зубчатого колеса.

Из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- технология быстрого прототипирования позволяет исключить сложные математические расчеты при разработке эскизных проектов конструкций сборных зубообрабатывающих инструментов;
- технология быстрого прототипирования позволяет в кратчайшие сроки создавать конструкции сборного инструмента с целью оценки его технологичности и наглядного представления моделей, перед непосредственным изготовлением на предприятии;
- технология быстрого прототипирования позволяет установить изготовленный прототип сборного инструмента на реальное промышленное оборудование и произвести какие-либо испытания, с целью снижения экономических затрат на опытный образец и пробные испытания;
- технология быстрого прототипирования позволяет получить готовое изделие зубчатого колеса, для последующего исследования;
- технология быстрого прототипирования позволяет смоделировать процесс обработки зубчатого колеса и схода стружки в процессе резания.

5.5 Выводы

1. Разработан алгоритм расчета и проектирования сборных червячных фрез с СРТП, на основании которого создана графовая модель, описывающая возможные конструктивные варианты исполнения и представления всей информации в матричном виде для дальнейшего создания автоматизированной базы данных для расчета и проектирования зубообрабатывающего инструмента.

2. Разработаны новые сменные режущие твердосплавные пластины, устанавливаемые в сборные червячные фрезы для реализации групповой схемы

резания путем последовательного срезания припуска режущими элементами расположенными на архимедовом червяке радиально и тангенциально.

3. Разработана и изготовлена методом прототипирования модель конструкции сборной червячной фрезы с групповым расположением режущих элементов (Пат. 2720011 РФ), которой произведена обработка зубчатого колеса, с обеспечением равномерности фрезерования и получением заявленного припуска на последующую чистовую обработку, что подтверждено результатами измерений на КИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе изложены новые научно-обоснованные технические и технологические решения, имеющие важное значение для Российского машиностроительного производства в рамках импортозамещения, заключающиеся в повышении эффективности работы сборных червячных фрез с СРТП при обработке крупномодульных зубчатых колес на основе имитационного моделирования и реализации групповой схемы резания, с расположением режущих элементов на базовом архимедовом червяке и численных методов исследования, с обеспечением максимальной эффективности (производительности) при черновой обработке.

2. Разработанная методика имитационного моделирования и графического определения сечений срезаемого слоя позволяют определить граничные условия нагружения и напряженное состояние СРТП, способствующие в установлении их конструктивных параметров (формы), способов расположения и крепления в корпусе инструмента.

3. Установлена неравномерность нагружения режущих зубьев стандартной червячной фрезы (35%) с использованием метода имитационного моделирования, что обусловило разработать принципиально новую схему расположения режущих элементов на архимедовом червяке в корпусе сборного инструмента для реализации групповой схемы резания, обеспечивающая снижение неблагоприятного фактора до 5%.

4. Благодаря реализации групповой схемы резания при зубофрезеровании, результатов исследования при имитационном моделировании обеспечивается равномерное нагружение режущих элементов сборной червячной фрезы, что дает возможность увеличить подачу и скорость резания, и соответственно производительность обработки на 20-25 %.

5. Установлено, что при групповой схеме резания снижается величина опасных напряжений растяжения σ_1 в СРТП в 1,5-2 раза по сравнению со стандартной червячной фрезой при одинаковых подачах, что позволяет повысить производительность работы инструмента.

6. Разработан алгоритм расчета и проектирования сборных червячных фрез с СРТП, на основании которого создана графовая модель, описывающая возможные конструктивные варианты исполнения и представления всей информации в матричном виде для дальнейшего создания автоматизированной базы данных для расчета и проектирования зубообрабатывающего инструмента.

7. Разработана и изготовлена методом прототипирования модель конструкции сборной червячной фрезы с групповым расположением режущих элементов (Пат. 2720011 РФ), которой произведена обработка зубчатого колеса, с обеспечением равномерности фрезерования и получением заявленного припуска на последующую чистовую обработку, что подтверждено результатами измерений на КИМ.

8. Передана техническая документация (в виде РТМ) для внедрения на предприятиях: Кировградский завод твердых сплавов (г. Кировград Свердловской обл.), ПАО Тюменские моторостроители (г. Тюмень), АО «Ишимский механический завод» (г. Ишим, Тюменская обл.), АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады» (г. Волгоград).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречишников, В. А. Инструментальное обеспечение интегрированных машиностроительных производств // В. А. Гречишников, С. Н. Григорьев, А. Р. Маслов, А. Г. Схиртладзе. - Старый оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2018. – 348 с. – Текст : непосредственный.
2. Калашников, С. Н. Зубчатые колеса и их изготовление / С. Н. Калашников, А. С. Калашников. – Москва : Машиностроение. - 1983. 264 с. – Текст : непосредственный.
3. Зорев, Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н. Н. Зорев. – Москва : Машгиз. - 1956. 368 с. – Текст : непосредственный.
4. Комиссаров, В. И. Исследование особенностей торцового фрезерования на участке врезания фрезы в заготовку и на участке выхода / В. И. Комиссаров, Р. М. Ибатуллин – Текст : непосредственный // Оптимизация процессов резания жаро- и особопроочных материалов : материалы конференции. – Уфа, 1983. - С. 106-112. – Текст : непосредственный.
5. Зорев, Н. Н. Стойкость и производительность торцовых фрез / Н. Н. Зорев, Н. П. Вирко – Текст : непосредственный // Исследование в области технологии обработки металлов резанием : материалы конференции. – Москва, 1957. - С. 118-124. – Текст : непосредственный.
6. Зорев, Н. Н. Влияние установки заготовки на стойкость фрез при торцовом фрезеровании / Н. Н. Зорев. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 1952, - №8. - С. 74-76.
7. Володин, С. А. Исследование загрузки зубьев червячных фрез / С. А. Володин – Текст : непосредственный // Технология и автоматизация машиностроения : материалы конференции. – Киев, 1986. - С. 25-29. – Текст : непосредственный.
8. Ларин, М. Н. Основы фрезерования / М. Н. Ларин. – Москва : Машгиз. 1947. 304 с. – Текст : непосредственный.

9. Ларюшин, В. В. Твердосплавные незатылованные зуборезные червячные фрезы : 05.03.01 : автореф дис. ... канд. техн. наук. / В. В. Ларюшин. – Саратов, 1981. – 20 с. – Текст : непосредственный.
10. Мойсеенко, О. И. Твердосплавные зуборезные инструменты / О. И. Мойсеенко, Е. В. Павлов, С. И. Диденко. – Москва : Машиностроение. 1977. 190 с. – Текст : непосредственный.
11. Тайц, Б. А. Точность и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц. – Москва : Машиностроение. 1972. 367 с. – Текст : непосредственный.
12. Семенченко, И. И. Проектирование металлорежущих инструментов / И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров – Москва : Машиностроение. 1963. 952 с. – Текст : непосредственный.
13. Бетанели, А. И. Прочность и надежность режущего инструмента / А. И. Бетанели. – Тбилиси : Сабчота Сакартвело. 1973. 304 с. – Текст : непосредственный.
14. Лоладзе, Т. Н. Исследование напряжений в режущей части инструмента при переходных процессах методом фотоупругости / Т. Н. Лоладзе, Г. Н. Ткемиладзе, Ф. Г. Тотчиев. – Тбилиси : Сабчота Сакартвело. 1975. 224 с. – Текст : непосредственный.
15. Медведицков, С. Н. Толщина срезаемого слоя при нарезании зубчатых колес червячно-модульными фрезами / С. Н. Медведицков, А. Т. Нарожных, В. Ф. Чурбаков – Текст : непосредственный // Технология машиностроения. Труды Волгоградского политехнического института. - Волгоград, 1971. – С 245-252. – Текст : непосредственный.
16. Медведицков, С. Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами / С. Н. Медведицков. – Москва : Машиностроение. 1981. 106 с. – Текст : непосредственный.
17. Борискин, О. И. Эвольвентная червячная фреза с твердосплавными рейками / О. И. Борискин, Н. Г. Стаханов, А. В. Якушенков – Текст : непосредственный // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в

- машиностроении : всероссийская научно-техническая конференция. – Тула, 2019. – С. 116-118. – Текст : непосредственный.
18. Чулин, И. В. Повышение стойкости сборных твердосплавных фрез для обработки железнодорожных остяков : 05.02.07 : автореф дис. ... канд. техн. наук. / И. В. Чулин. – Москва, 2011. – 24 с. – Текст : непосредственный.
19. Исаев, А. В. Разработка сборных фрез со сменными многогранными твердосплавными пластинами, расположенными на винтовой поверхности, для обработки заготовок с фасонным профилем : 05.02.07 : автореф дис. ... канд. техн. наук. / А. В. Исаев. – Москва, 2012. – 24 с. – Текст : непосредственный.
20. Гречишников, В. А. Метод формирования профиля образующей исходной инструментальной поверхности сборных фасонных фрез с режущими пластинами, расположенными вдоль винтовой линии / В. А. Гречишников, А. В. Исаев, В. Б. Романов. – Текст : непосредственный //Вестник МГТУ Станкин. – 2015. - №1. – С. 8-12.
21. Михайлов, М. И. Создание сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок для гибких производственных систем : 05.02.07 : автореф. дис. ... докт. техн. наук. / М. И. Михайлов. – Минск, 2014. – 49 с. – Текст : непосредственный.
22. Чевычелов, С. А. Повышение эффективности проектирования гиперболических фрез компьютерным моделированием процесса репрофилирования рельсов : 05.02.07 : автореф дис. ... канд. техн. наук. / С. А. Чевычелов. – Орел, 2005. – 23 с. – Текст : непосредственный.
23. Шаламов, В. Г. Системный подход к получению элементной стружки ротационным фрезерованием / В. Г. Шаламов, С. Д. Сметанин // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста : материалы конференции. – Челябинск, 2018. – С. 32-37. – Текст : непосредственный.
24. Пат. 173730 РФ, МПК В23В27/17 Ротационный режущий инструмент : № 2016147121 : заявл. 30.11.2016 : опубл. 07.09.2017 / Еговцев И. О., Шаламов В.

- Г. ; патентообладатель ФГАОУ ВО "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)" (ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)"). - Текст : непосредственный.
25. Пат. 1715522 СССР, МПК В23F5/12. Способ управления зубофрезерованием : № 4826153/08 : заявл. 13.02.1990 : опубл. 29.02.1992 / Ничков А.Г., Иванов И.Ю., Ничкова С.А., Козулин В.Б. ; патентообладатель Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова. – Текст : непосредственный.
26. Пат. 1715521 СССР, МПК В23F5/12. Способ управления зубофрезерованием : № 4780945/08 : заявл. 09.01.1990 : опубл. 29.02.1992 / Ничков А.Г., Иванов И.Ю., Ничкова С.А., Козулин В.Б. ; патентообладатель Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова. – Текст : непосредственный.
27. Ничков, А. Г. Исследование износа червячных модульных фрез методом моделирования процесса резания при черновом нарезании цилиндрических прямозубых колес : 05.03.01 : автореф дис. ... канд. техн. наук. / А. Г. Ничков. – Свердловск, 1966. – 20 с. – Текст : непосредственный.
28. Ничков, А. Г. Основы комплексного исследования процесса зубофрезерования и оптимизации его конструктивных и технологических параметров в простых и комбинированных схемах нарезания зубчатых колес червячными фрезами : 05.03.01 : дис. ... докт. техн. наук. / А. Г. Ничков ; - Тула, 1991. – 566 с. – Текст : непосредственный.
29. Ничкова, С. А. Исследование процесса зубофрезерования и его интенсификация путем управления параметрами резания в разных схемах, циклах и периодах нарезания цилиндрических зубчатых колес червячными фрезами : 05.03.01 : дис. ... канд. техн. наук. / С. А. Ничкова. – Екатеринбург, 2002. – 195 с. – Текст : непосредственный.
30. Бараболя, С. Я. Зубофрезерования цiлiндричних зубчастих колiс червячними фрезами / С.Я. Бараболя. – Киев : Технiка. 1992. 48 с. – Текст : непосредственный.

31. Сахаров, Г. Н. Металлорежущие инструменты / Г. Н. Сахаров, О. Б. Арбузов, Ю. Л. Боровой, В. А. Гречишников, А. С. Киселев. – Москва : Машиностроение. 1989. 328 с. – Текст : непосредственный.
32. ГОСТ 19042-80 Пластины сменные многогранные. Классификация. Система обозначений. Формы : Межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19.06.80 N 2903 / разработан и внесен Министерством цветной металлургии СССР. – Москва : Стандартиформ, 1980. – 19 с. – Текст : непосредственный.
33. ГОСТ 24257-80 Пластины режущие сменные многогранные твердосплавные ромбической формы с углом 55 град., с отверстием и стружколомающими канавками на двух сторонах. Конструкция и размеры : Межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19.06.80 N 2915 / разработан и внесен Министерством цветной металлургии СССР. – Москва : Стандартиформ, 1980. – 5 с. – Текст : непосредственный.
34. Sandvik Coromant : Инструментальная компания : сайт. – URL : <https://www.sandvik.coromant.com> (дата обращения: 15.01.2019). – Текст : электронный.
35. Ingersoll Cutting Tools : Инструментальная компания : сайт. – URL : <https://www.ingersoll-imc.com> (дата обращения: 15.01.2019). – Текст : электронный.
36. Пат. 2693578 РФ, МПК B23F21/16 Сборная червячно-модульная фреза : № 2017143186 : заявл. 11.12.2017 : опубл. 03.07.2019 / Пиженков Е.Н., Подгорбунских В.М. ; патентообладатель ОАО «Свердловский инструментальный завод». - Текст : непосредственный.
37. Пат. 187253 РФ, МПК B23F21/16 Фреза червячная сборная : № 2017146419 : заявл. 27.12.2017 : опубл. 26.02.2019 / Ничков А.В., Ничков А.Г. ; патентообладатель Ничков Андрей Владимирович.

38. Пат. 181245 РФ, МПК В23F21/16 Фреза червячная сборная : № 2017146420 : заявл. 27.12.2017 : опубл. 06.0.2018 / Ничков А.В., Ничков А.Г. ; патентообладатель Ничков Андрей Владимирович.
39. Андреев, В. Н. Справочник технолога машиностроителя // А. Н. Афонин, В. Ф. Безъязычный, Э. М. Берлинер, А. И. Болдырев, В. С. Булошников, М. В. Вартанов, С. Г. Васильев, А. С. Верещака, Д. В. Виноградов, А. Е. Древаль, Л. Я. Гиловой, В. А. Гречишников, Б. Д. Даниленко, П. В. Домнин, Е. А. Заставный, Н. Н. Зубков, А. В. Киричек, С. В. Кирсанов, Д. Н. Клауч, М. П. Козочкин, А. В. Крутов, А. А. Кутин, М. Е. Кущева, А. В. Литвиненко, О. В. Мальков, А. Р. Маслов, В. В. Молодцов, А. И. Овчинников, А. Г. Острецов, Ю. Е. Петухов, Ф. С. Сабиров, В. П. Смоленцев, Д. Л. Соловьев, Т. В. Тарасова, М. В. Туркин, А. В. Чурилин, А. А. Шатилов, С. Ю. Шачнев, Ю. А. Шачнев, А. В. Шулепов. - Москва : Инновационное машиностроение. 2018. 818 с., т.2. – Текст : непосредственный.
40. Цвис, Ю. В. Острозаточенные червячные фрезы / Ю. В. Цвис, З. М. Бугаков. – Текст : непосредственный // Станки и инструмент. 1959. - №10. - С. 32-41.
41. Никитина, З. А. Профилирование червячных зуборезных фрез различных конструктивных параметров с положительным передним углом / З. А. Никитина. – Текст : непосредственный // Высокопроизводительные процессы и режимы производства и эксплуатации инструмента. Контроль качества материалов и изделий. 1975. - С. 17-41.
42. Настасенко, В. А., Повышение стойкости червячных фрез путем оптимизации геометрии режущего клина / В. А. Настасенко, Ю. Н. Сухоруков – Текст : непосредственный // Исследование зубообрабатывающих станков и инструментов и процессов резания. - Саратов, 1990. - С.40-47. – Текст : непосредственный.
43. Мартыненко, В. А. Расчет геометрических параметров лунок у вершинных кромок червячных фрез / В. А. Мартыненко, А. Н. Дьяченко. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. 1990. - №1. - С. 56-59.

44. Огарков, А. В. Высокопроизводительное зубофрезерование сборными червячными фрезами с поворотными рейками: 05.02.08 : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / А. В. Огарков ; ТулГУ. - Тула, 1997. – 36 с. – Текст : непосредственный.
45. Плосков, В. А. Исследование кинематических и геометрических параметров в процессе чернового зубофрезерования прямозубых колес червячными фрезами : 05.03.01 : дис. ... канд. техн. наук / В. А. Плосков ; - Свердловск, 1955. – 195 с. – Текст : непосредственный.
46. Медведицков, С. Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами с новыми схемами резания : 05.03.03 : автореф дис. ... докт. техн. наук. / С. Н. Медведицков ; Куйбышевский политехнический институт им. В. В. Куйбышева. – Куйбышев, 1974. – 42 с. – Текст : непосредственный.
47. Матюшин, В. М. Новая конструкция высокопроизводительных червячных зуборезных фрез больших диаметров / В. М. Матюшин. – Москва : 1957. - 28 с. – Текст : непосредственный.
48. Шевченко, А. Н. Современный зуборезный инструмент / А. Н. Шевченко. – Москва : НИИМАШ, 1976. - 57 с. – Текст : непосредственный.
49. Смольников, Н. Я. Производственные испытания червячно-модульных фрез с различными схемами резания / Н. Я. Смольников, С. П. Стольников, А. З. Сахаров – Текст : непосредственный // Физические процессы при резании металлов: материалы конференции. - Волгоград : Волгоградский политехнический институт, 1993. - С. 127-134. – Текст : непосредственный
50. Смольников, Н. Я. Высокопроизводительное фрезерование фасонными и двугловыми фрезами с новыми схемами резания : 05.02.08 : автореф дис. ... докт. техн. наук. / Н. Я. Смольников ; СамГТУ. - Самара, 1994. – 37 с. – Текст : непосредственный.
51. Ничков, А. Г. Влияние схемы резания при зубофрезеровании на износ зубьев червячной фрезы / А. Г. Ничков, Б. К. Шунаев – Текст : непосредственный // II Научно техническая конференция УПИ : тезисы

- докладов конференции. – Свердловск, 1968. - С. 54-60. – Текст : непосредственный.
52. Ничков, А. Г. Стойкость червячной фрезы в зависимости от схемы резания / А. Г. Ничков – Текст : непосредственный // Передовой научно-производственный опыт резания металлов : тезисы докладов конференции. – Свердловск, 1971. - С.29-33. – Текст : непосредственный.
53. Башкиров, В. Н. Экспериментальные исследования динамики процесса зубофрезерования крупно модульными червячными фрезами / В. Н. Башкиров. – Текст : непосредственный // Станки и инструмент. - 1984. - №12. - С. 31-37.
54. Tokawa T. High productivity dry hobbing system / T. Tokawa, Y. Nishimura, Y. Nakamura. - Text : electronic // Mitsubishi Heavy Ind. – 2001. - № 38(1). - P. 27-31.
55. Медведицков, С. Н. Толщина срезаемого слоя при нарезании зубчатых колес червячно-модульными фрезами / С. Н. Медведицков, А. Т. Нарожных, В. Ф. Чурбаков – Текст : непосредственный // Технология машиностроения. - Волгоград : Волгоградский политехнический институт, 1971. – С. 245-252. – Текст : непосредственный
56. Северилов, В. С. Силовые зависимости при зубофрезеровании / В. С. Северилов. – Текст : непосредственный // Станки и инструмент. - 1969. - №7. - С. 28-30.
57. Шабашов, С. П. Исследование путем моделирования работы сил резания и износа при зубофрезеровании / С. П. Шабашов, А. Г. Ничков – Текст : непосредственный // Исследование, расчет и конструирование машин : труды Уральского политехнического института. – Свердловск, 1966. - С. 106-113.
58. Гончаров, А. М. Исследование влияния режимов зубофрезерования на износ и стойкость червячных фрез / А. М. Гончаров, Ю. А. Деркач, Ю. Д. Беличенко. - Рукопись депонированная. – Украина : УкрНИИНТИ, 1985. - 11 с. – Текст : непосредственный.

- 59.Настасенко, В. А., Повышение стойкости червячных фрез путем оптимизации геометрии режущего клина / В. А. Настасенко, Ю. Н. Сухоруков – Текст : непосредственный // Исследование зубообрабатывающих станков и инструментов и процессов резания. - Саратов, 1990. - С.40-47. – Текст : непосредственный.
- 60.Ничков, А. Г. Повышение стойкости червячных фрез за счет выбора рациональных параметров зубофрезерования / В. А. Мартыненко, В. В. Лоскутов – Текст : непосредственный // Проблемы совершенствования малогабаритных зубофрезерных станков: материалы конференции. - Вильнюс, 1975. - С. 129-138. – Текст : непосредственный.
- 61.Курин, А. А. Стойкостные исследования червячно-модульных фрез с вершиной зуба, очерченной по дуге окружности : 05.03.01 : автореф дис. ... канд. техн. наук. / А. А. Курин. - Волгоград, 2000. – 22 с. – Текст : непосредственный.
- 62.Николаев, В. К. Сравнительные исследования попутного и встречного фрезерования прямозубых колес червячной фрезой : 05.03.01 : автореф дис. ... канд. техн. наук. / В. К. Николаев. - Москва, 1961. – 16 с. – Текст : непосредственный.
- 63.Николаев, В.К. Попутное и встречное фрезерование прямозубых колес червячными фрезами / В. К. Николаев, А. Г. Шмулевич – Текст : непосредственный // Прогрессивные методы и средства фрезерной и токарной обработки металлов: материалы конференции. – Москва, 1963. - С. 83-91. – Текст : непосредственный.
- 64.Кусова, Е. В. Износостойкость червячных фрез и технологические методы нарезания косозубых цилиндрических колес / Е. В. Кусова, Б. Я. Мокрицкий, Б.К. Шунаев. – Текст : непосредственный // Станки и инструмент, 1977. - №4. - С. 25-26.
- 65.Коганов, И. А. Экспериментальные исследования характера изменения крутящего момента при зубофрезеровании с равномерными и неравномерными радиальными подачами / И. А. Коганов, Л. А. Васин, Е. В.

- Савельев – Текст : непосредственный : труды преподавателей и слушателей Тульского горного института науч.-техн. знаний. - Тула, 1973. - С. 60-66.
66. Комаров, А. А. Повышение точности и производительности зубообработки крупномодульных колес путем стабилизации упругих отжатый системы СПИД : 05.02.08 : автореф дис. ... канд. техн. наук. / А. А. Комаров. - Курган, 1985. – 16 с. – Текст : непосредственный.
67. Башкина, Д. М. Исследование работоспособности вольфрамомолибденовых инструментальных сталей / Д. М. Башкина – Текст : непосредственный // Алмазно-абразивная обработка : материалы IV конференции инструментальщиков Западного Урала. - Пермь, 1967. - С. 116-122. – Текст : непосредственный.
68. Артамонов, Е. В. Методология расчета и проектирования сменных режущих пластин и сборных инструментов : учебное пособие / Е. В. Артамонов, Т. Е. Помигалова, Н. И. Смолин, М. Х. Утешев. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2005. – 152 с. – Текст : непосредственный.
69. Артамонов, Е. В. Инструментальные твердые сплавы и их влияние на работоспособность металлорежущих инструментов : учебное пособие / Е. В. Артамонов, В. М. Костив. – Тюмень : ТюмГНГУ, 1998. – 136 с. – Текст : непосредственный.
70. Артамонов, Е. В. Механика разрушения и прочность сменных режущих пластин из твердых сплавов / Е. В. Артамонов, Т. Е. Помигалова, А. М. Тверяков, М. Х. Утешев. – Тюмень : ТюмГНГУ. 2013. 148 с. – Текст : непосредственный.
71. Артамонов, Е. В. Напряженно-деформированное состояние и прочность режущих элементов инструментов / Е. В. Артамонов, И. А. Ефимович, Н. И. Смолин, М. Х. Утешев. – Москва : Недра. 2001. 199 с. – Текст : непосредственный.
72. Артамонов, Е. В. Выбор формы СМП для фрез с винтовым зубом / Е. В. Артамонов, В. А. Василькович // Новые технологии – нефтегазовому

региону : материалы 3-ей научно-практической конференции. – Тюмень : 2005. – С. 56-60. – Текст : непосредственный.

73. Артамонов, Е. В. Повышение работоспособности сборных фрез формированием винтовой линии сменными режущими пластинами : учебное пособие / Е. В. Артамонов, В. А. Василькович, В. В. Киреев, В. А. Шрайнер. – Тюмень : Вектор Бук, 2009. – 136 с. – Текст : непосредственный
74. Балков, В. П. Современные технологические подходы при изготовлении цилиндрических зубчатых колес в условиях мелкосерийного производства и особенности расчета и проектирования зуборезного инструмента / В. П. Балков, Л. И. Каменецкий, А. С. Кирютин, Е. А. Негинский, О. С. Отт, Д. Н. Пищулин. – Текст : непосредственный // Металлообработка. 2015, №4(88). – С. 2-6.
75. Артамонов, Е. В. Эффективность сборной фрезы со сменными твердосплавными пластинами с прогрессивной схемой резания / Е. В. Артамонов, Е. С. Абрамова, В. В. Киреев // Нефть и газ Западной Сибири : материалы международной научно-технической конференции. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. – С. 129-136. – Текст : непосредственный.
76. Артамонов, Е. В. Сборная червячная фреза с сменными твердосплавными пластинами / Е. В. Артамонов, В. В. Киреев // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении : материалы VI научно-технической интернет-конференции с международным участием. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2012. – С. 69-70. – Текст : непосредственный.
77. Ничкова, С. А. Интенсификация процесса зубофрезерования путем регулирования подачи / С. А. Ничкова – Текст : непосредственный // Автоматизация и прогрессивные технологии : материалы конференции. – Новоуральск, 1996. - С. 156-157. – Текст : непосредственный.
78. Артамонов, Е. В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов / Е. В. Артамонов. – Тюмень : ТюмГНГУ. 2003. 192 с. – Текст : непосредственный.

79. Artamonov, E. V. An interlocking side mill with retrofittable carbide blades for processing of coarse-pitch tooth wheels / E. V. Artamonov, V. V. Kireev. V. A. Zyryanov. - Text : electronic // MATEC Web of Conferences. - 2018. - № 224. – P. 1–5.
80. Artamonov, E. V. Lay-out of cutting blades in an assembly basic rack of a counterpart rack for hob gears / E. V. Artamonov, V. V. Kireev. V. A. Zyryanov. - Text : electronic // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. - № 709. – P. 1-6.
81. Artamonov, E. V. Modeling of process of gear milling for definition of the intense deformed state in replaceable many-sided plates of a worm mill / E. V. Artamonov, V. V. Kireev. V. A. Zyryanov. - Text : electronic // MATEC Web of Conferences. - 2019. - № 298. – P. 1–8.
82. Artamonov E.V. Application of the group scheme of cutting when processing coarse-grain cogwheels / E.V. Artamonov, V.V. Kireev. V.A. Zyryanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, - pp. 1-5
83. Артамонов, Е.В. Повышение эффективности зубофрезерования путем создания сборных фрез со сменными режущими твердосплавными пластинами / Е.В. Артамонов, В.В. Киреев, В.А. Зырянов // Известия Юго-Западного государственного университета – 2020. 24(1). – С. 35-51.
84. Мартыненко, В. А. Расчет геометрических параметров лунок у вершинных кромок червячных фрез / В. А. Мартыненко, А.Н. Дьяченко. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. 1990. - №1. - С. 56-59.
85. Никитина, З. А. Профилирование червячных зуборезных фрез различных конструктивных параметров с положительным передним углом / З. А. Никитина. – Текст : непосредственный // Высокопроизводительные процессы и режимы производства и эксплуатации инструмента. Контроль качества материалов и изделий. 1975. - С. 17-41.
86. Матюшин, В. М. Новая конструкция высокопроизводительных червячных зуборезных фрез больших диаметров / В. М. Матюшин. – Москва : 1957. - 28 с. – Текст : непосредственный.

87. Лашнев, С. И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ / С. И. Лашнев, М. И. Юликов. – Москва : Машиностроение. 1980. 207 с. – Текст : непосредственный.
88. Артамонов, Е. В. Разработка сборной фрезы для обработки шестерен КПП подъемника для ремонта скважин / Е. В. Артамонов, В. В. Киреев. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2013, - №6. – С. 114-118.
89. Андреев, Г. С. Методика определения контактных поверхностей инструмента при периодическом прерывистом резании / Г. С. Андреев. – Текст : непосредственный // Станки и инструмент. 1974, – №11. – С. 58-61.
90. Токарев, В. В. Имитационная математическая модель геометрических параметров процесса червячного зубофрезерования. Метрологические аспекты и алгоритмическое обеспечение : 05.03.01, 05.03.16 : автореф дис. ... канд. техн. наук. / В. В. Токарев. – Волгоград, 1998. – 20 с. – Текст : непосредственный.
91. Комиссаров, В. И. Исследование особенностей торцового фрезерования на участке врезания фрезы в заготовку и на участке выхода / В. И. Комиссаров, Р. М. Ибатуллин – Текст : непосредственный // Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов : материалы конференции. – Уфа, 1983. - С. 106-112. – Текст : непосредственный.
92. Коганов, И. А. Аналитическое определение толщины элементарных срезов при зубофрезеровании узковенцовых цилиндрических колес с радиальной подачей / И. А. Коганов, Л. А. Васин – Текст : непосредственный // Исследования в области механической обработки и сборки машин : материалы конференции. – Тула, 1975. - С. 22-27. – Текст : непосредственный.
93. Башкиров, В. Н. Программа расчета параметров сечения срезов и составляющих силы резания при зубофрезеровании / В. Н. Башкиров – Текст : непосредственный // 15 Межгосударственный симпозиум :

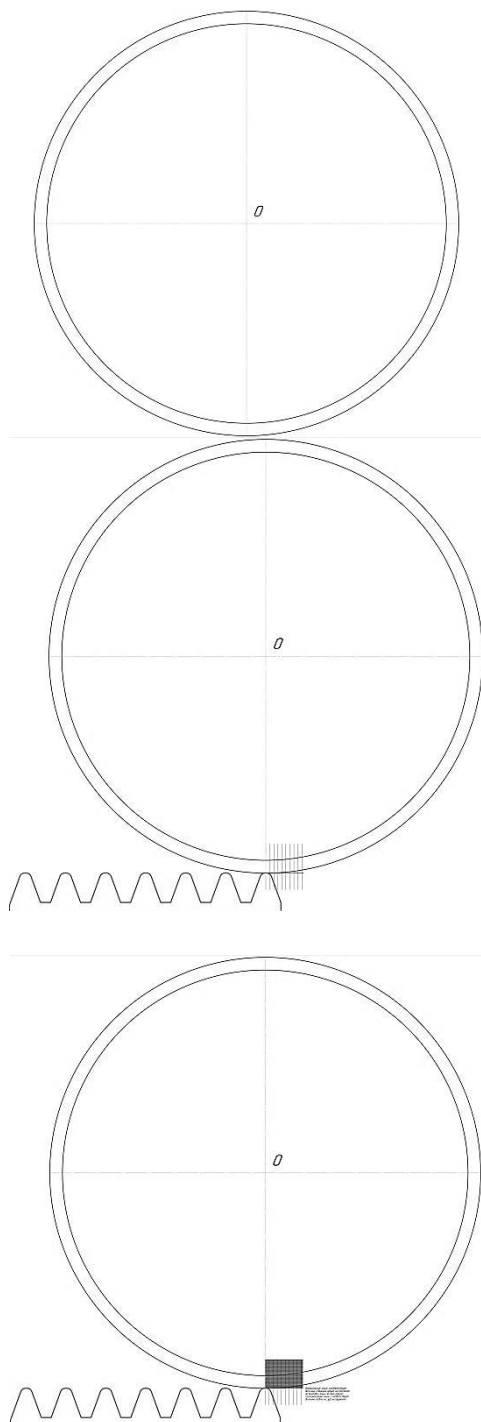
- материалы конференции. – Курган, 1993. - С.47-48. – Текст : непосредственный.
- 94.Сидоренко, Л. С. Расчет параметров слоя, срезаемого кромками червячной фрезы / Л. С. Сидоренко. – Текст : непосредственный // Станки и инструмент. - 1986, - №9. - С. 24-26.
- 95.Сидоренко, Л. С. Расчет параметров стружки, снимаемой цилиндрическими твердосплавными червячными фрезами с поворотными пластинами / Л. С. Сидоренко – Текст : непосредственный // Технология и автоматизация машиностроения : материалы конференции. – Киев, 1986. - С.108-114. – Текст : непосредственный.
- 96.Ничков, А. Г. Аналитический расчет зоны резания, размеров срезаемых слоев, износа и стойкости червячной фрезы при диагональном зубофрезеровании / А. Г. Ничков, Е. В. Кусова. - Рукопись депонированная. – Свердловск : УПИ, 1982. - 13 с. – Текст : непосредственный.
- 97.Володин, С. А. Исследование загрузки зубьев червячных фрез / С. А. Володин – Текст : непосредственный // Технология и автоматизация машиностроения : материалы конференции. – Киев, 1986. - С. 25-29. – Текст : непосредственный.
- 98.Кусова, Е. В. Методика расчета параметров слоев, срезаемых вершинными кромками червячной фрезы / Е. В. Кусова, Б. К. Шунаев – Текст : непосредственный // Прогрессивные процессы в машиностроении : материалы конференции. – Волгоград, 1982. - С. 48-54. – Текст : непосредственный.
- 99.Ничков, А. Г. Расчет силы резания при зубофрезеровании методом моделирования / А. Г. Ничков, В. А. Мартыненко – Текст : непосредственный // Зубообрабатывающий инструмент : материалы конференции. – Москва, 1969. - С. 446-458. – Текст : непосредственный.
100. Токарев, В. В. Имитационная математическая модель геометрических параметров процесса червячного зубофрезерования. Метрологические

- аспекты и алгоритмическое обеспечение : 05.03.01, 05.03.16 : автореф дис. ... канд. техн. наук. / В. В. Токарев. – Волгоград, 1998. – 20 с. – Текст : непосредственный.
101. Ничкова, С. А. Интенсификация процесса зубофрезерования в разные периоды нарезания зубчатых колес / С. А. Ничкова, А. П. Шершнеv – Текст : непосредственный // Проблемы и опыт комплексной автоматизации в машиностроении : тезисы докладов конференции. – Свердловск, 1988. - С. 18-24. – Текст : непосредственный.
 102. Ничкова, С. А. Зубофрезерование с переменной подачей в период выхода фрезы из заготовки / С. А. Ничкова – Текст : непосредственный // Применение автоматизированного проектирования режущих инструментов, технологических процессов, организационно-технической подготовки производства : тезисы докладов конференции. – Свердловск, 1989. - С. 41-45. – Текст : непосредственный.
 103. Ничков, А. Г. Интенсификация процесса зубофрезерования в разные периоды нарезания зубчатого колеса / А. Г. Ничков, С. А. Ничкова – Текст : непосредственный // Автоматизация и прогрессивные технологии : материалы конференции. – Новоуральск, 1996. - С. 191-192. – Текст : непосредственный.
 104. Андреев, Г.С. Методика определения контактных поверхностей инструмента при периодическом прерывистом резании / Г.С. Андреев. – Текст : непосредственный // Станки и инструмент. 1974, – №11. – С. 58-61.
 105. Петухов, Ю. Е. Профилирование червячных фрез численным методом / Ю. Е. Петухов. - Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного технологического университета. – Тула, 2017. - С. 341 – 347.
 106. Voschinobu T. Stress analysis in cutting edge Fundamental study of Cutting edge chipping / T. Voschinobu, I. Naoga, V. Kuniharu. - Text : electronic // I. Jap. Soc. Precis. Eng. – 1973. - № 10. – P. 1055-1061.

107. Bouzakis K. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes / K. Bouzakis, E. Lili, N. Michailidis, O. Friderikos. - Text : electronic // A critical synthesis of analysis methods. CIRP Annals - manufacturing Technology. – 2008. - № 2. – P. 676-696.
108. Bouzakis K. Gear hobbing cutting process simulation and tool wear prediction models / K. Bouzakis, S. Kombogiannis, A. Antoniadis, N. Vidakis. - Text : electronic // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2002. - № 1. - P. 42-51.
109. Fontaine M. Analytical simulation of milling: Influence of tool design on cutting forces / M. Fontaine, A. Devillez, D. Dudzinski. - Text : electronic // 12th IFToMM World Congress. - 2007. Besançon (France).
110. Agoston M. A. Computer Graphics an Geometric Modeling / M. A. Agoston. . - Text : electronic // Mathematics. – 2005. London.
111. Филоненко, С. Н. Резание металлов / С. Н. Филоненко – Киев : Вища школа. - 1969. 260 с. – Текст : непосредственный.
112. Пат. 2680122 РФ, МПК В23F21/16. Сборная червячная фреза : № 2017146947 : заявл. 28.12.2017 : опубл. 15.02.2019 / Артамонов Е.В., Киреев В.В., Зырянов В.А. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет». – Текст : непосредственный.
113. Пат. 2720011 РФ, МПК В23F21/16. Сборная червячная фреза с групповой схемой резания: № 2019115502 : заявл. 21.05.2019 : опубл. 23.04.2020 / Артамонов Е.В., Киреев В.В., Зырянов В.А, Чуйков Р.С. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет». – Текст : непосредственный.
114. Васильев, Д.В. Аддитивные технологии как активный помощник в создании металлорежущего инструмента / Д.В. Васильев, В.В. Киреев, В.А. Зырянов, И.С. Золотухин // Транспорт и машиностроение Западной Сибири – 2018. №1. – С. 45-53.

115. Силич, А.А. Технология обработки зубчатых колес цилиндрических передач Новикова / А.А. Силич – Тюмень : Научное издание. – изд. ТюмГНГУ. – 2007. 162 с. – Текст : непосредственный.
116. Литвин, Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф.Л. Литвин – Москва : Наука. – 1968. 584 с. – Текст : непосредственный.
117. Ерихов, М.Л. Синтез зубчатых зацеплений по условию нечувствительности к погрешностям монтажа / М.Л. Ерихов // Автомобильный транспорт. Серия: Теория механизмов и деталей машин – 1969. №17. – С. 2-36.

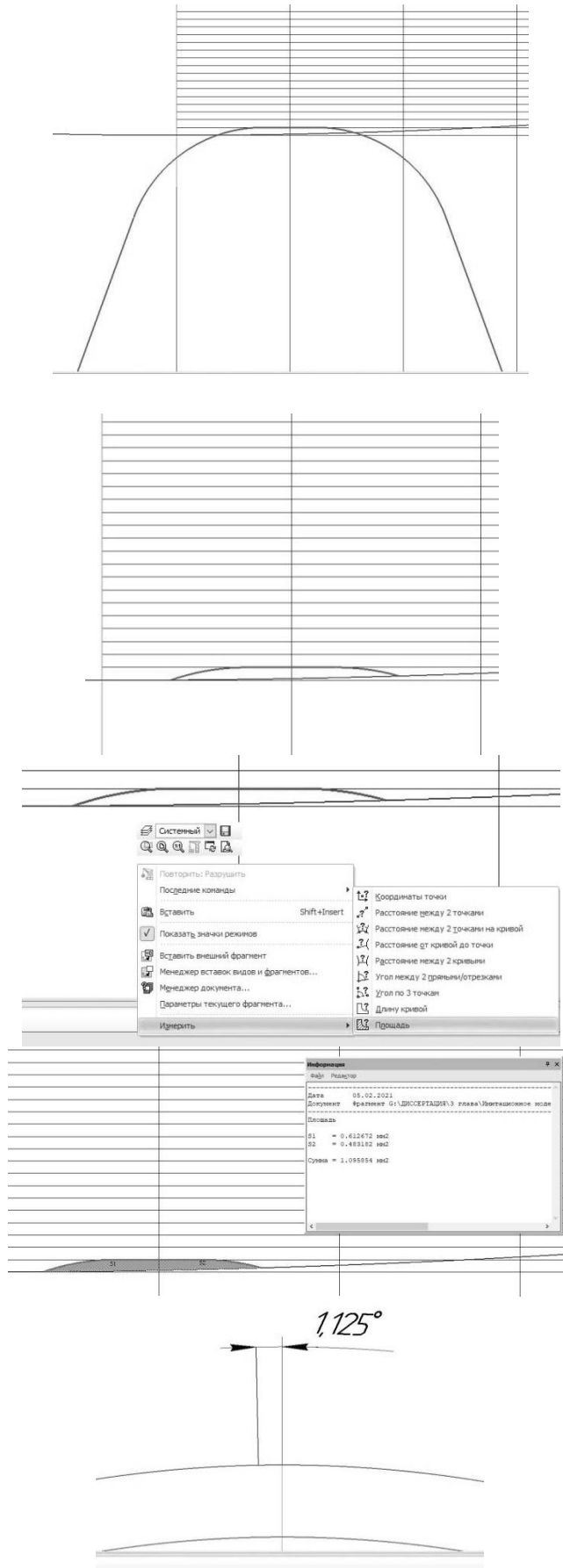
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Иллюстрация процесса имитационного моделирования



1. Вычертить эскизный проект обрабатываемого цилиндрического зубчатого колеса с обозначением его центра.

2. Расположить исходный профиль инструментальной рейки так, чтобы зубья инструмента произвели касание края заготовки обрабатываемого колеса, но не пересекли его.

3. На основании выбранной подачи, необходимо произвести расчет подачи на зуб инструмента за один оборот. Эту величину необходимо отложить от точки касания инструмента с заготовкой, что будет соответствовать горизонтальным линиям на чертеже. Вертикальные линии будут соответствовать количеству режущих зубьев инструмента.



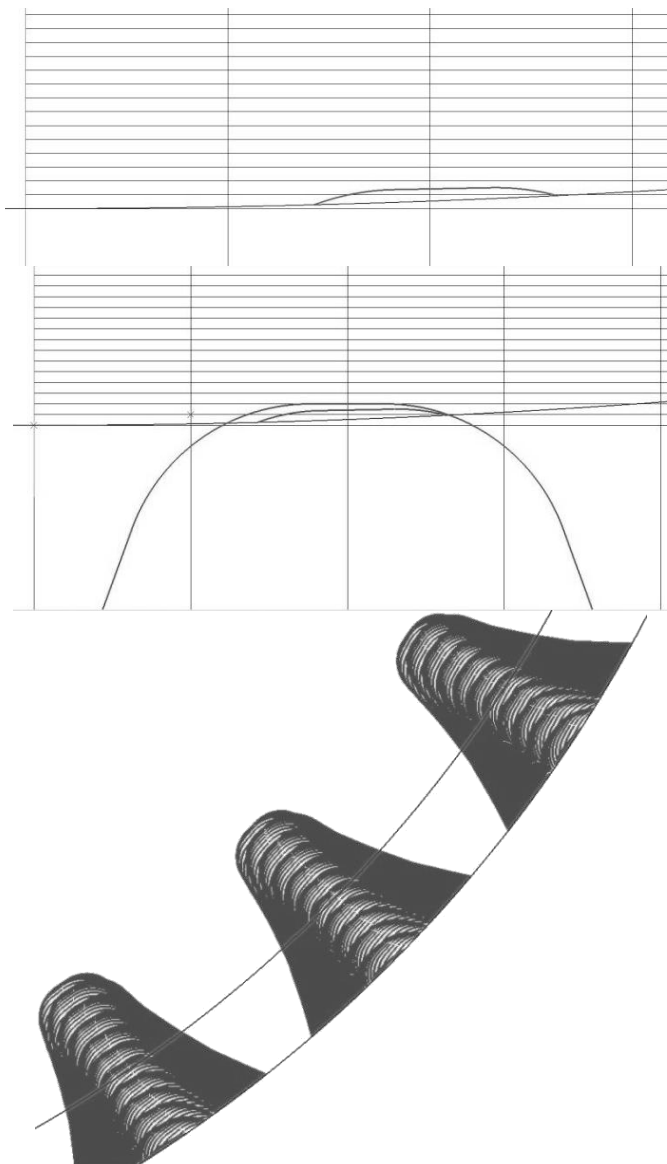
4. Производим заглабление инструмента на величину подачи на зуб (по горизонтальным линиям), одновременно перемещая инструмент на величину смещения зуба по винтовой линии (по вертикальным линиям) и поворачивая заготовку на величину углового шага поворота колеса относительно центра. Все движения необходимо производить одновременно для имитации процесса обработки.

5. Все линии контура режущего зуба, которые расположены ниже границ заготовки обрабатываемого колеса необходимо удалить.

6. Производим измерение площади очерченной линиями между контуром заготовки обрабатываемого колеса и контуром зуба фрезы после касания с заготовкой.

7. Результаты измерений площади срезаемого слоя записываем в таблицу (приложение А, Б, В) для дальнейшей обработки результатов имитационного моделирования.

8. Повторяем действия, описанные в п.4 и убеждаемся в повороте заготовки колеса.



9. Убеждаемся, что срезанный элемент также переместился на величину углового шага поворота.

10. Далее можно осуществлять следующее касание зуба червячной фрезы с обрабатываемой заготовкой и осуществлять действия, описанные в пунктах 4-9.

11. В результате проведения по данному алгоритму имитационного моделирования процесса механической обработки зубчатого колеса существует возможность получения фрагментов срезаемых слоев, оставленных режущими зубьями инструмента, с целью определения их площадей на всем этапе обработки.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Результаты проведенного имитационного
моделирования для стандартной червячной фрезы**

№	Смещение рейки	Глубина врезания	Угол поворота колеса	Круг	Зубья на рейке /рейка	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	4,398	0,3	1,125		2	0	0	0	1,1	0	0	0
3	8,796	0,6	2,25		3	0	0	0	1,05	0	0	0
4	13,194	0,9	3,375		4	0	0	0	0,69	0	0	0
5	17,592	1,2	4,5		5	0	0	0	0,33	0	0	0
6	21,99	1,5	5,625		6	0	0	1,67	0,13	0	0	0
7	26,388	1,8	6,75		7	0	0	7,9	0,02	0	0	0
8	30,786	2,1	7,875		8	0	0	9,63	0	0	0	0
9	35,184	2,4	9		9	0	0	8,73	0	0	0	0
10	39,582	2,7	10,125		10	0	0	4,5	0	0	0	0
11	43,98	3	11,25	2	1	0	0	0	3,99	0	0	0
12	48,378	3,3	12,375		2	0	0	0	3,29	0	0	0
13	52,776	3,6	13,5		3	0	0	0,59	2,56	0	0	0
14	57,174	3,9	14,625		4	0	0	1,63	1,87	0	0	0
15	61,572	4,2	15,75		5	0	0	2,31	1,26	0	0	0
16	65,97	4,5	16,875		6	0	0	2,98	0,86	0	0	0
17	70,368	4,8	18		7	0	0	8,33	0,55	0	0	0
18	74,766	5,1	19,125		8	0	0	9,87	0,33	0	0	0
19	79,164	5,4	20,25		9	0	0	8,94	0,18	0	0	0
20	83,562	5,7	21,375		10	0	0,01	4,67	0,07	0	0	0
21	87,96	6	22,5	3	1	0	0	0,63	4,14	0	0	0
22	92,358	6,3	23,625		2	0	0	1,13	3,49	0	0	0
23	96,756	6,6	24,75		3	0	0	1,4	2,83	0	0	0
24	101,154	6,9	25,875		4	0	0	1,71	2,25	0	0	0
25	105,552	7,2	27		5	0	0	2,18	1,8	0	0	0

продолжение Приложения Б

26	109,95	7,5	28,125		6	0	0	2,92	1,41	0	0	0
27	114,348	7,8	29,25		7	0	0	8,43	1,04	0	0	0
28	118,746	8,1	30,375		8	0	0	10,12	0,75	0	0	0
29	123,144	8,4	31,5		9	0	0,34	9,23	0,51	0	0	0
30	127,542	8,7	32,625		10	0	0,84	4,87	0,32	0	0	0
31	131,94	9	33,75	4	1	0	0	1,16	4,24	0,15	0	0
32	136,338	9,3	34,875		2	0	0	1,33	3,51	0,04	0	0
33	140,736	9,6	36		3	0	0	1,46	2,81	0	0	0
34	145,134	9,9	37,125		4	0	0	1,65	2,23	0	0	0
35	149,532	10,2	38,25		5	0	0	2,07	1,92	0	0	0
36	153,93	10,5	39,375		6	0	0	2,97	1,78	0	0	0
37	158,328	10,8	40,5		7	0	0	8,66	1,39	0	0	0
38	162,726	11,1	41,625		8	0	0,09	10,55	1,04	0	0	0
39	167,124	11,4	42,75		9	0	0,66	9,61	0,73	0	0	0
40	171,522	11,7	43,875		10	0	1,15	5,11	0,45	0	0	0
41	175,92	12	45	5	1	0	0	1,47	4,37	0,21	0	0
42	180,318	12,3	46,125		2	0	0	1,61	3,63	0,06	0	0
43	184,716	12,6	47,25		3	0	0	1,65	3	0	0	0
44	189,114	12,9	48,375		4	0	0	1,67	2,48	0	0	0
45	193,512	13,2	49,5		5	0	0	1,96	2,11	0	0	0
46	197,91	13,5	50,625		6	0	0	3,06	1,98	0	0	0
47	202,308	13,8	51,75		7	0	0	9,11	1,62	0	0	0
48	206,706	14,1	52,875		8	0	0,2	11,31	1,22	0	0	0
49	211,104	14,4	54		9	0	0,79	10,17	0,85	0	0	0
50	215,502	14,7	55,125		10	0	1,25	5,42	0,52	0	0	0
51	219,9	15	56,25	6	1	0	0	1,59	4,71	0,26	0	0
52	224,298	15,3	57,375		2	0	0	1,77	4,06	0,09	0	0
53	228,696	15,6	58,5		3	0	0	1,85	3,37	0,01	0	0
54	233,094	15,9	59,625		4	0	0	1,8	2,68	0	0	0
55	237,492	16,2	60,75		5	0	0	1,81	2,15	0	0	0
56	241,89	16,5	61,875		6	0	0	3,03	2,18	0	0	0
57	246,288	16,8	63		7	0	0	9,93	1,77	0	0	0

продолжение Приложения Б

58	250,686	17,1	64,125		8	0	0,34	12,47	1,33	0	0	0
59	255,084	17,4	65,25		9	0	0,92	10,89	0,94	0	0	0
60	259,482	17,7	66,375		10	0	1,34	6,14	0,6	0	0	0
61	263,88	18	67,5		1	0	0	1,65	5,35	0,31	0	0
62	268,278	18,3	68,625	7	2	0	0	1,8	4,53	0,13	0	0
63	272,676	18,6	69,75		3	0	0	1,86	3,69	0,02	0	0
64	277,074	18,9	70,875		4	0	0	1,82	2,81	0	0	0
65	281,472	19,2	72		5	0	0	1,73	2,04	0	0	0
66	285,87	19,5	73,125		6	0	0	2,31	2	0	0	0
67	290,268	19,8	74,25		7	0	0,02	9,75	1,88	0	0	0
68	294,666	20,1	75,375		8	0	0,49	13,74	1,44	0	0	0
69	299,064	20,4	76,5		9	0	1,03	11,86	1,03	0	0	0
70	303,462	20,7	77,625		10	0	1,42	6,94	0,68	0	0	0
71	307,86	21	78,75	8	1	0	0	1,7	5,99	0,38	0	0
72	312,258	21,3	79,875		2	0	0	1,82	5,01	0,17	0	0
73	316,656	21,6	81		3	0	0	1,86	4	0,04	0	0
74	321,054	21,9	82,125		4	0	0	1,8	2,96	0	0	0
75	325,452	22,2	83,25		5	0	0	1,71	2,07	0	0	0
76	329,85	22,5	84,375		6	0	0	2,33	2	0	0	0
77	334,248	22,8	85,5		7	0	0	12,86	1,96	0	0	0
78	338,646	23,1	86,625		8	0	0,72	14,8	1,55	0	0	0
79	343,044	23,4	87,75		9	0	1,14	12,84	1,13	0	0	0
80	347,442	23,7	88,875		10	0	1,5	7,75	0,76	0	0	0
81	351,84	24	90	9	1	0	0	1,74	6,64	0,44	0	0
82	356,238	24,3	91,125		2	0	0	1,84	5,49	0,22	0	0
83	360,636	24,6	92,25		3	0	0	1,85	4,34	0,06	0	0
84	365,034	24,9	93,375		4	0	0	1,78	3,28	0	0	0
85	369,432	25,2	94,5		5	0	0	2,59	2,72	0	0	0
86	373,83	25,5	95,625		6	0	0	3,96	2,19	0	0	0
87	378,228	25,8	96,75		7	0	0,18	12,62	2,1	0	0	0
88	382,626	26,1	97,875		8	0	0,78	14,53	1,68	0	0	0
89	387,024	26,4	99		9	0	1,24	13,13	1,23	0	0	0

продолжение Приложения Б

90	391,422	26,7	100,125	10	10	0	1,56	8,56	0,85	0	0	0
91	395,82	27	101,25		1	0	0	1,78	7,29	0,51	0	0
92	400,218	27,3	102,375		2	0	0	1,85	6,04	0,27	0	0
93	404,616	27,6	103,5		3	0	0	1,98	4,87	0,09	0	0
94	409,014	27,9	104,625		4	0	0	2,94	3,82	0	0	0
95	413,412	28,2	105,75		5	0	0	3,72	2,96	0	0	0
96	417,81	28,5	106,875		6	0	0	4,93	2,6	0	0	0
97	422,208	28,8	108		7	0	0,32	12,44	2,42	0	0	0
98	426,606	29,1	109,125		8	0	0,9	14,2	1,99	0	0	0
99	431,004	29,4	110,25		9	0	1,33	12,74	1,44	0	0	0
100	435,402	29,7	111,375	11	10	0	1,62	8,96	0,98	0	0	0
101	439,8	30	112,5		1	0	0	1,81	7,59	0,59	0	0
102	444,198	30,3	113,625		2	0	0	2,25	6,8	0,33	0	0
103	448,596	30,6	114,75		3	0	0	3,25	5,61	0,13	0	0
104	452,994	30,9	115,875		4	0	0	3,82	4,54	0,02	0	0
105	457,392	31,2	117		5	0	0	4,52	3,64	0	0	0
106	461,79	31,5	118,125		6	0	0,01	5,48	3,19	0	0	0
107	466,188	31,8	119,25		7	0	0,47	12,28	2,89	0	0	0
108	470,586	32,1	120,375		8	0	0,85	11,89	1,76	0	0	0
109	474,984	32,4	121,5		9	0	0,67	7,08	0,46	0	0	0
110	-	-	-		10	-	-	-	-	-	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ В - Результаты проведенного имитационного моделирования для сборной червячной фрезы с тангенциальными режущими элементами

№	Глубина врезания	Обознач.	Круг	Зубья на рейке /рейка	1	2	3	4	5	6
1	0,14	мл	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0,27	бл		2	0	0	0	0	0	0
3	0,41	мп		3	0	0	0	0	0	0
4	0,55	бп		4	0	0	0,013126	0	0	0
5	0,68	мл		5	0	0	0,328881	0	0	0
6	0,82	бл		6	0	0	1,036525	0	0	0
7	0,95	мп		7	0	0	2,358018	0	0	0
8	1,09	бп		8	0	0	1,028057	0	0	0
9	1,23	мл		9	0	0	2,730532	0	0	0
10	1,36	бл		10	0	0	1,188879	0	0	0
11	1,50	мп		11	0	0	1,725879	0	0	0
12	1,64	бп		12	0	0	0,623118	0	0	0
13	1,77	мл		13	0	0	2,702861	0	0	0
14	1,91	бл		14	0	0	0,937674	0	0	0
15	2,04	мп		15	0	0	0,863171	0	0	0
16	2,18	бп		16	0	0	0,255011	0	0	0
17	2,32	мл		17	0	0,129756	2,064447	0	0	0
18	2,45	бл		18	0	1,448519	2,011496	0	0	0
19	2,59	мп		19	0	1,531438	0,176982	0	0	0
20	2,73	бп		20	0	1,918286	0,067279	0	0	0
21	2,86	мл		21	0	4,633245	1,198491	0	0	0
22	3,00	бл		22	0	1,943287	0,290899	0	0	0
23	3,13	мп	2	1	0	0	2,564371	0,253594	0	0
24	3,27	бп		2	0	0	1,717531	0,15909	0	0

продолжение Приложения В

25	3,41	мл		3	0	0	7,266982	0	0	0
26	3,54	бл		4	0	0	2,123338	0	0	0
27	3,68	мп		5	0	0	3,266359	0,381813	0	0
28	3,82	бп		6	0	0	1,331857	0,057649	0	0
29	3,95	мл		7	0	0	5,151189	0	0	0
30	4,09	бл		8	0	0	1,709824	0	0	0
31	4,23	мп		9	0	0	2,285893	0,100514	0	0
32	4,36	бп		10	0	0	3,074501	0	0	0
33	4,50	мл		11	0	0,017575	1,257	0,004125	0	0
34	4,63	бл		12	0	0,943497	0,637411	0	0	0
35	4,77	мп		13	0	5,710244	4,630213	0	0	0
36	4,91	бп		14	0	3,496984	0,731473	0	0	0
37	5,04	мл		15	0	4,703145	7,241355	0	0	0
38	5,18	бл		16	0	6,717947	0,52462	0	0	0
39	5,32	мп		17	0	3,27317	0,127759	0	0	0
40	5,45	бп		18	0	2,924402	0,053272	0	0	0
41	5,59	мл		19	0	6,764794	3,865981	0	0	0
42	5,72	бл		20	0	4,251363	2,123834	0	0	0
43	5,86	мп		21	0	5,210362	0	0	0	0
44	6,00	бп		22	0	2,596265	0	0	0	0
45	6,13	мл	3	1	0	0	2,4525	3,910339	0	0
46	6,27	бл		2	0	0	1,621819	0	0	0
47	6,41	мп		3	0	0	14,686046	0	0	0
48	6,54	бп		4	0	0	1,529751	0	0	0
49	6,68	мл		5	0	0,058397	4,138692	0	0	0
50	6,82	бл		6	0	1,842485	1,765459	0	0	0
51	6,95	мп		7	0	1,660564	2,901392	0	0	0
52	7,09	бп		8	0	2,724308	1,087204	0	0	0
53	7,22	мл		9	0	8,055582	4,018706	0	0	0
54	7,36	бл		10	0	3,40697	1,39633	0	0	0
55	7,50	мп		11	0	7,606935	1,910192	0	0	0
56	7,63	бп		12	0	3,60762	0,658162	0	0	0

продолжение Приложения В

57	7,77	мл		13	0	7,809867	6,021821	0	0	0
58	7,91	бл		14	0	2,942208	0,925238	0	0	0
59	8,04	мп		15	0	8,816862	0,962769	0	0	0
60	8,18	бп		16	0	3,253509	0,262383	0	0	0
61	8,31	мл		17	0	7,066114	5,21761	0	0	0
62	8,45	бл		18	0	6,868273	0,21272	0	0	0
63	8,59	мп		19	0	3,911029	0,053531	0	0	0
64	8,72	бп		20	0	2,763913	0,007225	0	0	0
65	8,86	мл		21	0	7,13833	4,127891	0	0	0
66	9,00	бл		22	0	2,025059	0,114294	0	0	0
67	9,13	мп		1	0	0	2,851254	1,345594	0	0
68	9,27	бп		2	0	0,847884	1,797028	0,048258	0	0
69	9,40	мл		3	0	8,027588	14,645224	0	0	0
70	9,54	бл		4	0	4,158532	2,039291	0	0	0
71	9,68	мп		5	0	6,640789	3,764239	2,033579	0	0
72	9,81	бп		6	0	4,051455	1,347876	0,004101	0	0
73	9,95	мл		7	0	9,752843	9,460144	0	0	0
74	10,09	бл		8	0	3,689201	1,562532	0	0	0
75	10,22	мп		9	0	9,841877	2,572482	1,06188	0	0
76	10,36	бп		10	0	3,921454	0,905454	0	0	0
77	10,50	мл		11	0	9,693682	8,55372	0	0	0
78	10,63	бл		12	0	3,222446	1,090809	0	0	0
79	10,77	мп		13	0	11,00004	1,548105	0,282174	0	0
80	10,90	бп		14	0	3,426082	0,476225	0	0	0
81	11,04	мл	4	15	0	8,922451	7,228258	0	0	0
82	11,18	бл		16	0	2,759656	0,624633	0	0	0
83	11,31	мп		17	0	11,893811	0,58471	0	0	0
84	11,45	бп		18	0	2,935927	0,095788	0	0	0
85	11,59	мл		19	0	7,621634	5,543052	0	0	0
86	11,72	бл		20	1,03024	2,301076	0,166765	0	0	0
87	11,86	мп		21	9,394431	12,207045	0	0	0	0
88	11,99	бп		22	4,681608	2,45082	0	0	0	0

продолжение Приложения В

89	12,13	мл	5	1	0	5,652145	4,740268	0	0	0
90	12,27	бл		2	0	4,445367	2,213346	0	0	0
91	12,40	мп		3	0	11,14022	7,260879	4,532387	0	0
92	12,54	бп		4	0	4,57572	1,617606	0,000237	0	0
93	12,68	мл		5	0	11,86451	11,571863	0	0	0
94	12,81	бл		6	0	3,974389	1,7359	0	0	0
95	12,95	мп		7	0	11,560989	3,636566	1,788932	0	0
96	13,08	бп		8	0	4,102006	1,170301	0	0	0
97	13,22	мл		9	0	11,894543	10,586549	0	0	0
98	13,36	бл		10	0	3,505874	1,262615	0	0	0
99	13,49	мп		11	0	13,05303	2,330375	0,734902	0	0
100	13,63	бп		12	0	3,605997	0,728151	0	0	0
101	13,77	мл		13	0	11,134711	9,150944	0	0	0
102	13,90	бл		14	0	3,040815	0,796626	0	0	0
103	14,04	мп		15	0,433223	13,964499	1,183833	0,110979	0	0
104	14,18	бп		16	3,193197	3,115036	0,296366	0	0	0
105	14,31	мл		17	2,42672	9,781923	8,114688	0	0	0
106	14,45	бл		18	3,761941	2,580203	0,33471	0	0	0
107	14,58	мп		19	12,344038	14,272215	0,209171	4,974132	0	0
108	14,72	бп		20	4,974132	2,629282	0,005321	0	0	0
109	14,86	мл		21	10,573098	8,000209	5,168385	0	0	0
110	14,99	бл		22	5,007477	2,124107	0,052159	0	0	0
111	15,13	мп	6	1	0	7,015677	3,654596	1,882191	0	0
112	15,27	бп		2	0	4,783422	1,89541	0	0	0
113	15,40	мл		3	0	22,563946	20,528943	0	0	0
114	15,54	бл		4	0	4,267229	1,910374	0	0	0
115	15,67	мп		5	0	13,571489	5,251636	2,636079	0	0
116	15,81	бп		6	0	4,283087	1,445892	0	0	0
117	15,95	мл		7	0	14,590779	12,614084	0	0	0
118	16,08	бл		8	0	3,797022	1,437498	0	0	0
119	16,22	мп		9	0	15,104364	3,634539	1,367746	0	0
120	16,36	бп		10	0	3,786766	1,000897	0	0	0

продолжение Приложения В

121	16,49	мл		11	0	13,855707	11,072685	0	0	0
122	16,63	бл		12	0	3,329899	0,969823	0	0	0
123	16,76	мп		13	6,191086	16,013105	2,190623	0,454577	0	0
124	16,90	бп		14	5,681717	3,295242	0,560389	0	0	0
125	17,04	мл		15	5,696319	12,457368	10,069717	0	0	0
126	17,17	бл		16	5,035484	2,867171	0,507345	0	0	0
127	17,31	мп		17	14,643633	16,312697	0,920742	0,018308	0	0
128	17,45	бп		18	5,274491	2,808881	0,125388	0	0	0
129	17,58	мл		19	12,405279	10,573613	6,749195	0	0	0
130	17,72	бл		20	5,218091	2,40898	0,057142	0	0	0
131	17,86	мп		21	16,851706	16,023966	0,001199	0	0	0
132	17,99	бп		22	4,799439	2,327659	0	0	0	0
133	18,13	мл	7	1	0	9,895167	7,961851	0	0	0
134	18,26	бл		2	0	4,565777	2,089011	0	0	0
135	18,40	мп		3	0	21,277752	32,878516	5,955071	0	0
136	18,54	бп		4	0	4,467538	1,727352	0	0	0
137	18,67	мл		5	0	17,689104	14,549931	0	0	0
138	18,81	бл		6	0	4,093659	1,615539	0	0	0
139	18,95	мп		7	0	16,999616	5,485721	2,145018	0	0
140	19,08	бп		8	0	3,971528	1,279989	0	0	0
141	19,22	мл		9	0,003735	17,00051	12,923257	0	0	0
142	19,35	бл		10	1,435053	3,624524	1,147232	0	0	0
143	19,49	мп		11	13,096795	19,694995	3,735792	0,991579	0	0
144	19,63	бп		12	6,058453	3,479653	0,837161	0	0	0
145	19,76	мл		13	9,3294	15,239585	11,980454	0	0	0
146	19,90	бл		14	5,721129	3,15968	0,68441	0	0	0
147	20,04	мп		15	17,465426	18,215973	2,998678	0,235173	0	0
148	20,17	бп		16	5,580395	2,992661	0,398453	0	0	0
149	20,31	мл		17	13,781304	13,619286	8,329025	0	0	0
150	20,45	бл		18	5,403989	2,699239	0,234575	0	0	0
151	20,58	мп		19	20,035209	17,913388	0	0	0	0
152	20,72	бп		20	5,103642	2,510829	0,005096	0	0	0

продолжение Приложения В

153	20,85	мл	8	21	16,138614	11,277386	5,450922	0	0	0
154	20,99	бл		22	4,903987	2,243202	0,097201	0	0	0
155	21,13	мп		1	0	9,964722	5,014838	2,109352	0	0
156	21,26	бп		2	0	4,655115	2,014092	0	0	0
157	21,40	мл		3	0	30,403426	24,82936	0	0	0
158	21,54	бл		4	0	4,39563	1,797782	0,021421	0	0
159	21,67	мп		5	0	10,63754	4,484614	0	0	0
160	21,81	бп		6	2,466248	4,920196	1,786436	0	0	0
161	21,94	мл		7	1,777118	20,620825	16,514121	0	0	0
162	22,08	бл		8	3,665173	3,924688	1,328862	0	0	0
163	22,22	мп		9	16,098255	26,965202	8,88694	4,620677	0	0
164	22,35	бп		10	6,371229	3,66808	1,119799	0	0	0
165	22,49	мл		11	12,112718	19,154468	12,50619	0	0	0
166	22,63	бл		12	6,07914	3,457729	0,866288	0	0	0
167	22,76	мп		13	20,568265	19,982948	3,942327	0,667209	0	0
168	22,90	бп		14	5,891721	3,180652	0,678599	0	0	0
169	23,03	мл		15	19,235912	18,633182	9,872509	0	0	0
170	23,17	бл		16	5,592365	2,995172	0,418604	0	0	0
171	23,31	мп		17	23,539616	19,675594	2,916295	0,084248	0	0
172	23,44	бп		18	5,413429	2,698204	0,240502	0	0	0
173	23,58	мл		19	17,690425	14,660451	6,562198	0	0	0
174	23,72	бл		20	5,093791	2,537019	0,533714	0	0	0
175	23,85	мп		21	24,876599	18,773983	0,971548	0	0	0
176	23,99	бп		22	4,936844	2,220917	0,029991	0	0	0
177	24,13	мл	9	1	0	13,416759	22,166805	0,168181	0	0
178	24,26	бл		2	0	4,703223	1,984232	0,012513	0	0
179	24,40	мп		3	1,806437	28,92273	16,877257	6,632496	0	0
180	24,53	бп		4	5,227688	4,351179	1,855042	0	0	0
181	24,67	мл		5	3,737384	24,544503	18,349262	0,11772	0	0
182	24,81	бл		6	5,125497	4,230379	1,514802	0,000178	0	0
183	24,94	мп		7	18,450166	21,284644	8,447385	2,522907	0	0
184	25,08	бп		8	6,689408	3,860092	1,407906	0	0	0

продолжение Приложения В

185	25,22	мл		9	13,793214	23,160489	14,102726	0	0	0
186	25,35	бл		10	6,28226	3,76132	1,053027	0	0	0
187	25,49	мп		11	23,913597	21,60527	6,263313	1,279433	0	0
188	25,62	бп		12	6,208465	3,372747	0,964158	0	0	0
189	25,76	мл		13	16,501969	21,097032	1,923648	0	0	0
190	25,90	бл		14	5,783071	3,296646	2,512672	0	0	0
191	26,03	мп		15	27,343164	21,301383	4,254146	0,399816	0	0
192	26,17	бп		16	5,728653	2,889791	0,523512	0	0	0
193	26,31	мл		17	19,085277	18,53214	7,694767	0	0	0
194	26,44	бл		18	5,286122	2,836376	1,099842	0	0	0
195	26,58	мп		19	29,008346	20,370923	2,429936	0,007506	0	0
196	26,71	бп		20	5,250441	2,411888	0,136294	0	0	0
197	26,85	мл		21	21,020377	15,68967	6,045886	0	0	0
198	26,99	бл		22	4,791665	2,38051	0	0	0	0
199	27,12	мп	10	1	5,19692	12,347788	6,921013	2,338822	0	0
200	27,26	бп		2	6,96756	4,545484	2,150885	0	0	0
201	27,40	мл		3	5,501306	42,214758	27,39589	1,502003	0	0
202	27,53	бл		4	5,993903	4,541536	1,705153	0,026471	0	0
203	27,67	мп		5	21,069091	22,739932	11,613264	3,459804	0	0
204	27,81	бп		6	7,012934	4,055277	1,701366	0	0	0
205	27,94	мл		7	14,984312	27,592769	15,610229	0,328941	0	0
206	28,08	бл		8	6,47313	4,0704	1,24373	0,006737	0	0
207	28,21	мп		9	27,477936	23,079061	9,124503	2,040275	0	0
208	28,35	бп		10	6,530573	3,568461	1,255071	0	0	0
209	28,49	мл		11	17,723005	25,514475	12,895994	0,06025	0	0
210	28,62	бл		12	5,975912	3,603612	0,795526	0	0	0
211	28,76	мп		13	31,426971	22,785266	6,810684	0,91467	0	0
212	28,90	бп		14	6,049259	3,08548	0,811877	0	0	0
213	29,03	мл		15	20,32458	22,873027	10,149383	0	0	0
214	29,17	бл		16	5,480816	3,141275	0,375205	0	0	0
215	29,30	мп		17	33,440511	21,872826	4,672707	0,195448	0	0
216	29,44	бп		18	5,569445	2,607019	0,371786	0	0	0

продолжение Приложения В

217	29,58	мл	11	19	22,292007	19,832446	7,495926	0	0	0
218	29,71	бл		20	4,987946	2,683292	0,020492	0	0	0
219	29,85	мп		21	33,91791	22,966649	2,789262	0	0	0
220	29,99	бп		22	5,091697	2,133865	0,132579	0	0	0
221	30,12	мл		1	14,286352	17,449716	9,826874	0,905299	0	0
222	30,26	бл		2	6,603546	4,858301	1,899816	0	0	0
223	30,39	мп		3	33,979343	34,805224	23,835624	7,32758	0	0
224	30,53	бп		4	7,341962	4,253514	2,000324	0	0	0
225	30,67	мл		5	15,922397	32,44225	17,018458	1,273168	0	0
226	30,80	бл		6	6,66613	4,385122	1,438083	0,042764	0	0
227	30,94	мп		7	31,233527	24,400482	12,525952	2,921278	0	0
228	31,08	бп		8	6,858195	3,767569	1,551479	0	0	0
229	31,21	мл		9	18,794496	30,37406	2,708312	0,674343	0	0
230	31,35	бл		10	6,170925	3,916216	0,988471	0,018006	0	0
231	31,49	мп		11	35,769642	24,122936	9,907821	1,595717	0	0

ПРИЛОЖЕНИЕ Г - Результаты проведенного имитационного моделирования для сборной червячной фрезы с групповой схемой резания

№	Смещение рейки	Глубина врезания	Угол поворота колеса	Круг	Зубья на рейке/рейка	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1,7592	0,12	0,45		2	0	0	0	0	0	0	0
3	3,5184	0,24	0,9		3	0	0	0	0	0	0	0
4	5,2776	0,36	1,35		4	0	0	0	0	0	0	0
5	7,0368	0,48	1,8		5	0	0	0	0	0	0	0
6	8,796	0,6	2,25		6	0	0	0	0,88	0	0	0
7	10,5552	0,72	2,7		7	0	0	0	0	0	0	0
8	12,3144	0,84	3,15		8	0	0	0	0	0	0	0
9	14,0736	0,96	3,6		9	0	0	0	0	0	0	0
10	15,8328	1,08	4,05		10	0	0	0	0	0	0	0
11	17,592	1,2	4,5		11	0	0	0	0,56	0	0	0
12	19,3512	1,32	4,95		12	0	0	0	0	0	0	0
13	21,1104	1,44	5,4		13	0	0	0	0	0	0	0
14	22,8696	1,56	5,85		14	0	0	0	0	0	0	0
15	24,6288	1,68	6,3		15	0	0	0	0	0	0	0
16	26,388	1,8	6,75		16	0	0	3,58	0,03	0	0	0
17	28,1472	1,92	7,2		17	0	0	0	0	0	0	0
18	29,9064	2,04	7,65		18	0	0	0	0	0	0	0
19	31,6656	2,16	8,1		19	0	0	0	0	0	0	0
20	33,4248	2,28	8,55		20	0	0	0	0	0	0	0
21	35,184	2,4	9		21	0	0	6,8	0	0	0	0
22	36,9432	2,52	9,45		22	0	0	0	0	0	0	0
23	38,7024	2,64	9,9		23	0	0	0	0	0	0	0
24	40,4616	2,76	10,35		24	0	0	0	0	0	0	0
25	42,2208	2,88	10,8		25	0	0	0,05	0	0	0	0

продолжение Приложения Г

26	43,98	3	11,25	2	1	0	0	6,53	0	0	0	0
27	45,7392	3,12	11,7		2	0	0	0	0,31	0	0	0
28	47,4984	3,24	12,15		3	0	0	0	0	0	0	0
29	49,2576	3,36	12,6		4	0	0	0	0	0	0	0
30	51,0168	3,48	13,05		5	0	0	0	0,14	0	0	0
31	52,776	3,6	13,5		6	0	0	0,1	4,35	0	0	0
32	54,5352	3,72	13,95		7	0	0	0	0,91	0	0	0
33	56,2944	3,84	14,4		8	0	0	0	0	0	0	0
34	58,0536	3,96	14,85		9	0	0	0	0	0	0	0
35	59,8128	4,08	15,3		10	0	0	0,13	0	0	0	0
36	61,572	4,2	15,75		11	0	0	3,66	2,05	0	0	0
37	63,3312	4,32	16,2		12	0	0	0	0,83	0	0	0
38	65,0904	4,44	16,65		13	0	0	0	0	0	0	0
39	66,8496	4,56	17,1		14	0	0	0	0	0	0	0
40	68,6088	4,68	17,55		15	0	0	1,68	0	0	0	0
41	70,368	4,8	18		16	0	0	5,76	0,63	0	0	0
42	72,1272	4,92	18,45		17	0	0	0	0,44	0	0	0
43	73,8864	5,04	18,9		18	0	0	0	0	0	0	0
44	75,6456	5,16	19,35		19	0	0	0	0	0	0	0
45	77,4048	5,28	19,8		20	0	0	1,1	0	0	0	0
46	79,164	5,4	20,25		21	0	0	7,35	0,03	0	0	0
47	80,9232	5,52	20,7		22	0	0	0,31	0,11	0	0	0
48	82,6824	5,64	21,15		23	0	0	0	0	0	0	0
49	84,4416	5,76	21,6		24	0	0	0	0	0	0	0
50	86,2008	5,88	22,05		25	0	0	0,6	0	0	0	0
51	87,96	6	22,5	3	1	0	0	0	7,06	0	0	0
52	89,7192	6,12	22,95		2	0	0	0	2,11	0	0	0
53	91,4784	6,24	23,4		3	0	0	0	0	0	0	0
54	93,2376	6,36	23,85		4	0	0	0	0	0	0	0
55	94,9968	6,48	24,3		5	0	0	1,51	0,2	0	0	0
56	96,756	6,6	24,75		6	0	0	0	4,13	0	0	0
57	98,5152	6,72	25,2		7	0	0	0	2,37	0	0	0

продолжение Приложения Г

58	100,2744	6,84	25,65	4	8	0	0	0	0	0	0	0
59	102,0336	6,96	26,1		9	0	0	0	0	0	0	0
60	103,7928	7,08	26,55		10	0	0	2,4	0	0	0	0
61	105,552	7,2	27		11	0	0	2,67	1,73	0	0	0
62	107,3112	7,32	27,45		12	0	0	0	2,36	0	0	0
63	109,0704	7,44	27,9		13	0	0	0	0	0	0	0
64	110,8296	7,56	28,35		14	0	0	0	0	0	0	0
65	112,5888	7,68	28,8		15	0	0	1,9	0	0	0	0
66	114,348	7,8	29,25		16	0	0	5,63	0,38	0	0	0
67	116,1072	7,92	29,7		17	0	0	0	1,67	0	0	0
68	117,8664	8,04	30,15		18	0	0	0	0	0	0	0
69	119,6256	8,16	30,6		19	0	0	0	0	0	0	0
70	121,3848	8,28	31,05		20	0	0,02	1,23	0	0	0	0
71	123,144	8,4	31,5		21	0	0	7,88	0	0	0	0
72	124,9032	8,52	31,95		22	0	0	0,91	0,93	0	0	0
73	126,6624	8,64	32,4		23	0	0	0	0	0	0	0
74	128,4216	8,76	32,85		24	0	0	0	0	0	0	0
75	130,1808	8,88	33,3		25	0	1,54	0,69	0	0	0	0
76	131,94	9	33,75		1	0	0	0	7,11	0	0	0
77	133,6992	9,12	34,2		2	0	0	0	2,04	0,31	0	0
78	135,4584	9,24	34,65		3	0	0	0	0	0	0	0
79	137,2176	9,36	35,1		4	0	0	0	0	0	0	0
80	138,9768	9,48	35,55		5	0	0	2,41	0,24	0	0	0
81	140,736	9,6	36		6	0	0	0	3,97	0	0	0
82	142,4952	9,72	36,45		7	0	0	0	2,26	0	0	0
83	144,2544	9,84	36,9		8	0	0	0	0	0	0	0
84	146,0136	9,96	37,35		9	0	0	0	0	0	0	0
85	147,7728	10,08	37,8		10	0	0	2,6	0	0	0	0
86	149,532	10,2	38,25		11	0	0	1,9	1,42	0	0	0
87	151,2912	10,32	38,7		12	0	0	0	2,81	0	0	0
88	153,0504	10,44	39,15		13	0	0	0	0	0	0	0
89	154,8096	10,56	39,6		14	0	0	0	0	0	0	0

продолжение Приложения Г

90	156,5688	10,68	40,05	5	15	0	0	4,58	0	0	0	0
91	158,328	10,8	40,5		16	0	0	5,49	0,17	0	0	0
92	160,0872	10,92	40,95		17	0	0	0	2,6	0	0	0
93	161,8464	11,04	41,4		18	0	0	0	0	0	0	0
94	163,6056	11,16	41,85		19	0	0	0	0	0	0	0
95	165,3648	11,28	42,3		20	0	0,5	1,44	0	0	0	0
96	167,124	11,4	42,75		21	0	0	8,62	0	0	0	0
97	168,8832	11,52	43,2		22	0	0	1,35	1,47	0	0	0
98	170,6424	11,64	43,65		23	0	0	0	0	0	0	0
99	172,4016	11,76	44,1		24	0	0	0	0	0	0	0
100	174,1608	11,88	44,55		25	0	2,29	0,8	0	0	0	0
101	175,92	12	45		1	0	0	0	7,06	0	0	0
102	177,6792	12,12	45,45		2	0	0	0	1,97	0,45	0	0
103	179,4384	12,24	45,9		3	0	0	0	0	0	0	0
104	181,1976	12,36	46,35		4	0	0	0	0	0	0	0
105	182,9568	12,48	46,8		5	0	0	3,07	0,29	0	0	0
106	184,716	12,6	47,25		6	0	0	0	3,89	0	0	0
107	186,4752	12,72	47,7		7	0	0	0	2,57	0,002	0	0
108	188,2344	12,84	48,15		8	0	0	0	0	0	0	0
109	189,9936	12,96	48,6		9	0	0	0	0	0	0	0
110	191,7528	13,08	49,05		10	0	0	3	0	0	0	0
111	193,512	13,2	49,5		11	0	0	0,6	1,11	0	0	0
112	195,2712	13,32	49,95		12	0	0	0	3,52	0	0	0
113	197,0304	13,44	50,4		13	0	0	0	0	0	0	0
114	198,7896	13,56	50,85		14	0	0	0	0	0	0	0
115	200,5488	13,68	51,3		15	0	0	3,12	0	0	0	0
116	202,308	13,8	51,75		16	0	0	5,31	0,03	0	0	0
117	204,0672	13,92	52,2		17	0	0	0,02	3,22	0	0	0
118	205,8264	14,04	52,65		18	0	0	0	0	0	0	0
119	207,5856	14,16	53,1		19	0	0	0	0	0	0	0
120	209,3448	14,28	53,55		20	0	0,59	1,95	0	0	0	0
121	211,104	14,4	54		21	0	0	9,54	0	0	0	0

продолжение Приложения Г

122	212,8632	14,52	54,45	6	22	0	0	1,47	1,73	0	0	0
123	214,6224	14,64	54,9		23	0	0	0	0	0	0	0
124	216,3816	14,76	55,35		24	0	0	0	0	0	0	0
125	218,1408	14,88	55,8		25	0	2,54	1,02	0	0	0	0
126	219,9	15	56,25		1	0	0	6,27	7,77	0	0	0
127	221,6592	15,12	56,7		2	0	0	0	0,02	0	0	0
128	223,4184	15,24	57,15		3	0	0	0	0	0	0	0
129	225,1776	15,36	57,6		4	0	0	0	0	0	0	0
130	226,9368	15,48	58,05		5	0	0	6,03	1,56	0	0	0
131	228,696	15,6	58,5		6	0	0	0	2,55	0	0	0
132	230,4552	15,72	58,95		7	0	0	0	0,68	0	0	0
133	232,2144	15,84	59,4		8	0	0	0	0	0	0	0
134	233,9736	15,96	59,85		9	0	0	0	0	0	0	0
135	235,7328	16,08	60,3		10	0	0	3,55	0	0	0	0
136	237,492	16,2	60,75		11	0	0	0,04	0,59	0	0	0
137	239,2512	16,32	61,2		12	0	0	0	0,46	0	0	0
138	241,0104	16,44	61,65		13	0	0	0	0	0	0	0
139	242,7696	16,56	62,1		14	0	0	0	0	0	0	0
140	244,5288	16,68	62,55		15	0	0	4,07	0	0	0	0
141	246,288	16,8	63		16	0	0	5,07	0	0	0	0
142	248,0472	16,92	63,45		17	0	0	0,09	0,02	0	0	0
143	249,8064	17,04	63,9		18	0	0	0	0	0	0	0
144	251,5656	17,16	64,35		19	0	0	0	0	0	0	0
145	253,3248	17,28	64,8	7	20	0	0,81	2,76	0	0	0	0
146	255,084	17,4	65,25		21	0	0	10,04	0	0	0	0
147	256,8432	17,52	65,7		22	0	0	1,84	0	0	0	0
148	258,6024	17,64	66,15		23	0	0	0	0	0	0	0
149	260,3616	17,76	66,6		24	0	0	0	0	0	0	0
150	262,1208	17,88	67,05		25	0	2,72	1,55	0	0	0	0
151	263,88	18	67,5		1	0	0	0	6,96	0	0	0
152	265,6392	18,12	67,95		2	0	0	0	2,18	0	0	0
153	267,3984	18,24	68,4		3	0	0	0	0	0	0	0
154	269,1576	18,36	68,85		4	0	0	0	0	0	0	0

продолжение Приложения Г

155	270,9168	18,48	69,3		5	0	0	3,6	0,63	0	0	0
156	272,676	18,6	69,75		6	0	0	0	3,84	0	0	0
157	274,4352	18,72	70,2		7	0	0	0	1,95	0	0	0
158	276,1944	18,84	70,65		8	0	0	0	0	0	0	0
159	277,9536	18,96	71,1		9	0	0	0	0	0	0	0
160	279,7128	19,08	71,55		10	0	0	3,63	0,01	0	0	0
161	281,472	19,2	72		11	0	0	0	0,73	0	0	0
162	283,2312	19,32	72,45		12	0	0	0	1,83	0	0	0
163	284,9904	19,44	72,9		13	0	0	0	0	0	0	0
164	286,7496	19,56	73,35		14	0	0	0	0	0	0	0
165	288,5088	19,68	73,8		15	0	0	4,69	0	0	0	0
166	290,268	19,8	74,25		16	0	0	5,1	0	0	0	0
167	292,0272	19,92	74,7		17	0	0	0,46	1,96	0	0	0
168	293,7864	20,04	75,15		18	0	0	0	0	0	0	0
169	295,5456	20,16	75,6		19	0	0	0	0,12	0	0	0
170	297,3048	20,28	76,05		20	0	1,06	3,88	0	0	0	0
171	299,064	20,4	76,5		21	0	0	10,03	0	0	0	0
172	300,8232	20,52	76,95		22	0	0	2,85	1,89	0	0	0
173	302,5824	20,64	77,4		23	0	0	0	0	0	0	0
174	304,3416	20,76	77,85		24	0	0	0	0,12	0	0	0
175	306,1008	20,88	78,3		25	0	2,88	2,4	0	0	0	0
176	307,86	21	78,75	8	1	0	0	0	6,92	0	0	0
177	309,6192	21,12	79,2		2	0	0	0	3,74	0,76	0	0
178	311,3784	21,24	79,65		3	0	0	0,12	0	0	0	0
179	313,1376	21,36	80,1		4	0	0	0	0	0	0	0
180	314,8968	21,48	80,55		5	0	0	3,37	1,19	0	0	0
181	316,656	21,6	81		6	0	0	0	3,82	0	0	0
182	318,4152	21,72	81,45		7	0	0	0	4,08	0,08	0	0
183	320,1744	21,84	81,9		8	0	0	0,27	0	0	0	0
184	321,9336	21,96	82,35		9	0	0	0	0	0	0	0
185	323,6928	22,08	82,8		10	0	0	3,43	0,28	0	0	0
186	325,452	22,2	83,25		11	0	0	0	0,76	0	0	0

продолжение Приложения Г

187	327,2112	22,32	83,7
188	328,9704	22,44	84,15
189	330,7296	22,56	84,6
190	332,4888	22,68	85,05
191	334,248	22,8	85,5
192	336,0072	22,92	85,95
193	337,7664	23,04	86,4
194	339,5256	23,16	86,85
195	341,2848	23,28	87,3
196	343,044	23,4	87,75
197	344,8032	23,52	88,2
198	346,5624	23,64	88,65
199	348,3216	23,76	89,1
200	350,0808	23,88	89,55
201	351,84	24	90
202	353,5992	24,12	90,45
203	355,3584	24,24	90,9
204	357,1176	24,36	91,35
205	358,8768	24,48	91,8
206	360,636	24,6	92,25
207	362,3952	24,72	92,7
208	364,1544	24,84	93,15
209	365,9136	24,96	93,6
210	367,6728	25,08	94,05
211	369,432	25,2	94,5
212	371,1912	25,32	94,95
213	372,9504	25,44	95,4
214	374,7096	25,56	95,85
215	376,4688	25,68	96,3
216	378,228	25,8	96,75
217	379,9872	25,92	97,2
218	381,7464	26,04	97,65
219	383,5056	26,16	98,1

9

12	0	0	0	3,73	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0,83	0	0	0
15	0	0	4,2	0	0	0	0
16	0	0	5,19	0	0	0	0
17	0	0	1,93	2,16	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	1,68	0	0	0
20	0	1,21	5,21	0	0	0	0
21	0	0	9,97	0	0	0	0
22	0	0	3,57	0,95	0	0	0
23	0	0,73	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1,08	0	0	0
25	0	2	3,55	0	0	0	0
1	0	0	0	6,88	0	0	0
2	0	0	0	4,06	0,24	0	0
3	0	0	1,14	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0,44	0	0
5	0	0	2,59	2,07	0	0	0
6	0	0	0	3,8	0	0	0
7	0	0	0	3,55	0,01	0	0
8	0	0	0,86	0	0	0	0
9	0	0	0	0,34	0	0	0
10	0	0	2,92	0,89	0	0	0
11	0	0	0,02	1,03	0	0	0
12	0	0	0,84	2,39	0	0	0
13	0	0	0,34	0	0	0	0
14	0	0	0	2,01	0	0	0
15	0	0	3,4	0,27	0	0	0
16	0	0	5,62	0	0	0	0
17	0	0	3,31	1,15	0	0	0
18	0	0,73	0,05	0	0	0	0
19	0	0	0	2,75	0	0	0

продолжение Приложения Г

220	385,2648	26,28	98,55	10	20	0	0,09	5,18	0	0	0	0
221	387,024	26,4	99		21	0	0	9,75	0	0	0	0
222	388,7832	26,52	99,45		22	0	0	3,98	0,33	0	0	0
223	390,5424	26,64	99,9		23	0	2,29	0	0	0	0	0
224	392,3016	26,76	100,35		24	0	0	0	1,73	0	0	0
225	394,0608	26,88	100,8		25	0	0,68	4,98	0	0	0	0
226	395,82	27	101,25		1	0	0	0	6,84	0	0	0
227	397,5792	27,12	101,7		2	0	0	0	4,06	0,01	0	0
228	399,3384	27,24	102,15		3	0	0	2,37	0	0	0	0
229	401,0976	27,36	102,6		4	0	0	0	0,05	0,66	0	0
230	402,8568	27,48	103,05		5	0	0	1,52	3,21	0	0	0
231	404,616	27,6	103,5		6	0	0	0	3,78	0	0	0
232	406,3752	27,72	103,95		7	0	0	0,21	3,25	0	0	0
233	408,1344	27,84	104,4		8	0	0	1,73	0	0	0	0
234	409,8936	27,96	104,85		9	0	0	0	1,41	0,04	0	0
235	411,6528	28,08	105,3		10	0	0	2,13	1,8	0	0	0
236	413,412	28,2	105,75		11	0	0	0,44	1,33	0	0	0
237	415,1712	28,32	106,2		12	0	0	2,57	1,36	0	0	0
238	416,9304	28,44	106,65		13	0	0	0,92	0	0	0	0
239	418,6896	28,56	107,1		14	0	0	0	2,89	0	0	0
240	420,4488	28,68	107,55		15	0	0	2,48	0,87	0	0	0
241	422,208	28,8	108		16	0	0	6,47	0,14	0	0	0
242	423,9672	28,92	108,45		17	0	0	3,86	1,15	0	0	0
243	425,7264	29,04	108,9		18	0	0,99	0,36	0	0	0	0
244	427,4856	29,16	109,35		19	0	0	0	3,44	0	0	0
245	429,2448	29,28	109,8		20	0	0	4,02	0,3	0	0	0
246	431,004	29,4	110,25		21	0	0	9,24	0	0	0	0
247	432,7632	29,52	110,7		22	0	0	7,91	0,03	0	0	0
248	434,5224	29,64	111,15		23	0	2,83	0,06	0	0	0	0
249	436,2816	29,76	111,6		24	0	0	0	2,08	0	0	0
250	438,0408	29,88	112,05		25	0	0	5,29	0,03	0	0	0
251	439,8	30	112,5	11	1	0	0	0	6,81	0	0	0
252	441,5592	30,12	112,95		2	0	0	0	3,71	0	0	0

продолжение Приложения Г

253	443,3184	30,24	113,4
254	445,0776	30,36	113,85
255	446,8368	30,48	114,3
256	448,596	30,6	114,75
257	450,3552	30,72	115,2
258	452,1144	30,84	115,65
259	453,8736	30,96	116,1
260	455,6328	31,08	116,55
261	457,392	31,2	117
262	459,1512	31,32	117,45
263	460,9104	31,44	117,9
264	462,6696	31,56	118,35

3	0	0	3,56	0	0	0	0
4	0	0	0	0,78	0,78	0	0
5	0	0	0,28	4,74	0	0	0
6	0	0	0	3,85	0	0	0
7	0	0	1,66	2,01	0	0	0
8	0	0	2,89	0	0	0	0
9	0	0	0	2,37	0,08	0	0
10	0	0	1,02	3,03	0	0	0
11	0	0	1,23	1,64	0	0	0
12	0	0	3,71	0,59	0	0	0
13	0	0	1,81	0	0	0	0
14	0	0	0	3,47	0	0	0

ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Патент РФ 2680122



ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Патент РФ 2720011



ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Акты внедрения результатов диссертационной работы

Joint stock company
**Kirovgrad hard
alloys plant**

26a, Sverdlova street, Kirovgrad,
624140, Sverdlovsk region, Russia



Акционерное общество
**Кировградский завод
твёрдых сплавов**

624140, Россия, г. Кировград Свердловской
обл., ул. Свердлова, 26а

ИНН/КПП 6616000619/661601001, ОКПО 00196144, ОГРН 1026601154986
Телефоны/Phone: приемная (343 57) 98-299; Факс/Fax: приемная (343 57) 98-220;
производственно-сбытовой отдел (343 57) 98-290;
коммерческий директор (343 57) 98-003.
Web-адрес: <http://kzts.ru> <http://kzts.pф> E-mail: postmaster@kzts.ru

от «__» _____ 2018г. №__

АКТ

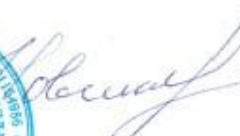
о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Зырянова Виталия Андреевича

Акт о том, что результаты диссертационной работы Зырянова В.А. «Повышение эффективности сборных зубообрабатывающих фрез путем формирования инструментального червяка сменными режущими твердосплавными пластинами» переданы для внедрения в акционерное общество «Кировградский завод твердых сплавов» в виде руководящих технических материалов, в которые вошли:

1. Методика выбора, расчета и проектирования СРП и сборных червячных фрез, позволяющая повысить эффективность механической обработки данным инструментом в 2-3 раза и снизить вероятность возникновения опасных циклических напряжений в зубе фрезы.
2. Новая конструкция сборной червячной фрезы с применением тангенсально расположенных СРП и фронтально расположенной эллипсной пластины позволяет обеспечить минимальную неравномерность фрезерования путем последовательного срезания припуска режущими твердосплавными элементами, расположенными на инструментальном червяке.

Председатель наблюдательного
совета АО «КЗТС»:



 Новиков Л.Р.



**Публичное акционерное общество
«Тюменские моторостроители»
(ПАО «ТМ»)**

ИНН 7203001556 КПП 720350001
р/с 40702810300260000326 в ф-ле
Банка ГПБ (АО) в г. Екатеринбурге
к/с 30101810365770000411, БИК 046577411,
ОГРН 1027200781541

625007, Тюменская область
г. Тюмень
Площадь Владимира Хуторянского
Тел.: (3452) 54-60-02
Факс: (3452) 54-60-29
e-mail: tm-delo@tmotor.ru



УТВЕРЖДАЮ

Начальник цеха №21

ПАО «Тюменские моторостроители»

А.П. Филиппов

«03» 03 2019 г.

АКТ

о внедрении материалов научно-технической работы

Настоящий акт составлен по результатам внедрения результатов научно-технической работы «Повышение эффективности зубофрезерования путем реализации групповой схемы резания сменными твердосплавными пластинами инструментального червяка».

По результатам испытаний новой конструкции сборной червячной фрезы со сменными режущими твердосплавными пластинами с группой схемой резания составлен научно-технический отчет. Результаты работы переданы для внедрения на ПАО «Тюменские моторостроители».

Использование указанных результатов позволяет:

1. Повысить эффективность механической обработки сборным инструментом со сменными режущими твердосплавными пластинами и снизить вероятность возникновения опасных циклических напряжений.

2. Реализация групповой схемы резания на инструментальном червяке позволяет обеспечить минимальную неравномерность фрезерования путем последовательного срезания припуска режущими твердосплавными элементами.

Исполнители: аспирант кафедры «СИ» ФГБОУ ВО «ТИУ» Зырянов В.А.

Заведующий лабораторией «Обработки материалов резанием»

ФГБОУ ВО «ТИУ» к.т.н. доцент Васильев Д.В.

Мастер механического участка цеха №21
ПАО «Тюменские моторостроители»

Данилов В.Д.



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ИШИМСКИЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД»
(АО «ИМЗ»)**

Красина ул., 2, г. Ишим, Тюменская обл., 627755

Телефон: (34551) 6-62-76, 6-62-77

Факс: (34551) 6-62-76, 6-62-77

E-mail: mehz@mail.ru

ОКПО 87225972, ОГРН 1087205000948

ИНН/КПП 7205019630/720501001

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер АО «ИМЗ»

В.Г. Стряпихин

09 2021 г.



АКТ

О внедрении материалов научно-технической работы

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Зырянова Виталия Андреевича будут использованы в технологической деятельности акционерного общества АО «ИМЗ», г. Ишим в виде руководящих технических материалов, в которые вошли:

1. Разработанный алгоритм расчета и проектирования сборных червячных фрез с СРТП, на основании которого создана графовая модель, описывающая возможные конструктивные варианты исполнения и представления всей информации в матричном виде для дальнейшего создания автоматизированной базы данных для расчета и проектирования зубообрабатывающего инструмента.

2. Конструкции сменных режущих твердосплавных пластин для реализации групповой схемы резания в конструкциях сборных червячных фрез, которые обеспечивают последовательное срезание чернового припуска режущими элементами, расположенными на инструментальном червяке.

3. Конструкция сборной червячной фрезы с групповой схемой резания, позволяющая обеспечить равномерность зубофрезерования, повышение эффективности механической обработки (увеличение подачи и скорости резания) инструментом с СРТП в 2-3 раза (Пат. 2720011 РФ).

4. Методика по применению технологий быстро прототипирования при создании новых конструкции сборного зубообрабатывающего инструмента.

Ведущий технолог

О.В. Иванов



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
**«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР
 «ТИТАН – БАРРИКАДЫ»**
 (АО «ФНПЦ «ТИТАН – БАРРИКАДЫ»)
 400071, г. Волгоград, пр. Ленина, б/н
 Тел. 74-93-26
 Факс. (8442) 27-57-36, 27-40-20
 E-mail: cdb@cdbtitan.ru

от _____

на _____

О рассмотрении результатов



УТВЕРЖДАЮ
 Главный технолог,
 кандидат технических наук
 А. Р. Ингеманссон
 «26» марта 2021 г.

АКТ

рассмотрения результатов диссертации
 на соискание ученой степени кандидата технических наук
Зырянова Виталия Андреевича

Комиссия в составе:

председатель Пилипенко П. А., начальник отдела новых технологий и производственных мощностей

(должность, ФИО)

члены комиссии: Рыгин И.Н., начальник конструкторского отдела режущего и измерительного инструмента; Моисеев А.О., ведущий инженер-технолог отдела новых технологий и производственных мощностей

(должность, ФИО)

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Зырянова Виталия Андреевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, рассмотрены на предмет возможности использования в технологической деятельности

АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград

(название организации)

в виде руководящих технических материалов, в которые вошли:

1. Разработанный алгоритм расчета и проектирования сборных червячных фрез со сменными многогранными твердосплавными пластинами (СМП), на основании которого создана графовая модель, описывающая возможные конструктивные варианты исполнения и представления всей информации в

матричном виде для дальнейшего создания автоматизированной базы данных для расчета и проектирования зубообрабатывающего инструмента.

2. Конструкции СМП для реализации групповой схемы резания в конструкциях сборных червячных фрез, которые обеспечивают последовательное срезание чернового припуска режущими элементами, расположенными на инструментальном червяке.
3. Конструкция сборной червячной фрезы с групповой схемой резания, позволяющая обеспечить равномерность зубофрезерования, повышение эффективности механической обработки (увеличение подачи и скорости резания) инструментом с СМП.
4. Методика по применению технологий быстрого прототипирования при создании новых конструкций сборного зубообрабатывающего инструмента.

Результаты исследования могут быть использованы на машиностроительных предприятиях, выпускающих механизмы с использованием зубчатых и червячных передач и имеющих собственное инструментальное производство.

Председатель комиссии:



(подпись)

П.А. Пилипенко

(И.О.Фамилия)

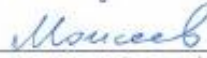
Члены комиссии:



(подпись)

И.Н. Рыгин

(И.О.Фамилия)



(подпись)

А.О. Моисеев

(И.О.Фамилия)

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – Пример управляющей программы

```

M107
M190 S95 ; set bed temperature and
wait for it to be reached
M104 S255 ; set temperature
G28 ; home all axes
G1 Z5 F5000 ; lift nozzle; Filament
gcode

M109 S255 ; set temperature and wait
for it to be reached
G21 ; set units to millimeters
G90 ; use absolute coordinates
M82 ; use absolute distances for
extrusion
G92 E0
G1 Z0.190 F7800.000
G1 E-2.00000 F2400.00000
G92 E0
G1 X68.020 Y113.464 F7800.000
G1 E2.00000 F2400.00000
G1 F1800
G1 X69.289 Y113.102 E2.03215
G1 X99.853 Y107.707 E2.78833
G1 X132.053 Y105.009 E3.57559
G1 X139.237 Y104.993 E3.75063
G1 X140.737 Y105.165 E3.78741
G1 X175.239 Y113.334 E4.65126
G1 X199.970 Y124.249 E5.30989
G1 X206.123 Y127.164 E5.47576
G1 X207.245 Y128.026 E5.51023
G1 X211.245 Y132.051 E5.64849
G1 X212.108 Y133.329 E5.68605
G1 X212.656 Y134.770 E5.72361
G1 X212.858 Y136.381 E5.76318 G1
X212.692 Y146.269 E6.00412
G1 X212.395 Y147.859 E6.04353
G1 X211.724 Y149.331 E6.08295
G1 X211.163 Y150.114 E6.10642
G1 X210.495 Y150.809 E6.12988
G1 X207.161 Y153.687 E6.23719
G1 X206.107 Y154.392 E6.26810
G1 X192.513 Y160.022 E6.62657
G1 X191.171 Y160.404 E6.66057
G1 X163.669 Y163.187 E7.33406 G1
X139.163 Y163.348 E7.93113
G1 X131.869 Y163.325 E8.10885
G1 X130.902 Y163.174 E8.13268 G1
X95.117 Y154.791 E9.02816 G1
X65.684 Y143.980 E9.79210 G1
X64.886 Y143.513 E9.8146
G1 X64.154 Y142.936 E9.83733
G1 X60.172 Y138.962 E9.97441

G1 X59.370 Y137.946 E10.00594
G1 X58.422 Y135.558 E10.06884
G1 X58.310 Y134.275 E10.10021
G1 X58.777 Y136.789 E10.03762
G1 X58.469 Y122.674 E10.38288
G1 X58.609 Y121.579 E10.40976
G1 X58.930 Y120.517 E10.43680
G1 X59.578 Y119.195 E10.47268
G1 X60.017 Y118.484 E10.49304
G1 X60.642 Y117.726 E10.51698
G1 X61.372 Y117.068 E10.54091
G1 X62.285 Y116.471 E10.56748
G1 X67.993 Y113.478 E10.72452
G1 X68.151 Y113.779 F7800.000
G1 F1800
G1 X69.351 Y113.436 E10.75493
G1 X99.895 Y108.044 E11.51062
G1 X132.078 Y105.347 E12.29747
G1 X139.237 Y105.332 E12.47188
G1 X140.661 Y105.495 E12.50681
G1 X175.134 Y113.657 E13.36993
G1 X199.832 Y124.559 E14.02769
G1 X205.925 Y127.441 E14.19189
G1 X207.010 Y128.271 E14.22516
G1 X210.976 Y132.258 E14.36219
G1 X211.799 Y133.470 E14.39788
G1 X212.323 Y134.838 E14.43356
G1 X212.519 Y136.389 E14.47166
G1 X212.355 Y146.229 E14.71145
G1 X212.078 Y147.737 E14.74879
G1 X211.447 Y149.134 E14.78613
G1 X210.910 Y149.888 E14.80869
G1 X210.273 Y150.552 E14.83110
G1 X206.953 Y153.419 E14.93798
G1 X205.941 Y154.096 E14.96764
G1 X192.391 Y159.705 E15.32493
G1 X191.108 Y160.071 E15.35746
G1 X163.656 Y162.848 E16.02970
G1 X139.161 Y163.009 E16.62651
G1 X131.902 Y162.988 E16.80338
G1 X130.987 Y162.845 E16.82594
G1 X95.237 Y154.474 E17.72050
G1 X65.846 Y143.681 E18.48332
G1 X65.078 Y143.234 E18.50498
G1 X64.376 Y142.679 E18.52678
G1 X60.418 Y138.729 E18.66302
G1 X59.649 Y137.753 E18.69328
G1 X59.083 Y136.641 E18.72369
G1 X58.752 Y135.476 E18.75320
G1 X58.649 Y134.269 E18.78271
G1 X58.807 Y122.696 E19.06470

G1 X58.941 Y121.648 E19.09044
G1 X59.250 Y120.632 E19.11632
G1 X59.881 Y119.347 E19.15119
G1 X60.300 Y118.671 E19.17058
G1 X60.899 Y117.948 E19.19344
G1 X62.452 Y116.766 E19.24113
G1 X68.124 Y113.793
E19.39717G1 X61.603 Y117.318
E19.21646
G1 E17.39717 F2400.00000
G92 E0
G1 X143.742 Y115.270 F7800.000
G1 E2.00000 F2400.00000
G1 F1800
G1 X171.503 Y115.264 E2.67636
G1 X171.635 Y115.279 E2.67960
G1 X171.827 Y115.261 E2.68430
G1 X174.169 Y115.376 E2.74142
G1 X175.038 Y115.697 E2.76399
G1 X176.040 Y116.338 E2.79296
G1 X177.617 Y117.915 E2.84733
G1 X178.269 Y119.041 E2.87903
-----
-----
G1 X132.094 Y122.858 E2.03025
G1 X132.094 Y125.494 E2.05857
G1 X131.829 Y125.503 E2.06142
G1 X131.597 Y125.703 F7800.000
G1 F600
G1 X131.728 Y122.692 E2.09380
G1 X132.287 Y122.650 E2.09982
G1 X132.287 Y125.681 E2.13237
G1 X131.627 Y125.702 E2.13946
G1 X131.618 Y125.504 F7800.000
G1 X131.949 Y125.402 F7800.000
G1 F600
G1 X131.984 Y123.763 E2.14449
G1 E0.14449 F2400.00000
G92 E0
M107; Filament-specific end gcode
;END gcode for filament
M104 S0; turn off temperature
G28 X0 ; home X axis
M84; disable motors

```