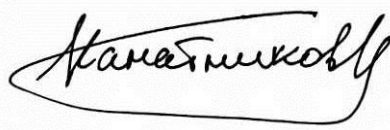


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Государственный университет –учебно-научно-производственный  
комплекс»

На правах рукописи



КАНАТНИКОВ НИКИТА ВЛАДИМИРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗУБОСТРОГАНИЯ  
ПРЯМОЗУБЫХ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор Г.А. Харламов

Орел 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ ПРЯМОЗУБЫХ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС .....	4
1.1 Механическая обработка прямозубых конических колес в современном машиностроении.....	8
1.2 Применение инструмента с дифференцированной схемой резания, работающего по методу обката.....	16
1.2.1 Классификация схем резания.....	16
1.2.2 Общие сведения об инструментах с дифференцированными схемами резания .....	22
1.2.3 Дифференцированные схемы резания .....	26
1.3 Управление процессами механической обработки .....	29
1.4 Состояние вопроса динамики обработки прямозубых конических колес .....	39
1.5 Исследование износа зуборезных инструментов.....	42
1.6 Влияние силы резания на точность обрабатываемых колес.....	45
1.7 Выводы по первой главе.....	49
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПРЯМОЗУБЫХ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС .....	51
2.1 Математическое отображение схемы резания .....	51
2.2. Определение кинематических параметров зубострогания с помощью математического отображения схемы резания .....	55
2.3. Определение динамических характеристик процесса зубострогания.....	60
2.4 Влияние угла наклона непрофилирующего лезвия зубострогального резца на силу резания.....	65
2.5 Определение погрешностей изготовления прямозубых конических колес, вызванных деформацией технологической системы .....	70
2.6 Определение расчетных неровностей, возникающих в процессе зубострогания конических зубчатых колес .....	75
2.7 Зубострогальные резцы с дифференцированными схемами резания.....	84
2.8 Методика прогнозирования качества обработки прямозубых конических колес.....	91

2.9 Выводы по второй главе .....	95
3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	97
3.1 Экспериментальное определение конструктивной подачи зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания .....	98
3.2 Методика исследования сил резания .....	104
3.3 Методика исследования точности прямозубых конических колес .....	105
3.4 Методика исследования износа инструмента .....	109
3.5 Методика экспериментального исследования шероховатости прямозубых конических колес.....	109
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАРЕЗАНИЯ ПРЯМОЗУБЫХ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС ЗУБОСТРОГАЛЬНЫМИ РЕЗЦАМИ .....	111
4.1 Исследование динамических процессов, возникающих в процессе обработки прямозубых конических колес.....	111
4.1.1 Влияние модуля нарезаемого колеса на составляющие силы резания .....	112
4.1.2 Влияние скорости резания на составляющие силы резания.....	113
4.1.3 Влияние круговой подачи на составляющие силы резания .....	114
4.2 Производственные испытания зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания .....	115
4.3 Исследование износа зубострогальных резцов.....	118
4.4 Экспериментальное исследование шероховатости зубьев прямозубого конического колеса .....	121
4.5 Экспериментальное исследование точности прямозубых конических колес	123
5 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ .....	129
5.1 Реализация результатов исследований .....	129
5.2 Расчет экономической эффективности .....	130
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ .....	132
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	146

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Прямозубые конические колеса находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Помимо использования в дифференциалах автомобилей их широко применяют в электроинструменте, сельскохозяйственной технике и различном оборудовании. Это связано с тем, что в прямозубых конических передачах снижены осевые нагрузки по сравнению со спиральными коническими передачами, так же осевая сила постоянна по направлению, что позволяет упростить конструкцию подшипниковых узлов.

Известен ряд способов получения прямозубых конических колес. Однако механическая обработка остается основной при создании точных зубчатых колес и используется при производстве небольших партий разных размеров. Особо важную роль этот факт приобретает в связи с тем, что в настоящее время до 75% предприятий отечественного машиностроения выпускают продукцию, которая по своему характеру является серийной и мелкосерийной. Наибольшее распространение получили процессы зубофрезерования и зубострогания по методу обката. Их отличает широкий диапазон нарезаемых модулей колес и относительно высокое (до шестой степени точности) качество получаемого зубчатого профиля.

Возрастание требований к функциональным показателям зубчатых колес привело к применению новых схем обработки, конструкций инструмента, новых инструментальных и обрабатываемых материалов. Однако внесение изменений в отработанные технологические процессы ведет к большим затратам, связанным с разработкой режимов резания и определением влияния вносимых изменений на показатели качества изделия. Определением взаимосвязей параметров технологической системы и качества получаемых изделий занимались многие российские ученые В.Ф. Безъязычный, А.С. Васильев, А.М. Дальский, В.М. Кован, Э.В. Рыжов, А.П. Соколовский, Ю.С. Степанов, А.Г. Суслов, В.Б. Протасьев, А.С. Тарапанов, О.В. Таратынов, Г.А. Харламов и др.

В этой связи представляется актуальной задача определения степени влияния различных параметров технологической системы и режимов резания на производительность процесса обработки, качество изделия, стойкость

инструмента и разработки алгоритма управления процессом. Это позволит значительно сократить расходы на подготовку производства и определить оптимальные параметры технологической системы, что является базой для бережливого производства.

**Цель работы.** Повышение качества (точности, шероховатости) и производительности зубострогания прямозубых конических колес методом обката за счет совершенствования конструкции инструмента и управления технологическими параметрами процесса обработки.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены следующие **задачи:**

1. разработать математическую модель процесса зубострогания прямозубых конических колес, позволяющую определить положение точек режущего лезвия инструмента в пространстве, осевые составляющие силы резания, точность и шероховатость обрабатываемого профиля;

2. разработать алгоритм управления процессом зубострогания прямозубых конических колес, сущность которого заключается в

- прогнозировании качественных параметров (точности, шероховатости) процесса обработки в зависимости от заданных параметров технологической системы (геометрии детали, оборудования, инструмента) и режимов резания;

- определении режимов обработки и конструкции инструмента в зависимости от требуемых параметров точности и шероховатости.

3. определить рациональные величины распределения срезаемых слоев между режущими лезвиями инструмента;

4. провести экспериментальные исследования влияния режимов обработки и конструкции инструмента на осевые составляющие силы резания, стойкость инструмента, точность и шероховатость;

5. разработать практические рекомендации, направленные на повышение эффективности зубострогания конических зубчатых колес по методу обката резцами с дифференцированными схемами резания.

**Объект исследования:** процесс зубострогания прямозубых конических колес методом обката.

**Предмет исследования:** производительность и качество (точность, шероховатость) зубострогания прямозубых конических колес, а так же конструкция зубострогальных резцов.

**Методика исследований.** Теоретические исследования базируются на положениях теории резания металлов, проектирования режущего инструмента, научных основ технологии машиностроения, дифференциальной геометрии, векторного анализа, инженерии поверхности.

Экспериментальные исследования проводились на действующем оборудовании Госуниверситета – УНПК, Орловского ЦКП и в реальных производственных условиях ООО «Орелстроймаш» (г. Орел). В основе экспериментальных исследований использованы методы многофакторного планирования экспериментов и математической статистики.

Исследования проводились с помощью лицензионных программных продуктов (Microsoft Office 2007, LabVIEW 2010, КОМПАС-3D V13).

**Научная новизна работы.** Разработана математическая модель процесса зубострогания прямозубых конических колес методом обката, позволяющая на основе комплексного анализа технологических (режима обработки, материала заготовки и жесткости оборудования) и конструкторско-технологических (схемы разделения стружки) параметров, управлять точностью и шероховатостью рабочего профиля детали.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

- методика комплексного анализа параметров процесса зубострогания прямозубых конических колес методом обката, сочетающая в себе возможность прогнозирования качества изделия и определения оптимальных режимов обработки;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований зубострогания резцами с дифференцированными схемами резания прямозубых конических колес методом обката;
- технологические рекомендации по реализации процесса зубострогания прямозубых конических колес резцами с дифференцированными схемами резания.

**Практическая значимость работы** заключается в обосновании вариантов конструкции зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания и

технологических рекомендаций к ним, обеспечивающих повышение производительности процесса до 1,8 раза.

**Реализация результатов работы:** разработанные рекомендации по конструкции инструмента с дифференцированной схемой резания и методика управления процессом обработки прямозубых конических колес апробированы и приняты к внедрению на ООО «Орелстроймаш» (экономический эффект более 200 тыс. рублей в год).

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях: «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии», г. Липецк, 2012; XV Международной научно – технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии» «Технология 2012», г. Орел, 2012; «Высокие технологии в машиностроении», г. Курган, 2012; VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства», г. Орел, 2013; ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Госуниверситета-УНПК (г. Орел 2011-2014 гг.).

**Диссертация выполнялась при поддержке** гранта ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» «Создание программно-аппаратного комплекса, повышающего эффективность обработки конических зубчатых колес» (2013-2014 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 6 в изданиях, рекомендованных ВАК для публикаций материалов диссертационных исследований.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 145 страницах основного текста, содержит 57 рисунков и 5 таблиц. Состоит из введения, пяти глав, списка литературы, включающего 97 наименований, и приложений.

# 1. НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ ПРЯМОЗУБЫХ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС

## 1.1 Механическая обработка прямозубых конических колес в современном машиностроении

Обработка зубчатого профиля является наиболее трудоемкой операцией в технологическом процессе производства зубчатых колес. Реализация процесса обработки зубчатого венца охватывает многообразие схем формообразования и широкую номенклатуру конструкций инструмента.

Можно выделить три основных метода производства прямозубых конических колес на современных машиностроительных предприятиях:

- 1) начальное формирование;
- 2) пластическое формирование;
- 3) обработка резанием.

Примером начального формирования являются литье и спекание. Литье используется для изготовления больших зубчатых колес из цветных металлов и неметаллов. Полученные изделия используются в нетребовательных к точности передачах с невысокими передаваемыми нагрузками. Металлокерамические зубчатые колеса широко используются в ручном электроинструменте. Данными методами сложно получить однородную структуру изделия без неравномерных уплотнений, кроме того доводка профиля металлокерамических зубчатых колес крайне проблематична, так как может привести к разрушению изделия.

Ковка и штамповка в настоящее время широко применяются в массовом производстве передач конических дифференциалов. Пластическим деформированием можно обеспечить восьмой класс точности зубчатых колес, требуемый в данном производстве.

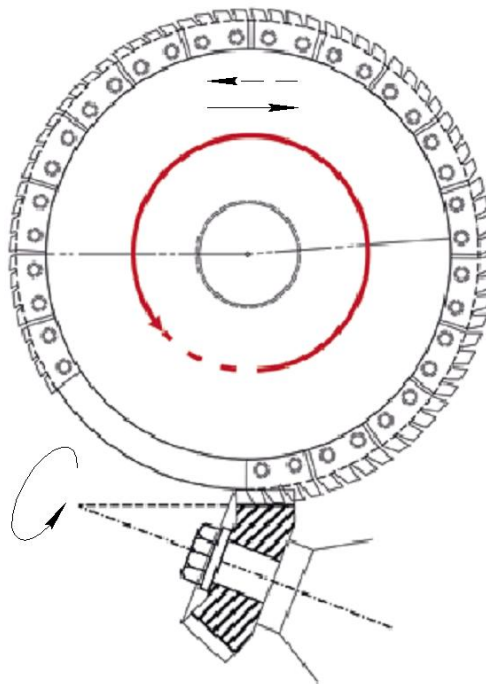
Тем не менее, резание является наиболее распространенным методом обработки зубчатого профиля конического колеса на предприятиях, как в России, так и за рубежом. Основными методами обработки зубчатого профиля



прямозубых конических колес являются: протягивание, фрезерование и строгание.

Круговое протягивание используется в массовом производстве для изготовления шестерен дифференциалов. Инструмент представляет собой наборную фрезу-протяжку (рисунок 1.1), составленную из 15-17 блоков по четыре – пять резцов в каждом. Первые 10-13 блоков – черновые, а остальные – чистовые. Черновые резцы, работающие боковыми и наружными режущими кромками, вырезают основную массу металла из впадины. Чистовые резцы имеют только боковые режущие кромки. При нарезании заготовка неподвижна, а фреза-протяжка вращается и одновременно движется поступательно в направлении образующей внутреннего конуса. Протяжка вращается равномерно, и за один ее оборот производится полная обработка впадины. Когда против заготовки оказывается сектор протяжки, свободный от резцов, происходит поворот заготовки.

Данный способ обработки является наиболее производительным из всех известных способов нарезания прямозубых конических колес. Время нарезания одной впадины составляет 1,5 – 6 с.



0

**Рисунок 1.1 – Схема нарезания зубчатых колес методом кругового протягивания**

Из-за технологических трудностей изготовления инструмента с точным профилем зубья профилируются приближенно – по дугам окружностей; поэтому круговое протягивание применяется только в тех случаях, когда требования к точности невысоки.

Более универсальным методом обработки прямозубых конических колес является нарезание методом обката. Наиболее распространенные способы основанные на данном методе представлены в таблице 1.1.

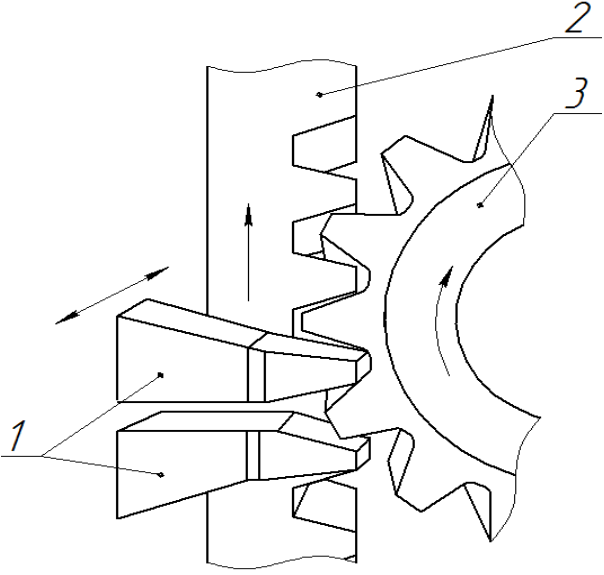
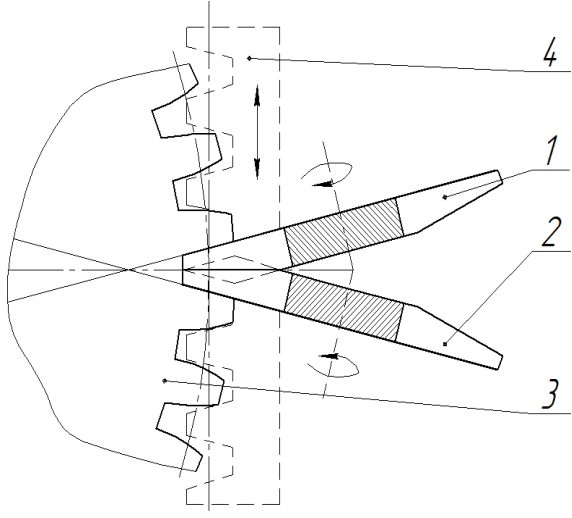
Методом фрезерования двумя спаренными дисковыми фрезами с прямолинейными режущими кромками обрабатывают колеса модуля 1...8 мм с длиной образующей начального конуса 15...250 мм в условиях серийного и массового производства. Фрезы вращаются вокруг осей, наклоненных под углом к вертикали, близким к углу зацепления пары, причем резцы обеих фрез работают в одной и той же впадине нарезаемого зубчатого колеса, а шпиндели станка вращаются синхронно так, что резцы одной из фрез входят в промежутки между резцами другой.

Существуют разные конструкции фрез. Одна из них такова, что каждая фреза состоит из двух частей: корпуса и режцового диска. Фрезы данной конструкции выпускает американская компания Gleason, рисунок 1.2.



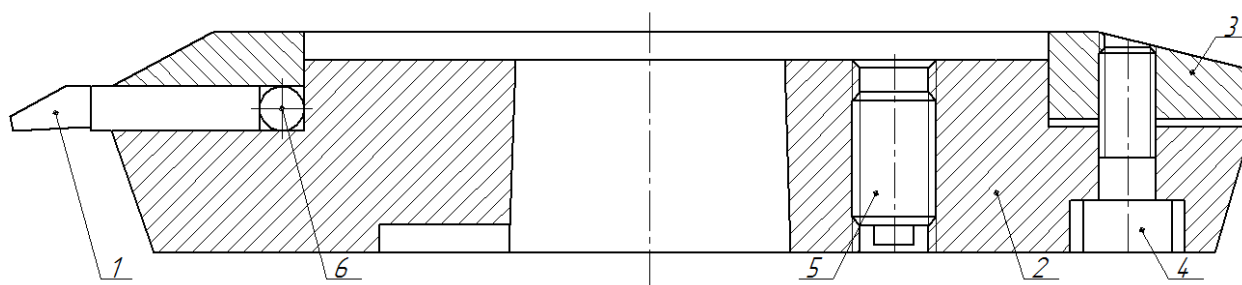
**Рисунок 1.2 – Фрезы с цельными дисками  
выпускаемые компанией Gleason**

**Таблица 1.1 – Способы нарезания прямозубых конических колес методом обката**

Метод обработка	Эскиз	Станки, инструмент
<p>Строгание двумя резцами с прямолинейными режущими кромками</p>	 <p>1- зубострогальные резцы; 2- производящее колесо; 3-обрабатываемое колесо.</p>	<p>Специальные зубострогальные станки, зубострогальные резцы</p>
<p>Фрезерование двумя спаренными дисковыми фрезами с прямолинейными режущими кромками</p>	 <p>1,2- две спаренные дисковые фрезы; 3- обрабатываемое колесо; 4-производящее колесо.</p>	<p>Специальные зубофрезерные станки, специальные дисковые фрезы</p>

Кроме того, получили широкое распространение, фрезы со вставными резцами. Основным преимуществом данной конструкции является дешевизна резцов, хотя производительность этих фрез, а также точность нарезаемых зубчатых колес несколько меньше, чем у фрез с цельными резцовыми дисками, так как сборные фрезы имеют меньшее число резцов, повышенное биение и веерообразность режущих кромок [24 с. 241].

Резцы 1 (рисунок 1.3) вставляются в пазы кольца 3 и опираются на корпус 2. Резцы доводятся до упора в шарики 6, проложенные между базовой плоскостью резца и цилиндрическим заплечником корпуса. Шарики необходимы для устранения влияния масла и пыли, которые могут попасть под резцы и ухудшить их центрирование. Фреза с резцами надевается на коническую шейку шпинделя станка и одновременно прилегает к торцу шпинделя. Для этой цели при изготовлении корпуса надо делать его так, чтобы при посадке на конус от руки без толчка между ним и торцом шпинделя был зазор 0,1 – 0,15 мм. Тогда при затяжке крепежного винта фреза сядет одновременно на конус и на торец. Если надо снять фрезу со шпинделя, то пользуются вытяжными винтами 5 [24 с. 242].



**Рисунок 1.3 – Фреза со вставными резцами**

Ввиду того, что нарезание рассматриваемым способом осуществляется без подачи вдоль зуба, дно нарезаемой впадины получает вогнутую форму, что негативно сказывается на прочностных характеристиках колеса. Еще одним недостатком фрезерования двумя дисковыми спаренными фрезами является невозможность обработки колес со ступицей ввиду большого диаметра фрез.

При нарезании прямозубых конических колес на зубострогальных станках методом обката, резцы воспроизводят впадину зуба производящего колеса

(обрабатываются две стороны зуба) или зуб производящего колеса (обрабатываются две стороны впадины), и в процессе обработки резцы и обрабатываемое зубчатое колесо получают относительное обкаточное движение, которое воспроизводит зацепление нарезаемого зубчатого колеса с производящим [24 с. 10]. Обработка может производиться:

а) с предварительным прорезанием впадины по способу врезания, когда резцы имеют только радиальную подачу;

б) с предварительным прорезанием впадины по способу обката, когда настройка станка ничем не отличается от настройки при чистовом нарезании за исключением того, что угол установки поворотных сегментов надо изменить в соответствии с величиной припуска, оставляемого на чистовое нарезание;

в) с предварительным прорезанием впадины по комбинированному способу, когда резцы имеют и врезание и движение обката;

г) без предварительного прорезания на цельных заготовках.

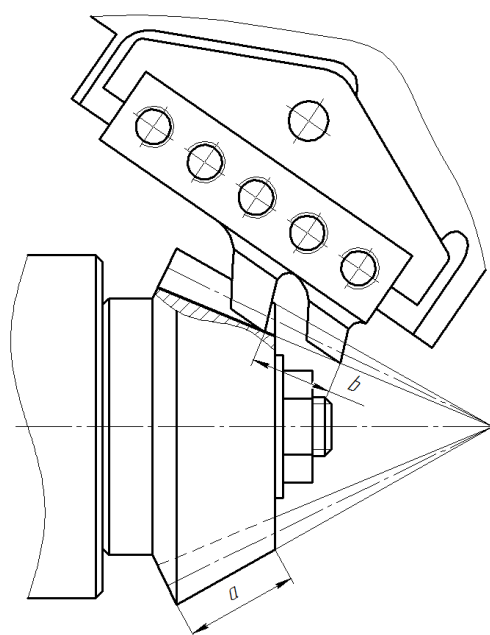
ГОСТ 5392-80 регламентирует только зубострогальные резцы для чистового нарезания прямозубых конических колес (рисунок 1.4) по заранее прорезанным впадинам, резцы для чернового нарезания и нарезания зубьев на цельной заготовке не стандартизованы и имеют различные варианты конструкции [13 с. 303-304, 24 с. 119-132].



**Рисунок 1.4 – Чистовые зубострогальные резцы**

Наиболее трудоемким является способ нарезания прямозубых конических колес без предварительного прорезания впадин на цельных заготовках. Этот

способ применяется для обработки мелкозубчатых колес, когда предварительное нарезание затруднено. В подобных случаях ведут обработку универсальными резцами в два – три прохода. Иногда с целью улучшения качества нарезаемых колес и некоторого увеличения производительности в подобных случаях применяют комбинированные резцы [24 с. 130] (рисунок 1.5), у которых спереди находится участок черного нарезания с передней поверхностью, заточенной как у черновых резцов, а далее следует участок чистового нарезания, передняя поверхность которого затачивается под углом профиля обрабатываемого колеса.



**Рисунок 1.5 – Схема процесса зубострогания дифференцированными резцами**

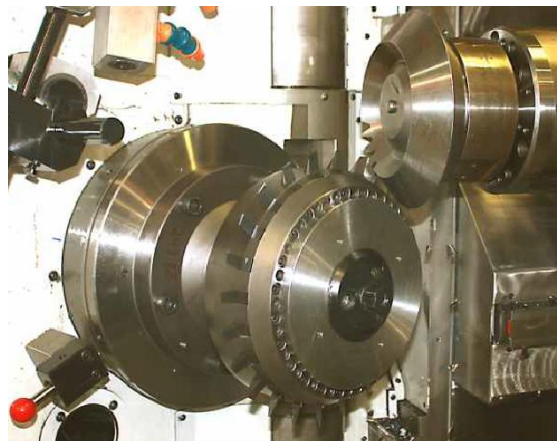
Подобная конструкция резцов подводит к решению задачи повышения производительности процесса обработки прямозубых конических колес при использовании резцов с дифференцированной схемой резания. Такая схема разработана и активно применяется в конструкции зуборезных долбяков.

Однако выбор схемы распределения срезаемой стружки и конструктивной подачи инструмента невозможен без четкого представления о величине и характере изменения толщины срезаемого слоя металла, а так-же кинематического изменения углов резания.

Одним из передовых методов обработки прямозубых конических колес является, предложенный компанией Gleason, CONIFLEX Plus. Сущность метода заключается в обработке венца зубчатого колеса сборной дисковой фрезой, рисунки 1.6,1.7, на станках модельного ряда PHOENIX.



**Рисунок 1.6 – Фреза  
CONIFLEX Plus**



**Рисунок 1.7 – Процесс обработки  
венца зубчатого колеса фрезой  
CONIFLEX Plus**

Необходимая геометрия профиля зубчатого колеса достигается за счет согласованных движений шпинделей станка. Данный метод позволяет вести обработку на скорости до 305 м/мин, в то время как при фрезеровании двумя спаренными дисковыми фрезами обработка ведется на скоростях до 61 м/мин. Стоит, однако, отметить высокую стоимость оборудования и инструмента необходимого для реализации данного метода.

Передовые технологии изготовления прямозубых конических колес используют станки с ЧПУ и инструмент, обладающий высокой стойкостью и обеспечивающий значительные скорости обработки.

В настоящее время произошло разделение технологий обработки зубчатых колес по применяемости смазочно-охлаждающих технологических сред:

1. станки, рассчитанные на работу с СОТС;
2. станки, рассчитанные на работу без применения СОТС, работающие по так называемой технологии «сухого» резания;

3. станки, рассчитанные на работу в том и другом режимах.

В мировой практике для предварительной и чистовой обработки зубчатых колес применяют высокопроизводительные станки с числовым программным управлением. Конструкции зубообрабатывающих станков имеют большое количество управляемых координат для обеспечения производительной работы, сокращения времени на переналадку. Такого рода оборудование создается по принципу модульной компоновки на основе базовой модели, а в модификациях исполняются концепции автоматизации главных и вспомогательных движений.

Производительность хотя и остается главным критерием выбора станков, однако с ускорением темпов замены моделей выпускаемого оборудования все большее внимание уделяется удобству, скорости и простоте их переналадки.

В станках модельного ряда PHOENIX фирмы Gleason заложена модульная концепция, что упрощает эксплуатацию и обслуживание. Управление зубообрабатывающим оборудованием осуществляется от 4-координатного УЧПУ фирмы Siemens (мод. Sinumerik 840 C) или Fanuc (мод. 160 I-MA), для перемещений по осям координат используются цифровые сервоприводы. При использовании оборудования в крупносерийном и массовом производстве для повышения производительности существует возможность оснащения различными видами загрузочно-разгрузочных устройств. Кроме того использование этого оборудования позволяет обрабатывать различные виды конических колес: прямозубые, косозубые, спиральные и др.

## **1.2 Применение инструмента с дифференцированной схемой резания, работающего по методу обката**

### **1.2.1 Классификация схем резания**

Кинематика процесса резания хорошо изучена. Вопросы формообразования и кинематики резания рассмотрены В.Ф. Бобровым, С.С. Петрухиным, Г.Н. Сахаровым, И.И. Семенченко, Ю.В. Цвисом, С.С. Четвериковым и др. [1, 44,



36, 37, 38, 39, 49, 61, 89, 90, 93, 94, 95].

Родин П.Р. [61] провел классификацию не схем резания, а кинематических схем формообразования поверхностей. Его схемы отличает то, что они представляют собой не абсолютные движения резания, а движения относительно неподвижного инструмента с указанием характера аксоидов.

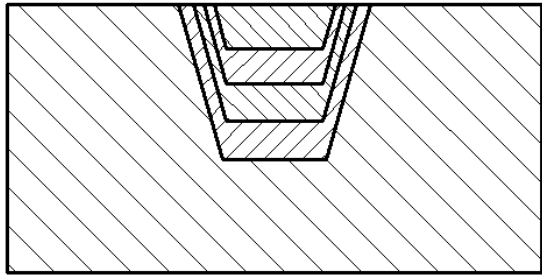
Данная классификация позволяет выявить возможные инструментальные поверхности для обработки заданного изделия. Родиным П. Р. рассмотрены схемы формообразования, основанные на сочетании двух движений: прямолинейно-поступательного и вращательного.

Рассмотрим классификацию схем резания, свойственную для большей части случаев обработки резанием. Разобьем условно все инструменты на две группы:

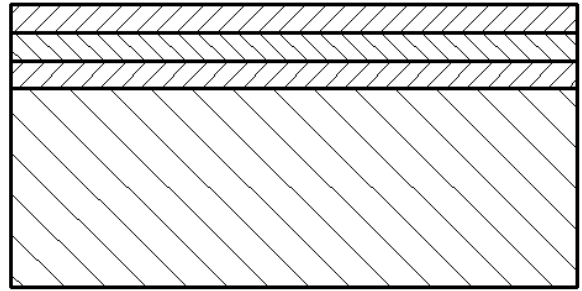
1. Инструменты, работающие без приведенной конструктивной подачи;
2. Инструменты, работающие с приведенной конструктивной подачей.

Возможные схемы резания для первой группы инструментов: профильная, генераторная, огибающая.

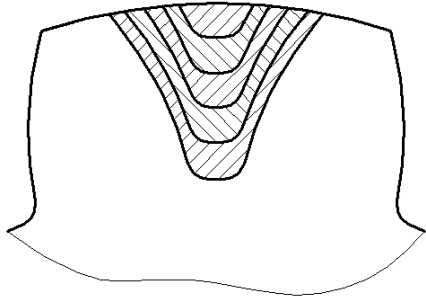
Профильная схема предполагает форму профиля режущих лезвий подобную форме профиля обработанных поверхностей. Окончательное профилирование производится последним резом. Металл при профильной схеме резания отделяется тонкими и широкими слоями. Наиболее характерные примеры обработки поверхностей по профильной схеме резания представлены на рисунке 1.8.



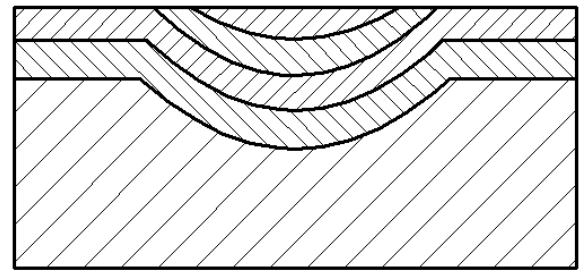
а



в



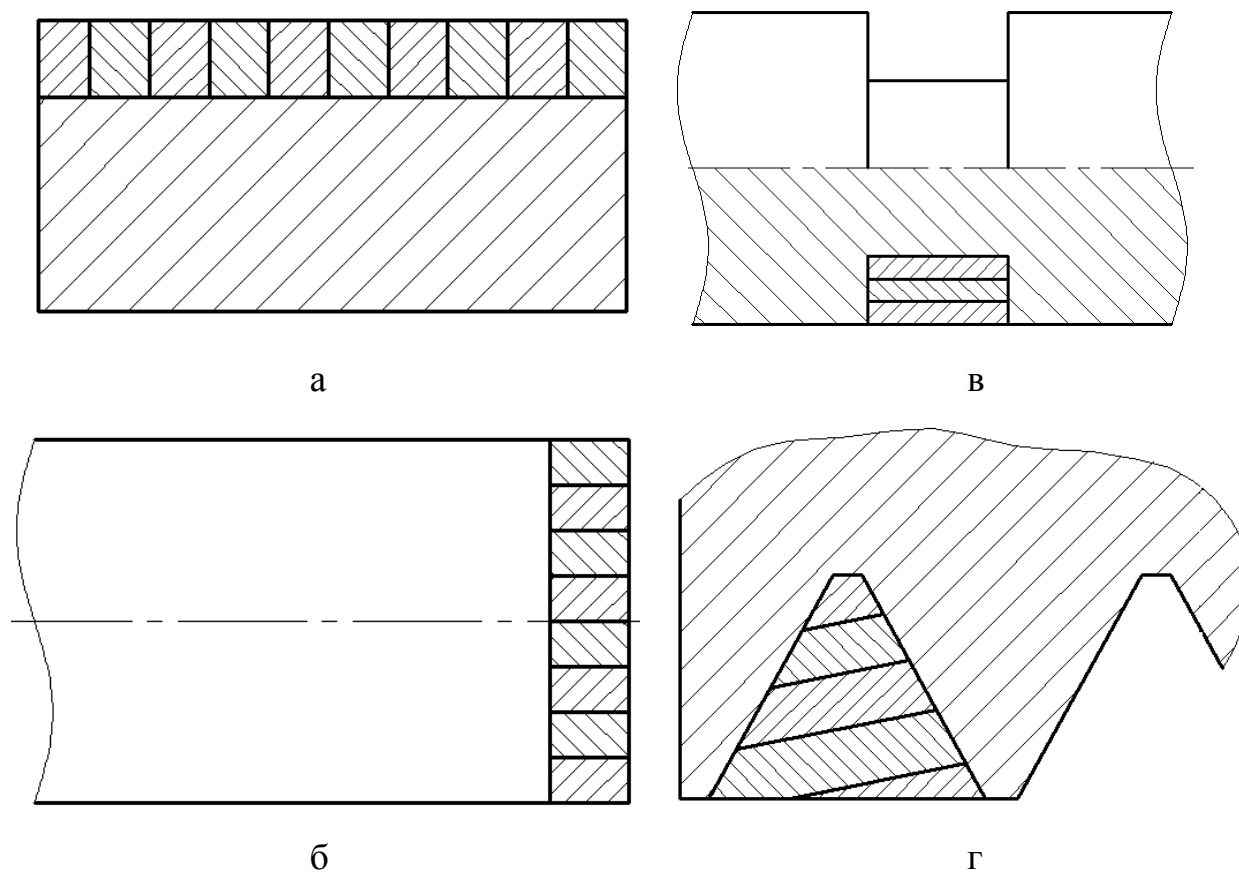
б



г

**Рисунок 1.8 – Примеры обработки поверхности по профильной схеме резания**

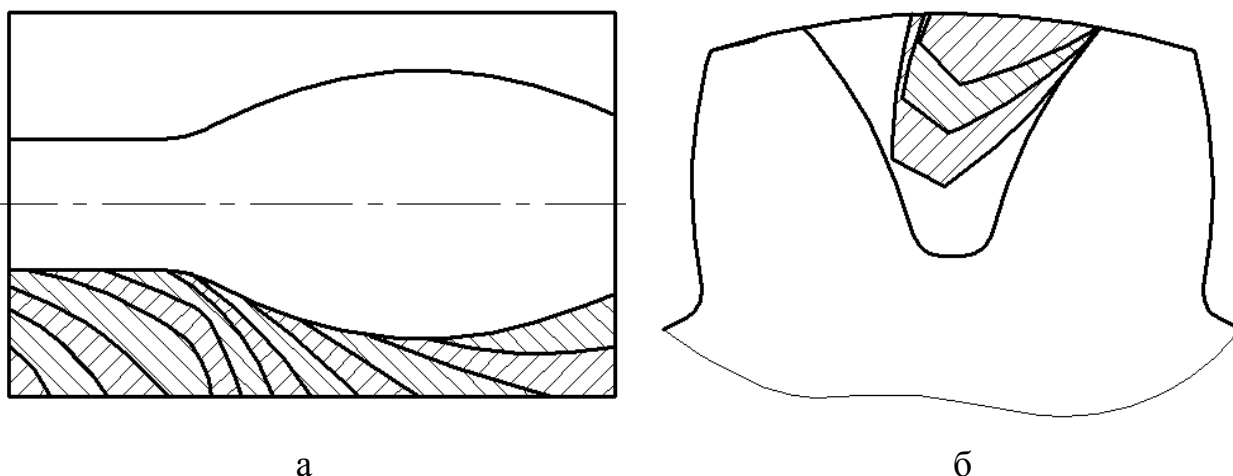
Отличительной особенностью генераторной схемы является то, что окончательная поверхность обрабатываемой детали получается как сумма элементарных поверхностей, образуемых каждым движением резания. Режущие лезвия имеют, как правило, простую форму. По этой схеме работают сверла, зенкеры, развертки, токарные резцы, канавочные и торцовые фрезы и др. Наиболее характерные примеры обработки поверхностей по генераторной схеме резания представлены на рисунке 1.9.



**Рисунок 1.9 – Примеры обработки поверхности по генераторной схеме резания**

При обработке по огибающей схеме резания окончательная поверхность обработанной детали получается как сумма элементарных поверхностей, образованный за каждый ход резания различными участками режущего лезвия. К инструментам, первой группы, работающим по огибающей схеме резания, относятся: резец-летучка, фасонные фрезы для образования готовых канавок, фрезы определенной установки, зуборезные долбяки и гребенки и др.

Примеры обработки поверхностей по огибающей схеме резания представлены на рисунке 1.10.



**Рисунок 1.10 – Примеры обработки поверхности по огибающей схеме резания**

Вторая группа инструментов включает в себя все вышеперечисленные схемы резания. Так протяжки могут работать по профильной, генераторной и огибающей схемам, метчики – по профильной, генераторной и т.д. Особенность инструментов этой группы состоит в том, что наличие приведенной конструктивной подачи делает схемы резания дифференцированными и может вносить в них дополнительные различия. Такая подача, как уже указывалось выше, осуществляется закономерным расположением режущих кромок на поверхности режущей части инструмента и позволяет отделять слои металла каждым режущим лезвием без участия движения абсолютной подачи, создаваемой кинематикой станка. Например, каждый зуб цилиндрической фрезы будет участвовать в процессе резания только в том случае, когда кроме вращательного движения фрезы - движения резания - будет иметь место поступательное движение фрезы или заготовки, являющееся движением подачи.

Каждый зуб протяжки участвует в процессе резания при наличии поступательного движения, являющегося в этом случае движением резания. Движение абсолютной подачи заменяется здесь приведенной конструктивной подачей, величина которой определяется подъемом на зуб или группу зубьев. Инструменты, отделяющие за один ход резания без участия движения

абсолютной подачи более одного слоя металла, являются и инструментами с дифференцированной схемой резания.

Таким образом, для инструментов второй группы возможны схемы резания: профильная дифференцированная, генераторная дифференцированная, огибающая дифференцированная.

Дифференцирование каждой из схем резания может производиться различным образом.

Рассмотрим в качестве примера обработку шпоночного паза строгальным резцом производящуюся по генераторной схеме резания. Замена строгального резца шпоночной протяжкой трансформирует генераторную схему в генераторную дифференцированную. Режущие лезвия каждого зуба протяжки расположены параллельно соответствующим лезвиям других зубьев, следовательно, способ дифференцирования - параллельный. При достаточной ширине шпоночного паза может быть использован групповой способ дифференцирования, при котором генераторная схема сохраняется при движении от одной группы зубьев к другой, а внутри группы разделение срезаемого слоя производится по групповому методу.

Обработка зубчатого венца червячной фрезой производится по огибающей схеме резания.

Значительное распространение имеют конструкции червячных фрез, у которых четные зубья по витку фрезы имеют отличие от нечетных, т.е. каждая пара зубьев приобретает приведенную конструктивную подачу. При этом огибающая схема резания трансформируется в огибающую дифференцированную. Дифференцирование внутри каждой пары зубьев может быть различным. В одном случае каждый четный зуб может работать только боковыми сторонами, отделяя удвоенные по толщине слои металла, а нечетные зубья - только вершинами. Или четные зубья будут отделять металл только входной боковой стороной, а нечетные - выходной и вершинной. В этих случаях профилирование впадины между зубьями заготовки распределяется между каждой парой зубьев, и способ дифференцирования является односторонним. В

другом случае каждый нечетный зуб может иметь равномерное занижение размеров, сохраняя параллельность режущих лезвий соответствующим лезвиям четных зубьев. В этом случае будем иметь параллельное дифференцирование. Разделение срезаемого слоя может производиться нечетными зубьями с формой боковых сторон подобной форме сечения срезаемого слоя - подобное дифференцирование. Все перечисленные способы дифференцирования могут быть использованы при работе комплектных долбяков, зубострогальных гребенок, зубострогальных резцов и т.п. Каждый из способов обладает определенными преимуществами и недостатками.

Итак, основными схемами резания являются: профильная схема, генераторная и огибающая. По мере совершенствования конструкции инструмента, связанного с приданием ему приведенной конструктивной подачи, увеличивающей производительность процессов резания, основные схемы трансформируются в дифференцированные, сохраняя характерные признаки. Внутри каждой из основных схем дифференцирование может производиться различными способами: параллельным, групповым, подобным и односторонним.

### **1.2.2 Общие сведения об инструментах с дифференцированными схемами резания**

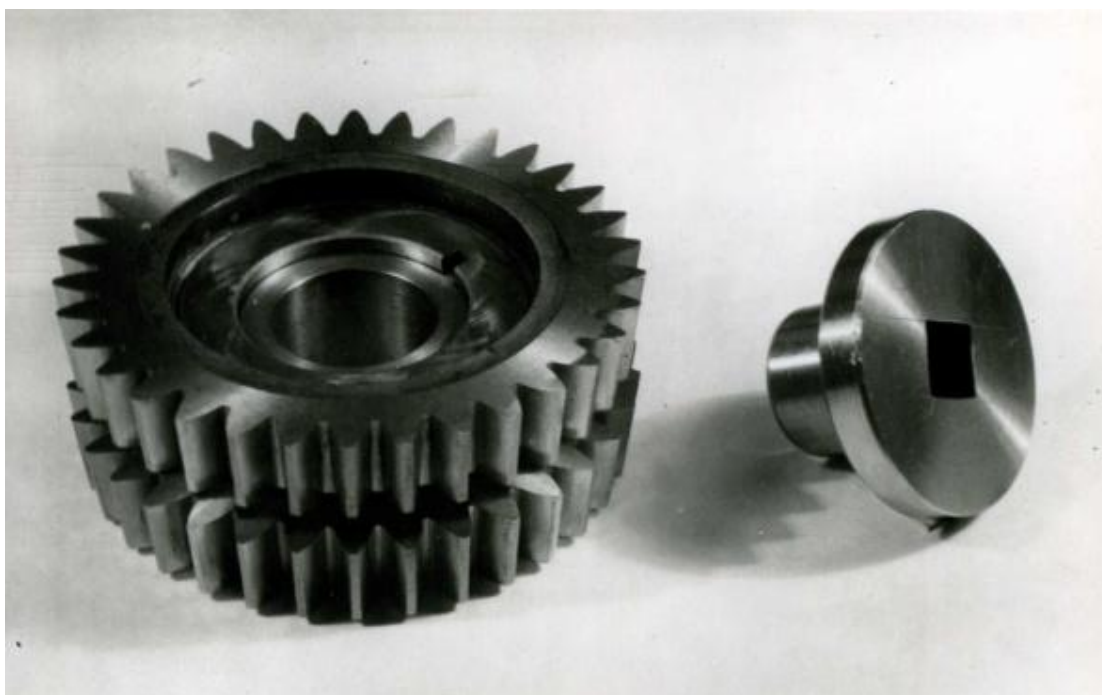
Разделение срезаемого слоя на части применяется во многих видах обработки резанием: протягивании, торцовом фрезеровании, строгании, зубофрезеровании и др. Во всех этих случаях распределение припуска между режущими лезвиями способствует снижению сил резания, увеличению стойкости инструмента и производительности процесса. В каждом конкретном случае разделение нужно согласовывать с мощностью станка, его жесткостью, требуемой точностью обработанного изделия, чистотой его поверхности, прочностью инструмента и др. условиями.

Вопросами разработки и применения инструмента с дифференцированными схемами резания активно занимались Бобров В.Ф., Петрухин С.С., Евдокимов

В.А., Тарапанов А.С. Их работы, в частности, были посвящены проектированию ступенчатых зуборезных долбяков, реализующих различные схемы резания. Причиной для этой работы послужил тот факт, что, на современном этапе развития зубодолбежных станков, наблюдается отставание возможностей зуборезных долбяков от технологических возможностей станков. Ряд зубодолбежных станков имеет мощность двигателя и диапазон радиальных и круговых подач, которые не могут быть полностью использованы из-за малой прочности долбяков.

Так при обработке колес из ст. 18ХГТ с модулем 5 мм; числом зубьев 40, стандартным долбяком с делительным диаметром 100 мм и  $Z=20$  уже при круговой подаче  $S_{кр} = 0,44$  мм/дв.ход происходит слом зубьев. Кроме того, рост сил резания, возникающий при увеличении подач, отрицательно сказывается на точности обработанных колес. Применение долбяков с дополнительными режущими лезвиями - комплектных долбяков - позволяет снизить возникающие силы пропорционально числу долбяков в комплекте.

Долбяки с дифференцированными схемами резания являются частным, более сложным случаем обычного долбяка (рисунок 1.11). В зависимости от выбираемой круговой подачи слой металла, срезаемый за один рабочий ход, разбивается на две или три части в определенном соотношении. Число частей, на которые разбивается срезаемый слой, определяет число ступеней комплектного долбяка. Каждая ступень представляет собой обычный дисковый долбяк. Верхний долбяк - чистовой - не подвергается модификации по профилю и служит для окончательного формирования профиля нарезаемого зуба. Нижний долбяк и, в случае применения трех ступеней, промежуточный перешлифовываются по профилю таким образом, чтобы ширина и высота каждого зуба была на определенную величину меньше ширины и высоты зуба долбяка, расположенного над ним.



**Рисунок 1.11 – Долбьяк с дифференцированной схемой резания**

Иначе говоря, долбьяк с дифференцированной схемой резания - это такая модификация обычного долбьяка, в результате которой он приобретает приведенную конструктивную подачу [49] в виде разности размеров зуба по ступеням.

При этом каждая ступень инструмента срезает определенную, зависящую от принятой приведенной конструктивной подачи, часть общего слоя металла, приходящегося на рабочий ход, что дает возможность, сохраняя заданную для чистового режима толщину срезаемого слоя, значительно увеличить круговую и радиальную подачи. Производительность процесса зубодолбления может быть повышена до 2,5 раз.

Все долбьяки комплекта размещаются на штосселе зубодолбежного станка, для чего необходимо увеличить посадочную шейку штосселя, и выставляются при помощи шпонки, специального шаблона или индикатора с магнитной стойкой. Опорная втулка шпинделя должна изготавливаться с учетом высоты инструмента и обеспечивать возможность свободного выхода последней ступени инструмента из заготовки. Осевое расстояние между режущими лезвиями долбьяков может



быть на 1 - 1,5 мм больше высоты нарезаемого венца, чтобы каждый последующий долбяк вступал в работу после выхода предыдущего. Такое расположение долбяков комплекта увеличивает необходимую длину хода штосселя, ограничивает число ступеней инструмента и максимальную высоту обрабатываемого зубчатого венца, но резко снижает силы резания. Это позволяет работать без перегрузки станка и инструмента при повышенных подачах. Кроме того, снижение сил способствует уменьшению величины упругих отжатию технологической системы и положительно влияет на точность нарезаемого зуба.

При обычном зубодолблении в два прохода - черновом и чистовом-основная масса металла срезается черновым долбяком, и на долю чистового остается тонкий слой, расположенный по боковым сторонам и во впадине обрабатываемого зуба.

При зубодолблении долбяками с дифференцированными схемами резания черновой и чистовой проходы совмещаются, что приводит к резкому изменению схемы резания. За каждый рабочий ход металл срезается и черновым и чистовым долбяками комплекта, а окончательное профилирование зуба заготовки производится чистовым долбяком. Таким образом чистовой долбяк комплекта срезает значительно большую часть металла, чем при обычном долблении в два прохода, и, в то же время, толщина срезаемого им слоя лежит в пределах, рекомендуемых для чистовой обработки, и определяется выбранной приведенной конструктивной подачей.

Эта подача выражает величину смещения двух соседних поверхностей резания относительно друг друга, когда это смещение осуществляется закономерным расположением режущих лезвий на поверхности режущей части инструмента при отсутствии абсолютной подачи. Форма поверхностей резания, полученных при помощи приведенной конструктивной подачи, зависит от образующих, их режущих лезвий и принятой схемы резания.

Возможны два основных конструктивных типа долбяков с дифференцированной схемой резания.

а) Расстояние между передними поверхностями долбяков на 1 - 1,5 мм больше высоты нарезаемого венца, чтобы долбяки вступали в работу последовательно, с некоторым перерывом во времени.

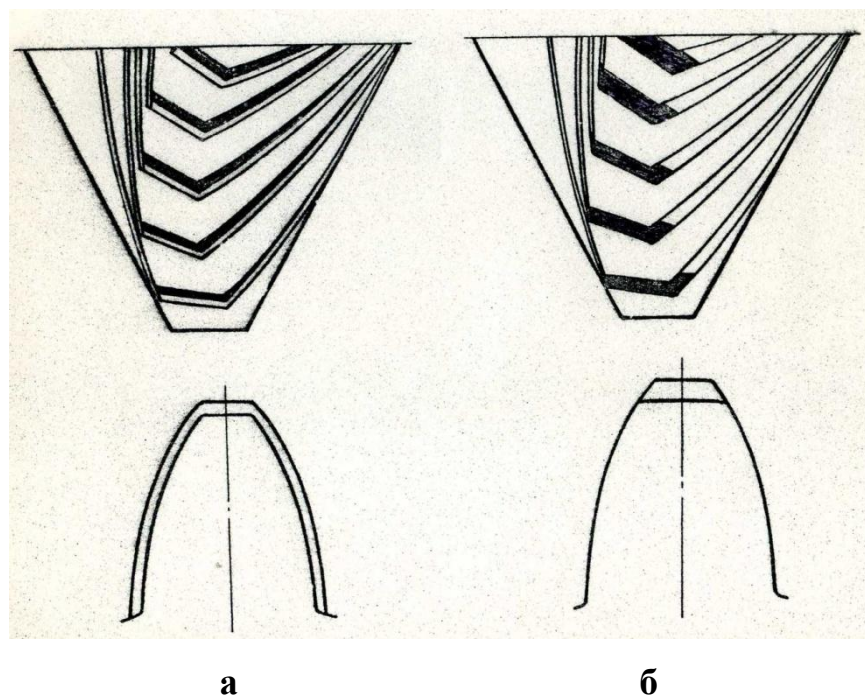
б) Расстояние между передними поверхностями долбяков меньше высоты нарезаемого венца и зависит от необходимого пространства для размещения стружки и прочности черновой ступени.

Второй конструктивный тип рационально применять при наличии станков повышенной жесткости, так как силы резания при обработке такими инструментами могут несколько возрасти по сравнению с обычным вариантом, однако нагрузка на каждую ступень инструмента снижается примерно вдвое. Таким образом, увеличение окружных подач в данном случае регламентируется лишь жесткостью применяемого оборудования.

### **1.2.3 Дифференцированные схемы резания**

Так как процесс обработки прямозубого конического колеса по методу обката во многом схож с процессом нарезания цилиндрических зубчатых колес зуборезными долбяками, то целесообразно рассмотреть предложенные в работах Боброва В.Ф., Петрухина С.С., Евдокимова В.А., Тарапанова А.С. способы дифференцирования срезаемых слоев металла по ступеням инструмента.

Введение в конструкцию обычного зуборезного долбяка дополнительных режущих лезвий трансформирует огибающую схему резания, присущую инструментам, работающим по методу обката, в огибающую дифференцированную. Дифференцирование срезаемого слоя, как и в случае зубофрезерования, может осуществляться различными способами, выбор которых зависит от конкретных условий обработки. Наиболее рациональными для комплектных долбяков являются способы: параллельный, подобный и односторонний (рисунок 1.12).



**Рисунок 1.12 – Способы дифференцирования срезаемых слоев специальными долбьяками**

При параллельном дифференцировании форма дополнительных лезвий полностью копирует форму основных чистовых лезвий (рисунок 1.12,а). При одностороннем дифференцировании исключается взаимное влияние схода стружек от различных лезвий (рисунок 1.12,б). Например, черновой зуб работает только вершинным режущим лезвием, а чистовой - только боковыми лезвиями.

Подобное дифференцирование позволяет наиболее равномерно распределить срезаемый слой по толщине вдоль режущих лезвий, однако для его осуществления, черновую ступень инструмента следует перешлифовать по задней поверхности, что возможно лишь на специальном оборудовании (точные зубошлифовальные станки). Поэтому в условиях производства самыми целесообразными, с точки зрения технологичности, являются долбьяки с параллельным и односторонним дифференцированием.

Схема резания с параллельным дифференцированием предполагает боковые режущие лезвия верхней и нижней ступени долбьяка как эвольвенты одной

окружности, расположенные по образующей на расстоянии, равном приведенной конструктивной подаче.

Приведенная конструктивная подача по боковым режущим лезвиям может быть определена из выражения:

$$S_{к.нр.} = \Delta b t g a_{\delta} \quad (1.1)$$

Соотношение  $S_{к.нр.}$  и  $S_{к.нр.в.}$  можно получить следующим образом:

$$\frac{S_{к.нр.}}{S_{к.нр.в.}} = \frac{t g a_{\delta}}{t g a_{\epsilon}} \quad (1.2)$$

так как  $t g a_{\delta} = t g a_{\epsilon} \sin a_{tw}$

где  $a_{tw}$  – угол зацепления

$$\frac{S_{к.нр.}}{S_{к.нр.в.}} = \sin a_{tw} \quad (1.3)$$

Как правило  $\sin a_{tw} = 20^{\circ}$  и  $\sin 20^{\circ} = 0,342$ , что примерно соответствует распределению толщины слоя, срезаемого обычным долбяком по его входному и вершинному режущим лезвиям в процессе обработки. Таким образом, параллельное дифференцирование позволяет в достаточной степени равномерно распределить срезаемый слой между отдельными режущими лезвиями.

Основным фактором, оказывающим доминирующее влияние на величину  $S_{к.нр.}$  является круговая подача инструмента, поэтому для получения оптимального значения  $S_{к.нр.}$  целесообразно воспользоваться соотношением вида:

$$S_{к.нр.} = f(S_{кр.}) \quad (1.4)$$

Соотношение (1.4) можно получить либо на основе анализа геометрических параметров слоев, срезаемых черновым и чистовым режущими лезвиями, либо экспериментальным путем. При работе обычных долбяков и долбяков с параллельным дифференцированием срезаемого слоя, условия резания в вершинной части зуба инструмента остаются неблагоприятными. Стружки,

отделяемые боковыми и вершинными режущими лезвиями встречаются в зоне контакта с передней поверхностью, затрудняя процесс обработки.

Чтобы избавиться от взаимного влияния этих стружек в процессе работы, необходимо распределить срезаемый слой металла по ступеням таким образом, чтобы у каждой из ступеней участвовали в работе только боковые режущие лезвия, а у другой - вершинное.

Такая схема резания с распределенным дифференцированием значительно улучшает работу режущих лезвий долбяка.

Приведенная конструктивная подача долбяка в этом случае характеризуется толщиной слоя, срезаемой верхней ступенью.

Для того, чтобы исключить из участия в работе боковые режущие лезвия верхней ступени, их исходное расстояние по отношению к нижней ступени выполняется меньшим на величину:

$$\Delta b = 0,5 \div 0,6 \text{ мм.}$$

Применение каждой из указанных схем зависит от конкретного случая обработки. По мере увеличения круговой подачи схемы резания следует применять в такой последовательности: распределенная, параллельная.

Это объясняется тем, что схема резания с распределенным дифференцированием не предполагает разделения слоев металла, срезаемых отдельными лезвиями между ступенями долбяка, поэтому при увеличении круговой подачи толщины их быстро растут и качество поверхности обрабатываемой детали ухудшается.

### **1.3 Управление процессами механической обработки**

Постоянно возрастающие требования к эксплуатационным свойствам прямозубых конических колес приводят к использованию новых инструментальных и конструкционных материалов, новых схем процесса обработки, конструкций режущего инструмента. Изменения, вносимые в отработанные технологические процессы влияют на качество обработки, кроме

того их внедрение требует больших затрат, связанных с определением режимов резания. Использование методики управления процессом обработки позволяет не только сократить эти расходы, но и на этапе проектирования рассмотреть возможные варианты обработки и отбросить нерациональные.

Вопросами взаимосвязи параметров технологической системы и качества получаемых изделий занимались многие российские и зарубежные ученые [8, 28, 62, 69, 76, 88], однако на сегодняшний день не существует методик, позволяющих на стадии технологической подготовки производства гарантировать получение требуемых параметров качества детали. Кроме того, ошибочно полагать, что погрешности, возникающие в процессе прохождения заготовкой по всей совокупности технологических операций можно ликвидировать при помощи самонастраивающихся станков. Данные машины, зачастую, обладают значительными порогами «нечувствительности», и не решают проблему обеспечения требуемого качества изделий. Необходим анализ параметров технологической системы, порождающих погрешности обработки и использование результатов анализа для корректного определения параметров качества изделия.

В настоящее время, наиболее широкое распространение имеет расчетно-аналитический метод определения точности размеров деталей машин, разработанный научными школами Кована В.М. – Соколовского А.П.. Данный метод сыграл важную роль в развитии технологической науки, однако, не может в полной мере удовлетворить требованиям, предъявляемым современным машиностроением, что объясняется их ужесточением к качеству изделий в условиях конкурентного рынка.

Э.В. Рыжов [62] получил зависимости, возникающие между эксплуатационными свойствами деталей (контактная жесткость, усталостная прочность, износостойкость и др.) и качеством их поверхности. Методика Э.В. Рыжова применима в расчетах экономической эффективности и выбора рациональных режимов обработки.

Суслов А.Г. [76] доказал, что эксплуатационные свойства деталей машин определяются системой параметров поверхностного слоя. Проведенные А.Г. Сусловым исследования позволили установить между ними качественные и количественные зависимости, удовлетворяющие требованиям практики.

В работе [76] доказано, что существует реальная возможность управления формированием выбранной системой параметров поверхностного слоя изделий при их производстве. Реализация происходит за счет рационального выбора метода обработки и технологических режимов при учете технологической наследственности.

Однако, в работе [76] отмечено, что основным недостатком существующей методики расчета рациональных режимов обработки является неполное отражение свойств в системе технических требований, предъявляемых к состоянию поверхностного слоя изготавливаемой детали, а следовательно, и к ее эксплуатационным свойствам.

В работе [76] были предложены структурные схемы задачи конструктора и технолога, а также схема расчета оптимальных параметров состояния рабочих поверхностей деталей и схема оптимизации обработки изделий по параметрам состояния поверхностного слоя.

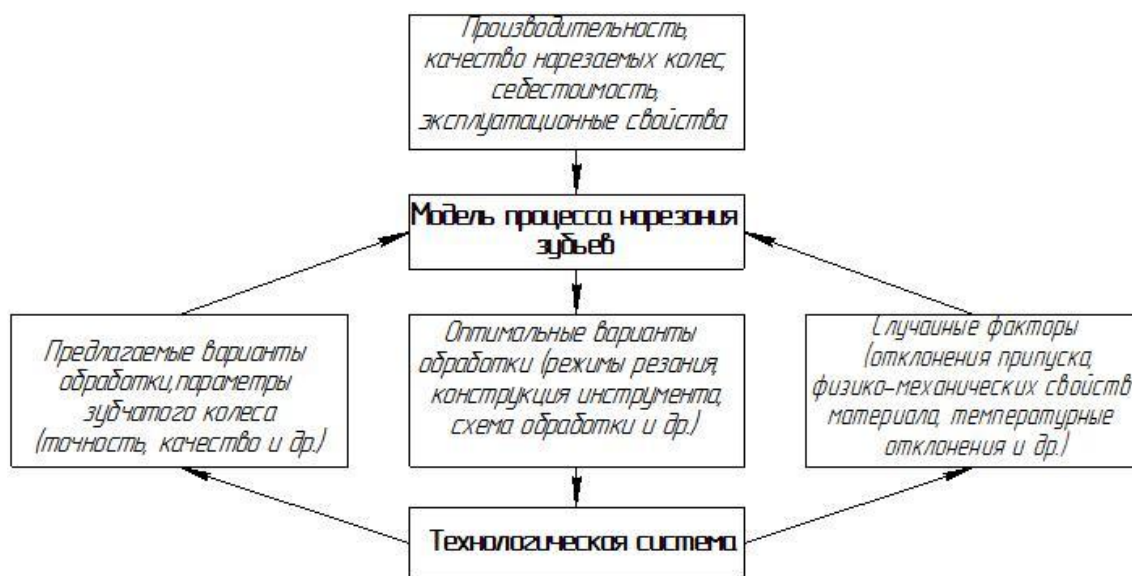
В работах Васильева А.С. и Дальского А.М. [8] погрешность обработки рассматривается не только как результат проведения данной технологической операции, но и включает в себя погрешности предыдущих операций. Формирование заданных параметров качества изделия представляется как непрерывный процесс, на каждом этапе которого достигнутое значение показателя качества включает оперативно сформированную составляющую (следствие прямого воздействия конкретного технологического метода) и составляющую, учитывающую технологическую предысторию обрабатываемой детали.

Данные представления о процессе обработки верны и для нарезания прямозубых конических колес по методу обката потому, что очевидно влияние способа получения заготовки, чернового нарезания и т.д. на качественные

параметры полученной рабочей поверхности. Однако кинематика процесса резания такова, что качественные параметры зубчатого венца меняются вдоль всего профиля, следовательно для верного прогнозирования параметров качества прямозубых конических колес необходимо в первую очередь анализировать процесс лезвийной обработки рабочей поверхности.

В работах Тарапанова А.С., Харламова Г.А. предлагается методика управления процессом лезвийной обработки сложных периодических профилей, основанная на анализе виртуальных моделей.

Управляющая (модель процесса обработки) и управляемая (станок, инструмент, приспособления) системы составляют систему управления. Различают разомкнутые и замкнутые системы управления. Вариант разомкнутой системы управления процессом нарезания зубьев представлен на рисунке 1.13, в таких системах отсутствует обратная связь.



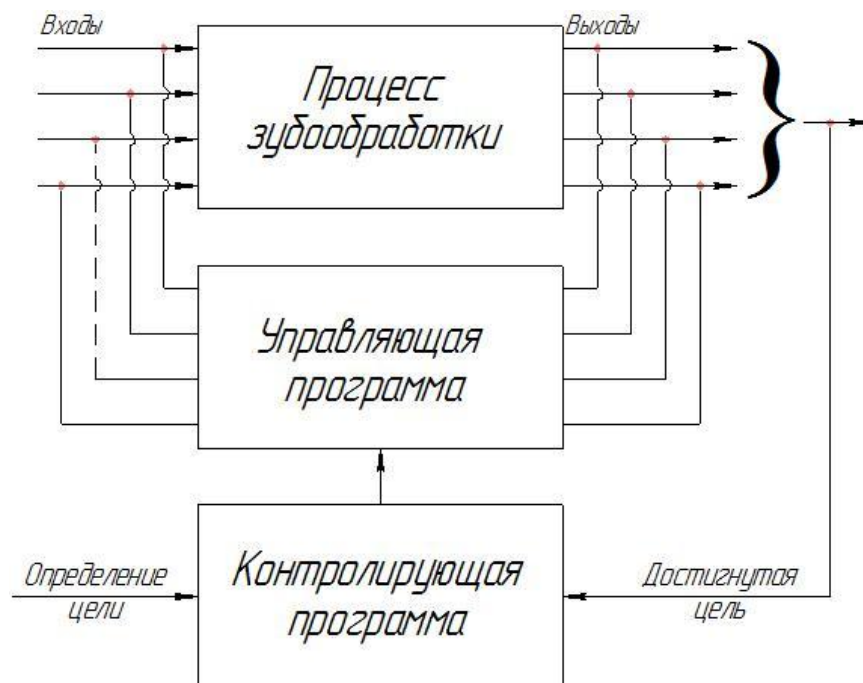
**Рисунок 1.13 – Схема разомкнутой системы управления процессом зубообработки**

Однако используя разомкнутую систему управления нельзя учесть случайные факторы, которые в большом количестве сопровождают процесс резания, поэтому при разработке методики управления процесс нарезания зубьев представляется как замкнутая система управления с обратной связью.

Авторы в работе [88 с. 198-199] отмечают, что основной задачей при изучении процесса нарезания зубьев является определение величины влияния



параметров технологической системы на показатели качества колеса и производительность процесса. Представленное в виде методики решение данной задачи, позволит управлять процессом. На рисунке 1.14 представлена схема управления процессом зубообработки с обратной связью.



**Рисунок 1.14 – Схема замкнутой системы управления процессом зубообработки**

В общем виде структура управления представляет собой ввод в систему зубообработки параметров управления и получение определенных величин управляемых параметров. Для оптимизации управляемых параметров в схеме управления предусмотрена подпрограмма, которая оптимизирует значения выходных параметров в зависимости от заданных ограничивающих факторов. В случае если потребуется улучшить какой-либо управляемый параметр (шероховатость, степень точности, износ инструмента), то, предусмотрена специальная контролирующая программа, которая, влияя на управляющую программу, позволит достичь заданную цель.

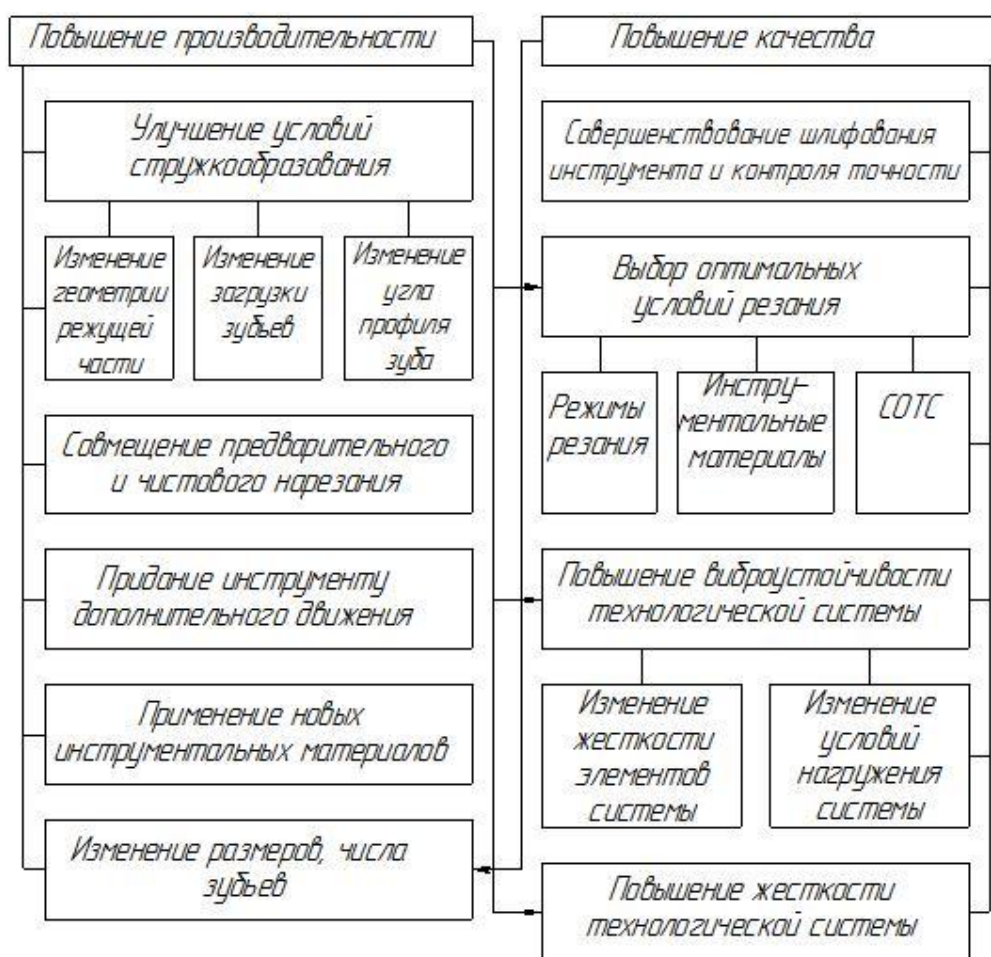
Из приведенных схем видно, что главным элементом управления является виртуальная модель процесса обработки.

Можно выделить ряд задач модели процесса зубообработки: определение величины влияния на управляемые параметры с целью получения их оптимального значения, определение зависимостей связывающих входные и выходные параметры, выбор величины влияния на входные параметры с целью получения требуемых значений выходных параметров.

В качестве управляющих параметров выделяют: геометрические параметры и материал обрабатываемой детали, режимы обработки, кинематическую схему резания, конструкцию инструмента, станок и т.д.

Обработка зубчатого венца представлена следующими управляемыми параметрами: в качестве первообразной целевой функции – получение зубчатого колеса; в качестве частных целевых функций – повышение качества поверхности, повышение точности венца, производительности процесса зубообработки, снижение износа инструмента и т.д. В качестве частной функции можно выделить повышение эксплуатационных свойств детали, связанных с качеством поверхности и системой параметров поверхностного слоя.

При разработке методики управления процессом нарезания прямозубых конических колес основной задачей является определение величины влияния параметров процесса обработки на точность, шероховатость, производительность обработки (рисунок 1.15). В качестве основных параметров, можно выделить кинематику процесса, конструкцию инструмента, особенности динамики процесса и износ инструмента.



**Рисунок 1.15 – Основные направления управления процессом нарезания прямозубых конических колес**

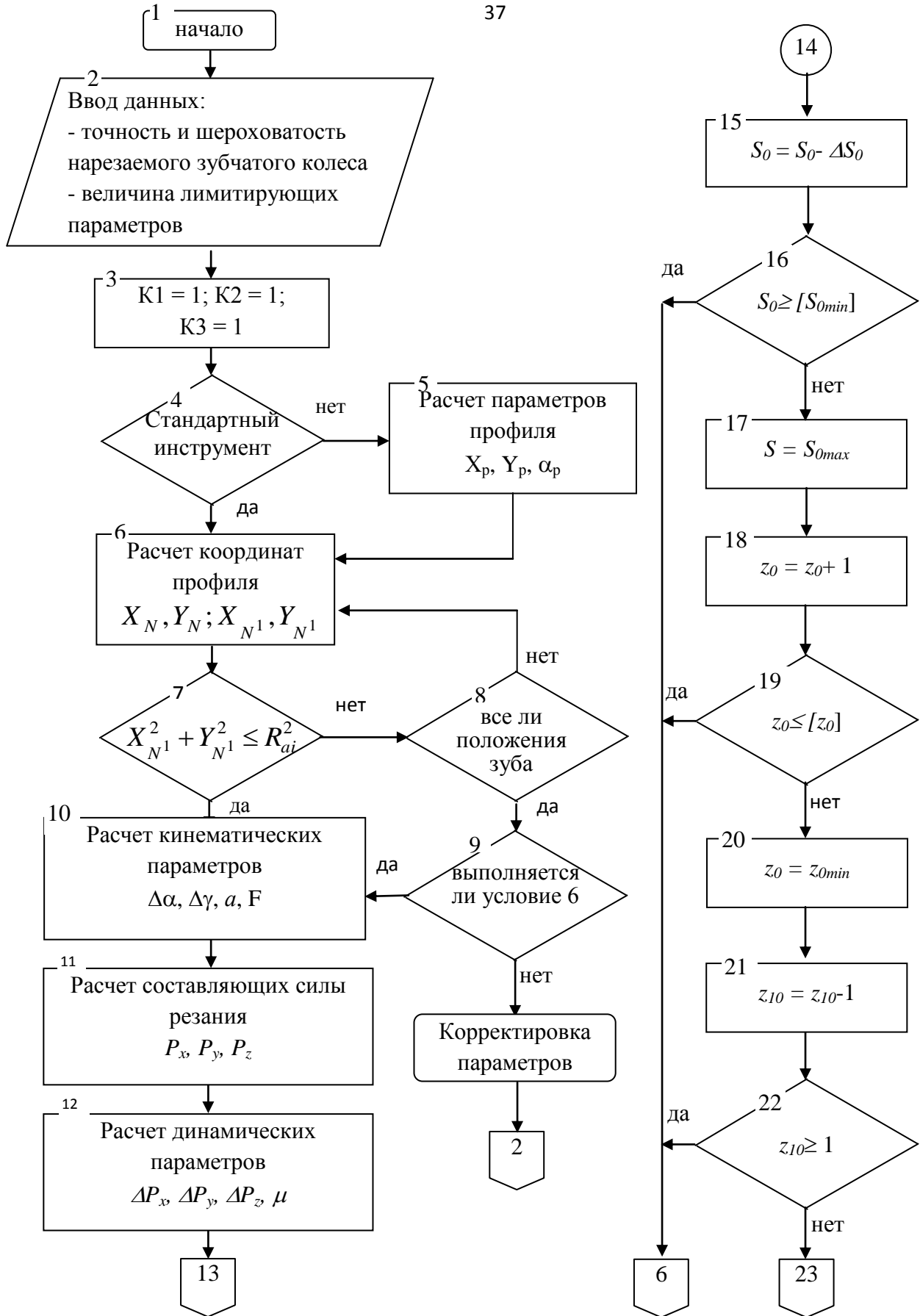
Существуют алгоритмы, позволяющие управлять процессом нарезания зубьев [54 с. 100-107], он представлен на рисунке 1.16. После ввода данных (требуемая шероховатость профиля, степень точности и т.п.), а также ограничивающих факторов (предельные значения режимов резания и др.), задаются возможные варианты кинематики, исполнения режущей части инструмента, вида формообразования (блок 3). Блок 5 выполняется при использовании специального инструмента, в нем производится расчет параметров профиля. В блоке 6 рассчитываются координаты профиля режущего лезвия. Условия, в блоках 7, 8, 9, позволяют выявить положения инструмента, при которых происходит профилирование зуба или удаление материала из впадин. Далее рассчитываются кинематические изменения параметров резания (переднего и заднего углов, толщины срезаемой стружки) в блоке 10. В блоке 11 производится

расчет осевых составляющих силы возникающей в процессе резания. В блоке 12 определяются динамические характеристики процесса, необходимые для расчетов точности обработки. Блок 13 предназначен для расчета точностных параметров венца. В блоке 14 сравниваются полученные точностные параметры с допустимыми значениями, и, если условие выполняется, то производится сравнение основного времени обработки.

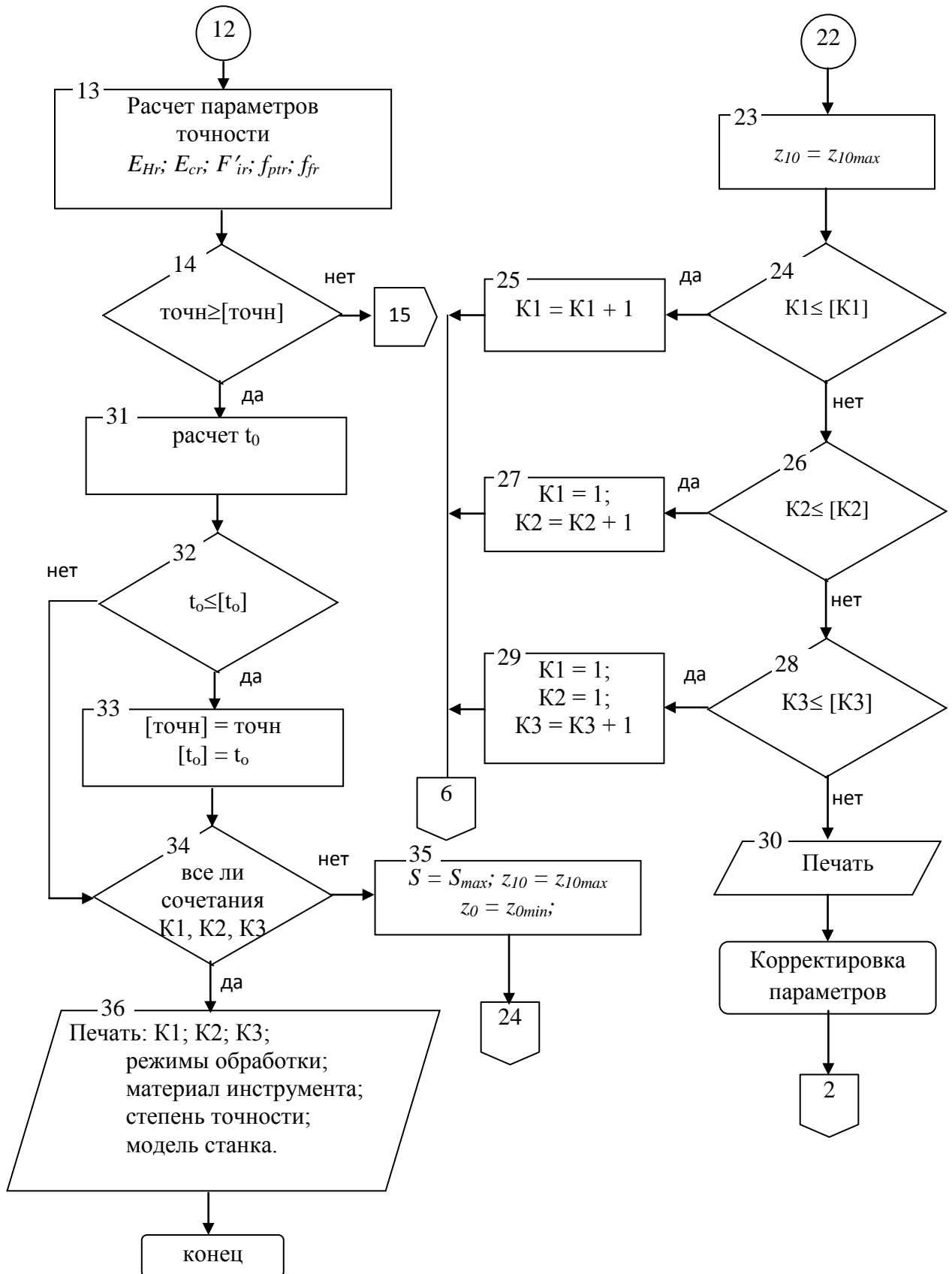
При точности больше допустимого значения производится оптимизация с целью выбора рациональных режимов и конструктивных элементов (блоки 21, 26). Если положительный результат не получен, то в блоках 24, 25, 26, 27, 5, 29 выполняется перебор различных сочетаний параметров процесса (вида формообразования, кинематики и конструкций режущей части). При В случае если условие 14 выполняется на печать выводится (блок 30) соответствующее сообщение и производится корректировка ограничивающих факторов.

В случае если условие 32 не выполняется, рассмотрение оставшегося сочетания  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  производится с помощью блоков 34, 35, 24, 25, 26, 27, 5, 29. После выполнения условия 32 допустимым значениям точности и основного времени присваиваются значения расчетных (блок 34). Далее продолжается перебор оставшихся вариантов (условие 34) обработки.

В результате на печать выводятся режимы обработки, и конструктивное исполнение режущей части инструмента, обеспечивающие наибольшую точность зубчатого колеса в пределах ограничивающих параметров.



**Рисунок 1.16 – Алгоритм программы, управляющей точностью нарезаемых колес (начало)**



**Рисунок 1.16 – Алгоритм программы, управляющей точностью нарезаемых колес (окончание)**

На основании данного алгоритма существует возможность решить обратную задачу – определить параметры точности при заданных режимах обработки и схемах формообразования.

#### **1.4 Состояние вопроса динамики обработки прямозубых конических колес**

Изучение силы резания, возникающей в процессе нарезания венца прямозубого конического колеса представляет собой важную задачу, так как такие параметры точности как плавность зацепления зубчатой передачи, погрешность профиля и др. на одном зубе колеса, зависят от величины колебания силы резания в процессе обработки одной впадины зуба. Кроме того, в результате действия силы резания происходит прогиб оправки, на которой креплено колесо, , что вызывает погрешность направления зуба. Кроме того сила резания также влияет на кинематическую точность обрабатываемой детали.

Оптимизация эксплуатационных возможностей станков для нарезания прямозубых конических колес по методу обката по качеству обрабатываемых колес и производительности связана, с определением амплитуды силы резания и изменения ее осевых составляющих за период обработки одной впадины зуба.

Информация о силе резания позволяет определить не только мощность станка, требуемую для обработки изделия, но и жесткость отдельных его узлов, жесткость детали и приспособления. Определение сил резания позволяет также рассчитать ряд конструктивных параметров зуборезного инструмента.

Зачастую определение силы резания производится на основании результатов экспериментов. В настоящее время разработан ряд методик, позволяющих определить силу резания возникающую в процессе работы зуборезных инструментов экспериментальным путем. Получение необходимой аналитической информации связано с большими техническими трудностями, что обусловлено сложностью выделения той части нагрузки, которая приходится на каждую режущую кромку инструмента.

Универсальная методика определения степени загруженности элементов зубообрабатывающего инструмента, в частности зубострогальных резцов и спаренных дисковых фрез, теоретическим путем представлена в работе [53]. При расчете сил резания сначала определяют геометрию инструмента и срезаемый им слой металла, а затем коэффициент утолщения стружки  $K_a$ . После этого происходит перерасчет зависимостей для расчета силы резания при токарной обработке с учетом специфики расположения режущего инструмента относительно колеса. Расчет силы резания производят при известных режимах обработки, толщинах срезаемого слоя материала и свойствах материала заготовки. Однако рекомендации в работе приводятся для частного случая.

Для универсального изучения силы, возникающих в процессе обработки зубьев инструментами с прямыми режущими кромками (зубострогальными резцами, спаренными дисковыми фрезами), возможно использование методики, представленной в работах [11, 45, 54, 67].

Вначале производится расчет удельных сил. В диапазоне толщин срезаемого слоя от 0,01 до 0,5 мм, передних углов – от -0,0175 рад до 0,0349 рад и задних углов – от  $0,873 \cdot 10^{-2}$  рад до 0,0524 рад:

$$\Delta P_z = \left( 1,7 \cdot 10^2 a^{0,9} + 4,3 - 9(\gamma + \Delta\gamma) \right) (\alpha - \Delta\alpha)^{-0,07} 9,8 K_{Pz}; \quad (1.9)$$

$$\Delta P_y = \left( 0,44 \cdot 10^2 a^{0,95} + 1,4 - 3,4(\gamma + \Delta\gamma) \right) (\alpha - \Delta\alpha)^{-0,2} 9,8 K_{Py}, \quad (1.10)$$

где  $a$  – толщина срезаемого слоя;

$\gamma$  – передний угол инструмента;

$\Delta\gamma$  – кинематическое изменение переднего угла;

$\alpha$  – задний угол инструмента;

$\Delta\alpha$  – кинематическое изменение заднего угла;

$K_{Pz}$  и  $K_{Py}$  – обобщенные поправочные коэффициенты, равные произведению коэффициентов  $K_M$ ,  $K_{TCOC}$ ,  $K_h$ , и  $K_V$ , учитывающих влияние следующих факторов:  $K_M$  – материала;  $K_{TCOC}$  – TCOC;  $K_h$  – износа инструмента;  $K_V$  – скорости резания.

В диапазоне толщин срезаемых слоев от 0 до 0,01 мм:



$$\Delta P_z = (57 + 2210a)K_{Pz}; \quad (1.11)$$

$$\Delta P_y = (67,5 + 1480a)K_{Py}. \quad (1.12)$$

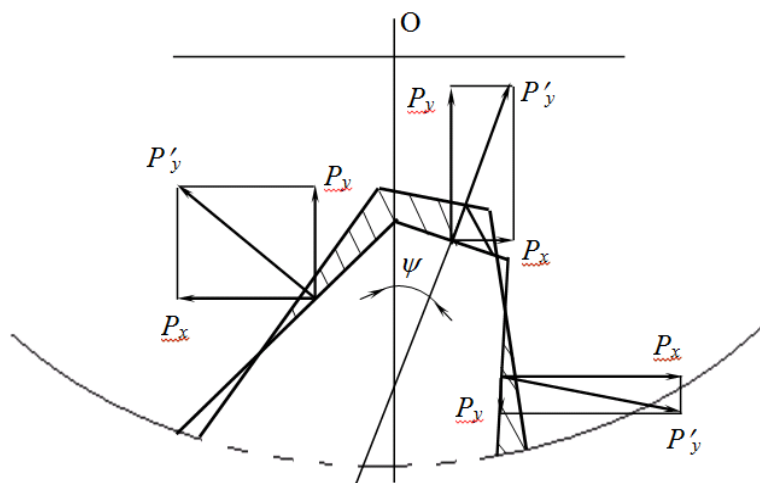
Суммируя произведения удельной силы, возникающей на элементарном участке режущего лезвия, получим:

$$P_z = \sum \Delta P_z \Delta l K_{cl}. \quad (1.13)$$

Значения составляющих силы резания (рисунок 1.17) для боковых режущих лезвий:

$$P_y = \sum \Delta P_y \Delta l \sin(\alpha_0 \pm \psi) K_{cl}; \quad (1.14)$$

$$P_x = \sum \Delta P_y \Delta l \cos(\alpha_0 \pm \psi) K_{cl} \quad (1.15)$$



**Рисунок 1.17 – Определение составляющих сил резания при обработке инструментами с прямолинейными режущими кромками**

и вершинного режущего лезвия:

$$P_y = \sum \Delta P_y \Delta l \cos(\psi) K_{cl}; \quad (1.16)$$

$$P_x = \sum \Delta P_y \Delta l \sin(\psi) K_{cl}, \quad (1.17)$$

где «±» – входная кромка или выходная кромка;

$\Delta l$  – элементарный участок режущего лезвия;

$K_{cl}$  – коэффициент, учитывающий сложность формирования стружки.

Таким образом, при изучении процессов, происходящих при резании металлов, в частности динамики обработки прямозубых конических колес,

основной задачей является определение степени влияния различных факторов на составляющие силы резания.

Изучение динамики процесса обработки профиля прямозубого конического колеса позволяет не только определить точностные показатели обрабатываемого изделия, но и дает возможность решить обратную задачу, а именно рассчитать оптимальные режимы обработки в зависимости от заданных параметров качества детали.

### **1.5 Исследование износа зуборезных инструментов**

Проблема механизма и природы износа режущего инструмента привлекала внимание большого числа исследователей: [5, 6, 9, 25, 33, 34, 35, 40, 43, 46, 50, 51, 60, 63, 82, 86].

Выполненные в данных работах исследования, позволили решить ряд фундаментальных вопросов, а именно: были установлены виды износа при резании всухую (адгезионный, диффузионный, абразивный и окислительный); доказано, что преобладание того или иного вида износа зависит от конкретной ситуации в зоне резания; выяснилось, что виды износа частично перекрывают друг друга; при обработке металлов стальными инструментами с применением СОЖ установлен особый вид износа – химический.

В разной степени, все выше перечисленное относится к любому из режущих инструментов. Однако, износ зуборезных инструментов, в частности зубострогальных резцов имеет свои особенности. Определяющее значение при работе данным инструментом имеет размерный износ, так как он оказывает значительное влияние на точность обрабатываемых прямозубых конических колес.

Одними из первых работ, посвященных износу зуборезных инструментов, являются работы [64, 75]. В них было введено понятие критерия затупления.

Стаханов Н. Г. связал износ инструмента работающего по методу обката с точностью боковой эвольвентной поверхности зубьев обрабатываемой детали.

Критерием работоспособности был принят износ по задней поверхности режущего инструмента, при котором погрешность эвольвенты колеса выходила за допустимые пределы [70].

Даниэлян А.М. получил математическую зависимость износа зуборезного инструмента от ряда факторов: продолжительности работы –  $\tau$ , круговой подачи –  $S_{кр}$  и скорости резания  $V$  [9].

Впоследствии, вопросы, связанные с износом зуборезных инструментов, были представлены в работах [6, 43].

Кропотов Г.А. [34], принимая во внимание большую разницу по вопросу допустимого износа зуборезных инструментов (допустимый износ долбяков по данным разных авторов различался в 15 раз), провел серию экспериментов в целях установления закономерности и характера износа режущих лезвий зубообрабатывающего инструмента, а также критерия износа и его допустимой величины в зависимости от точности обрабатываемых колес.

Основываясь на экспериментальных данных (было проведено около 70 тыс. замеров долбяков) был сделан следующий вывод.

При износе долбяка свыше 0,3 мм по вершинам задних поверхностей зуба долбяка точность зубчатых колес с модулями 0,75 ... 2 мм становится ниже 8-й степени точности (ГОСТ 1643-56). Данные значения критического износа можно использовать как ограничивающие факторы при разработке методики управления процессом обработки прямозубых конических колес.

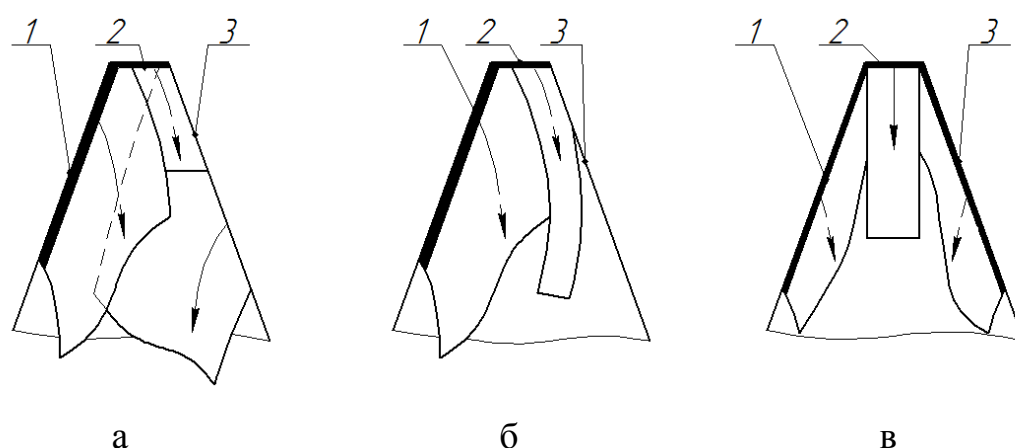
Матюшин В.М. в работах [41, 42] отмечает повышенный износ выходного лезвия инструмента и объясняет это малой толщиной отделяемого слоя металла. В работах В.М. Матюшина рекомендуется закруглять вершины зуба долбяка на максимально допустимую величину. Закругления радиусом в 0,5 мм повышает стойкость инструмента на 30%.

Евдокимова В.А. в работе [51] установил, что у инструментов работающих с приведенной конструктивной подачей – ступенчатых долбяков, больше всего изнашивается входное режущее лезвие черновой ступени – наиболее нагруженное. Кроме того, автор отмечает, что с увеличением круговой подачи

величина износа выходного режущего лезвия чистовой ступени остается неизменной, а у черновой ступени – несколько увеличивается. Необходимо отметить, что у ступенчатых долбяков исследовался лишь один из возможных вариантов дифференцирования срезаемого слоя.

Харламова Г.А. в работе [87] установила закономерность уменьшения износа задней поверхности режущего лезвия зуборезного инструмента при увеличении числа проходов с одновременным пропорциональным увеличением круговой подачи. Однако определению причин возникновения и величины локального выкрашивания участка выходной кромки, внимание не уделялось.

В работе [2] автор предположил, что при зубообработке по классической схеме наиболее распространен тип U-образного схода стружки (рисунок 1.18, а), при котором входная 1 и вершинная 2 режущие кромки срезают более широкие стружки, чем выходная режущая кромка 3.



**Рисунок 1.18 – Схема схода стружек при зубострогании**

Анализируя наиболее распространенный сход стружки [2] автор объяснил возникновение локального износа на выходной режущей кромке инструмента выдавливанием тонких стружек, срезаемых выходной режущей кромкой зуба, широкими стружками в зазор между боковой стороной инструмента и обрабатываемой поверхностью, где они истираются на участке стыка вершинной и выходной режущих кромок. В результате образуется лунка локального износа по передней поверхности. Данное явление представляет собой специфический

парадокс процесса обработки по методу обката, так как оно возникает на участке, срезающем минимальные по толщине стружки.

Для уменьшения скорости возникновения локального износа на выходной режущей кромке [2] автор предложил ряд технологических приемов:

первый прием заключается в изменении направления движения обката перед обработкой очередной детали. В этом случае локальный износ образуется симметрично на входной и выходной режущих кромках. Однако интенсивность его развития замедляется примерно в 2 раза;

второй способ заключается в такой модификацией схемы резания, которая обеспечивает срезание вместо U-образной более простой L-образной стружки (рисунок 1.18, б). В этом случае L-образная стружка сходит беспрепятственно и не вызывает больших деформаций на границе между этими кромками;

третий способ – создание условий резания, при которых толщина стружки, срезаемой входной и выходной режущими кромками, будет одинакова (рисунок 1.18, в). В этом случае стружки, имеющие одинаковую толщину, вызывают равную взаимную деформацию и сходят в стыке между вершинной и боковыми режущими кромками в одинаковых условиях. Вследствие взаимной деформации передняя поверхность режущего инструмента подвергается равномерной силовой и тепловой нагрузке. Образование зоны локализованного износа сдвигается во времени и происходит ее перераспределение на обе боковые режущие кромки.

Рассмотренные возможности замедления развития локального износа и, следовательно, соответствующего повышения периода размерной стойкости зубообрабатывающего инструмента требуют существенного изменения классической схемы резания. Это обстоятельство в настоящее время определяет одно из основных направлений поиска в области обкатного зубонарезания.

## **1.6 Влияние силы резания на точность обрабатываемых колес**

Под влиянием силы, возникающей в процессе обработки зубчатого колеса, возникают упругие деформации технологической системы, что приводит к

появлению погрешности в точностных параметрах обрабатываемых изделий. Вопрос о влиянии оказываемой силой резания на точность обработки зубчатых колес был рассмотрен К.С. Колевым [30].

Прямозубые конические колеса выпускаются машиностроительными предприятиями меньшими партиями, чем цилиндрические это связано со спецификой применения данных изделий. Поэтому в литературе зачастую рассматриваются процессы обработки цилиндрических колес, так и в работе [30] были рассмотрены деформации технологической системы при зубодолблении. Однако основные принципы зубонарезания двумя зубострогальными резцами и зубодолбления схожи и основываясь на данных известных о возникающих в процессе работы деформациях технологической системы при зубодолблении можно сделать вывод об аналогичных процессах, происходящих при зубострогании.

В работе [30] говорится о том, что из-за разной жесткости штосселя в момент начала вреза инструмента (точка А) и при выходе инструмента из зоны резания (точка В) (рисунок 1.19) происходит отжатие долбяка на  $\Delta h_1$  (в точке А) и  $\Delta h_2$  (в точке В) и поворот оправки на угол  $\alpha_1$ .

Некоторое искажение размеров и формы зуба может произойти из-за отклонения штосселя на угол  $\alpha_2$ . Суммарная погрешность на одном резе долбяка составляет:

$$\Delta h_{\text{сум}} = P_y \left( \frac{1}{j_B} - \frac{1}{j_A} + \frac{l_2^3 - l_1^3}{3EJ} \right) + \frac{bP_z}{rj_3}, \quad (1.10)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – расстояния от точек А и В заготовки до опоры штосселя.

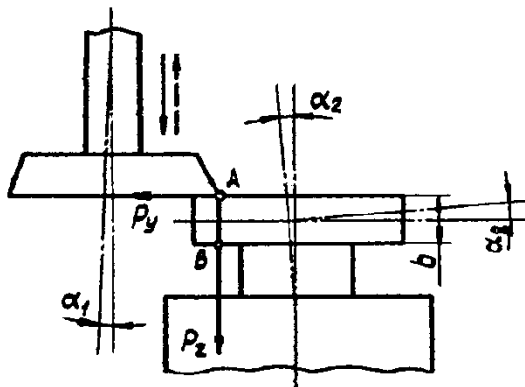
Используя известную зависимость:

$$P_z = \frac{0,474m^2 S_{кр} P}{z_1^{0,1}}$$

и принимая  $\frac{P_y}{P_z} = k$ , автор [30] предложил формулу для определения круговой

подачи с учетом заданной погрешности  $\Delta h_{\text{сум}}$ :

$$S_{кр} = \frac{\Delta h_{сум} z_1^{0,1}}{0,475m^2 \left[ k \left( \frac{1}{J_B} - \frac{1}{J_A} + \frac{l_2^3 - l_1^3}{3EJ} \right) + \frac{bP_z}{rj_3} \right]} \quad (1.11)$$



**Рисунок 1.19 – Схема деформаций технологической системы в процессе зубоблечения**

В работе [63] показана возможность расчета подачи в зависимости от требуемой точности обработки.

Однако, погрешность  $\Delta h_{сум}$ , являющаяся основой для расчета по формуле (1.11), нормативными документами на допуски зубчатых колес (ГОСТ 1643-81) не регламентируется. Кроме того зависимость для определения силы возникающей в процессе резания, не является точной. Эти факты не позволяют применять данный метод в практических расчетах.

Вопросы аналитического определения погрешностей обработки зубчатых колес и расчета режимов резания в соответствии с заданной точностью обрабатываемых деталей раскрыты в работах [3, 4].

В работе [3] изложены зависимости, позволяющие определить погрешность обработки правого и левого профиля нарезаемого зуба с учетом динамических деформаций технологической системы:

$$\Delta f_{пр} = (y_{0см1} \cdot \mu_1 + y_{0см2} \cdot \mu_2) \cdot \sin \alpha_w + (x_{0см1} \cdot \mu_1 + x_{0см2} \cdot \mu_2) \cdot \cos \alpha_w;$$

$$\Delta f_{лев} = (y_{0см1} \cdot \mu_1 + y_{0см2} \cdot \mu_2) \cdot \sin \alpha_w - (x_{0см1} \cdot \mu_1 + x_{0см2} \cdot \mu_2) \cdot \cos \alpha_w;$$

где  $y_{0см1}$  – максимальная статическая деформация системы детали по оси  $OY$ ;

$y_{0cm2}$  – максимальная статическая деформации системы инструмента по оси  $OY$ ;

$x_{0cm1}$  – максимальная статическая деформация системы детали по оси  $OX$ ;

$x_{0cm2}$  – максимальная статическая деформация системы инструмента по оси  $OX$ ;

$\mu_1$  – коэффициент динамичности для системы детали;

$\mu_2$  – коэффициент динамичности для системы инструмента.

Методики, приведенные в работах [3, 4, 30] не учитывают, что при повороте обрабатываемого колеса осевые составляющие силы резания значительно изменяются. Об этом говорится в работе [32].

В работе [32] проведено исследование жесткости зубодолбежного станка и точности зубчатых колес, обрабатываемых долбяками. Установлено, что на точность профиля изготавливаемых колес большое влияние оказывает жесткость конечных звеньев станка (стол – штоссель). Малая жесткость в направлении кратчайшего межосевого расстояния и амплитуда изменения силы, возникающая в процессе обработки, приводят к значительным погрешностям профиля зуба обрабатываемого колеса. Кроме того, из-за возникновения опрокидывающего момента от действия вертикальной и радиальной осевых составляющих силы резания происходят не только прогибы детали и штосселя, но и опрокидывание штосселя, суппорта и стола, вследствие чего появляются погрешности в направлении зуба обрабатываемого колеса. Данный вопрос более глубоко исследован в работе [30].

По мнению В.Г. Колесникова, в случае возникновения при нарезании зубчатого колеса погрешности профиля зуба и больших колебаний измерительного межосевого расстояния на одном зубе, наиболее действенным способом их снижения является уменьшение окружной подачи или увеличение числа проходов. Другие пути, по мнению автора работы, не могут обеспечить значительное снижение  $f_{ir}$  и  $f_{ir}''$ . Однако, уменьшение окружной подачи или



увеличение числа проходов приводят к увеличению основного времени обработки колеса, а значит к снижению производительности процесса.

Авторы работ [3, 4, 30, 32] рассматривают влияние только вертикальной и радиальной составляющих силы резания на точность нарезаемых колес. Однако на обрабатываемую деталь в процессе резания действует в неблагоприятном направлении окружная составляющая силы резания. Направление обрабатываемого зуба колеса отклоняется от номинального на угол поворота заготовки под действием этой силы. Периодическое изменение окружной составляющей силы резания оказывает влияние на погрешность профиля зуба колеса, особенно при чистовых проходах.

### 1.7 Выводы по первой главе

1. Установлено, что применение прямозубых конических передач имеет ряд весомых преимуществ:

- сниженные осевые нагрузки;
- постоянная по направлению осевая сила, возникающая в процессе работы зубчатой пары;
- простота монтажа.

2. Существует ряд способов производства прямозубых конических колес, однако на предприятиях, выпускающих мелкосерийную и серийную продукцию основным методом их изготовления является обработка резанием. Среди всех способов нарезания прямозубых конических колес особое распространение получили методы, основанные на процессе обката, а именно строгание двумя резцами с прямолинейными режущими кромками и фрезерование двумя спаренными дисковыми фрезами.

Основными достоинствами обработки прямозубых конических колес по методу обката являются:

- универсальность процесса и технологическая простота инструмента;
- достаточно высокая точность нарезания колес (IT 6).

– относительно высокая чистота поверхности (до Ra1,6).

К недостаткам процесса относятся:

- необходимость использование специального оборудования и инструмента;
- сравнительно невысокая производительность.

3. Процесс нарезания прямозубых конических колес по методу обката требует использования специального оборудования и инструмента, однако кинематика процесса принципиально не отличается от нарезания эвольвентных цилиндрических зубчатых колес, поэтому для изучения процесса обработки конических колес можно использовать методы и теории, применяемые для изучения других видов зубчатых передач.

4. Разработанные в настоящее время математические модели процесса обработки зубчатых колес методом обката учитывают лишь часть факторов, оказывающих влияние на процесс зубообработки, и могут в достаточной степени справедливо прогнозировать качество и точность поверхности зуба колеса только для конкретно заданных вариантов обработки и профиля обрабатываемого колеса. Универсальной теории управления процессом зубообработки не существует.

5. Применение специального зубообрабатывающего инструмента с приведенной конструктивной подачей в виде разности размеров зуба по ступеням дает возможность, сохраняя заданную для чистового режима толщину срезаемого слоя, значительно увеличить круговую и радиальную подачи.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПРЯМОЗУБЫХ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС

### 2.1 Математическое отображение схемы резания

В процессе обработки прямозубого конического колеса на зубострогальных станках методом обката основными движениями являются: возвратно-поступательное движение резцов (главное движение), вращение резцов вокруг оси воображаемого производящего колеса (люльки), вращение заготовки, согласованное с движением люльки. Зависимости, характеризующие перемещения режущих лезвий инструмента в процессе обработки целесообразно представить в параметрической форме.

При определении зависимостей были сделаны следующие допущения:

- заготовка неподвижна;
- обработка ведется по схеме плосковершинного производящего колеса (рисунок 2.1);
- начало координат расположено в вершине начального конуса колеса;
- начало координат совпадает с осью симметрии одной из впадин колеса;
- все необходимые для формообразования движения совершает инструмент;
- обкат происходит по делительной окружности колеса без скольжения.

В процессе зубострогания двумя резцами в каждый отдельно взятый момент времени движение резания осуществляет только один инструмент, что позволяет рассматривать резцы независимо друг от друга.

В общем виде математическое отображение схемы резания для произвольно выбранного резца в декартовых координатах можно представить следующим образом [88 с. 26]:

$$\begin{aligned} X &= f(l, \Phi, \Delta h); \\ Y &= f(l, \Phi, \Delta h); \\ Z &= f(l, \Phi, \Delta h), \end{aligned} \tag{2.1}$$

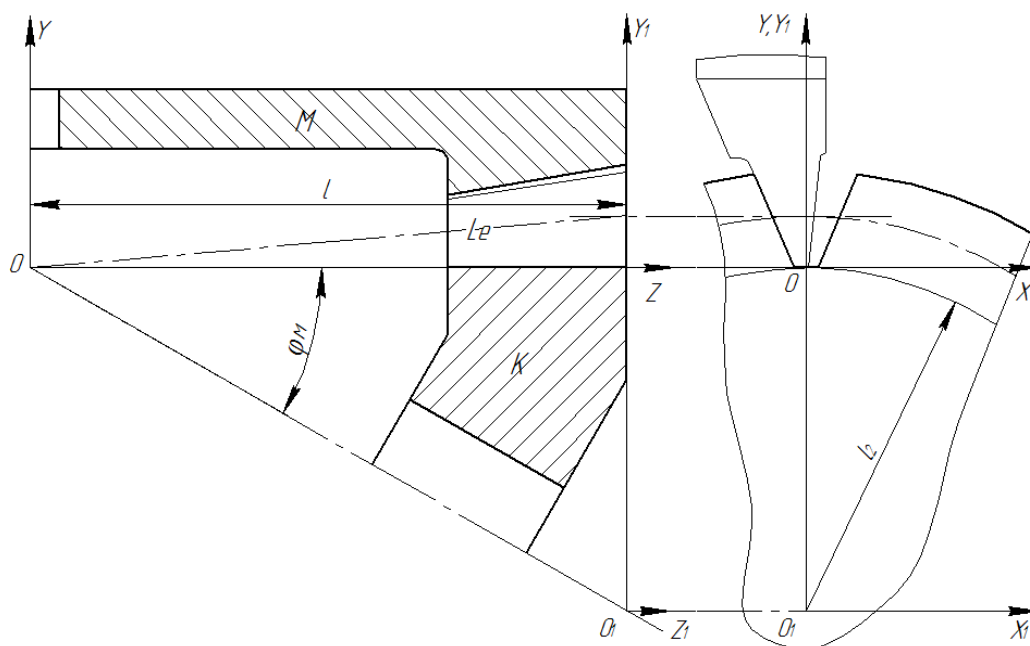
где  $X, Y, Z$  – координаты точки режущего лезвия резца в процессе резания;

$l$  – параметр движения резания;

$\Phi$  – угол поворота резца;

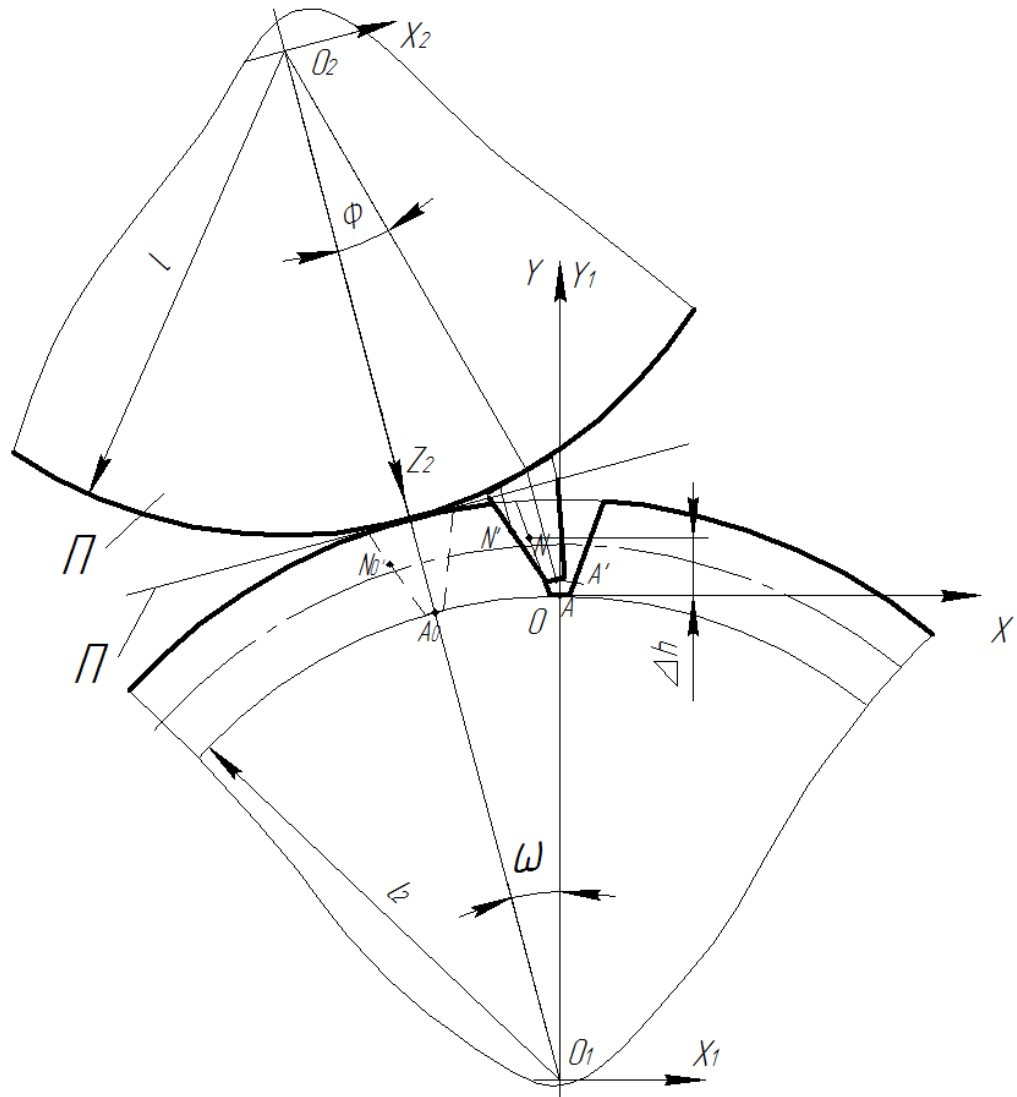
$\Delta h$  – параметр режущего лезвия.

Схема процесса резания, характеризующегося величинами  $l$  и  $\Phi$  в произвольный момент времени, представлена на рисунках 2.1,2.2. Плоскость резания вращается вместе с плоскостью обкатного колеса (П) по окружности с центром в точке  $O_2$  радиусом  $l$ . Кроме того плоскость резания вращается по окружности с центром  $O_1$  радиусом  $l_2$  на угол  $\Phi$ .



**Рисунок 2.1 – Нарезание по схеме плосковершинного производящего колеса одним универсальным зубострогальным резцом: К – Нарезаемое зубчатое колесо; М – Производящее колесо (люлька);  $l_e$  – наружная длина образующей начального конуса;  $\phi_m$  – угол внутреннего конуса**

Рассмотрим произвольный  $i$ -ый рез и определим для него координаты профиля зуба в пространстве. Пусть в реальном процессе обработки плоскость резца переместится из положения 1 в положение 2. При этом люлька повернется на угол  $\Phi$ .



**Рисунок 2.2 – Схема расчета математического отображения процесса зубострогания универсальным резцом**

Для вывода математического отображения воспользуемся следующими системами координат:

$X_2, Y_2, Z_2$  – подвижная система координат (зависит от  $l$ ) характеризующая обрабатываемое колесо;

$X_1, Y_1, Z_1$  – подвижная система координат, характеризующая обкатную люльку;

$X, Y, Z$  – неподвижная система координат.

Перемещение центра вершины резца, точки а:

$$\begin{aligned} X &= -l_2 \sin \omega + l \sin \Phi \cos \omega; \\ Y &= l_2 \cos \omega + l \sin \Phi \sin \omega - l_2; \\ X &= l \cos \Phi. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Профиль режущего инструмента в плоскости  $X_1 Y_1$ :

$$\begin{aligned} X_1 &= \pm(0,2m + \Delta h \operatorname{tg} \alpha'); \\ Y_1 &= \Delta h, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $m$  – модуль;

$\alpha'$  – профильный угол резца, в сечении перпендикулярном направлению движения;

$\pm$  – входная или выходная кромка.

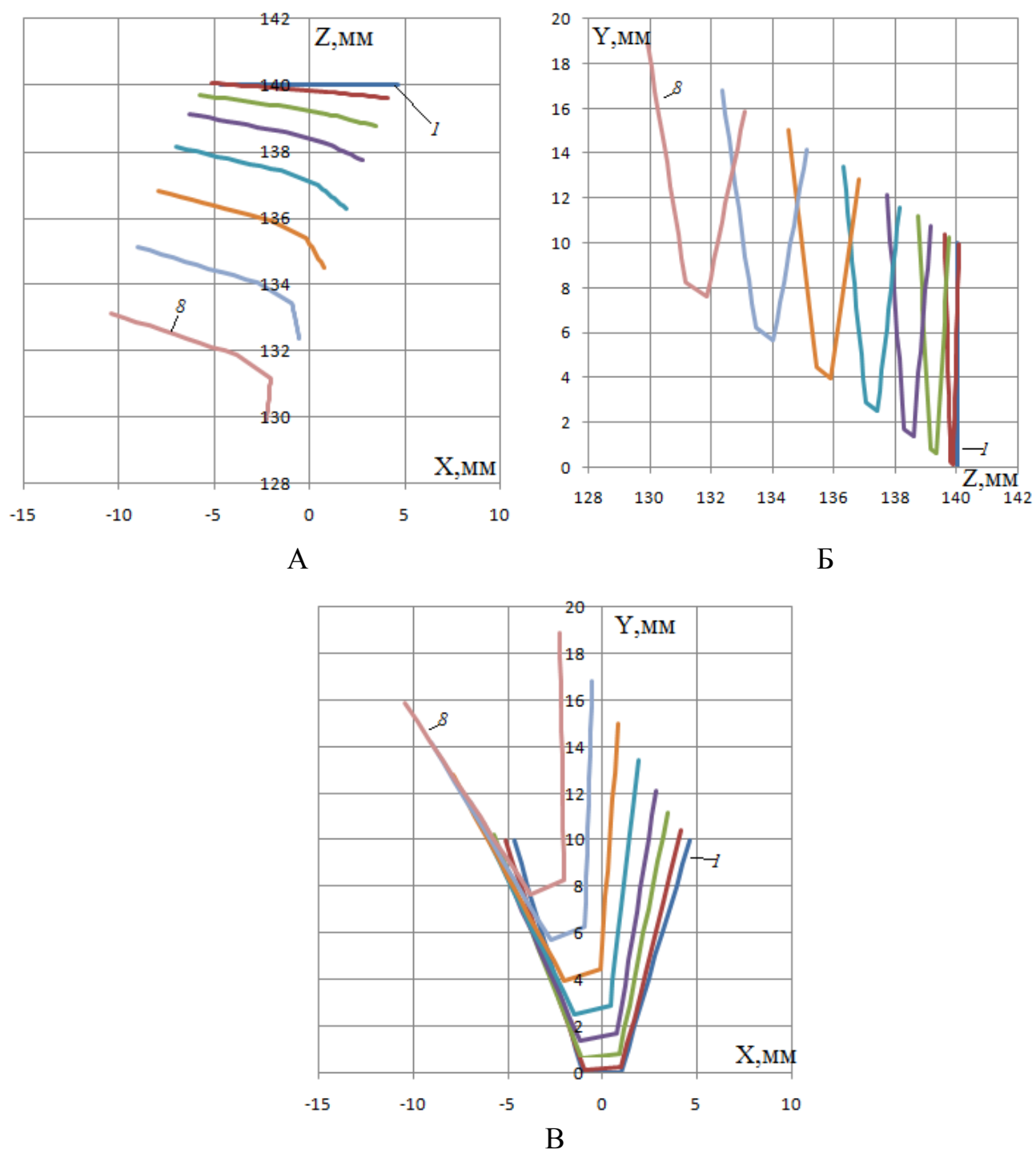
Из рисунка 2.1 определяем следующие зависимости:

$$\begin{aligned} l_2 &= l \operatorname{tg} \varphi_M; \\ \omega &= \Phi / \operatorname{tg} \varphi_M. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Подставляя выражения (2.3) и (2.4) в систему (2.2), получим:

$$\begin{aligned} X &= -\sin \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} (l \operatorname{tg} \varphi_M + \Delta h) + \cos \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} [l \sin \Phi \pm (0,2m + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \cos \Phi]; \\ Y &= \cos \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} (l \operatorname{tg} \varphi_M + \Delta h) + \sin \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} [l \sin \Phi \pm (0,2m + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \cos \Phi] - l \operatorname{tg} \varphi_M; \\ Z &= l \cos \Phi \mp (0,2m + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \sin \Phi. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Уравнение (2.5) позволяет описать профиль режущих кромок зубострогального резца в требуемый момент обработки. Данная зависимость может служить основой для прогнозирования результатов процесса обработки и выработки рекомендаций по возможным воздействиям на его ход.



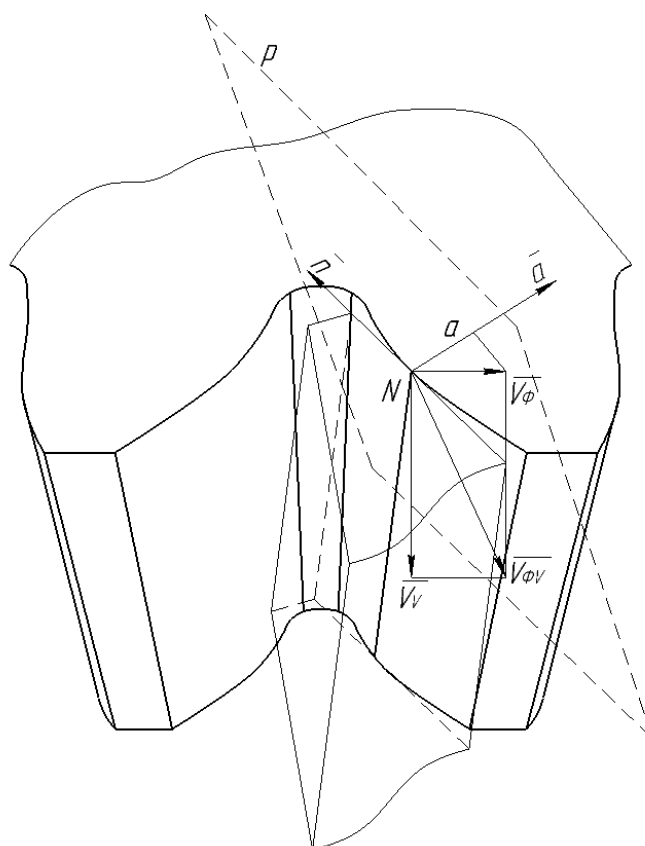
**Рисунок 2.3 – Расчетное положение режущих кромок зубострогального резца в процессе обработки прямозубого конического колеса ( $m_s=5$  мм,  $\varphi=45^\circ$ ,  $z=40$ )**

*A – в плоскости XZ; Б – в плоскости ZY; В – в плоскости XY.*

## 2.2. Определение кинематических параметров зубострогания с

### помощью математического отображения схемы резания

Предложенное пространственное математическое отображение схемы резания (2.5) позволяет провести расчеты параметров процесса обработки на основе использования векторного анализа (рисунок 2.4) с привлечением численных методов.



**Рисунок 2.4 – Схема определения толщины слоя, срезанного при обработке зубострогальным резцом**

Кинематическое изменение заднего угла в направлении наибольшего перемещения по подаче можно определить по формуле:

$$\Delta\alpha = \arctg \frac{\sqrt{X_{\phi}^2 + Y_{\phi}^2 + Z_{\phi}^2}}{\sqrt{X_V^2 + Y_V^2 + Z_V^2}} \quad (2.6)$$



Вектор скорости в направлении подачи:

$$\begin{aligned} \vec{V}_\Phi &= \left\{ \frac{\partial x}{\partial \Phi} \frac{d\Phi}{dt} V_X; \frac{\partial y}{\partial \Phi} \frac{d\Phi}{dt} V_Y; \frac{\partial z}{\partial \Phi} \frac{d\Phi}{dt} V_Z \right\} = \{X_\Phi; Y_\Phi; Z_\Phi\} = \\ &= \left\{ \left[ \cos \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \left( -l - \frac{\Delta h}{\operatorname{tg} \varphi_M} + l \cos \Phi + (0,2m + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \sin \Phi \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sin \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \left( -l \frac{\sin \Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} + (0,2m + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \frac{\cos \Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \right) \right] V_\Phi; \right. \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} &\left[ \sin \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \left( -l - \frac{\Delta h}{\operatorname{tg} \varphi_M} + l \cos \Phi + (0,2m + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \sin \Phi \right) + \right. \\ &\quad \left. + \cos \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \left( l \frac{\sin \Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} - (0,2m + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \frac{\cos \Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \right) \right] V_\Phi; \\ &\quad \left. [-l \sin \Phi + (0,2m + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \cos \Phi] V_\Phi \right\} \end{aligned}$$

Вектор движения резания:

$$\begin{aligned} \vec{V}_V &= \left\{ \frac{\partial x}{\partial l} \frac{dl}{dt} V_X; \frac{\partial y}{\partial l} \frac{dl}{dt} V_Y; \frac{\partial z}{\partial l} \frac{dl}{dt} V_Z \right\} = \{X_V; Y_V; Z_V\} = \\ &= \left\{ \left[ -\sin \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \operatorname{tg} \varphi_M + \cos \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \sin \Phi \right] V_V; \right. \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\left. \left[ \cos \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \operatorname{tg} \varphi_M + \sin \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \sin \Phi - \operatorname{tg} \varphi_M \right] V_V; [\cos \Phi] V_V \right\}.$$

где  $t$  – время.

Для вычисления толщины срезаемого слоя необходимо получить уравнение плоскости  $p$ , касательной к поверхности резания в точке  $N$ . Эта плоскость определяется тремя векторами:

1) Суммарным вектором:

$$\vec{V}_{\Phi V} = \{X_{\Phi V}; Y_{\Phi V}; Z_{\Phi V}\} = \{(X_\Phi + X_V); (Y_\Phi + Y_V); (Z_\Phi + Z_V)\}. \quad (2.9)$$

2) Вектором  $\vec{n}$

$$\begin{aligned} \vec{n} &= \{X_n; Y_n; Z_n\} = \\ &= \left\{ \left( -\sin \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} - \cos \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \cos \Phi \operatorname{tg} \alpha' \right); \right. \\ &\left. \left( \cos \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} - \sin \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} \cos \Phi \operatorname{tg} \alpha' \right); (\operatorname{tg} \alpha' \sin \Phi) \right\}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

3) Вектором  $\vec{z}$

$$\vec{z} = \{X_z; Y_z; Z_z\} = \{(X - X_n); (Y - Y_n); (Z + Z_n)\}. \quad (2.11)$$

Составляя определитель из этих трех векторов и раскрывая его, получаем уравнение плоскости  $p$ :

$$(Y_{\varphi V} Z_n - Z_{\varphi V} Y_n) X_z + (Z_{\varphi V} X_n - X_{\varphi V} Z_n) Y_z + (X_{\varphi V} Y_n - Y_{\varphi V} X_n) Z_z = 0. \quad (2.12)$$

Вектор  $\vec{a}$ , в направлении которого изменяется толщина срезаемого слоя, должен быть перпендикулярен к плоскости  $p$  в точке  $N$ :

$$\vec{a} = \{X_a; Y_a; Z_a\} = \{(Y_{\varphi V} Z_n - Z_{\varphi V} Y_n); (Z_{\varphi V} X_n - X_{\varphi V} Z_n); (X_{\varphi V} Y_n - Y_{\varphi V} X_n)\}. \quad (2.13)$$

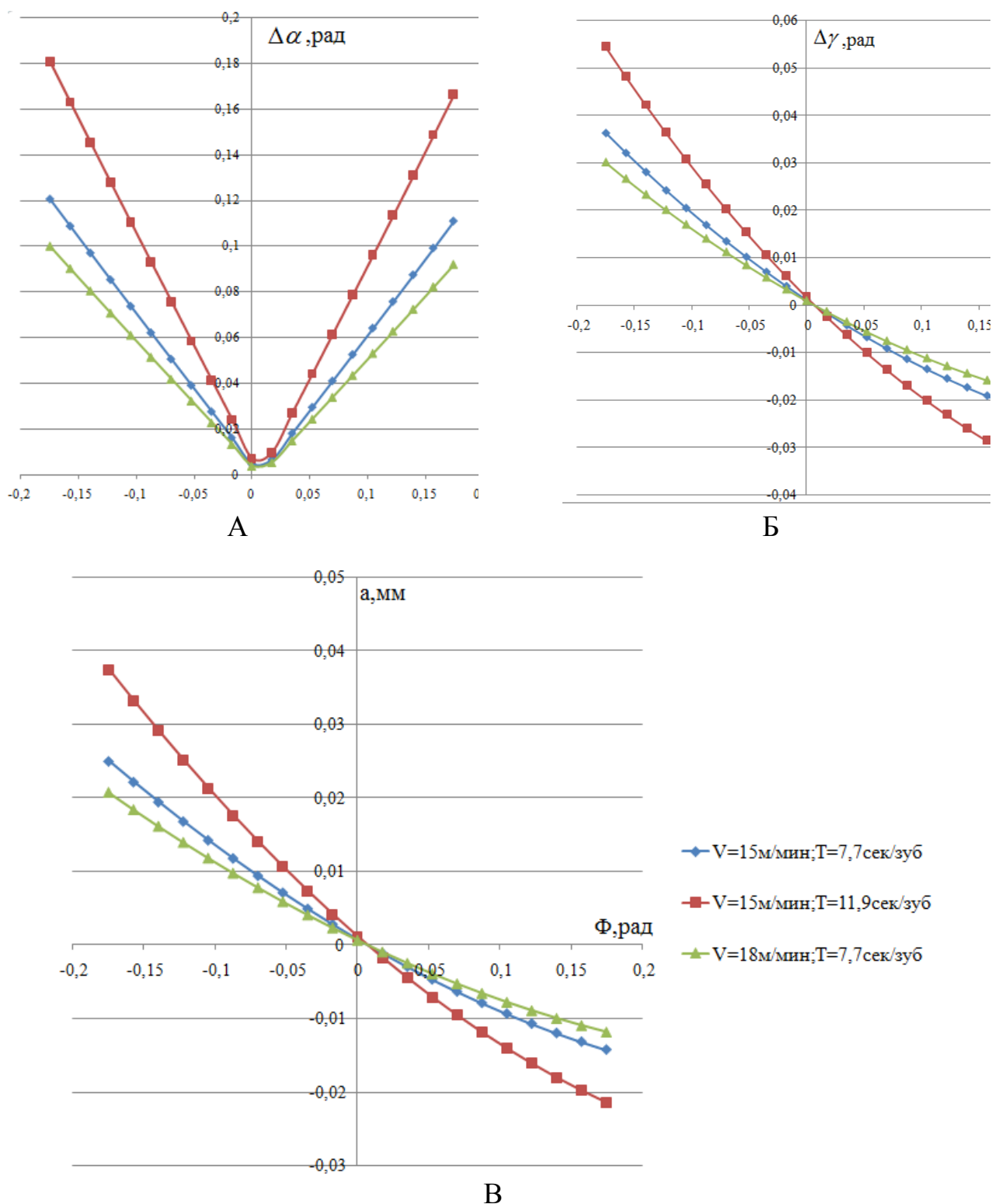
Спроектировав на направление вектора  $\vec{a}$  вектор  $\vec{V}_\varphi$ , получим толщину срезаемого слоя:

$$a = \frac{X_a X_\varphi + Y_a Y_\varphi + Z_a Z_\varphi}{\sqrt{X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2}} \quad (2.14)$$

Кинематическое изменение переднего угла определяется по формуле:

$$\Delta \gamma = \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{X_v^2 + Y_v^2 + Z_v^2}} \quad (2.15)$$

На рисунке 2.5 представлены графики аналитического расчета кинематического изменения параметров резания вершины профилирующего лезвия зубострогального резца при обработке прямозубого конического колеса  $m_s=2\text{мм}$ ,  $\varphi=45^\circ$ ,  $z=40$ .



**Рисунок 2.5 – Изменение кинематических параметров процесса резания**

**А – График кинематического изменения заднего угла**

**Б – График кинематического изменения переднего угла**

**В – График кинематического изменения толщины срезаемой стружки**

### 2.3. Определение динамических характеристик процесса зубострогания

Оптимизация производственных возможностей зубострогальных станков по качеству и производительности обрабатываемых колес связана с определением максимальной амплитуды силы резания и ее изменения в процессе обработки.

Для универсального расчета сил, возникающих при зубострогании, была использована методика, представленная в работе [54 с. 69-71].

Удельные составляющие силы резания  $\Delta P_Z$  и  $\Delta P_Y$  в диапазоне толщин срезаемого слоя металла от 0,01 до 0,5 мм, передних углов от -0,0175 рад до 0,0349 рад и задних углов от 0,00873 рад до 0,0524 рад:

$$\Delta P_Z = (1,7 \cdot 10^2 \cdot a^{0,9} + 4,3 - 9(\gamma + \Delta\gamma))(\alpha - \Delta\alpha)^{-0,07} 9,8 K_{Pz}; \quad (2.16)$$

$$\Delta P_Y = (0,44 \cdot 10^2 \cdot a^{0,95} + 1,4 - 3,4(\gamma + \Delta\gamma))(\alpha - \Delta\alpha)^{-0,2} 9,8 K_{Py}, \quad (2.17)$$

где  $a$  – толщина срезаемого слоя;

$\gamma$  – передний угол инструмента;

$\Delta\gamma$  – кинематическое изменение переднего угла;

$\alpha$  – задний угол инструмента;

$\Delta\alpha$  – кинематическое изменение заднего угла;

$K_{Pz}$  и  $K_{Py}$  – обобщенные поправочные коэффициенты, равные произведению коэффициентов  $K_M$ ,  $K_{TCOC}$ ,  $K_h$  и  $K_V$ , учитывающих влияние следующих факторов:  $K_M$  – материала,  $K_{TCOC}$  – TCOC,  $K_h$  – износа инструмента,  $K_V$  – скорости резания.

При толщине срезаемого слоя до 0,01мм:

$$\Delta P_Z = (57 + 2210a) K_{Pz}; \quad (2.18)$$

$$\Delta P_Y = (67,5 + 1480a) K_{Py}. \quad (2.19)$$

Суммируя удельные силы, возникающие на элементарных участках режущего лезвия, получим:

$$P_Z = \sum \Delta P_Z \Delta K_{cл}. \quad (2.20)$$

Значения составляющих силы резания, возникающих на боковых режущих кромках, определим по схеме представленной на рисунке 2.6:

$$P_y = \sum \Delta P_y \Delta l \sin(\alpha' \pm \Phi) K_{сл}; \quad (2.21)$$

$$P_x = \sum \Delta P_y \Delta l \cos(\alpha' \pm \Phi) K_{сл}, \quad (2.22)$$

и вершине режущего лезвия:

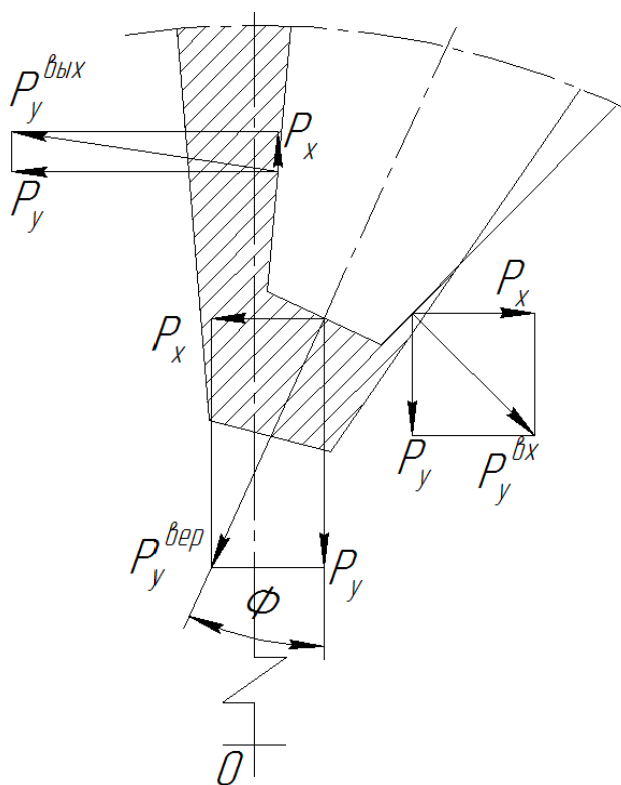
$$P_y = \sum \Delta P_y \Delta l \cos \Phi K_{сл}; \quad (2.23)$$

$$P_x = \sum \Delta P_y \Delta l \sin \Phi K_{сл}, \quad (2.24)$$

где  $\pm$  – входная или выходная кромка;

$\Delta l$  – элемент режущего лезвия;

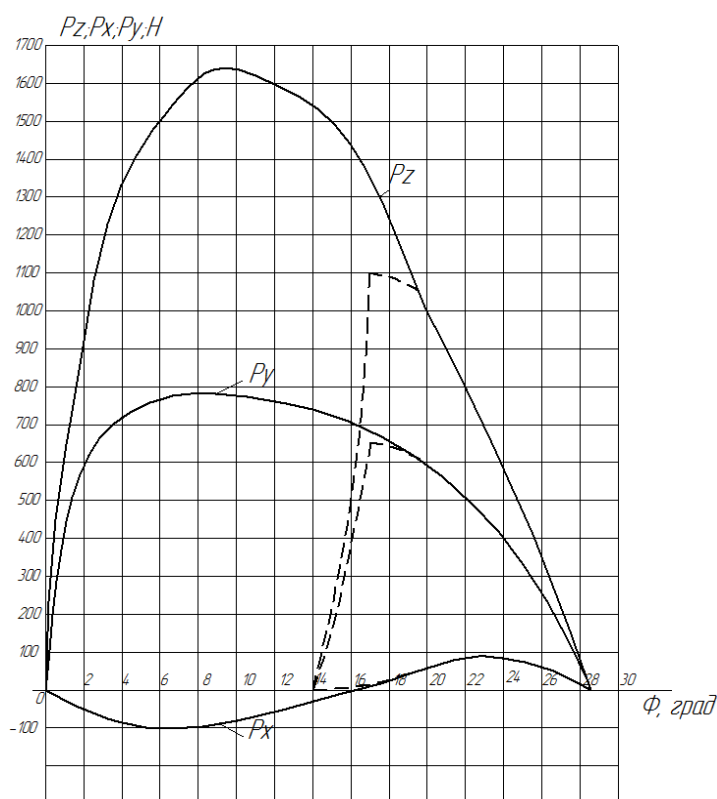
$K_{сл}$  – коэффициент, учитывающий сложность формирования стружки.



**Рисунок 2.6 – Определение составляющих силы резания при обработке зубострогальным резцом**

Основываясь на представленной методике, рассчитаем осевые составляющие силы резания в торцевом сечении, возникающие в процессе обработки венца конического зубчатого колеса:  $Z=40$ ,  $m=4$  мм,  $\varphi=45^\circ$  двумя

способами. Первый вариант обработки заключается в строгании зуба в цельной заготовке универсальным резцом. По второму варианту работа ведется чистовым зубострогальным резцом в заготовке с заранее прорезанными впадинами. Впадины прорезаны зубострогальным черновым резцом методом простого врезания. Режим резания в обоих случаях прием одинаковым:  $V=14$  м/мин;  $T=25$  с/зуб, рисунок 2.7.



**Рисунок 2.7 – Осевые составляющие силы резания**

На рисунке 2.7 основной линией показано изменение осевых составляющих силы резания при строгании универсальным резцом цельной заготовки и пунктирной линией – изменения составляющих силы резания при строгании заготовки с уже прорезанными впадинами. Из графика видно, что при строгании цельной заготовки максимальная амплитуда осевой составляющей силы резания увеличивается более чем на 50%. Кроме того, основная нагрузка приходится на переднюю кромку резца, в результате чего она быстро изнашивается. Полученные результаты говорят о том, что строгание колес среднего модуля в один проход без предварительной обработки нежелательно.

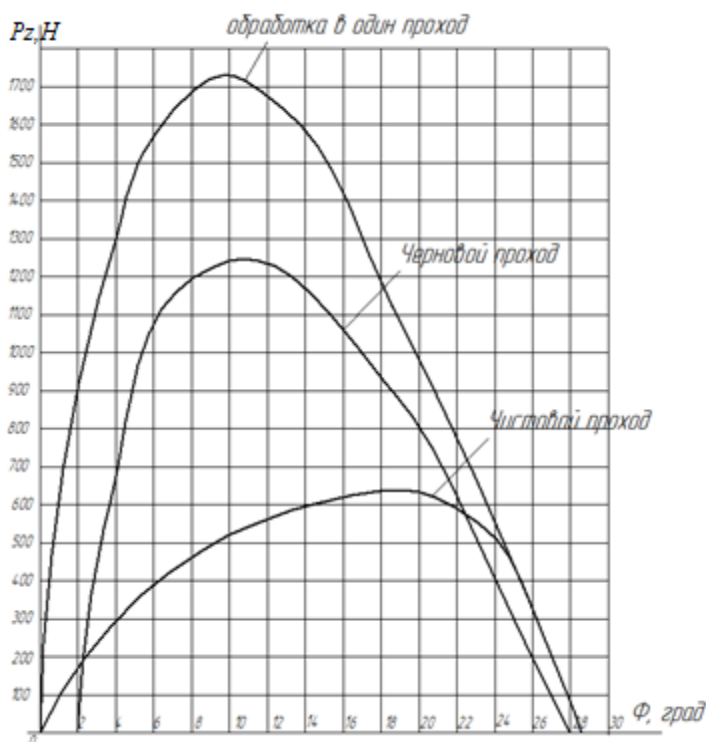
Так же следует отметить тот факт, что на этапе профилирования сила резания при обработке в один проход и при обработке уже прорезанных впадин одинакова. Соответственно качество получаемого профиля не будет меняться. Это происходит в результате того, что черной резец с прямолинейными режущими кромками оставляет неравномерный припуск на чистовую обработку.

Качество получаемой поверхности можно увеличить за счет изменения режима резания (увеличение времени обработки одного зуба) или при предварительном строгании впадин фасонными резцами, что позволяет обеспечить равномерный припуск. Первый способ связан с увеличением технологического времени обработки поверхности. Второй требует изготовление специального режущего инструмента со сложным фасонным профилем.

Рассчитаем осевые составляющие силы резания в торцевом сечении, возникающие в процессе обработки венца конического зубчатого колеса при зубострогании в два прохода. Сущность метода заключается в обработке заготовки универсальными резцами, подвигая инструментальную бабку или стол вперед после каждого прохода. Исходными данными для расчета являются следующие характеристики:  $Z=40$ ,  $m=4$  мм,  $\varphi = 45^\circ$ , припуск под чистовой проход 1 мм. Режим резания примем:  $V=14$  м/мин;  $T=25$  с/зуб, рисунок 2.8.

Наибольшее влияние на процесс обработки оказывает максимальная составляющая силы, возникающей в процессе резания, поэтому для увеличения наглядности на рисунке 2.8 представлено только изменение составляющей  $P_z$ .

Из рисунка 2.8 видно, что при обработке в несколько проходов существенно снижается максимальная амплитуда силы резания и уменьшается сила резания, возникающая на участке профилирования, что приводит к повышению качества получаемого изделия. Однако при использовании данного вида обработки существенно возрастает основное время.



**Рисунок 2.8 – Изменения осевой составляющей силы резания  $P_z$  при строгании в два прохода**

Таким образом, можно сделать вывод, что при разработке технологического маршрута обработки прямозубого конического колеса на зубострогальном станке приходится решать задачу нахождения компромисса между производительностью процесса и качеством получаемого изделия.

Из вышесказанного следует нежелательность применения способа строгания зубчатых колес среднего модуля на цельных заготовках универсальными резцами. Кроме того следует отметить тот факт, что точность профиля нарезаемого зубчатого колеса не зависит от того, была ли проведена предварительная обработка впадин или нет (за исключением случая когда черновое нарезание ведется фасонным инструментом).

При рассмотрении процесса зубострогания в несколько проходов было установлено, что, несмотря на то, что применение этого способа ведет к значительному увеличению времени обработки, в результате его использования значительно снижаются нагрузки на технологическую систему и повышается качество получаемой поверхности. Данный метод находит ещё более широкое



применение при обработке мелко модульных колес, когда черновое нарезание методом простого врезания невозможно, так как трудно с достаточной точностью ввести чистовые резцы в уже прорезанные впадины.

#### **2.4 Влияние угла наклона непрофилирующего лезвия зубострогального резца на силу резания**

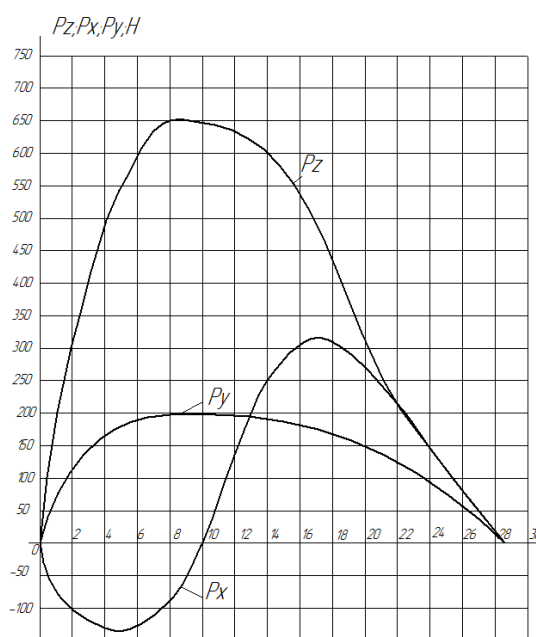
Обычно технологический процесс обработки зубьев прямозубого конического колеса включает в себя черновую и чистовую операцию. В начале зубья предварительно нарезаются черновыми резцами, затем профилируются чистовыми. Однако для мелко модульных колес предварительное нарезание становится невозможным, так как трудно с достаточной точностью ввести чистовые резцы в уже прорезанные впадины, вследствие чего обработка ведется универсальными резцами. При использовании универсальных резцов увеличивается площадь срезаемого слоя и, соответственно, сила, возникающая в процессе резания.

При зубострогании универсальными (трапециевидными) зубострогальными резцами, профилирующая кромка и носик резца обеспечивают требуемую геометрию прямозубого конического колеса. Непрофилирующая кромка, в свою очередь, обеспечивает необходимые углы резания. Угол наклона непрофилирующей кромки варьируется в пределах от  $8^\circ$  (для резцов ГОСТ 5392-90), до  $20^\circ$  (для универсальных резцов). Однако при минимальных углах наклона непрофилирующей кромки возможна ситуация, при которой резец потеряет работоспособность, а при максимальных – возрастает рабочая площадь инструмента, что приводит к увеличению силы, возникающей в процессе резания. Определим зависимость между силой резания и углом наклона непрофилирующей кромки зубострогального резца.

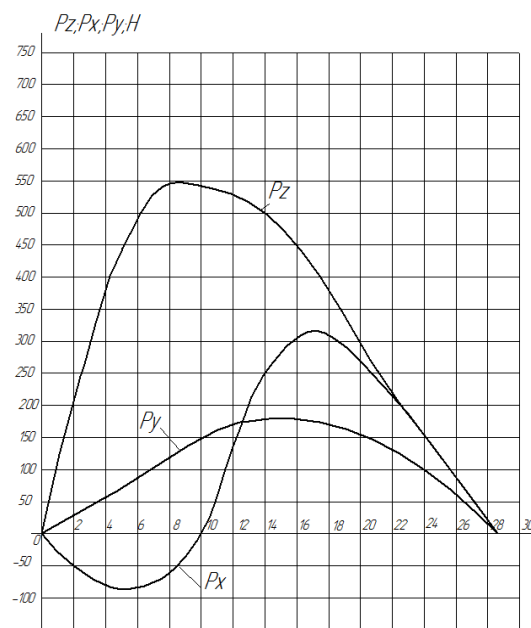
Для определения зависимости возникающей между осевыми составляющими силы резания и углом наклона непрофилирующей кромки зубострогального резца рассмотрим, в качестве примера, процесс обработки

зубчатого колеса  $m=2$  мм,  $Z=40$ ,  $\varphi=45^\circ$  без предварительной прорезки впадин универсальным зубострогальным резцом и специальным зубострогальным резцом на одинаковых режимах резания:  $n=350$  дв.ход/мин;  $T=12$  с. Угол наклона профилирующей кромки у зубострогальных резцов примем равным углу зацепления,  $\alpha_{ПУ} = \alpha_{ПС} = 20^\circ$ . Угол наклона непрофилирующей кромки:  $\alpha_{ТВ} = 20^\circ$ , для универсального резца и  $\alpha_{ТС} = 8^\circ$ , для специального.

На рисунках 2.9 и 2.10 представлены графики изменения осевых составляющих силы резания в торцевом сечении.



**Рисунок 2.9 – Осевые составляющие силы резания при строгании универсальным резцом**



**Рисунок 2.10 – Осевые составляющие силы резания при строгании специальным резцом**

Из графиков видно, что при значении угла непрофилирующей кромки в  $8^\circ$  максимальная осевая составляющая силы резания уменьшается на 15% по сравнению с силами, возникающими при строгании универсальным резцом. Стоит отметить, что данные изменения происходят на этапе врезания резца в заготовку. На участке профилирования значения осевых составляющих силы резания не меняются. Однако можно сделать вывод, что при уменьшении угла наклона непрофилирующей кромки зубострогального резца максимальное

значение осевой силы резания уменьшается и при проектировании специального инструмента следует стремиться к минимальному значению данного параметра.

Одним из необходимых условий сохранения работоспособности зубоострогальных резцов, работающих в цельных заготовках, является выполнение следующего неравенства:

$$\lambda_T + \Delta\lambda_T \leq [\lambda_T], \quad (2.25)$$

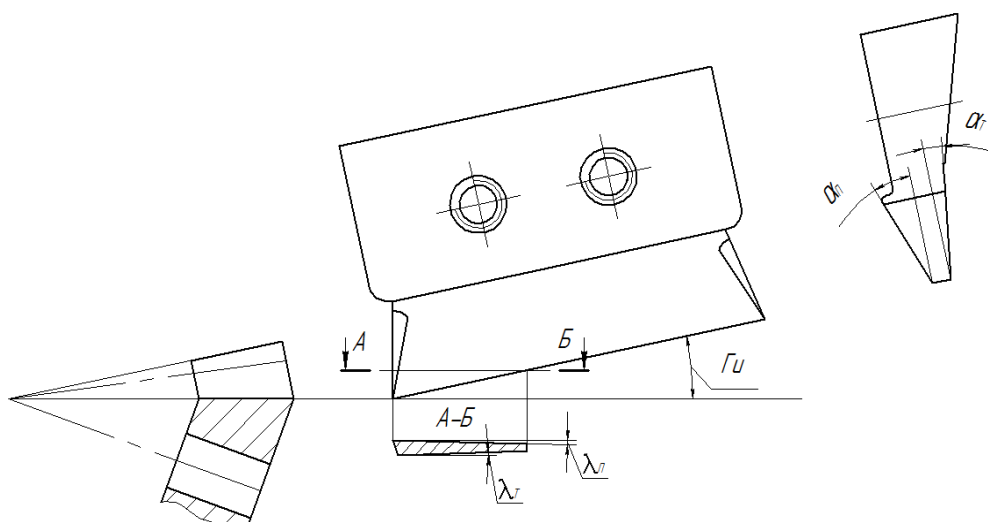
где  $\lambda_T$  – задний угол резания образующийся при работе непрофилирующей кромки резца;

$\Delta\lambda_T$  – кинематическое изменение заднего угла резания происходящее в процессе обработки;

$[\lambda_T]$  – минимальное допустимое значение заднего угла, для процесса зубоострогания (примем  $[\lambda_T] = 2^\circ$ ).

Зубоострогальные резцы не имеют угла задней заточки; задние углы при резании образуются в результате того, что резцедержатель наклонен к линии движения резца на угол  $\Gamma_u$ .

Рассмотрим процесс зубоострогания резцом с углом заточки непрофилирующей кромки  $8^\circ$  (рисунок 2.11).



**Рисунок 2.11 – Схема процесса зубоострогания**

Задние углы в плоскости АБ, параллельной направлению движения резца равны:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \lambda_{\Pi} &= \sin \alpha'_{\Pi} \operatorname{tg} \Gamma_u, \\ \operatorname{tg} \lambda_T &= \sin \alpha'_T \operatorname{tg} \Gamma_u, \end{aligned} \quad (2.26)$$

где  $\alpha'_{\Pi}, \alpha'_T$  – угол наклона профилирующей кромки и непрофилирующей кромки резца в сечении, перпендикулярном направлению движения соответственно;

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha'_{\Pi} &= \operatorname{tg} \alpha_{\Pi} \cos \Gamma_u, \\ \operatorname{tg} \alpha'_T &= \operatorname{tg} \alpha_T \cos \Gamma_u, \end{aligned} \quad (2.27)$$

$\alpha_{\Pi}, \alpha_T$  – угол наклона профилирующей кромки и непрофилирующей кромки резца соответственно;

Подставим выражение (2.26) в выражение (2.27) и выразим  $\lambda_T$ :

$$\operatorname{tg} \lambda_T = \sin(\alpha_T \cdot \operatorname{arctg} \cos \Gamma_u) \cdot \operatorname{tg} \Gamma_u. \quad (2.28)$$

Подставим числовые данные в выражение (2.28) и получим:

$$\lambda_T = 1,62^\circ < 2^\circ = [\lambda_T]. \quad (2.29)$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что резцы с углом наклона непрофилирующей кромки в  $8^\circ$  можно применять только в том случае, если впадины зубьев предварительно прорезаны. Они не могут нарезать зубья на цельных заготовках, так как тыловая кромка имеет слишком малый угол наклона.

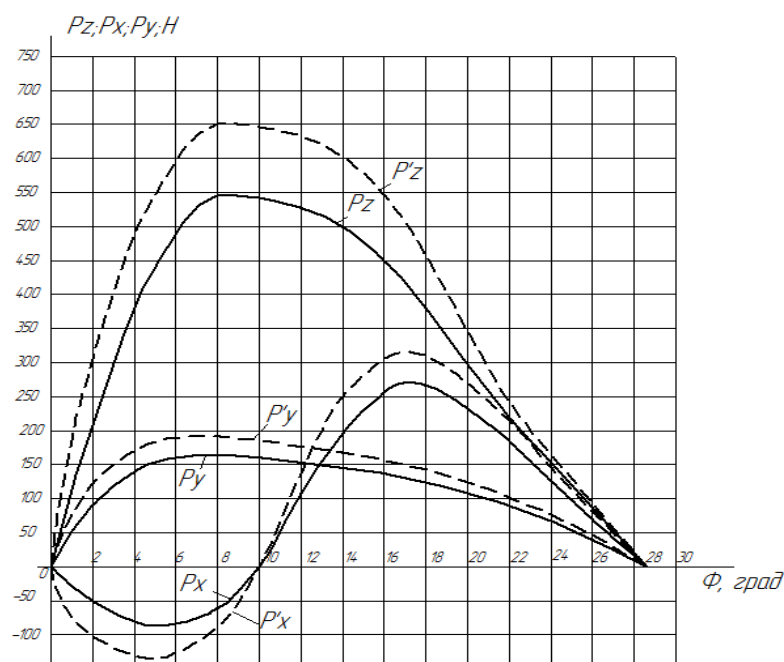
Определим оптимальный угол наклона непрофилирующей кромки зубострогального резца при следующем режиме резания:  $n=350$  дв.ход/мин;  $t_z=12$  с. При данном режиме резания максимальное кинематическое изменение заднего угла составит:  $\Delta \lambda_T = 0,1^\circ$ . Тогда, минимальное допустимое значение образующегося заднего угла по формуле (2.25), составит:  $\lambda_T = 2,1^\circ$ .

Выразив из выражений (2.26) и (2.27)  $\alpha_T$  получим:

$$\operatorname{tg} \alpha_T = \frac{\operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{\operatorname{tg} \lambda_T}{\operatorname{tg} \Gamma_u} \right)}{\cos \Gamma_u}. \quad (2.30)$$

Подставив числовые значения в выражение (2.30) получим:  $\alpha_T = 10,1^\circ$ .

Определим осевые составляющие силы резания при данном угле непрофилирующей кромки (рисунок 2.12).



**Рисунок 2.12 – Изменение осевых составляющих силы резания при зубострогании резцом с минимально допустимым углом наклона непрофилирующей кромки ( $P'_x$ ,  $P'_y$ ,  $P'_z$  – универсальными резцами;  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  – специальными резцами)**

Из анализа графика, представленного на рисунке 2.12 видно, что максимальная составляющая силы резания уменьшается на 12% по сравнению с обработкой универсальным резцом. Влияние угла наклона непрофилирующей режущей кромки на осевые составляющие силы резания в процессе зубострогания очевидно. При оптимизации угла наклона непрофилирующей кромки зубострогального резца, максимальная амплитуда силы, возникающей в процессе обработки, уменьшится более чем на 10%.

Таким образом, при проектировании специального инструмента следует стремиться к минимальному значению угла наклона непрофилирующего лезвия зубострогального резца, что позволит оптимизировать эксплуатационные возможности зубострогальных станков, увеличить стойкость инструмента, и в конечном итоге приведет к повышению производительности процесса.

## **2.5 Определение погрешностей изготовления прямозубых конических колес, вызванных деформацией технологической системы**

Основной задачей управления процессом нарезания зубьев является прогнозирование точности обрабатываемых колес, определяемого деформациями технологической системы и точностью нарезаемого зубчатого колеса в любой момент времени и в широком диапазоне чисел зубьев, модулей и конструктивных особенностей режущей части инструмента.

Влияние которое оказывают деформации технологической системы на формирование погрешностей обработки в процессе зубострогания прямозубых конических колес значительно. В данном случае деформации изменяются во времени вследствие чего погрешности сложно, а иногда невозможно компенсировать соответствующей наладкой технологической системы.

Основными видами погрешностей, влияющих на точность конического зубчатого колеса, являются: изменение радиального расстояния между инструментом и обрабатываемым колесом; нарушение обката; погрешности перемещения инструмента вдоль оси зуба обрабатываемого изделия; отклонения производящей поверхности зубообрабатывающего инструмента [80]. Перечисленные погрешности, за исключением последней, полностью или частично вызваны возмущающими воздействиями, возникающими в процессе резания: температурными, силовыми, инерционными, параметрическими, кинематическими.

Зачастую погрешности возникающие вследствие деформации технологической системы и ее элементов, являются доминирующими в общей суммарной погрешности обработки заготовки. В частности при прерывистом резании, когда основными видами возмущающих воздействий, определяющих динамические деформации, являются силовые возмущения от процесса врезания. При зубострогании, вследствие периодичности работы резцов, осила резания имеет вид периодически повторяющихся импульсов.

Стандарт, нормирующий точность конических зубчатых колес с прямыми зубьями в принципе не отличается от стандарта цилиндрических передач. Более того, при составлении стандарта было принято, что цилиндрические и конические колеса, изготовленные по одной степени точности, должны обеспечивать одинаковую точность в эксплуатации. Для этого по многим показателям точности (кинематическая погрешность колеса, накопленная погрешность окружного шага, биение зубчатого венца, погрешность обката, разность окружных шагов) нормы точности на конические колеса полностью совпадают с нормами на цилиндрические колеса соответствующих степеней. Это дает возможность аналитически рассчитать погрешности изготовления прямозубых конических колес по зависимостям, используемым для расчета цилиндрических колес.

По следующим формулам можно определить деформации технологической системы, которые вызывают погрешность радиуса кривизны огибающей образующей эвольвенту зуба  $\Delta\rho$ , радиуса делительной окружности  $\Delta r_1$ , смещение исходного контура  $\Delta h$  и погрешность толщины зуба по хорде  $\Delta S_X$ .

$$\Delta\rho = y \sin \alpha_0 \pm x \cos \alpha_0; \quad (2.31)$$

$$\Delta r_1 = y \mp x \operatorname{tg} \alpha_0; \quad (2.32)$$

$$\Delta h = y; \quad (2.33)$$

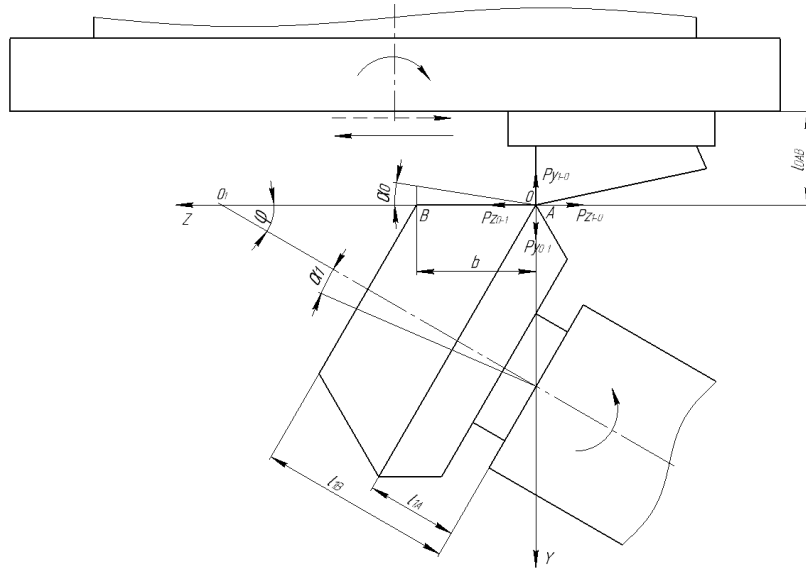
$$\Delta S_X = 2y \operatorname{tg} \alpha_0, \quad (2.34)$$

где  $\alpha_0$  – угол зацепления (верхний знак относится к правому, а нижний к левому профилям зуба);

$x, y$  – относительное смещение заготовки и инструмента по осям  $OX$  и  $OY$  соответственно.

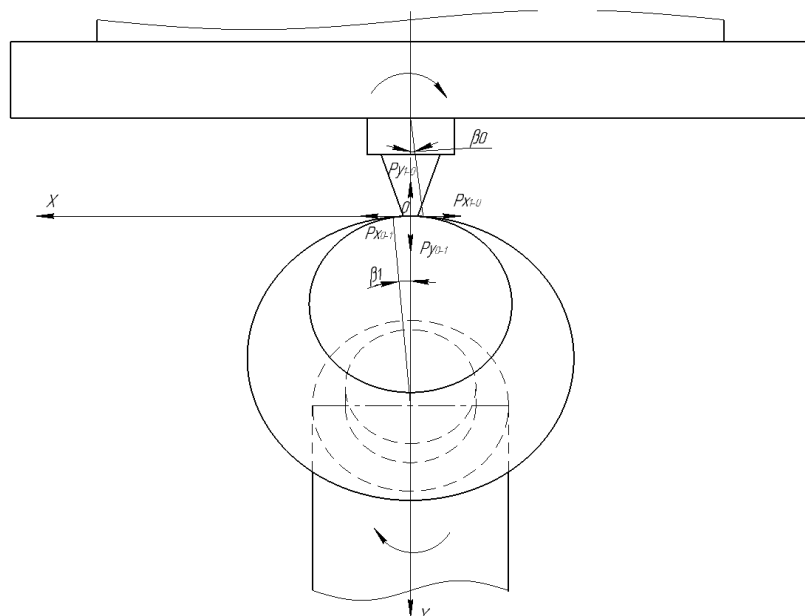
При возвратно-поступательном движении зубострогального резца из-за разной жесткости люльки и бабки происходит относительное отжатие резца и обрабатываемой заготовки соответственно на  $\Delta y_0$  и  $\Delta y_1$ , поворот оси движения резца на угол  $\alpha_0$  и поворот оси обрабатываемого колеса на угол  $\alpha_1$  (рисунок

2.13). С увеличением силы резания углы поворота увеличиваются, а, следовательно, и растут погрешности обработки.



**Рисунок 2.13 – Схема определения деформации технологической системы в плоскости OYZ**

Аналогично в плоскости OYX происходит отжим резца и обрабатываемого колеса соответственно на  $\Delta x_0$  и  $\Delta x_1$  и поворот оси движения резца на угол  $\beta_0$  и поворот оси обрабатываемого колеса на угол  $\beta_1$  (рис. 2.14).



**Рисунок 2.14 – Схема определения деформации технологической системы в плоскости OYX**



Суммарное относительное смещение заготовки и инструмента по оси  $OY$ :

$$y = -\Delta y_0 + \Delta y_1 \cos \varphi, \quad (2.35)$$

где  $\varphi$  – угол начального конуса;

$\Delta y_0, \Delta y_1 \cos \varphi$  – относительный отжим резца и колеса, спроецированный на ось  $OY$ ,

$$\Delta y_0 = \frac{P_{y_{1-0}}}{j_{д0}} + \frac{P_{y_{1-0}} l_0^3}{3EJ_0}; \quad (2.36)$$

$$\Delta y_1 = \frac{P_{z_{0-1}} \sin \varphi + P_{y_{0-1}} \cos \varphi}{j_{д1}} + \frac{(P_{z_{0-1}} \sin \varphi + P_{y_{0-1}} \cos \varphi) l_1^3}{3EJ_1}, \quad (2.37)$$

по оси  $OX$ :

$$X = -\Delta x_0 + \Delta x_1, \quad (2.38)$$

где  $\Delta x_0, \Delta x_1$  – относительный отжим резца и колеса, спроецированный на ось  $OX$ ,

$$\Delta x_0 = \frac{P_{x_{1-0}}}{j_{д0}} + \frac{P_{x_{1-0}} l_0^3}{3EJ_0}; \quad (2.39)$$

$$\Delta x_1 = \frac{P_{x_{0-1}}}{j_{д1}} + \frac{P_{x_{0-1}} l_1^3}{3EJ_1}, \quad (2.40)$$

где  $P_{y_{1-0}}, P_{z_{1-0}}, P_{x_{1-0}}$  – осевые составляющие силы резания, действующие на инструмент, равны по модулю и противоположны по направлению осевым составляющим силы резания, действующим на заготовку –  $P_{y_{0-1}}, P_{z_{0-1}}, P_{x_{0-1}}$ . С целью упрощения выражения примем следующую замену:  $P_y = P_{y_{0-1}} = -P_{y_{1-0}}; P_z = P_{z_{0-1}} = -P_{z_{1-0}}; P_x = P_{x_{0-1}} = -P_{x_{1-0}}$ .

$j_{д0}, j_{д1}$  – динамическая жесткость технологической системы, обеспечивающей крепление и необходимые кинематические перемещения резца и заготовки соответственно;

$E$  – модуль упругости;

$J_0, J_1$  – сосредоточенный момент инерции сечения державки резца и оправки колеса;

$l_0, l_1$  – расстояние от точки контакта до опоры резцедержателя и бабки станка.

Таким образом, общее смещение по оси  $OY$ :

$$y = Py \left( \frac{1}{j_{D0}} + \frac{\cos \varphi \cos \varphi}{j_{D1}} + \frac{1}{3E} \left[ \frac{l_0^3}{J_0} + \frac{\cos \varphi \cos \varphi l_1^3}{J_1} \right] \right) + Pz \sin \varphi \cos \varphi \left( \frac{1}{j_{D1}} + \frac{l_1^3}{3EJ_1} \right), \quad (2.41)$$

по оси  $OX$ :

$$x = Px \left( \frac{1}{j_{D0}} + \frac{1}{j_{D1}} + \frac{1}{3E} \left[ \frac{l_0^3}{J_0} + \frac{l_1^3}{J_1} \right] \right), \quad (2.42)$$

Стоит отметить, что суммарное относительное перемещение осей бабки и люльки станка являются следствием перемещений деталей и узлов станка, составляющих упругую систему. Прямая зависимость между деформацией технологической системы и возникающей нагрузкой имеет место в оборудовании после устранения всех зазоров и преодоления препятствующих этому сопротивлений, а также устранения циклической и кинематической погрешностей.

По высоте зуба в плоскости  $YZ$  из-за различной жесткости технологической системы в момент врезания (точка  $A$ ) и при выходе (точка  $B$ ), а также из-за изменения силы резания в процессе строгания возникает погрешность:

$$\Delta y_{AB} = y_A - y_B + y_{1\alpha}, \quad (2.43)$$

где  $y_A, y_B$  – смещение по оси  $OY$  в точке  $A$  и в точке  $B$  соответственно;

$y_{1\alpha}$  – перемещение заготовки на угол  $\alpha_1$  под влиянием силы  $Pz$ .

$$y_{1\alpha} = b \sin \alpha_1 = b \sin \frac{2Pz_B \sin \varphi}{D_B j_{заг}}; \quad (2.44)$$

где  $b$  – ширина зубчатого венца;

$D_B$  – диаметр делительной окружности в точке  $B$ ;

$j_{заг}$  – жесткость заготовки по оси  $Z$ .

Как видно из формул 2.41, 2.42, 2.43 суммарная погрешность не может быть постоянной величиной, так как осевые составляющие силы резания в любой момент времени обработки зубчатого венца различны.

Величина деформаций, возникающих в технологической системе прямо пропорциональна силе резания возникающей в процессе обработки, следовательно, одним из условий увеличения точности профиля зуба обрабатываемого колеса является уменьшение максимальной силы резания. Данную задачу можно решить как за счет изменения конструкции отдельных элементов технологической системы, так и за счет изменения режимов резания. Второй способ более прост в реализации и не требует дополнительных материальных затрат, однако ведет к увеличению времени обработки.

Таким образом, после проведения экспериментальных исследований, устанавливающих значения динамической жесткости технологической системы, пользуясь изложенной методикой, возможно рассчитать точностные параметры нарезаемого конического колеса в зависимости от используемых технологических режимов обработки и в зависимости от результатов определить оптимальные режимы для каждого конкретного случая.

## **2.6 Определение расчетных неровностей, возникающих в процессе зубострогания конических зубчатых колес**

Основными параметрами качества обработанной поверхности является шероховатость поверхности и состояние материала поверхностного слоя. В прямозубых конических колесах шероховатость профиля зубьев определяет контактную прочность и долговечность. Следовательно, определение требуемой шероховатости поверхности профиля зубчатого колеса является важной задачей, возникающей при проектировании прямозубой конической передачи.

Учение об инженерии поверхности позволяет определить зависимости, связывающие шероховатость с параметрами режима резания. И на их основе представляется возможным выявить технологические условия, необходимые для достижения требуемых параметров качества детали. На формирование профиля шероховатости при всех методах обработки оказывают влияние одни и те же факторы, в каждом конкретном случае различающиеся лишь интенсивностью

воздействия Данный подход является универсальным и может быть применен для различных методов обработки.

Формула для определения средней высоты профиля шероховатости для всех методов механической обработки [75 с. 56] имеет вид:

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4; \quad (2.45)$$

где  $h_1$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента;

$h_2$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности;

$h_3$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки;

$h_4$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента.

При изготовлении прямозубых конических колес на зубострогальных станках формирование профиля зубьев осуществляется за счет того, что режущие лезвия инструмента последовательно огибают профиль в различных по его высоте точках. Данный процесс реализован за счет кинематики станка.

Использование данной схемы обработки (кинематического огибания) ведет к тому, что профиль обрабатываемого зуба колеса образуется в форме ломаной линии, имеющей отклонения от теоретически верного профиля в виде гребешков огранки. Вид гребешка огранки зависит от формы профилирующей режущей кромки резца, которая обычно представляет собой прямую [24 с. 119]. Высота гребешка огранки ( $h_1$ ) влияет на погрешность формообразования профиля зубчатого колеса и является важной составляющей одного из параметров точности прямозубого конического колеса – погрешности профиля зуба. Таким образом, для решения задачи оптимизации процесса зубострогания необходимо определить влияние режимов резания на данный параметр шероховатости.

Известна зависимость [4 с. 96] для определения высоты гребешка огранки профиля зуба колеса:

$$h_1 = \rho_i \frac{\Delta\alpha^2}{8}, \quad (2.46)$$

где  $\rho_i$  – радиус кривизны зуба в середине формируемого участка профиля;

$\Delta\alpha$  – угол между соседними огибающими резами.

Радиус кривизны можно определить по формуле:

$$\rho_i = \sqrt{r_i^2 + r_b^2}, \quad (2.47)$$

где  $r_i$  – радиус эквивалентного зубчатого колеса в текущей точке профиля;

$r_b$  – радиус основной окружности.

Выразим  $\Delta\alpha$  через параметры технологической системы и геометрические характеристика конического колеса:

$$\Delta\alpha = \frac{\theta M}{2h}, \quad (2.48)$$

где  $\theta$  – угол поворота производящего колеса, необходимый для полной обработки профиля зуба нарезаемого колеса;

$M$  – ширина реза;

$h$  – высота зуба.

Подставляя выражения 2.47 и 2.48 в выражения 2.46 получим зависимость кинематической составляющей шероховатости от параметров обработки и геометрии колеса:

$$h_1 = \frac{1}{32} \sqrt{r_i^2 + r_b^2} \left( \frac{\theta M}{h} \right)^2, \quad (2.49)$$

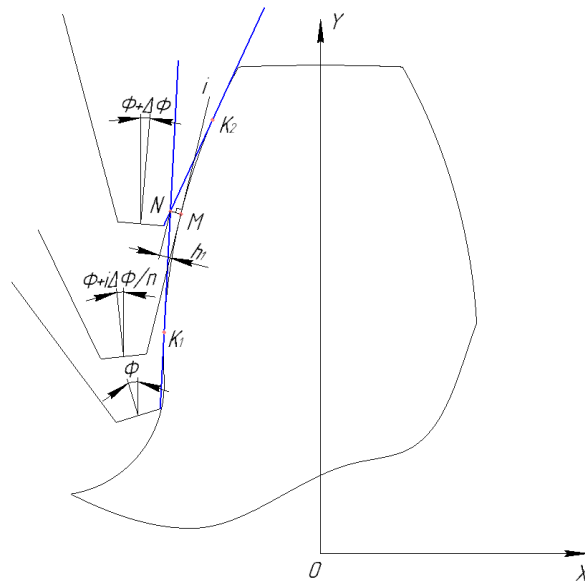
Эта зависимость является приближенной, так как при ее выводе принят ряд допущений, основанных на замене формируемого участка профиля зуба дугой окружности.

В случае необходимости более точного определения значения кинематической шероховатости, возникающей в процессе зубострогания, можно использовать ниже изложенную методику при следующих допущениях:

- материал заготовки абсолютно недеформируемый;
- технологическая система абсолютно жесткая;
- лезвия инструмента представляют собой прямые геометрические линии;
- высота гребешка равна расстоянию от вершины гребешка до линии профилирующей ближайшую к вершине точку теоретически верного профиля.

Для определения величины  $h_1$  воспользуемся математическим отображением кинематической схемы резания, позволяющей рассчитать координаты точек режущего профиля инструмента в любой момент резания.

Задача определения величины огранки решается на плоскости, поэтому в дальнейшем будем рассматривать процесс в системе координат  $OXY$ , а параметр движения резания считать постоянным. Расчетная схема приведена на рисунке 2.15.



**Рисунок 2.15 – Схема определения кинематической составляющей средней высоты шероховатости профиля**

Вершина гребешка огранки  $N$  является точкой пересечения двух последовательных резов, профилирующих точки  $K_1$  и  $K_2$  реального профиля. Для

получения уравнения прямых, профилирующих данные точки, воспользуемся системой (2.5), определив с ее помощью координаты двух произвольных точек, принадлежащих данным прямым.

Уравнения прямой, проходящей через две точки имеет вид:

$$\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1};$$

Прямая, профилирующая точку  $K_1$ , проходит через точки  $A(X_1; Y_1)$  и  $B(X_2; Y_2)$ , координаты точек определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} X_1 &= f(\Phi, \Delta h_1); & X_2 &= f(\Phi, \Delta h_2); \\ Y_1 &= f(\Phi, \Delta h_1); & Y_2 &= f(\Phi, \Delta h_2); \end{aligned}$$

Прямая профилирующая точку  $K_2$  проходит через точки  $A'(X_1'; Y_1')$  и  $B'(X_2'; Y_2')$ , координаты точек соответственно:

$$\begin{aligned} X_1' &= f(\Phi + \Delta\Phi, \Delta h_1); & X_2' &= f(\Phi + \Delta\Phi, \Delta h_2); \\ Y_1' &= f(\Phi + \Delta\Phi, \Delta h_1); & Y_2' &= f(\Phi + \Delta\Phi, \Delta h_2); \end{aligned}$$

где  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  принимают произвольные отличные друг от друга значения.

$\Delta\Phi$  – угловое перемещение инструмента за двойной ход.

Координаты точки  $N$  определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} Y_N - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X_N - X_1); \\ Y_N - Y_1' = \frac{Y_2' - Y_1'}{X_2' - X_1'} (X_N - X_1') \end{cases} \quad (2.50)$$

Определим уравнения  $n$  прямых профилирующих теоретически верный профиль зуба в диапазоне угла поворота инструмента  $\Phi \in (\Phi; \Phi + \Delta\Phi)$ .

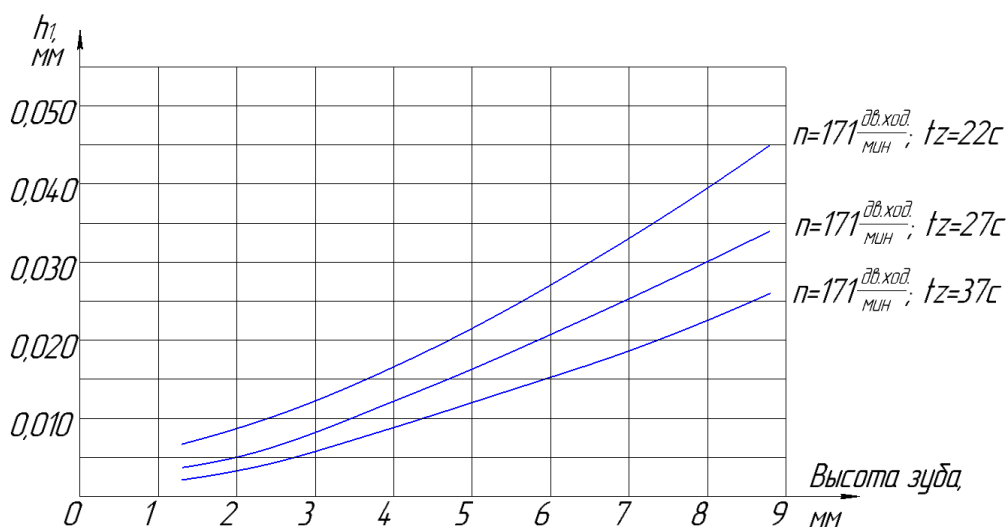
Расстояния от точки  $N(X_N, Y_N)$  до  $i$ -той прямой определяем из уравнения:

$$NM_i = \left| \frac{\frac{Y_{i2} - Y_{i1}}{X_{i2} - X_{i1}} X_N + Y_N + \frac{Y_{i2} - Y_{i1}}{X_{i2} - X_{i1}} X_{i1} - Y_{i1}}{\sqrt{\left(\frac{Y_{i2} - Y_{i1}}{X_{i2} - X_{i1}}\right)^2 + 1}} \right|; \quad (2.51)$$

где  $X_{i1}, X_{i2}, Y_{i1}, Y_{i2}$  – координаты двух произвольных точек лежащих на прямой соответствующей углу поворота резца на величину равную  $\Phi + i \frac{\Delta\Phi}{n}$ .

Максимальное значение  $NM_i$  будет равна высоте гребешка огранки  $h_1$ .

Рассчитаем зависимость размеров  $h_1$  от режимов обработки. В качестве примера рассмотрим обработку прямозубого конического колеса на станке 429(14) фирмы «Глисон» по схеме плосковершинного производящего колеса. Геометрические параметры обрабатываемого колеса:  $z = 40$ ;  $m_s = 40$ ;  $\varphi = 45^\circ$ . Результаты расчета приведены на рисунке 2.16.

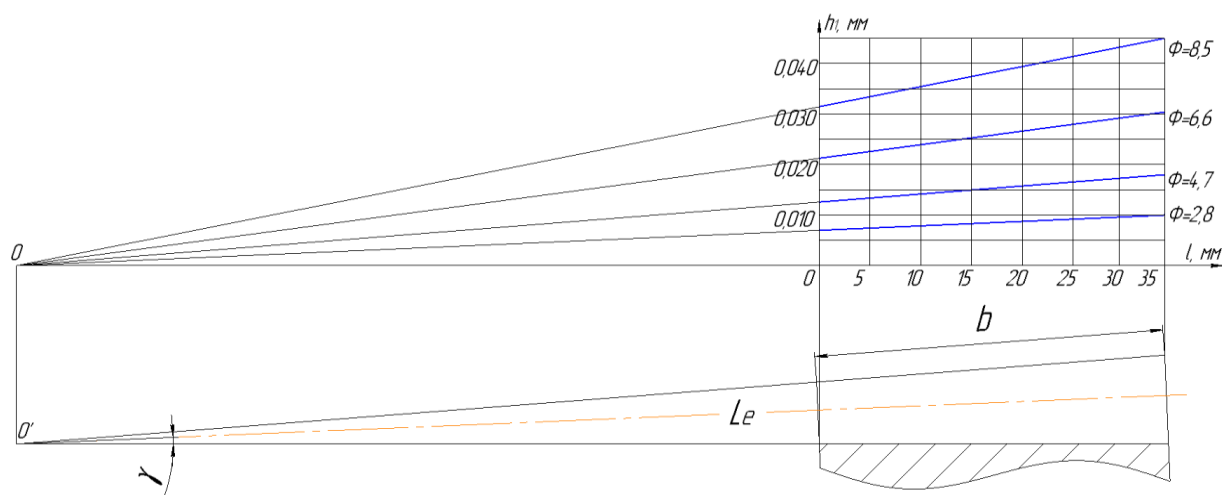


**Рисунок 2.16 – График изменения кинематической составляющей средней высоты шероховатости по высоте зуба**

Из рисунка 2.16 видно, что при увеличении времени обработки зуба (уменьшении окружной подачи) высота гребешков огранки уменьшается. Это свидетельствует о возможности управления величиной шероховатости с помощью оптимизации режимов резания.

Кинематическая схема процесса зубострогания предполагает, что траектории движения резания инструмента сходятся в точке вершины начального конуса  $O$  (рисунок 2.17). Это дает возможность предположить, что высота гребешков огранки уменьшается от внешнего торца колеса к внутреннему. При помощи вышеизложенной методики рассчитаем изменения значения  $h_1$  вдоль профиля зуба. Результаты расчета при различных углах поворота резца приведены на рисунке 2.17.





**Рисунок 2.17 – График изменения кинематической составляющей средней высоты шероховатости вдоль профиля зуба**

Из рисунка 2.17 следует, что график теоретического изменения высоты огранки вдоль профиля зуба представляет собой луч, исходящий из вершины начального конуса, что подтверждает ранее сделанное предположение и позволяет вывести формулу для определения значения высоты огранки  $h_{1l}$  в сечении перпендикулярном профилю зуба, находящемся на расстоянии  $l$  от торца.

$$h_{1l} = \frac{(L_e - l)h_{1S}}{L_e}; \quad (2.52)$$

где  $L_e$  – длина образующей начального конуса;

$h_{1S}$  – высота гребешка огранки в торцевом сечении.

Кроме того, рассматривая рисунки 2.16 и 2.17 можно прийти к выводу, что величина кинематической огранки значительно снижается у ножки зуба ближе к внутреннему торцу колеса. Это дает возможность проектирования прямозубых конических колес с пятном контакта зубьев, смещенным в зону с минимальными значениями кинематической шероховатости, с целью повышения эксплуатационных свойств передачи.

Составляющая профиля шероховатости  $h_2$  при зубострогании:

$$h_2(\tau) = \frac{P(\tau) - P_{\min}}{j}, \quad (2.53)$$

где  $P(\tau)$  – мгновенное значение силы резания;

$P_{\min}$  – минимальное значение силы резания, возникающей в процессе формирования профиля зуба;

$j$  – жесткость технологической системы.

Составляющая профиля шероховатости  $h_3$  при зубострогании:

$$h_3 = 0,25\rho \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta M}{2h}\right) \cdot \left(1 - \frac{\tau_{сдв}}{\sqrt{\tau_{сдв}^2 + \sigma_T^2}}\right), \quad (2.54)$$

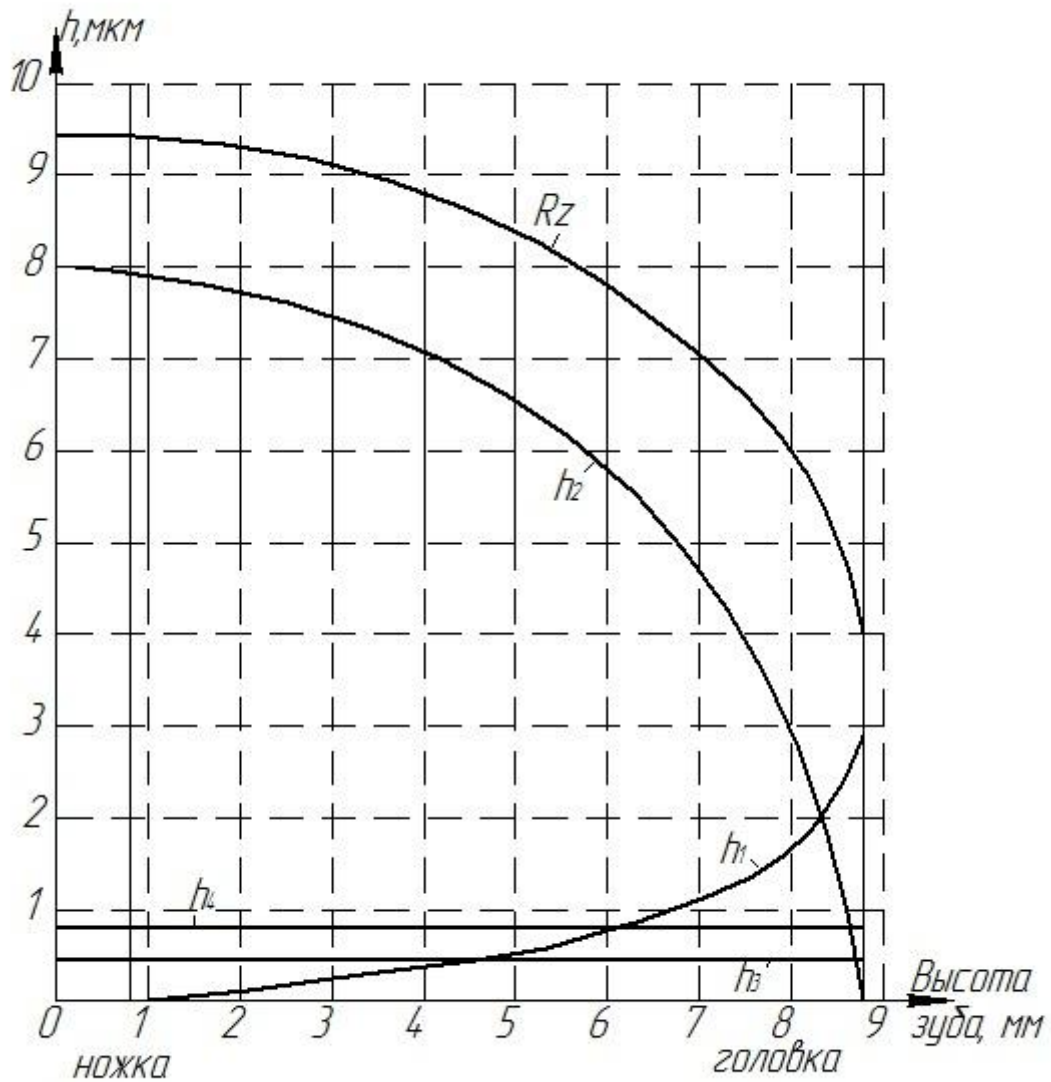
где  $\rho$  – радиус скругления режущего лезвия;

$\tau_{сдв}$  – прочность обрабатываемого материала на сдвиг;

$\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала.

Составляющая профиля шероховатости  $h_4$  обусловлена шероховатостью рабочих поверхностей инструмента. Согласно ГОСТ 8392-80 шероховатость режущей части резцов  $Ra = 0,16$ . Шероховатость режущей кромки резца в процессе обработки меняется незначительно, поэтому примем  $h_4$  неизменной в процессе строгания и равной  $h_4 = 5 \cdot Ra = 0,8 \text{ мкм}$ .

Рассчитаем шероховатость в процессе чистовой обработки венца конического зубчатого колеса:  $Z = 40$ ,  $m = 4 \text{ мм}$ ,  $\varphi = 45^\circ$ , сталь 45, жесткость технологической системы  $j = 1,2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ , ширина реза  $M = 0,23 \text{ мм}$ , скорость резания  $V = 14 \text{ м/мин}$ . (черновая обработка производится методом простого врезания). График изменения средней высоты профиля шероховатости в торцевом сечении представлен на рисунке 2.18.



**Рисунок 2.18 – Изменение средней высоты профиля шероховатости**

Из графика видно, что наибольшее влияние на величину средней высоты профиля шероховатости оказывает составляющая  $h_2$ . Это связано с большой амплитудой изменения силы резания, возникающей в процессе зубострогания. Уменьшить силу резания и соответственно данную составляющую шероховатости можно за счет уменьшения окружной подачи, что связано с увеличением основного времени обработки, или за счет использования инструмента специальной конструкции.

Кинематическая составляющая оказывает заметно меньшее влияние на величину средней высоты профиля шероховатости, однако у головки зуба ее

влияние достаточно высоко. Снизить значение данной величины можно только уменьшением окружной подачи.

Значения составляющих  $h_3$  и  $h_4$  незначительны и соответственно изменения данных параметров не окажет на  $R_z$  заметного влияния.

Значения шероховатости  $R_z$ , получаемые после чистового зубострогания, достаточно велики и колеса после данного вида обработки без шлифования не могут быть использованы в ответственных передачах, к которым предъявляются высокие требования. Одним из возможных путей улучшения качества получаемого в процессе зубострогания профиля является использования специальных резцов, разделяющих стружку. Их использование позволяет уменьшить силу, возникающую в процессе резания и соответственно повысить качество получаемого профиля без уменьшения круговой подачи.

## **2.7 Зубострогальные резцы с дифференцированными схемами резания**

Анализ методов обработки прямозубых конических колес показывает, что для повышения производительности либо увеличиваются скорости резания [96], либо используется специальный инструмент [96, 97]. Эти способы связаны с созданием новых конструкций станков и сложного инструмента. Использование специального, дорогостоящего оборудования в условиях современного российского машиностроения, где большая часть предприятий выпускают серийную и мелкосерийную продукцию, зачастую является нецелесообразным. Поэтому как на российских, так и на зарубежных предприятиях для обработки прямозубых конических колес все ещё широко используются зубострогальные станки [97]. Это объясняется универсальностью данного оборудования, простотой режущего инструмента и относительно высокой точностью получаемых изделий (до 6й степени точности). Однако современная техника предъявляет все более жесткие требования к точности рабочих поверхностей деталей, кроме того конкурентоспособность любого предприятия, независимо от формы

собственности и размеров, зависит в первую очередь от качества продукции и соответствия цены с качеством.

Одним из путей повышения производительности существующих зубострогальных станков является увеличение применяемых подач с одновременным разделением слоя металла, срезаемого за каждый рабочий ход, между дополнительно вводимыми режущими лезвиями инструмента.

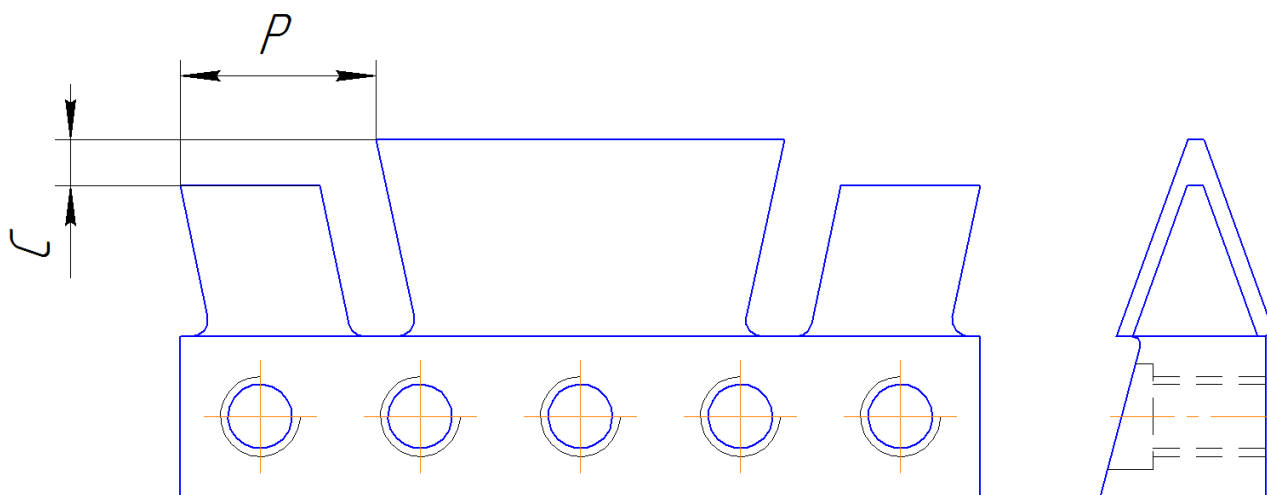
Разделение срезаемого слоя на части применяется во многих видах обработки резанием: протягивании, торцовом фрезеровании, строгании, зубофрезеровании и др. Во всех этих случаях распределение припуска между режущими лезвиями способствует снижению сил резания, увеличению стойкости инструмента и производительности процесса. В каждом конкретном случае разделение нужно согласовывать с мощностью станка, его жесткостью, требуемой точностью обработанного изделия, чистотой его поверхности, прочностью инструмента и др. условиями.

При обычном зубострогании в два прохода - черновом и чистовом-основная масса металла срезается черновым резцом, и на долю чистового остается тонкий слой, расположенный по боковым сторонам и во впадине обрабатываемого зуба.

При зубострогании резцами с дифференцированными схемами резания черновой и чистовой проходы совмещаются, что приводит к резкому изменению схемы резания. За каждый рабочий ход металл срезается и черновой и чистовой ступенью резца. Таким образом, чистовая ступень резца срезает значительно большую часть металла, чем при обычном зубострогании в два прохода и, в то же время, толщина срезаемого им слоя лежит в пределах, рекомендуемых для чистовой обработки, и определяется выбранной приведенной конструктивной подачей.

Зубострогальный резец с дифференцированной схемой резания - это такая модификация обычного резца, в результате которой он приобретает приведенную конструктивную подачу в виде разности размеров лезвия по ступеням, рисунок 2.19.

При этом каждая ступень инструмента срезает определенную, зависящую от параметров технологической системы, часть общего слоя металла, приходящегося на рабочий ход, что дает возможность, сохраняя заданную для чистового режима резания толщину срезаемого слоя, значительно увеличить круговую и радиальную подачи.



**Рисунок 2.19 – Конструкция инструмента**

Размеры резца, определяющие взаимное расположение его вершинных лезвий, определяются из формул:

$$C = P \operatorname{tg} \alpha + a_g; \quad (2.55)$$

$$P = B + 1,5 \div 2, \quad (2.56)$$

где  $B$  – ширина венца конического зубчатого колеса;

$\alpha$  – угол установки резца на станке;

$a_g$  – максимальная толщина слоя, срезаемого вершинным режущим лезвием резца.

Осевое расстояние между режущими лезвиями резца может быть на 1,5 – 2 мм больше высоты нарезаемого венца, чтобы чистовой резец вступал в работу после выхода чернового. Такое расположение лезвий увеличивает необходимую длину рабочего хода, ограничивает число ступеней инструмента и максимальную высоту обрабатываемого зубчатого венца, но резко снижает силы резания. Это позволяет работать без перегрузки станка и инструмента при повышенных

подачах. Кроме того, снижение сил способствует уменьшению величины упругих отжатий технологической системы и положительно влияет на точность нарезаемого зуба.

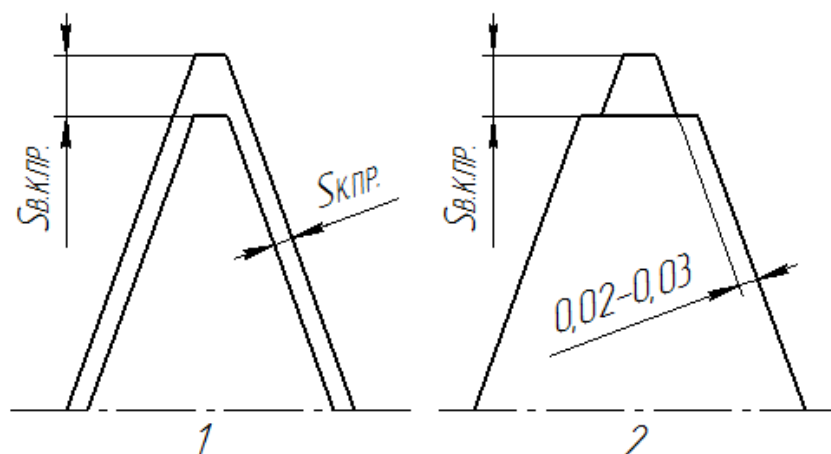
В отличие от обычных зубострогальные резцы с дифференцированной схемой резания не имеют угла наклона передней поверхности. Это выравнивает условия работы каждой из сторон зуба резца. Для повышения срока службы резцы выполняются двухсторонними. Установка резцов на станке производится по чистовому зубу. Переточка инструмента должна производиться по чистовому и черновому зубьям на одинаковую величину.

Дифференцирование срезаемого слоя может осуществляться различными способами, выбор которых зависит от конкретных условий обработки. Наиболее рациональными для зубострогальных резцов являются способы: параллельный и распределенный.

При параллельном дифференцировании форма дополнительных лезвий полностью копирует форму основных чистовых лезвий (рисунок 2.20 1).

При работе обычными резцами и ступенчатыми резцами с параллельным дифференцированием срезаемого слоя условия резания в вершинной части зуба инструмента остаются неблагоприятными. Стружки, отделяемые боковыми и вершинными режущими лезвиями, встречаются в зоне контакта с поверхностью, затрудняя процесс обработки.

Чтобы избавиться от взаимного влияния режущих лезвий в процессе работы применяется распределенная схема резания. При распределенной схеме первый зуб работает боковыми сторонами, а второй вершиной (рисунок 2.20 2). Для того, чтобы исключить из работы боковые режущие лезвия второго зуба резца, между ними и боковыми режущими лезвиями первого зуба делается перепад. Подобное разделение срезаемого слоя позволяет избежать контакта стружки от различных лезвий на передней поверхности и снижает силы резания и износ инструмента. Такая схема резания с распределенным дифференцированием значительно улучшает работу режущих лезвий резца.



**Рисунок 2.20 – Схемы разделения срезаемого слоя  
(1 – параллельная; 2 – распределенная)**

Наиболее полно выявить преимущества и особенности процесса зубострогания позволяют исследования усилий резания, возникающих при обработке, износа инструмента и качества нарезаемых деталей. Взаимосвязь этих показателей очевидна. Равномерное распределение усилий резания по ступеням инструмента приводит к оптимизации общего усилия от их совместной работы, делая его минимальным при определенных режимах обработки.

Равномерное распределение усилий по ступеням инструмента предопределяет равные условия работы каждой ступени, вследствие чего режущие лезвия обеих ступеней в равной степени изнашиваются. Для резцов с дифференцированными схемами резания это особенно важно, так как в целях сохранения расчетного распределения срезаемого металла между режущими лезвиями ступеней резца, обе ступени перетачиваются на одну и ту же величину, независимо от индивидуального износа.

Обработка зубчатых колес с минимальными усилиями резания при прочих равных условиях, повышает их точность ввиду уменьшения упругих деформаций в технологической системе. При этом улучшается качество обрабатываемой поверхности.

Наибольшее уменьшение всех составляющих силы резания осуществится лишь при значении приведенной конструктивной подачи резца, являющейся



оптимальной при данных условиях обработки. Таким образом, основным вопросом, связанным с проектированием резцов с дифференцированными схемами резания, является выбор оптимальной приведенной конструктивной подачи  $S_{КПР}$ , определяющей толщину слоев срезаемых режущими лезвиями верхней ступени, обеспечивающей наиболее полное снижение составляющих силы резания при работе инструмента.

Основным фактором, оказывающим доминирующее влияние на величину  $S_{КПР}$ , является круговая подача инструмента, поэтому для получения оптимального значения  $S_{КПР}$ , целесообразно воспользоваться соотношением вида:

$$S_{КПР} = f(S_{КР}). \quad (2.57)$$

Как показали результаты аналитического исследования силы резания при зубострогании, осевая её составляющая, имеющая наибольшую величину, стремится отжать заготовку и инструмент в сторону увеличения межосевого расстояния и создает опрокидывающий момент. Радиальная составляющая усугубляет действие осевой силы. Тангенциальная составляющая является знакопеременной и действует попеременно в сторону движения обката и против обката, вызывая поочередно торможение и ускорение обкатанного движения, влияющего на точность нарезаемого венца.

Применение инструмента с дифференцированными схемами резания может способствовать уменьшению составляющих силы резания и снижению амплитуды изменения этих составляющих. Снижение силы резания происходит в результате разделения срезаемого за каждый рабочий ход слоя металла между ступенями инструмента в оптимальном для каждого случая отношении. В результате уменьшения величины всех составляющих: силы резания и выравнивания амплитуды их колебания, деформации в технологической системы заметно снижаются, что сказывается на повышении точности нарезаемых изделий.

При отклонении величины  $S_{КПР}$  инструмента в сторону увеличения или уменьшения против оптимального значения, составляющие усилия резания

увеличиваются в связи с перегрузкой соответственно первой или второй ступени резца и далее эффект от применения резца с дифференцированной схемой резания по сравнению с обычным пропадает.

Принимая во внимание величины приведенных конструктивных подач, рекомендованных для обработки конических зубчатых колес, величину приведенной конструктивной подачи зубострогального резца с параллельной схемой резания в зависимости от абсолютной подачи, можно вычислить пользуясь зависимостями:

по вершинному режущему лезвию

$$S_{КПР.В} = (1,2 \div 1,3) \frac{1}{T}, \quad (2.58)$$

по боковым режущим лезвиям

$$S_{КПР.Б} = (0,9 \div 1,0) \frac{1}{T}, \quad (2.59)$$

где  $T$  – время обработки зуба конического колеса в секундах.

Таким образом, можно сделать вывод, что одним из путей повышения производительности обработки конических колес, является применение зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания. Для проектирования подобных инструментов необходимо точное определение геометрических параметров срезаемого слоя.

Результатом применения данного типа резцов является снижение составляющих силы резания и более равномерное их перераспределение, вследствие чего уменьшаются отжатыя технологической системы в процессе резания и увеличивается точность нарезаемых изделий.

## **2.8 Методика прогнозирования качества обработки прямозубых конических колес**

Постоянно возрастающие требования к эксплуатационным свойствам прямозубых конических колес приводят к применению новых конструкционных и инструментальных материалов, новых схем процесса обработки, конструкций режущего инструмента. Изменения, вносимые в отработанные технологические процессы влияют на качество обработки, кроме того их внедрение требует больших затрат, связанных с разработкой режимов резания. Методика прогнозирования качества обработки позволяет сократить эти расходы.

Целью разработки универсальной математической модели процесса является получение зависимостей, позволяющих прогнозировать точность и качество получаемых изделий в зависимости от параметров технологической системы.

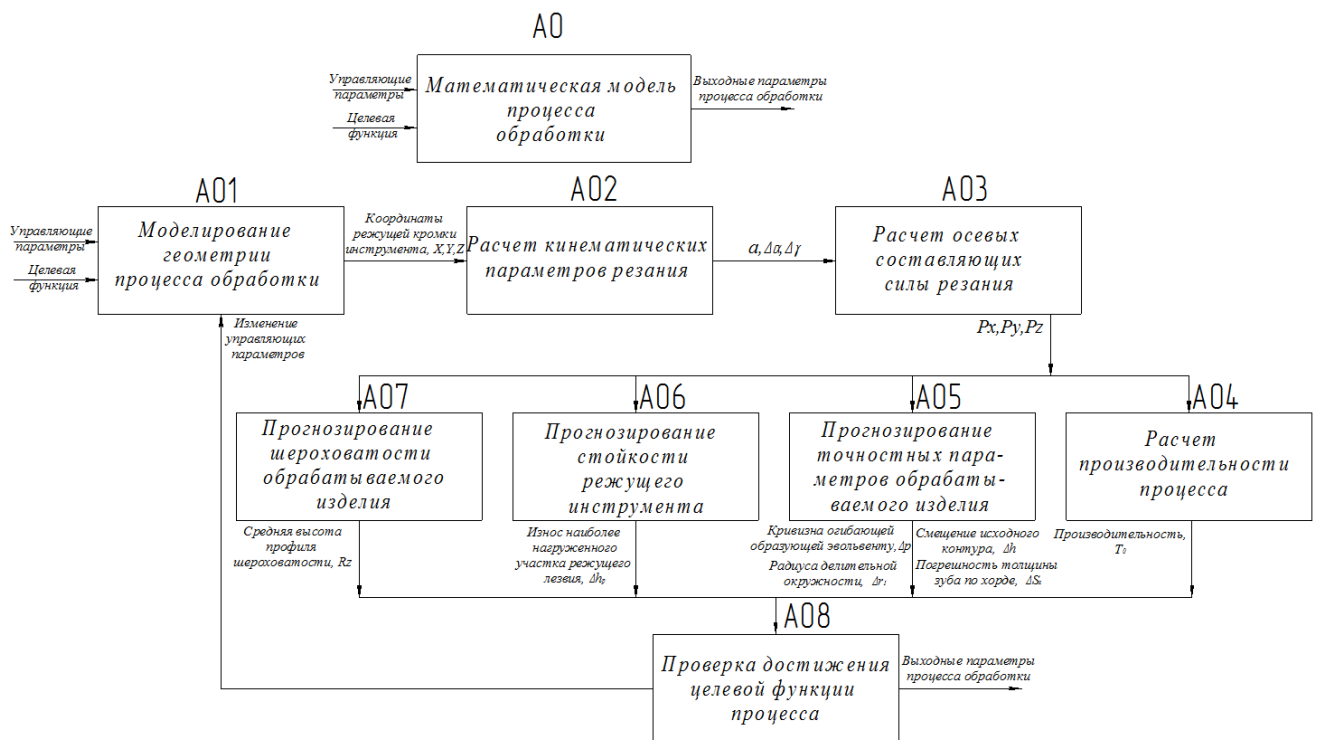
Основными задачами модели являются: установление влияния параметров технологической системы на выходные параметры процесса обработки, определение зависимостей связывающих входные и выходные параметры, определение величины воздействия на входные параметры с целью поддержания значений выходных параметров.

Данные о величине изменений кинематических углов режущего лезвия и толщине срезаемого слоя на каждом элементарном участке режущего лезвия позволяют перейти к детальному анализу процесса обработки прямозубых конических колес – определению изменения осевых составляющих силы резания, износа режущих кромок, шероховатости обрабатываемой поверхности, точности зубчатого профиля. Это, в свою очередь, дает возможность создать алгоритм управления процессом обработки прямозубых конических колес. Разработанный алгоритм – набор взаимосвязанных описаний, начиная с описания верхнего уровня и кончая подробным описанием деталей на нижних уровнях. Каждое из описаний называется диаграммой [81]. В вершине структуры лежит контекстная диаграмма, которая отражает связь системы с внешним миром. Она состоит из

одного блока и множества дуг. Нижние уровни иерархической структуры получают путем декомпозиции контекстной диаграммы (рисунок – 2.21).

В качестве входных параметров выделим: геометрические параметры и материал обрабатываемой детали, режимы обработки, кинематическую схему резания, конструкцию инструмента и др.

Нарезание зубчатого венца прямозубого конического колеса представлено следующими выходными параметрами, в качестве первообразной целевой функции – получение зубчатого колеса; в качестве частных целевых функций – снижение шероховатости, повышение точности зубчатого профиля и производительности процесса зубообработки и т.п.

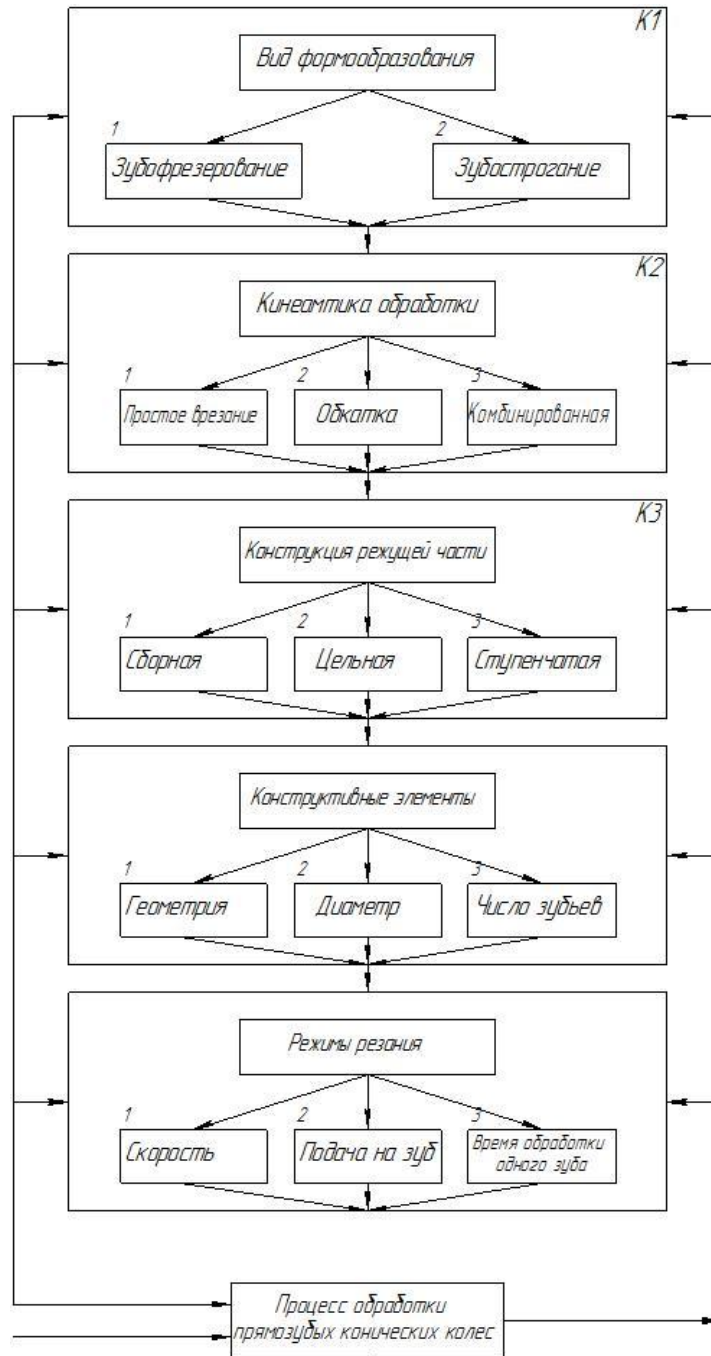


**Рисунок 2.21 – Управление процессом обработки конических колес**

На основании разработанной пространственной модели процесса обработки был предложен алгоритм, позволяющий управлять процессом нарезания зубчатого венца конического колеса. После ввода входных параметров на печать выводятся оптимальные режимы резания и конструктивное исполнение инструмента, позволяющее достичь выполнения целевой функции процесса.

На рисунке 2.22 представлена иерархическая схема управления процессом лезвийной обработки прямозубых конических колес по методу обката. Представленная структура управления процессом зубострогания характеризуется поуровневым решением поставленной задачи. Разработка рекомендаций по нарезанию прямозубого конического колеса заканчивается после прохождения всех блоков, а для улучшения каких-либо отдельных параметров можно использовать один из блоков, оставляя другие неизменными. Для оптимизации значений управляемых параметров предусмотрена подпрограмма пошаговой оптимизации, предусматривающая выбор численной величины или конструктивного исполнения выходного параметра с учетом лимитирующих факторов.

Использование данного алгоритма позволит прогнозировать качество и точность изделия на этапе технологической подготовки производства для нового технологического процесса, а также определить оптимальные режимы резания, необходимые для обработки зубчатого колеса требуемой точности, что позволит сократить основное время для существующего техпроцесса обработки.



**Рисунок 2.22 – Иерархическая схема управления процессом лезвийной обработки прямозубых конических колес**

## 2.9 Выводы по второй главе

1. Разработана методика комплексного анализа кинематической схемы процесса обработки прямозубых конических колес по методу обката. Данная методика основана на математическом описании движений режущих кромок инструмента. Анализ процесса позволил установить аналитические зависимости для определения кинематического изменения переднего и заднего углов резания и толщины срезаемого слоя, как во времени, так и по профилю режущих лезвий, прогнозировать значения осевых составляющих силы резания.

2. Теоретический расчет осевых составляющих силы резания и кинематического изменения параметров резания дает возможность прогнозировать точность и шероховатость поверхности обрабатываемого зубчатого венца.

3. На основе пространственного отображения процесса обработки разработана методика управления процессом обработки прямозубого конического колеса и алгоритм определения оптимальных значений входных параметров системы, позволяющих получить заданную точность и шероховатость поверхности при требуемой производительности процесса.

4. Наибольшее влияние на величину средней высоты профиля шероховатости оказывает составляющая  $h_2$ . Это связано с большой амплитудой изменения силы резания, возникающей в процессе зубострогания. Кинематическая составляющая оказывает заметно меньшее влияние на величину средней высоты профиля шероховатости, однако у головки зуба ее влияние достаточно высоко. Значения составляющих  $h_3$  и  $h_4$  незначительны.

5. Угол наклона режущей кромки непрофилирующего лезвия зубострогального резца оказывает значительное влияние силу резания в процессе зубострогания цельной заготовки. Обозначены границы, в которых возможно изменения данного параметра и не произойдет изменения геометрии колеса, а также уменьшения ниже требуемых значений рабочих углов инструмента. Было

показано, что при оптимизации угла наклона непрофилирующей кромки зубострогального резца, максимальная амплитуда силы, возникающей в процессе обработки, уменьшится более чем на 10%.

6. Предложен вариант конструкции специального инструмента для обработки прямозубых конических колес – зубострогальный резец с дифференцированной схемой резания. Были разработаны различные варианты конструкции специальных резцов:

по типу работы

- открытого типа,

- закрытого типа,

по схеме распределения срезаемых слоев металла:

- параллельная,

- распределенная.

Определены оптимальные значения приведенной конструктивной подачи.

Результатом применения данного типа резцов может быть снижение составляющих силы резания и более равномерное их перераспределение вследствие чего уменьшатся отжатия технологической системы в процессе резания, и увеличится точность нарезаемых изделий. Аналитический расчет показывает, что применение данного инструмента позволит повысить производительность процесса в 1,8 раза.



### **3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Целью экспериментального исследования является подтверждение теоретически определенных величин составляющих силы резания и амплитуды их колебаний возникающих при обработке прямозубых конических колес методом обката; точности обрабатываемых зубчатых колес; шероховатости зубчатого профиля; рациональных значений приведенной конструктивной подачи для резцов с дифференцированными схемами резания.

В соответствии с поставленной целью, экспериментальное исследование состоит из следующих этапов:

- изготовление инструмента – резца с дифференцированной схемой резания;
- определение оптимальных значений конструктивной подачи резцов с дифференцированными схемами резания;
- анализ влияния на процесс обработки различных схем резания, реализованных с помощью применения специальных резцов;
- исследование осевых составляющих силы резания и амплитуды их колебания в зависимости от режимов обработки (скорости резания, подачи) и параметров обрабатываемой заготовки (количества зубьев, модуля и т.д.);
- исследование параметров шероховатости обработанного профиля;
- исследование погрешностей профиля зуба при различных сочетаниях режимов обработки;
- исследование влияния режимов обработки и особенностей профиля режущей части инструмента на его стойкость.

### **3.1 Экспериментальное определение конструктивной подачи зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания**

Процесс обработки резцами с дифференцированными схемами резания характеризуется большим числом факторов, влияющих с разной силой и в разных направлениях друг на друга, на ход и конечный результат процесса.

Наиболее полно выявить преимущества и особенности процесса зубообработки позволяют исследования усилий резания, возникающих при обработке, износа инструмента и качества нарезаемых деталей. Взаимосвязь этих показателей очевидна. У резцов, работающих по параллельной схеме резания, происходит равномерное распределение усилий резания по ступеням, что приводит к оптимизации общего усилия от их совместной работы, делая его минимальным при определенных режимах обработки.

Равномерное распределение усилий по ступеням инструмента предопределяет равные условия работы каждой ступени, вследствие чего режущие лезвия обеих ступеней в равной степени изнашиваются. Для резцов с дифференцированными схемами резания это особенно важно, так как в целях сохранения расчетного распределения срезаемого металла между режущими лезвиями ступеней инструмента, обе ступени перетачиваются на одну и ту же величину, независимо от индивидуального износа.

Обработка зубчатых колес с минимальными усилиями резания при прочих равных условиях, повышает их точность ввиду уменьшения упругих деформаций в технологической системе. При этом улучшается качество обрабатываемой поверхности.

Таким образом, основной задачей, связанной с экспериментальным исследованием зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания является оптимизация усилий резания для различных режимов обработки посредством выбора определенного соотношения геометрических параметров слоев металла, срезаемых ступенями резца.

Исследование усилий резания, особенностей износа и качества обрабатываемых изделий для зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания представляет интерес с точки зрения эффективности применения той или иной схемы резания для конкретных условий производства. Цель данного динамометрического исследования заключается в определении величины приведенной конструктивной подачи, при которой происходит равномерное распределение сил резания по ступеням резца.

Как показали аналитические расчеты осевых составляющих силы резания при зубострогании, осевая её составляющая, имеющая наибольшую величину, стремится отжать заготовку и инструмент в сторону увеличения межосевого расстояния и создает опрокидывающий момент. Радиальная составляющая усугубляет действие осевой силы. Тангенциальная составляющая является знакопеременной и действует попеременно в сторону движения обката и против обката, вызывая поочередно торможение и ускорение обкатанного движения, влияющего на точность нарезаемого венца.

Расчеты показывают, что применение инструмента с дифференцированными схемами резания может способствовать уменьшению составляющих силы резания и снижению амплитуды изменения этих составляющих. Снижение сил резания происходит в результате разделения срезаемого за каждый рабочий ход слоя металла между ступенями инструмента в оптимальном отношении. В результате уменьшения величины всех составляющих силы резания и выравнивания амплитуды их колебания, деформации в технологической системе, заметно снижаются, что сказывается на повышении точности нарезаемых изделий.

Наибольшее уменьшение всех составляющих силы резания осуществится лишь при значении приведенной конструктивной подачи, являющейся оптимальной при данных условиях обработки (режимы резания, геометрия обрабатываемого колеса и др.). Таким образом, основным вопросом, связанным с проектированием резцов с дифференцированными схемами резания, является выбор оптимальной приведенной конструктивной подачи  $S_{кпр}$ , определяющей

толщину слоев, срезаемых режущими лезвиями последней ступени, обеспечивающей наиболее полное снижение составляющих силы резания при работе инструмента.

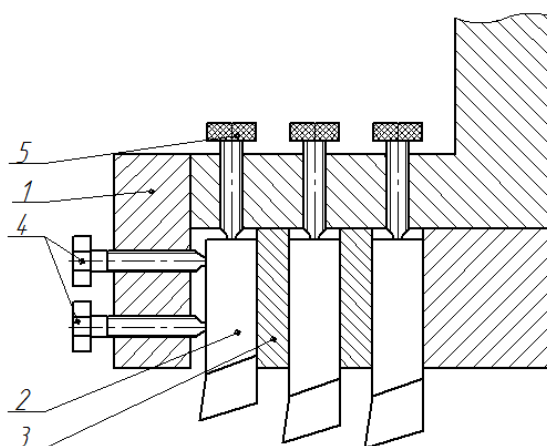
Доминирующим фактором, влияющим на изменение составляющей силы резания, является круговая подача  $S_{кр}$ . Каждому значению круговой подачи соответствует определенное значение приведенной конструктивной подачи инструмента.

Ввиду сложности применения универсального динамометра УДМ600 непосредственно при обработке прямозубых конических колес и возможных в связи с этим погрешностей, исследование оптимальной конструктивной подачи проводилось при помощи специального приспособления.

Моделирование процесса происходило на поперечно-строгальном станке ГД-320, что позволило сохранить специфические для процесса зубострогания элементы, такие как прерывистость резания и начальное ударное воздействие инструмента на заготовку. Моделировалась обработка прямозубого конического колеса из стали 45 ГОСТ 1050-88, с числом зубьев  $z_1 = 30$ , шириной  $b = 20$  мм, внешний окружной модуль  $m_s = 3$  мм при скорости резания  $V_{рез} = 20$  м/мин. Шероховатость задней и передней поверхностей зубострогальных резцов соответствовала  $Ra = 0,16$  мкм.

Взаимное расположение режущих лезвий инструмента в процессе резания воспроизводится с помощью резцов из стали Р6М5, HRCэ 62 – 64, закрепленных в головке (рисунок 3.1). Резцы были изготовлены из одного предварительно термообработанного прутка с последующей проверкой твердости режущей части.

Приспособление состоит из резцов 2 закрепленных в корпусе 1 и проставок 3 между резцами. Точность установки режущих лезвий относительно оси головки достигается перемещением резцов с помощью винта 5 в нужном направлении. Закрепление резцов в корпусе обеспечивается винтом 4. Моделирование процесса зубострогания производится тремя резцами.

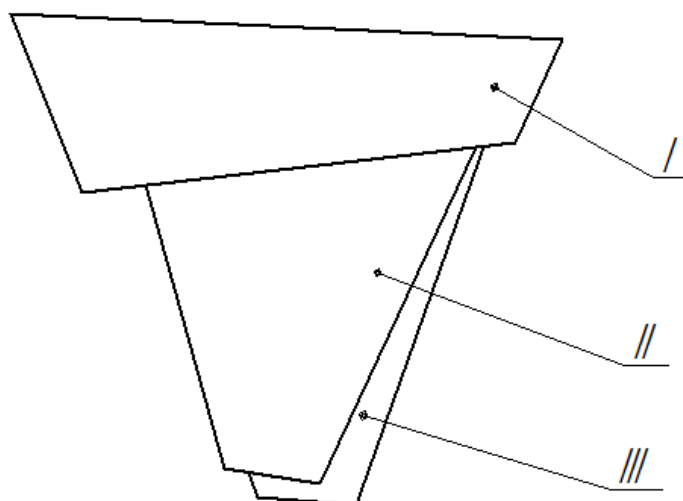


**Рисунок 3.1 Конструкция приспособления для моделирования процесса зубострогания**

По данной схеме резания толщина срезаемого слоя устанавливается соответственно каждому режущему лезвию резца. Различное распределение толщин по отдельным режущим лезвиям резца достигается за счет определенного угла наклона режущих лезвий относительно подачи вглубь заготовки.

Моделирование процесса зубострогания производится тремя резцами (рисунок 3.2 а,б). Каждый резец воспроизводит отдельно взятый рез схемы резания по методу обката. Резец I ограничивает длины режущих лезвий головки в соответствии с моделируемым резом. Резец II предназначен для гарантии определенной толщины срезаемого слоя металла резцом III. Резец III моделирует чистовой рез и затачивается.

Учитывая то, что данный эксперимент требует проведения большого количества опытов с различными вариантами приведенной конструктивной подачи боковых режущих кромок и вершины резца, а также учитывая то, что на точностные параметры профиля колеса в первую очередь оказывает влияние величина максимального значения силы резания и ее амплитуда, будем изучать только наиболее нагруженный рез. Длину и толщину слоя, срезаемого каждой ступенью специального резца рассчитаем при помощи методики изложенной в главе 2.



**Рисунок 3.2 - Схема расположения резцов строгальной головки**

При экспериментальном исследовании резцов с параллельной схемой резания для установления оптимального соотношения между круговой подачей и приведенной конструктивной подачей инструмента по боковым режущим лезвиям, был выбран ряд приведенных конструктивных подач: 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08 (мм). Указанный ряд конструктивных подач выбирался на основе анализа толщин срезаемого слоя при различных круговых подачах. Диапазон изменения времени обработки одного зуба: 7,5- 22,5 с/зуб.

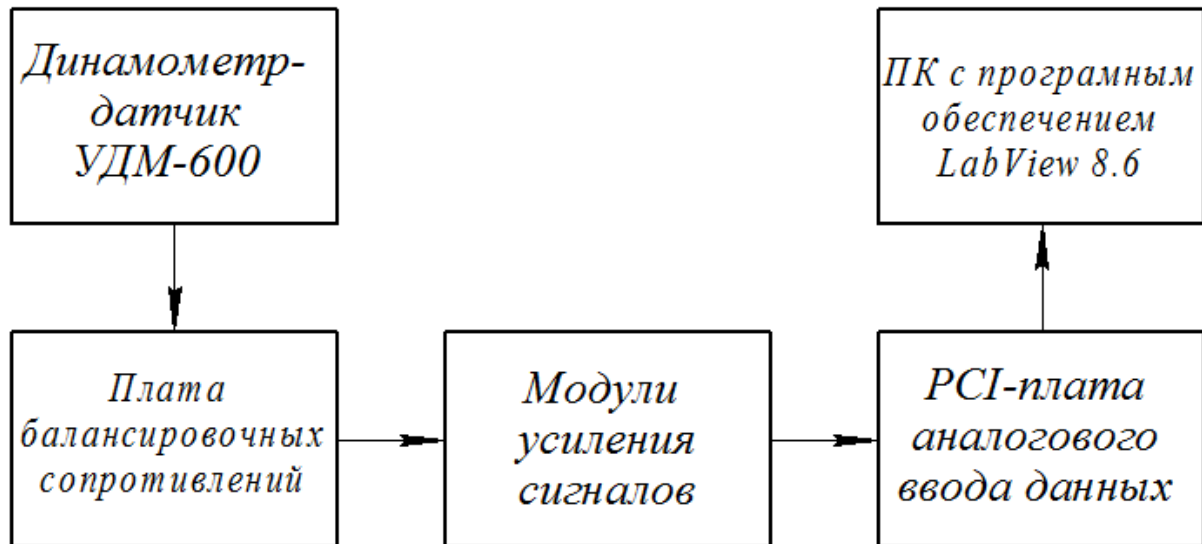
При отклонении величины  $S_{кр}$  инструмента в сторону увеличения или уменьшения против оптимального значения, составляющие усилия резания увеличиваются в связи с перегрузкой соответственно верхней или нижней ступени резца и далее эффект от применения специального инструмента пропадает.

Таким образом, предлагаемая схема эксперимента позволяет на основании изучения изменения составляющих силы резания получить оптимальное соотношение между  $S_{кр}$  и  $S_{кр}$  и представить его в виде функциональной зависимости.

Универсальный динамометр используемый в эксперименте (УДМ-600) предназначен для измерения статических и динамических деформаций, возникающих в процессе обработки. Задающим элементом являются

тензометрические датчики. С помощью примененного универсального динамометра можно исследовать мгновенные значения силы резания в диапазоне частот от 0 до 500 Гц.

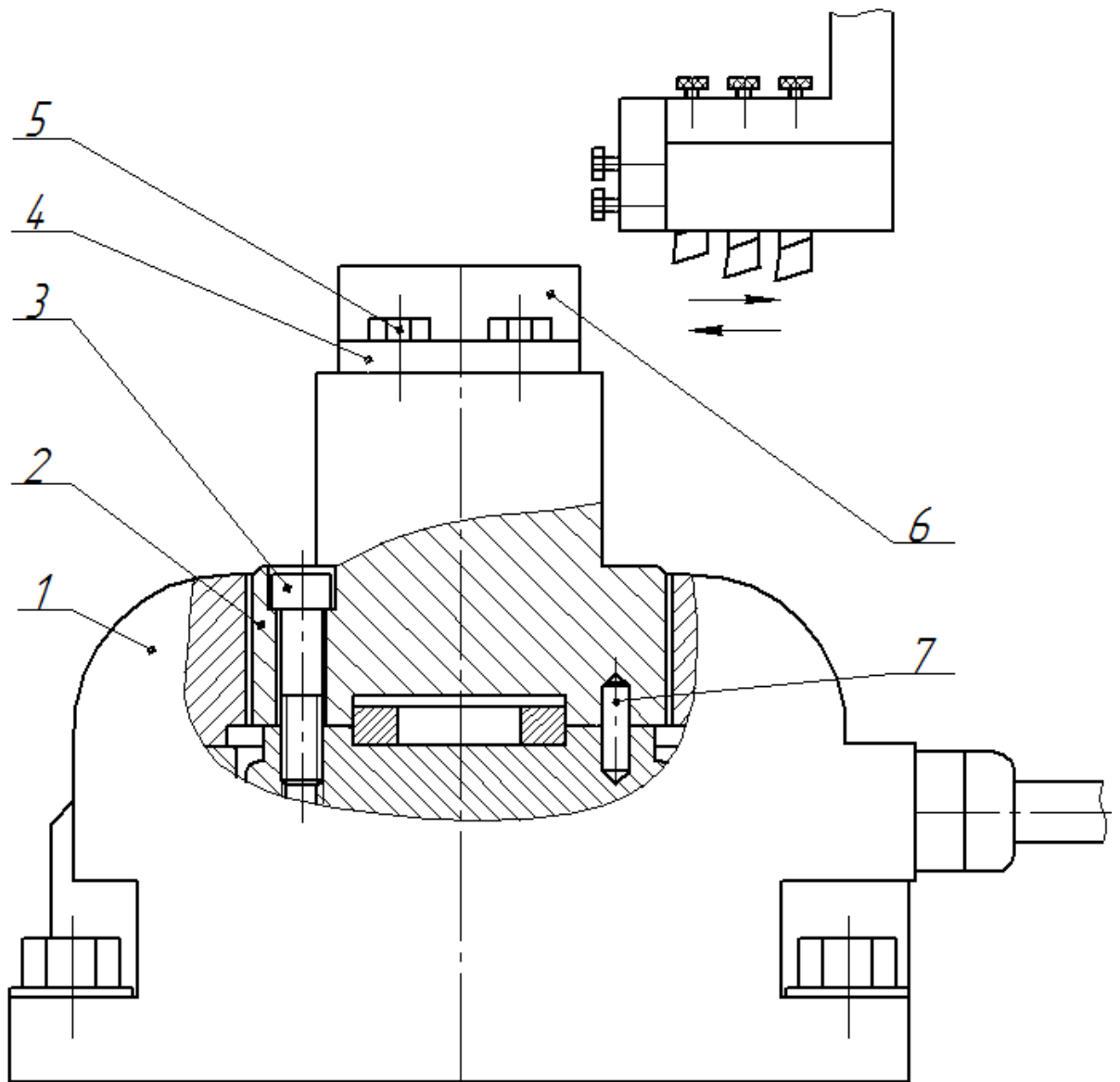
На рисунке 3.3 представлена структурная схема взаимодействия составных частей стенда.



**Рисунок 3.3 – Структурная схема взаимодействия составных частей измерительного стенда для измерения сил резания**

При проведении эксперимента использовалось специально разработанное приспособление, служащее для установки заготовки прямозубого конического колеса в УДМ. (рисунок 3.4).

Приспособление крепится на УДМ-600 (рисунок 3.4) с помощью 6 отверстий (рисунок 3.4 позиция 3). Крепление столика на динамометре осуществляется винтами (рисунок 3.4 позиция 3) и штифтом (рисунок 3.4 позиция 7). Обрабатываемая заготовка (рисунок 3.4 позиция 4) крепится винтами (рисунок 3.4 позиция 5).



**Рисунок 3.4 – Приспособление для закрепление заготовки при проведении эксперимента на УДМ-600**

### **3.2 Методика исследования сил резания**

Целью исследования является экспериментальное подтверждение адекватности расчетных составляющих силы резания, полученных с помощью пространственного математического отображения схемы резания, а также исследование влияния режимов обработки на осевые составляющие силы резания.

Методика эксперимента по определению осевых составляющих силы резания изложена в разделе 3.1 данной работы. Её отличие заключается в том, что



в данном эксперименте недостаточно рассмотреть наиболее нагруженный рез. Для того, что бы иметь возможность целостно рассмотреть процесс изменения осевых составляющих силы резания, возникающих в процессе зубострогания, на стенде моделировался каждый пятый рез зубострогального резца. Кинематические параметры каждого реза рассчитывали по методике изложенной в главе 2.

Так как случайные погрешности отдельных измерений полностью исключить невозможно, было проведено несколько опытов (6 – 8). Заготовки для проведения экспериментального исследования отбирались из одной партии поставки и перед опытами проверялись на твердость, с целью более полного исключения влияния колебаний химического состава и заготовок на погрешности измерения осевых составляющих силы резания.

Программой экспериментальных исследований предусматривалось измерение составляющих силы резания при имитации обработки прямозубых конических колес из стали 45 ГОСТ 1050-88, внешний окружной модуль зуба  $m_e=3\text{мм}$ , число зубьев  $z_1=30$ . Время обработки одного зуба изменялось в диапазоне от 7,5 до 22,5 с/зуб; из стали 45 ГОСТ 1050-88, внешний окружной модуль зуба  $m_e=6\text{мм}$ , число зубьев  $z_1=16$ . Время обработки одного зуба изменялось в диапазоне от 18 до 47 с/зуб.

### **3.3 Методика исследования точности прямозубых конических колес**

В настоящее время на большинстве машиностроительных предприятий контроль параметров качества зубчатых колес занимает весьма значительное время и требует применения специальных приспособлений. Применение современных измерительно-вычислительных комплексов на основе ПК позволяет автоматизировать контрольно-измерительные операции и отказаться от использования специальных приспособлений тем самым значительно сократить время контроля и оперативно влиять на точность изготовления, увеличивая надёжность и долговечность эксплуатации зубчатых колес.

Прямозубые конические колеса, согласно ГОСТ 1758 – 81, нормируются по трем нормам точности, оценивается степень кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев. Для оценки кинематической точности был использован показатель – радиальное биения зубчатого венца, для контроля плавности работы – отклонение шага зацепления, для контроля контакта зубьев – длина и высота пятна контакта.

Контроль параметров точности прямозубых конических колес осуществлялся с помощью универсальной координатно-измерительной машины PRISMO 7 производства Германия (рисунок 3.5).

С помощью координатно-измерительной машины определяются геометрические размеры зубчатого колеса. КИМ имеет подвижные оси и может измерять деталь в координатных направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . С помощью специального программного обеспечения может определяться форма деталей.

Диапазон измерений координатно-измерительной машины (КИМ):

$X=700$  мм;

$Y=900$  мм;

$Z=500$  мм;



**Рисунок 3.5 – Координатно-измерительная машина PRISMO 7**

КИМ предоставляет возможность проводить измерения в 3-х режимах:

1. ощупывание отдельных точек;
2. ощупывание множества точек;
3. сканирование.

Исследование погрешностей прямозубого конического колеса производилось при нарезании венцов,  $z=16$ , внешний окружной модуль зуба  $m_e=6$ мм. Ширина зубчатого венца - 30 мм. Инструмент – зубострогальный резец ГОСТ 5392-80 тип 4 из стали Р6М5. Скорость резания 20 м/мин. Обработка с

применением смазочно-охлаждающей жидкости – машинного масла. Время обработки одного зуба изменялось в диапазоне: 0,3 – 0,784 мин/зуб.

Экспериментальные работы проводились на зубострогальном станке мод.5С286П, со следующими характеристиками:

- наибольший диаметр обрабатываемого колеса  $d$  в мм: 800
- наибольшая ширина нарезаемого зубчатого венца  $b$  в мм: 150
- наибольший внешний окружной модуль колес  $m_e$  в мм: 20
- наибольшее среднее конусное расстояние  $R$ , мм: 450
- наименьший угол делительного конуса, градусы: 5
- число зубьев изделия: 5 – 150
- частота двойных ходов ползунов, дв.ход/мин: 34...166
- угловая скорость круговой подачи, град/с: 0,2...3,0
- предел радиальных подач в мм/дв.ход: 0,025...0,1
- мощность электродвигателя главного движения, кВт: 7,5

Измерение проводилось в следующей последовательности:

1. Калибровка (при проведении измерения впервые), с целью определения длины щупов. Далее калибровку выполняют в следующих случаях:
  - значительного изменения температуры окружающей среды;
  - при столкновения щуповой системы с измеряемым объектом;
  - в случае установки в щуповую конфигурацию нового щупа.
2. Установка и закрепление прямозубого конического колеса на рабочем столе.
3. Выбор вида измерения и конфигурации щуповой головки. Контроль вышеуказанных точностных параметров зубчатых колес проводится в режиме сканирования и ощупывания множества точек.
4. Выбор ручного режима измерения.
5. Установка скорости перемещения щуповой конфигурации.
6. Осуществление привязки к системе координат зубчатого колеса:
7. Измерение параметров зубчатого колеса, заключающееся в ощупывании контрольных точек.

### **3.4 Методика исследования износа инструмента**

При анализе характера износа зубострогальных резцов можно сделать вывод, что износ по режущему периметру неодинаковый. Наибольший износ наблюдается на задней поверхности режущей кромки, прилегающей к вершине зуба. Именно этот элемент был взят за основу для определения износостойкости инструмента в целом.

Исследование износа зубострогальных резцов производилось в процессе производственных испытаний зубострогальных резцов без снятия инструмента со станка. В процессе проведения эксперимента устанавливалось влияние различных параметров обработки и конструкции инструмента на величину износа. В качестве параметров были выбраны время обработки одного зуба, схема резания, скорость резания, геометрические параметры изделия.

Величина износа зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания определялась на станке без съема инструмента. В качестве измерительного инструмента применялась бинокулярная лупа. Цена деления 0,038мм. Визуальная точность отсчета 0,02мм. Измерение величины износа проводилось для каждой ступени резца.

### **3.5 Методика экспериментального исследования шероховатости зубьев прямозубых конических колес**

Исследование шероховатости зубчатой поверхности прямозубого конического колеса производилось после нарезания зубчатого профиля с параметрами  $z_1=16$ , внешний окружной модуль зуба  $m_e=6$ мм после обработки на зубострогальном станке модели 5С286П.

Проверка шероховатости обработанных поверхностей производилась в измерительной лаборатории ООО «Орелстроймаш».

Для контроля параметров шероховатости зубчатого профиля прямозубого

конического колеса применялся так называемый иммерсионно-репликовый метод (метод слепков), так как применение данного метода наиболее целесообразно для контроля шероховатости поверхностей сложной формы в труднодоступных местах.

При измерении шероховатости непосредственно фиксировалось значение параметра  $Ra$ , а затем определялось значение параметра  $Rz$  по формуле [75 с. 57]:

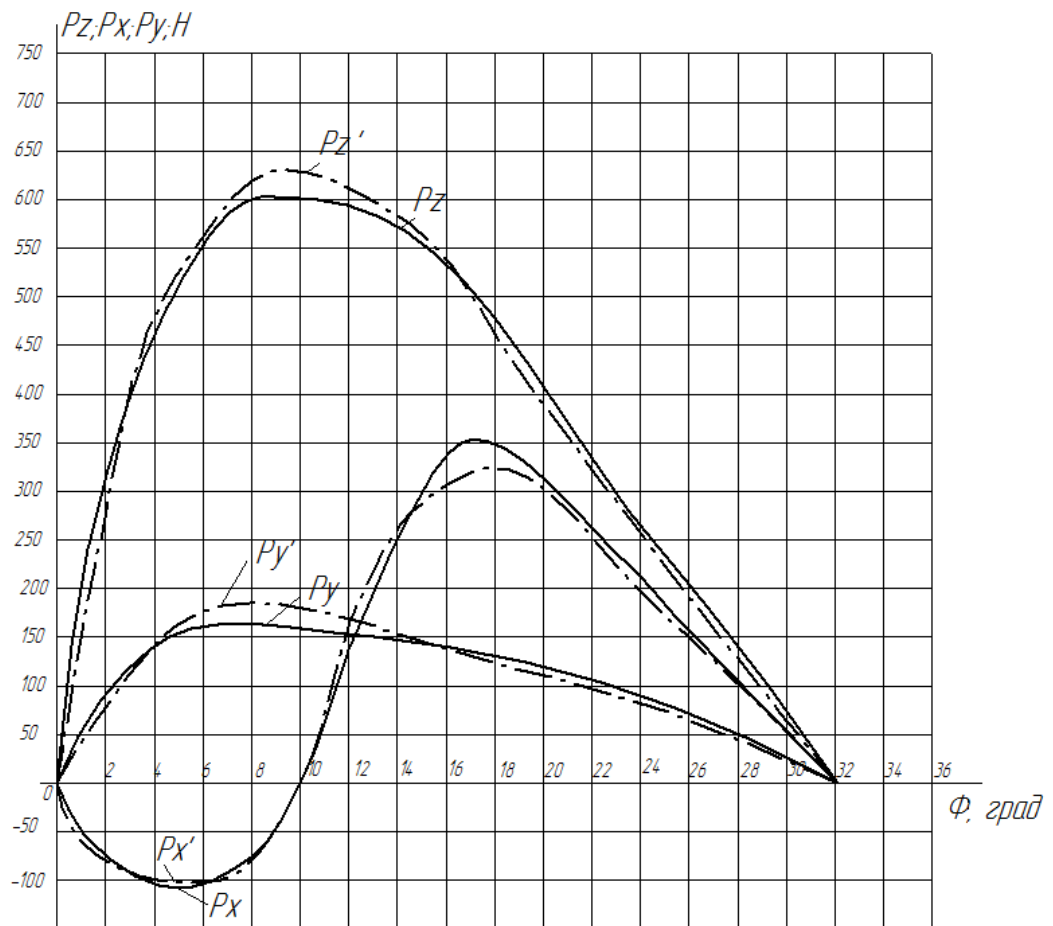
$$Rz = 5,0 Ra.$$

## 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАРЕЗАНИЯ ПРЯМОЗУБЫХ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС ЗУБОСТРОГАЛЬНЫМИ РЕЗЦАМИ

### 4.1 Исследование динамических процессов возникающих в процессе, обработки прямозубых конических колес

Программой экспериментальных исследований предусматривалось измерение составляющих силы резания при обработке прямозубых конических колес из стали 45 ГОСТ 1050-88, внешний окружной модуль зуба  $m_e=3$ мм, число зубьев  $z_1=30$ . Время обработки одного зуба изменялось в диапазоне от 7,5 до 22,5 с/зуб; из стали 45 ГОСТ 1050-88, внешний окружной модуль зуба  $m_e=6$ мм, число зубьев  $z_1=16$ . Время обработки одного зуба изменялось в диапазоне от 18 до 47 с/зуб.

На рисунке 4.1 представлены данные, полученные при проведении эксперимента. Форма графика изменения сил резания, величина амплитуды и силы резания совпадает с теоретически прогнозируемой. Разница в значениях силы резания между аналитическими данными и экспериментальными составляет 4-10%. Причем, на 4% отличается минимальная сила  $P_x$ , а на 10% - максимальная сила  $P_z$ .



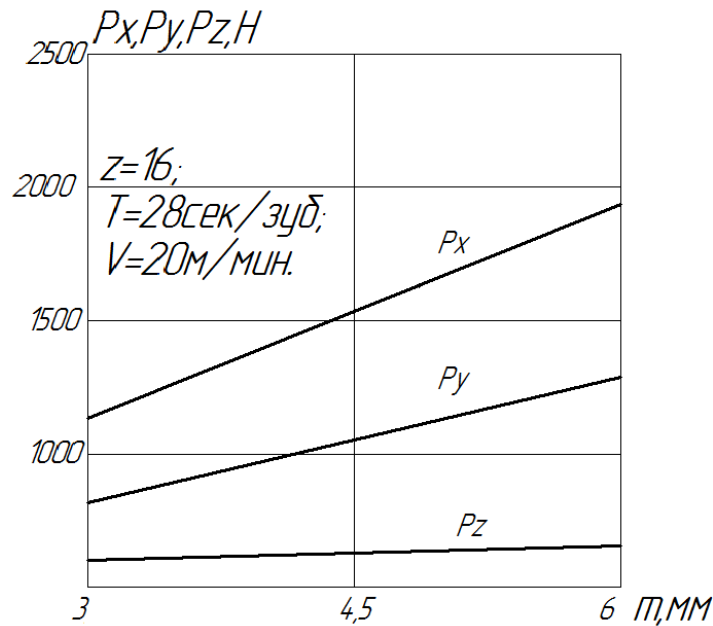
*Осевые составляющие силы резания  
 $P_x, P_y, P_z$ -рассчитанные аналитически  
 $P_x', P_y', P_z'$ -определенные экспериментально*

**Рисунок 4.1 – Результаты экспериментального исследования силы резания ( $m_e=3\text{мм}$ ,  $z_1=30$ ,  $T=18\text{с/зуб}$ ,  $V=20\text{м/мин}$ )**

#### **4.1.1 Влияние модуля нарезаемого колеса на составляющие силы резания**

Анализируя данные о зависимости осевых составляющих силы резания от модуля нарезаемых колес (рисунок 4.2), наблюдается значительное повышение сил с увеличением модуля. Такое повышение силы объясняется увеличением толщины срезаемого слоя металла (с ростом модуля растет ширина и толщина срезаемого слоя).





**Рисунок 4.2 – Зависимость осевых составляющих силы резания от модуля**

Были получены следующие зависимости осевых составляющих силы резания от модуля нарезаемого колеса при обработке прямозубых конических колес из стали 45:

$$P_z = C_{MZ} m^{1,61}; \quad (4.1)$$

$$P_y = C_{MY} m^{1,12}; \quad (4.2)$$

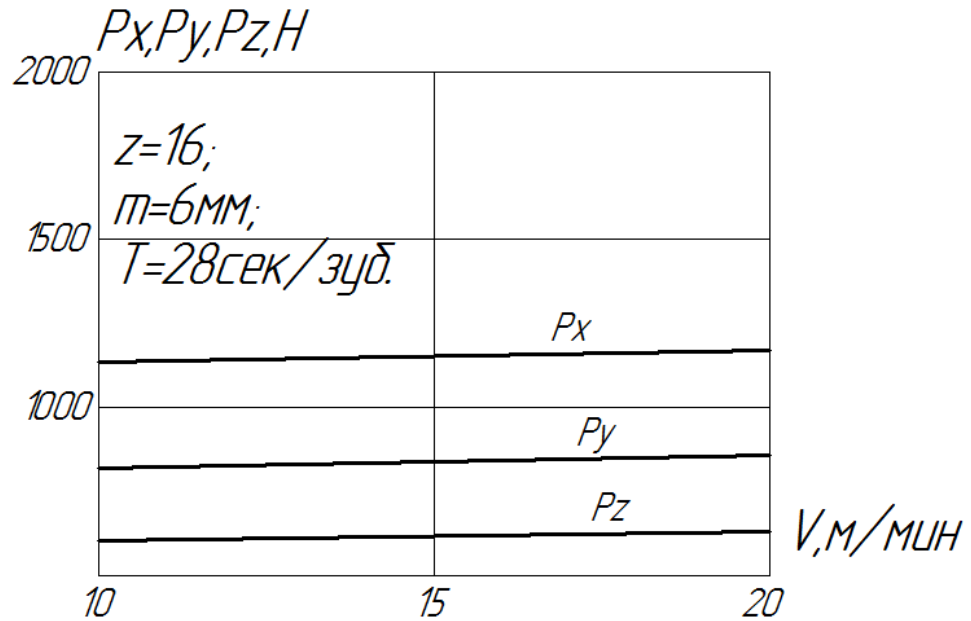
$$P_x = C_{MX} m^{0,52}. \quad (4.3)$$

#### 4.1.2 Влияние скорости резания на составляющие силы резания

Исследование влияния скорости резания на составляющие силы резания проводилось при зубострогании зубчатых колес из стали 45 (170 – 200 НВ),  $z_1 = 16$ ,  $m = 6$  мм. Скорость резания изменялась в пределах  $V = 10 - 20$  м/мин; осевая подача  $T = 28$  с/зуб.

Опыты показали, что скорость резания практически не влияет на составляющие силы резания (рисунок 4.3). Данный вывод может быть приемлем

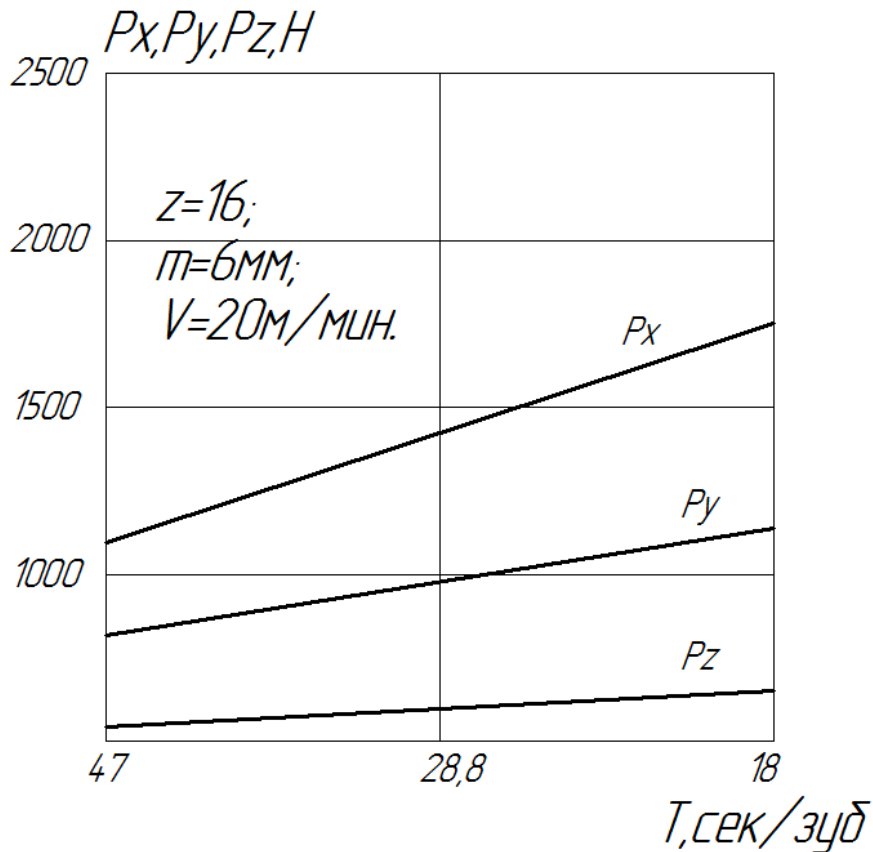
только для этого диапазона скоростей и не может быть принят для процессов зубообработки с высокими скоростями резания.



**Рисунок 4.3 – зависимость составляющих силы резания от скорости резания**

#### 4.1.3 Влияние окружной подачи на составляющие силы резания

Исследуя зависимость составляющих силы резания от времени обработки одного зуба (рисунок 4.4), можно отметить значительное повышение сил с уменьшением времени обработки. Такое повышение силы объясняется увеличением сечения среза. С уменьшением времени обработки растет ширина и толщина срезаемого слоя.



**Рисунок 4.4 – Зависимость составляющих силы резания от подачи**

По данным серии опытов и на основании результатов математической обработки были определены зависимости  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  от  $T$  (рисунок 4.4):

$$P_z = C_{MZ} m^{1,12}; \quad (4.1)$$

$$P_y = C_{MY} m^{0,81}; \quad (4.2)$$

$$P_x = C_{MX} m^{0,62}. \quad (4.3)$$

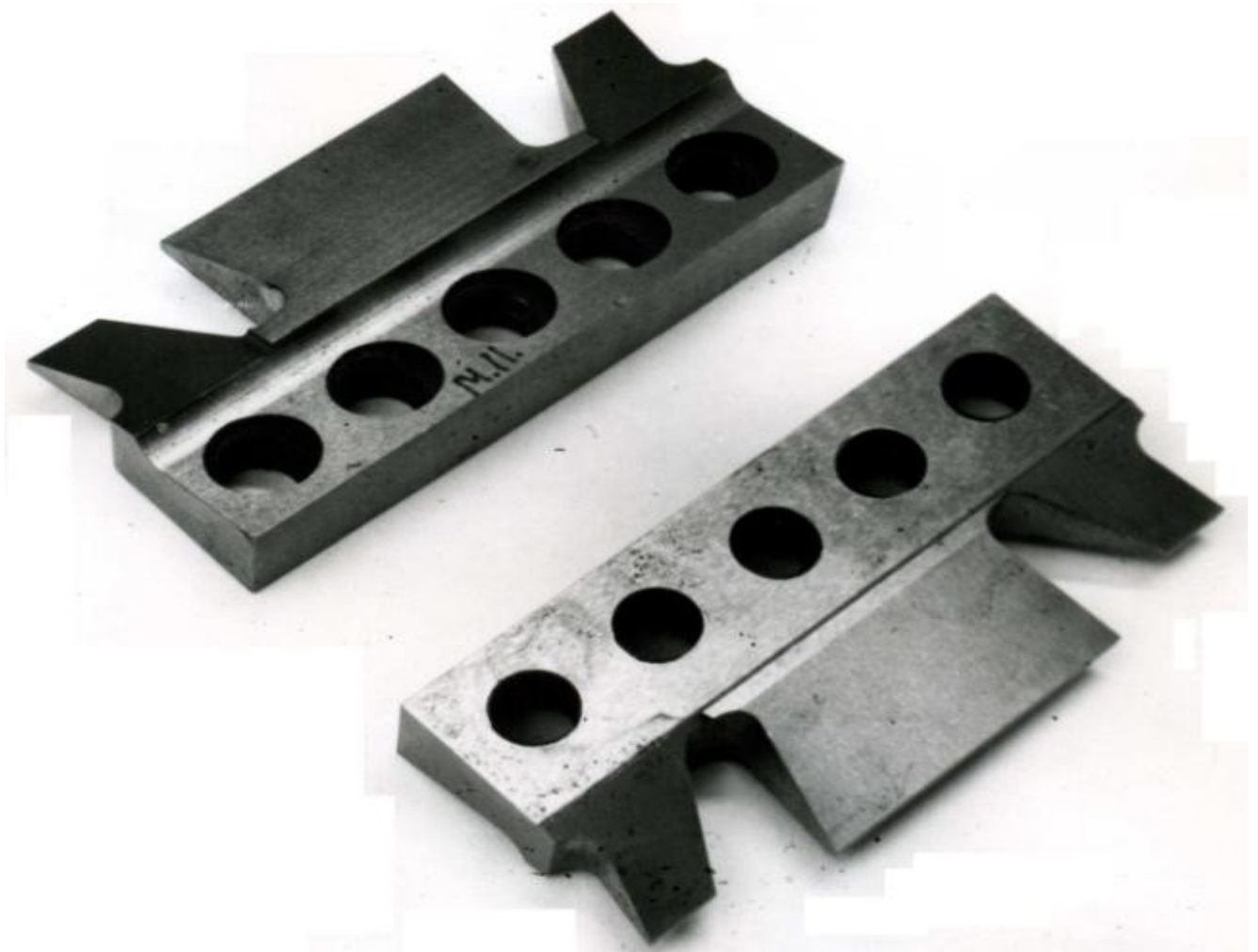
#### **4.2 Производственные испытания зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания**

Одновременными критериями оценки всякого металлорежущего инструмента являются стойкость, качество получаемые изделий и технологичность конструкции. Технологичность и стоимость инструмента

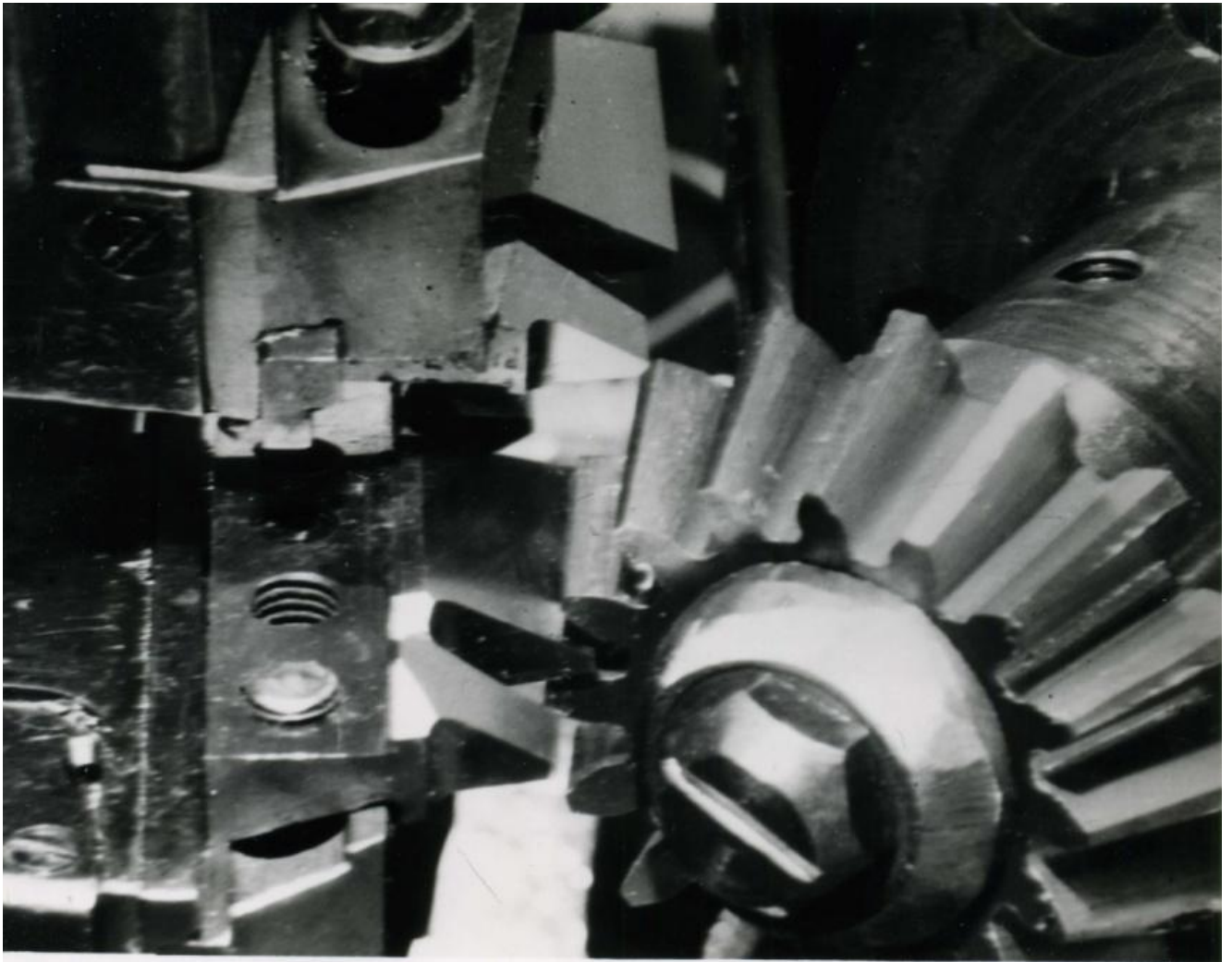
определяется его конструкцией. Стойкость инструмента и качество изделий требует экспериментальной проверки. Под качеством обрабатываемых изделий в данном случае понимается точность зубчатого венца и шероховатость профиля.

В соответствии с поставленной целью экспериментального исследования были изготовлены резцы с дифференцированными схемами резания (рисунок 4.5). Величины конструктивной подачи, которых, были рассчитаны во второй главе и экспериментально подтверждены методикой изложенной в подглаве 3.1.

На рисунке 4.6 представлен процесс нарезания прямозубого конического колеса специальными зубострогальными резцами.



**Рисунок 4.5 – Специальные зубострогальные резцы**



**Рисунок 4.6 – Обработка прямозубого конического колеса резцами с дифференциальной схемой резания**

Обработка зубчатых конических колес ( $m=6$  мм,  $z=16$ , ширина венца  $b=30$  мм, материал – сталь 45) производилась следующими инструментами: зубострогальными резцами открытого типа с параллельным и односторонним дифференцированием срезаемого слоя и резцами закрытого типа с параллельным дифференцированием срезаемого слоя при следующих режимах обработки:  $T = 0,3$  мин/зуб;  $0,48$  мин/зуб;  $0,784$  мин/зуб,  $V=20$  м/мин. На каждом из указанных режимов резания было нарезано по три изделия, причем приведенная конструктивная подача при этом соответствовала оптимальной. Исходя из условия наибольшей производительности обработки при сохранении точностных параметров изделий, была выбрана следующая подача: при обработке конических зубчатых колес резцами открытого типа с

параллельным и распределенным дифференцированием срезаемого слоя и закрытого типа, с параллельным дифференцированием срезаемого слоя  $T=0,48$  мин/зуб.

Таким образом сравнительные данные по режимам резания для базового и внедряемого варианта представлены в таблице 4.1.

**Таблица 4.1 – Сравнительные данные по режимам резания**

инструмент	число проходов	круговая подача, мм/дв.ход	скорость резания, м/мин	машинное время, мин
универсальные резцы	2	0,784	20	22
резцы с дифференциальными схемами резания	1	0,48	20	12,2

Анализ результатов испытаний показывает, что производительность процесса обработки прямозубого конического венца возрастает в 1,8 раза. Это происходит за счет увеличения окружной подачи и сокращения числа проходов необходимых для обработки профиля.

### 4.3 Исследование износа зубострогальных резцов

Анализ экспериментальных данных показывает, что износ резца по периметру режущего лезвия неодинаковый. Наибольший износ имеет задняя поверхность участка выходной режущей кромки чистовой ступени. Именно этот элемент был взят за основу для определения износостойкости инструмента в целом.

Исследование износа зубострогальных резцов производилось на станке модели 5С286П.

Программой экспериментальных работ предусматривалось исследование износа инструмента без снятия инструмента со станка:

– зубчатых колес из стали 45 ГОСТ 1050 – 88,  $z_1 = 16$ , внешний окружной модуль зуба  $m_e = 6$  мм; ширина зубчатого венца - 30 мм.

– зубострогальными резцами ГОСТ 5392-80 тип 4; зубострогальными резцами с параллельной схемой резания; зубострогальными резцами с распределенной схемой резания;

– при скоростях резания  $V = 15-20$  м/мин;

– при времени обработки одного зуба  $T = 18-47$  с/зуб.

Проверка твердости образцов осуществлялась на приборе (твердомере) ТШ – 2М. Твердость образцов находилась в пределах  $170 \div 215$  НВ.

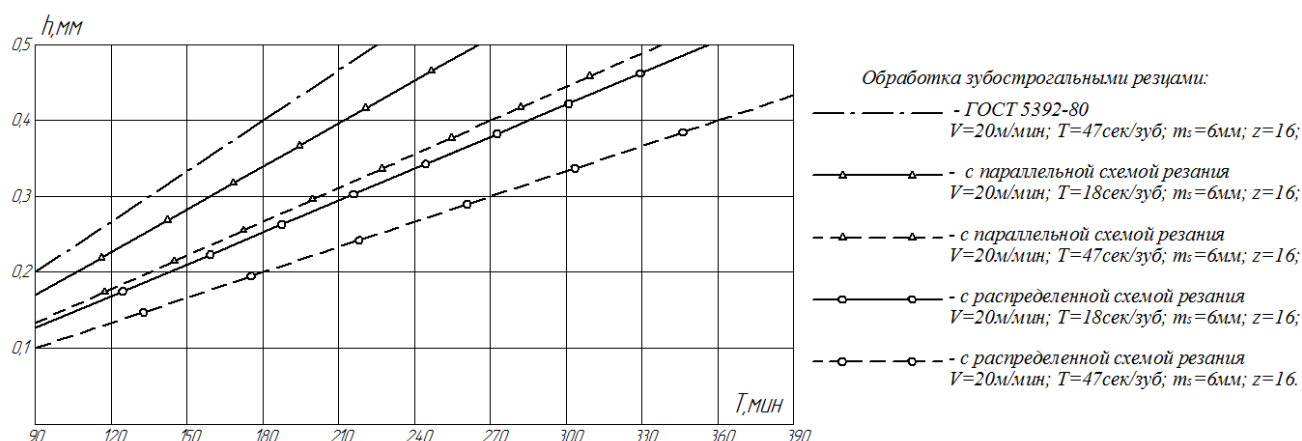
Нарезание зубьев деталей производилось с применением в качестве ТСОС – машинного масла 3 – 5 л/мин.

При проведении экспериментального исследования через определенные промежутки времени измеряли максимальный износ задних поверхностей резцов с помощью бинокулярной лупы с ценой деления 0,038 мм.

Шероховатость передней поверхностей режущих кромок соответствовала  $Ra = 0,16$ , задней  $Ra = 0,32$ .

В процессе проведения эксперимента устанавливалось влияние конструкции и времени обработки одного зуба на стойкость инструмента.

Как и ожидалось, лимитирующий износ происходил по задней поверхности выходной кромки. По результатам измерений строились кривые износа (рисунок 4.7). Критерием прекращения эксперимента являлось достижение критического износа задней поверхности резца.



**Рисунок 4.7 – Зависимость износа зубострогальных резцов от конструкции инструмента и времени обработки одного зуба**

Анализ результатов измерений показывает, что стойкость инструментов с параллельной схемой резания увеличивается по сравнению с обычными резцами в 1,2 – 1,5 раза.

Стойкость инструментов с распределенной схемой резания увеличивается по сравнению с обычными резцами в 1,6 – 2 раза.

Это объясняется тем, что при работе резца с дифференцированными схемами создаются благоприятные условия резания, влияющие на лимитирующую по стойкости чистовую ступень резца, который при параллельной схеме резания имеет одинаковую толщину срезаемых слоев металла вдоль режущих лезвий, что обусловлено конструкцией инструмента. Деформация срезаемого в процессе слоя уменьшается, и износ по боковым режущим лезвиям выравнивается.

При распределенной схеме резания геометрия слоев металла, срезаемых вершинным лезвием черновой ступени и боковыми режущими лезвиями чистовой ступени, значительно упрощается, что и предопределяет увеличение стойкости инструмента в этом случае.



#### **4.4 Экспериментальное исследование шероховатости зубьев прямоугольного конического колеса**

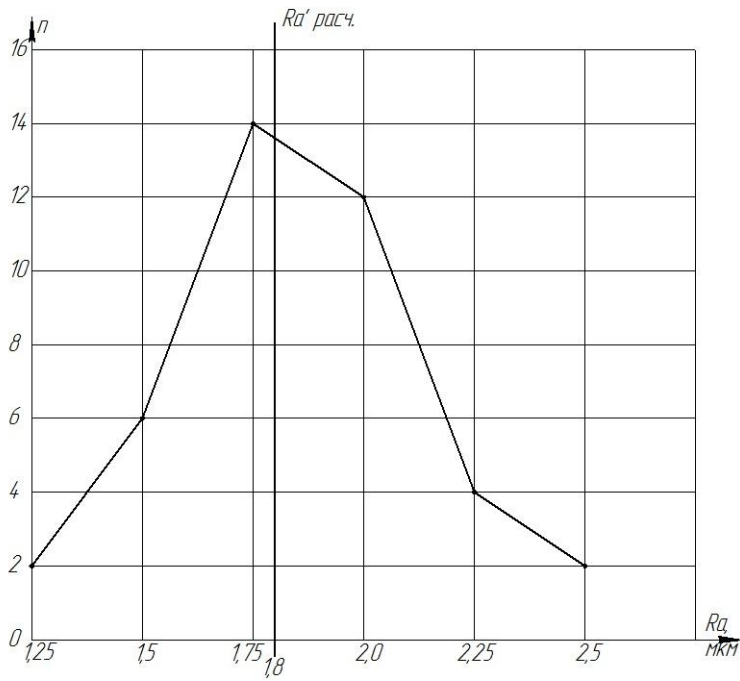
Результаты измерений представлены в виде полигонных кривых на рисунках 4.8 а, б, в. Вертикальной линией на рисунках показаны результаты аналитического расчета параметров шероховатости для различных вариантов обработки. Анализ теоретически определенных и экспериментальных значений позволяет сделать вывод об адекватности разработанной математической модели определение величины шероховатости возникающей в процессе обработки венца прямоугольного конического колеса.

Результаты измерений и оценка существенности различия между средними значениями показателей точности с помощью критерия Стьюдента приведены в приложении В.

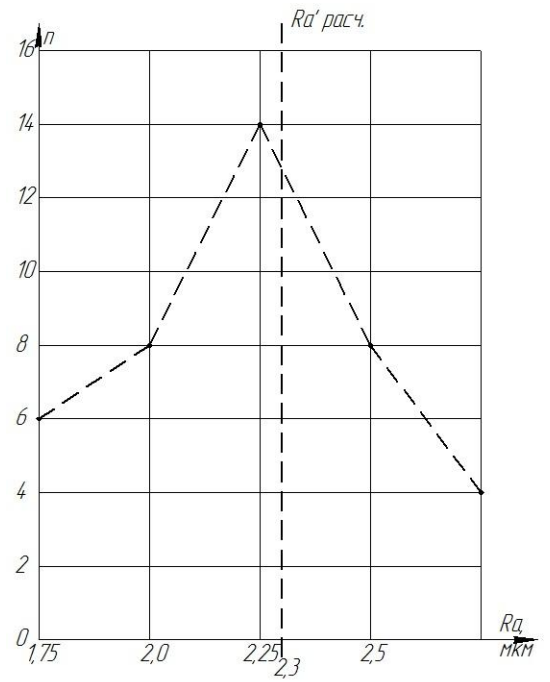
Анализ результатов измерений показывает, что шероховатость зубьев обработанных специальным инструментом с параллельной схемой резания сокращается по сравнению с обычными резцами на 20%.

Шероховатость зубьев обработанных специальным инструментом с распределенной схемой резания сокращается по сравнению с обычными резцами на 10%.

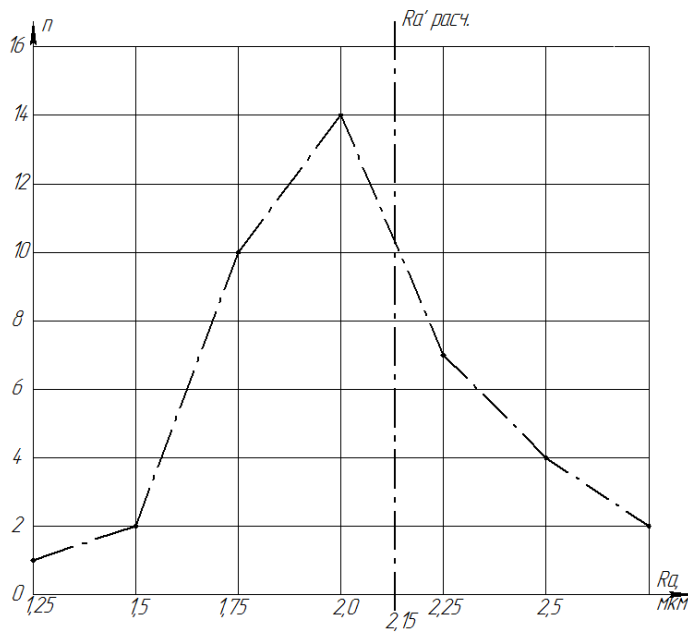
Это объясняется тем, что при использовании инструментов с дифференцированными схемами резания создаются благоприятные условия резания, влияющие на шероховатость обрабатываемой поверхности.



а



б



в

**Рисунок 4.8 – Шероховатость боковой поверхности зубьев**

**Зубострогание производилось резцами:**

**а – с дифференцированием по параллельной схеме;**

**б – ГОСТ 5392-80;**

**в - с дифференцированием по распределенной схеме**

#### 4.5 Экспериментальное исследование точности прямозубых конических колес

Критерий точности является одним из основополагающих для управления процессом обработки прямозубых конических колес зубострогальными резцами и имеет важное значение при выборе оптимальных параметров технологической системы.

Обработка конических зубчатых колес в условиях предприятия производится на станке модели 5С286П, имеющих определенный физический и моральный износ. Поэтому, несмотря на снижение усилий резания при обработке инструментами с дифференцированными схемами резания, величина подач в значительной степени лимитировалась жесткостью станка, оказывающей большое влияние на точность изделий и не позволяющей увеличить производительность процесса обработки.

В процессе производственных испытаний обрабатывались прямозубые конические колеса ( $m=6$  мм,  $Z=16$ , ширина венца  $B=30$  мм, материал - сталь 45). При следующих режимах резания: время обработки одного зуба колеса –  $T=0,3$  мин/зуб;  $0,48$  мин/зуб;  $0,784$  мин/зуб,  $V=20$  м/мин. Нарезание зубьев деталей производилось с применением в качестве ТСОС - машинного масла 3-5 л/мин.

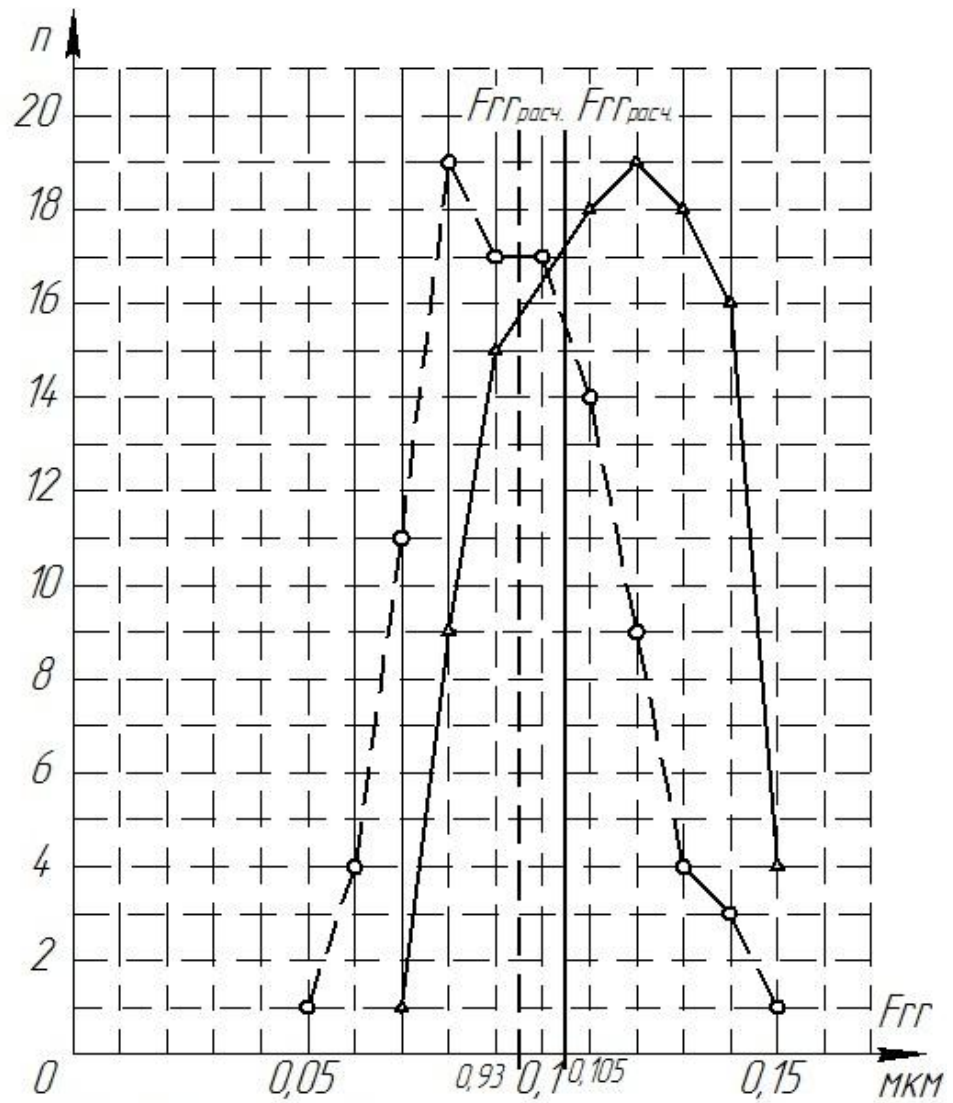
На каждом из указанных режимов резания было нарезано по три изделия, причем приведенная конструктивная подача при этом соответствовала оптимальной. Исходя из условия сохранения производительности обработки при увеличении точностных параметров изделий, была выбрана следующая подача: при обработке конических зубчатых колес резцами открытого типа с параллельным и распределенным дифференцированием срезаемого слоя и закрытого типа, с параллельным дифференцированием срезаемого слоя  $T=0,48$  мин/зуб. Далее на выбранных режимах обрабатывалась партия деталей из ста штук, на которой затем измерялись точностные показатели. Сравнительные данные по режимам резания приведены в таблице 4.2.

**Таблица 4.2 – Сравнительные данные по режимам резания**

инструмент	число проходов	круговая подача, мм/дв.ход	скорость резания, м/мин	машинное время, мин
универсальные резцы	2	0,784	20	22
резцы с дифференциальными схемами резания	2	0,48	20	21,8

Результаты измерений представлены в виде полигонных кривых.

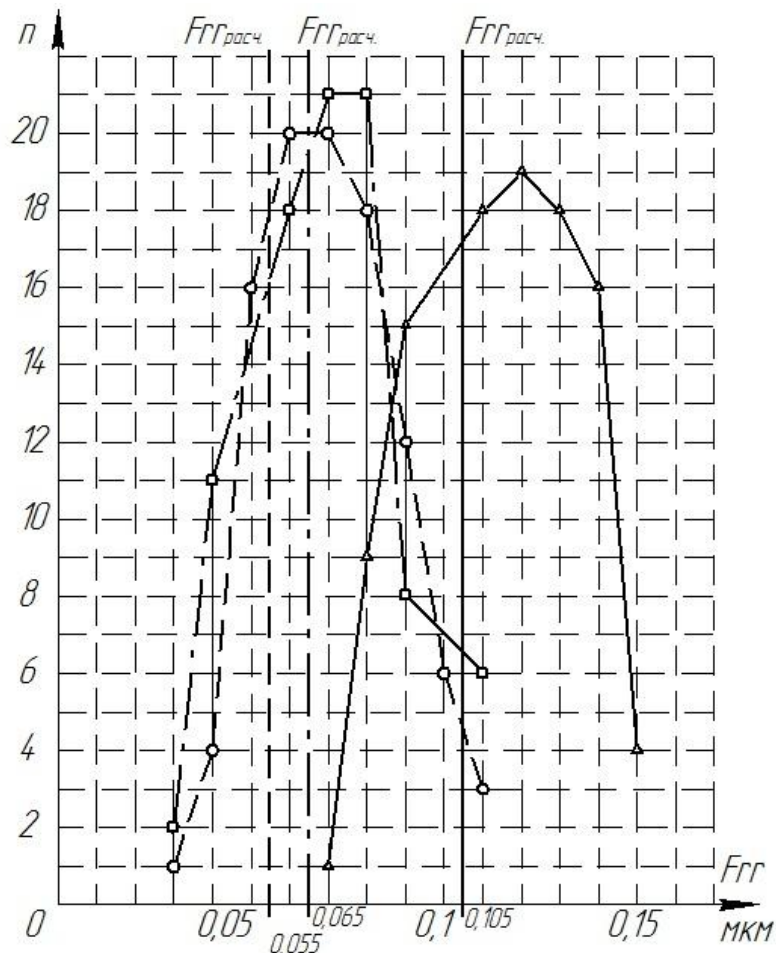
Степень кинематической точности определяем по радиальному биению зубчатого венца (рисунки 4.9, 4.10), степень плавности работы по показателю отклонения шага зацепления (рисунок 4.11), а контакт зубьев по длине и высоте пятна контакта (рисунок 4.12). Результаты измерений и оценка существенности различия между средними значениями показателей точности с помощью критерия Стьюдента приведены в приложении Б. Различия между средними экспериментальными значениями показателей точности и значениями, полученными аналитически, не превышают 15%, что подтверждает адекватность математической модели процесса.



Обработка зубострогальными резцами:

- ▲ — ГОСТ 5392-80;
- — с параллельным дифференцированием среземого слоя закрытого типа.

**Рисунок 4.9 – Радиальное биение зубчатого венца конической шестерни**



Обработка зубострогальными резцами:

- ▲ — резцами ГОСТ 5392-80;
- — с параллельным дифференцированием срезового слоя открытого типа;
- — с распределенным дифференцированием срезового слоя открытого типа.

**Рисунок 4.10 – Радиальное биение зубчатого венца конической шестерни**

Различие средних показателей радиального биения зубчатого венца существенно (по критерию Стьюдента). Среднее значение радиального биения при использовании резцов закрытого типа уменьшается на 18% по сравнению со стандартными резцами.

Среднее значение радиального биение при использовании резцов открытого типа уменьшается более чем на 30% по сравнению со стандартными резцами. Закрытый тип резцов увеличивает биение зубчатого венца на 10 - 12 %

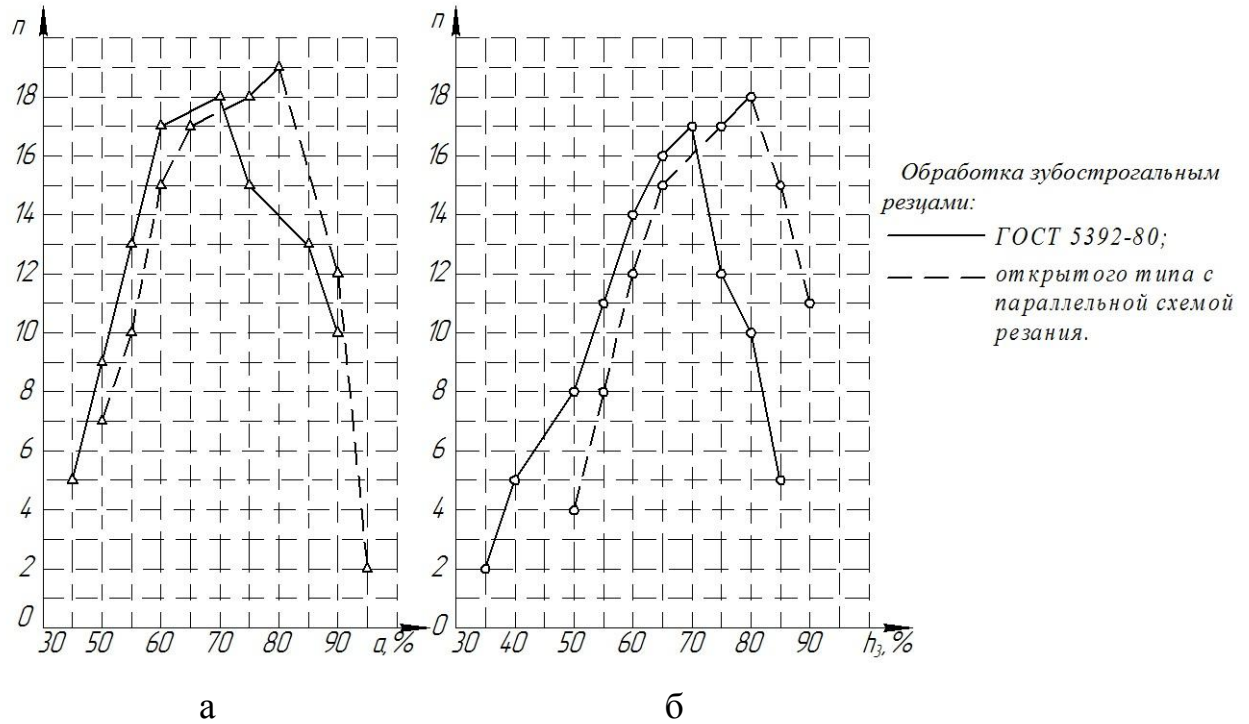
по сравнению с открытыми, а параллельная схема резания дает более стабильные показатели точности по сравнению с распределенной.



**Рисунок 4.11 – Отклонение шага зацепления**

Различие средних значений отклонения шага зацепления зубчатого венца существенно (по критерию Стьюдента). Среднее значение при использовании резцов закрытого типа уменьшается на 22% по сравнению со стандартными резцами.

Среднее значение радиального биение при использовании резцов открытого типа уменьшается более чем на 40% по сравнению со стандартными резцами.



**Рисунок 4.12 – Параметры пятна контакта конической шестерни**

(*a* – длина пятна контакта, *b* – высота пятна контакта)

Размер пятна контакта профиля конического зубчатого колеса при обработке резцами с дифференцированными схемами резания увеличивается более чем на 20%.

Анализируя полученные кривые, получаем: обработанные стандартными резцами колеса имеют степень точности 9-9-8 (ГОСТ 1758-81); обработанные специальными резцами колеса имеют степень точности 8-8-7. Таким образом, использование резцов с дифференцированными схемами резания позволяет повысить точность обрабатываемых колес на одну степень при сохранении производительности процесса.



## 5 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

### 5.1 Реализация результатов исследований

Результаты исследований показали, что имеется резерв для повышения производительности обработки прямозубых конических колес. По результатам проведенных исследований были предложены режимы обработки прямозубых конических колес зубострогальными резцами с дифференцированными схемами резания при которых точностные показатели сохранялись, а производительность процесса увеличивалась.

Число двойных ходов резцов  $n'$ , необходимое для обработки профиля одного зуба колеса:

$$n' = K \frac{h}{M}, \quad (5.1)$$

где  $h$  – полная высота зуба на внешнем торце, мм;

$M$  – ширина реза одного резца, мм;

$K$  – коэффициент зависящий от схемы распределения срезаемого слоя.

Коэффициент зависящий от схемы распределения срезаемого слоя можно определить по таблице 5.1.

**Таблица 5.1 – Рекомендуемый коэффициент  $K$  для резцов с дифференцированными схемами резания**

Тип резцов	Схема распределения срезаемого слоя	
	параллельная	распределенная
Открытый	0,9	1
закрытый	0,75	0,85

Ширину реза  $M$  одного резца при чистовом нарезании прямозубых конических колес резцами с дифференцированными схемами резания можно определить по таблице 5.2.

**Таблица 5.2 – Рекомендуемая ширина реза  $M$ , мм, одного резца при чистовом нарезании прямозубых конических колес специальными резцами**

Модуль, мм	Твердость обрабатываемого материала, <i>HВ</i>		
	170-223	223-269	269-321
1	0,213	0,178	0,140
2	0,249	0,195	0,159
3	0,284	0,213	0,178
4	0,322	0,250	0,213
5	0,374	0,355	0,322
6	0,427	0,390	0,357
7	0,480	0,427	0,392
8	0,532	0,462	0,427

При предъявлении высоких требований к качеству поверхности, ширину реза  $M$  необходимо уменьшить на 25%. Если требования к шероховатости поверхности невысокие, ширину площадки резания и скорость резания необходимо увеличить на 20%.

## 5.2 Расчет экономической эффективности.

Результаты исследований показали, что имеется резерв повышения производительности при зубострогании прямозубых за счет применения специальных резцов с дифференцированными схемами резания и сокращения времени обработки одного зуба.

Формула для определения основного времени при зубострогании прямозубого конического колеса выглядит следующим образом:

$$t_0 = \frac{z t_z}{60}, \quad (5.2)$$

где  $t_z$  – время обработки одного зуба, с,

$z$  – количество обрабатываемых зубьев.

При снижении времени обработки одного зуба время на обработку всего зубчатого венца будет снижаться.

При производстве изделий «Шестерня» (черт. ПЩО – 1,8.01.08.001), «Колесо» (черт. 1,8.01.08.002) на станке мод. 5С286П по режимам резания, применяемым на предприятии ООО «Орелстроймаш» основное время обработки составляло: «Шестерня»– 22 мин., «Колесо» - 28 мин, по рекомендуемым режимам: «Шестерня» – 8,8 мин., «Колесо» – 11 мин.

Далее приведен расчет экономического эффекта по методике, принятой на предприятии.

Снижение основного времени на одну деталь:

$$\Delta\tau_1=22 - 8,8 =13,2 \text{ мин};$$

$$\Delta\tau_2=28 - 11 =17 \text{ мин.}$$

Снижение основного времени на годовую программу (1000 в год каждой детали):

$$\Delta\tau_{\Sigma} = \frac{30,2 \cdot 2000}{60} = 1006,7 \text{ часов.}$$

При этом же вспомогательном времени экономия заработной платы производственных рабочих составит:

$$\Delta C_z = 108,1 \cdot 1006,7 = 108824 \text{ руб.}$$

Экономия заработной платы с учетом дополнительной надбавки (40% от основной), начислений по социальному страхованию и отпускных (36,5% от суммы основной и дополнительной) составляет 207 962 руб.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В представленной научно-квалификационной работе изложена совокупность технических и технологических решений, направленных на повышение производительности и точности, а также снижение шероховатости обработки прямозубых конических колес зубостроганием за счет использования резцов с дифференцированными схемами резания и управления технологическими параметрами процесса.

2. На основе комплексного анализа геометрических, кинематических и силовых параметров зубострогания прямозубых конических колес разработана математическая модель процесса позволяющая связать точность и шероховатость обрабатываемой поверхности с параметрами технологической системы (оборудования, изделия, инструмента) и режимами обработки. Экспериментально подтверждено, что различия между расчетными и экспериментальными значениями параметров точности и шероховатости не превышают 15%, что подтверждает адекватность полученных зависимостей.

3. Разработан алгоритм, позволяющий управлять зубостроганием прямозубых конических колес, основанный на использовании полученных зависимостей процесса обработки. Использование данного алгоритма позволяет как прогнозировать точность и шероховатость обрабатываемого изделия, так и определять режимы обработки и конструкцию инструмента в зависимости от требуемых параметров качества (точности и шероховатости).

4. Предложены конструкции специального инструмента – резцов с дифференцированными схемами резания, позволяющих снизить амплитуду силы резания и равномерно её перераспределить, а также две схемы разделения срезаемого слоя по ступеням режущего инструмента – параллельная и распределенная.

Рассчитаны аналитически и подтверждены экспериментально величины конструктивных подач предложенных резцов:

- по вершинному режущему лезвию  $S_{КПР.В} = (1,2 \div 1,3) \frac{1}{T}$ ;

- по боковым режущим лезвиям  $S_{КПР.Б} = (0,9 \div 1,0) \frac{1}{T}$ .

5. Разработаны практические рекомендации по выбору режимов резания для обработки прямозубых конических колес зубострогальными резцами с дифференцированными схемами резания, направленные на повышение производительности процесса. Установлено:

- производительность процесса зубострогания прямозубых конических колес при использовании инструмента с дифференцированными схемами резания повышается в 1,5 – 1,8 раза при сохранении точностных параметров за счет увеличения подачи и сокращения числа проходов;

- использование резцов с дифференцированными схемами резания открытого типа позволяет повысить точность обрабатываемых колес на одну степень при сохранении производительности процесса за счет снижения амплитуды силы резания и более равномерного распределения нагрузки по ступеням инструмента. Закрытый тип резцов снижает кинематическую точность на 15% сравнению с открытым;

- стойкость резцов с параллельной схемой резания увеличивается по сравнению с обычными в 1,2 – 1,5 раза. Стойкость резцов с распределенной схемой резания увеличивается по сравнению с обычными в 1,6 – 2 раза.

6. Произведена апробация результатов исследования на предприятии ООО «Орелстоймаш». Внедрен прогрессивный технологический процесс, основанный на использовании алгоритма управления процессом зубострогания прямозубых конических колес, включающий использование специальных резцов с рекомендуемой конструктивной подачей и предложенные режимы резания. Экономический эффект от внедрения более 200 тыс. руб. в год.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $z_1$  – число зубьев нарезаемого колеса;  
 $\alpha$  – задний угол инструмента, рад;  
 $\gamma$  – передний угол инструмента, рад;  
 $\Delta\gamma$  – кинематическое изменение переднего угла, рад;  
 $\Delta\alpha$  – кинематическое изменение заднего угла, рад;  
 $a$  – толщина срезаемого слоя, м;  
 $T$  – время обработки одного зуба, с;  
 $n$  – частота движения резцов, дв. ход./мин;  
 $M$  – ширина реза одного резца, м;  
 $V$  – скорость резания, м/мин;  
 $L_e$  – наружная длина образующей начального конуса, м;  
 $\varphi$  – угол начального конуса, рад;  
 $\varphi_e$  – угол наружного конуса, рад;  
 $\varphi_i$  – угол внутреннего конуса, рад;  
 $\gamma$  – угол ножки зуба, рад;  
 $m$  – модуль зубчатого колеса, м;  
 $b$  – ширина зубчатого венца, м;  
 $\Gamma_n$  – угол наклона резцедержателя, рад;  
 $\theta$  – угол поворота производящего колеса, необходимый для полной обработки профиля зуба нарезаемого колеса, рад;  
 $h_1$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, м;  
 $h_2$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, м;  
 $h_3$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки, м;

$h_4$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная, м;

$l$  – параметр движения резания, м;

$\Phi$  – угол поворота резца, рад;

$\Delta h$  – параметр режущего лезвия, м.

$\Delta l$  – элемент режущего лезвия, м.

$K_{cl}$  – коэффициент, учитывающий сложность формирования стружки;

$j_{D0}, j_{D1}$  – динамическая жесткость технологической системы, обеспечивающей крепление и необходимые кинематические перемещения резца и заготовки, Н/м;

$E$  – модуль упругости, МПа;

$J_0, J_1$  – сосредоточенный момент инерции сечения державки резца и оправки колеса, кг · м<sup>2</sup>;

$j_{BZ}, j_{AZ}$  – жесткость опор оправки стола, Н/м;

$j_{заг}$  – жесткость заготовки, Н/м;

$l_{опр}$  – длина оправки, м;

$l_0, l_1$  – расстояние от точки контакта до опоры резцедержателя и бабки станка, м.

$\tau_{сдв}$  – прочность обрабатываемого материала на сдвиг, МПа;

$\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала, МПа.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов [Текст] / В.Ф.Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
2. Голембиевский, А.И. Системный анализ процесса зубодолбления [Текст] / А.И. Голембиевский; под ред. В.А. Петрова.-Мн.: Навука і тэхніка, 1993. – 152с.
3. Горчаков, Д.М. Динамические деформации и погрешности при зубонарезании [Текст] / Д.М. Горчаков, Г.К. Кештов, А.П. Попов //Труды Сев.-Кавк. горно-металлургического института. – Вып. 27. – Орджоникидзе: 1970. – С.63–72.
4. Горчаков, Л.М. О возмущающих воздействиях при прерывистом резании [Текст] / Л.М. Горчаков, К.С. Колев //Труды Сев.-Кавк. горнометаллургического института. – Вып. 27. – Орджоникидзе: 1970. – С.3–8.
5. Гребеньков, В.И. Экспериментальные динамические и стойкостные исследования при зубодолблении чугуна: автореф. дис. канд. техн. наук. – Волгоград, 1966. – 20с.
6. Гусева, В.В. Силы резания и стойкость долбяков при зубодолблении [Текст] / В.В. Гусева //Вестник машиностроения. – 1958. – № 5. – С.57–60.
7. Дальский, А.М. Ступени технологического обновления [Текст] / А.М. Дальский // Приложение к журналу «Справочник. Инженерный журнал». – 2010. - №9. – С.5-7.
8. Дальский, А.М. Направленное формирование показателей качества [Текст] / А.М. Дальский, А.С. Васильев, А.И Кондаков // Образование через науку: сборник докладов Международного симпозиума – МГТУ им. Н.Э. Баумана – М: 2006. – С.70–76.
9. Даниелян, А.М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов [Текст] / А.М. Даниелян. – М.: Машгиз, 1954. – 275 с.
10. Евдокимов, В.А. Совершенствование процесса зубодолбления [Текст]/ В.А. Евдокимов, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов.– Орел: Приокское кн.изд.,1974.– 36с.



11. Евдокимов, В.А. Вариант расчета силы резания при различных методах обработки с помощью ЭВМ [Текст] / В.А. Евдокимов, А.С. Тарапанов // Совершенствование методов обработки металлов резанием. – Орел: Орловское областное правление НТО МАШПРОМ, 1981.
12. Калашников, С.Н. Производство зубчатых колес [Текст] / С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган – М.: Машиностроение, 1990. – 464с.
13. Калашников, А.С. Технология изготовления зубчатых колес [Текст] / А.С. Калашников – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.
14. Канатников, Н.В. Математическая модель схемы формообразования профиля зуба прямозубого конического колеса зубострогальными резцами. [Текст] / А.Н. Дерли, Н.В. Канатников // Фундаментальный и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №6(290). – С.37-42.
15. Канатников, Н.В. Определение составляющих силы резания возникающей в процессе нарезания конического прямозубого колеса инструментом с прямолинейными режущими кромками. [Текст] / Н.В. Канатников, А.В. Хандожко, Г.А. Харламов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №6/3(290). – С.26-34.
16. Канатников, Н.В. Повышение эффективности обработки конических зубчатых колес среднего модуля. [Текст] / Н.В. Канатников, А.А. Ревенков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №3/3(293). – С.24-33.
17. Канатников, Н.В. Влияние угла наклона тыловой кромки зубострогальных резцов на силу резания. [Текст] / Н.В. Канатников, Г.А. Харламов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №2/6(292). – С.33-40.
18. Канатников, Н.В. Зубострогальные резцы с дифференцированными схемами резания. [Текст] / А.В. Канатников, Н.В. Канатников, Г.А. Харламов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – №3-2(299). – С.136-141.

19. Канатников, Н.В. Определение средней высоты профиля шероховатости, возникающей в процессе зубострогания конических зубчатых колес. [Текст] / Н.В. Канатников, Г.А. Харламов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 8 – 2013 – С.117-121.

20. Канатников, Н.В. Производственные испытания зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания. [Текст] / Н.В. Канатников, А.С. Тарапанов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – №1. – С.40-45.

21. Канатников, Н.В. Влияние геометрических параметров зубострогального резца на осевые составляющие силы резания [Текст] / Н.В. Канатников, Г.А. Харламов // «Фундаментальные проблемы техники и технологии» «Технология 2012» Материалы XV Международной научно-технической конференции. Орел: УНПК – 2012 – с.183.

22. Канатников, Н.В. Определение погрешностей изготовления прямозубых конических колес, вызванных деформацией технологической системы. [Текст] / С.И. Брусов, Н.В. Канатников, Г.А. Харламов // «Высокие технологии в машиностроении». Материалы Международной научно-технической конференции. Курган: КГУ – 2012 – С. 51-55.

23. Канатников, Н.В. Возможности повышения производительности процесса зубострогания конических зубчатых колес. [Текст] / А.В. Канатников, Н.В. Канатников, Г.А. Харламов, // «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства». Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции. Орел: УНПК – 2013 – С.30-32.

24. Кедринский, В.Н. Станки для обработки конических зубчатых колес. [Текст]/ Кедринский В.Н., Писманик К.М. М.: Машиностроение, 1967. – 588с.

25. Кенинг, В. Стружкообразование и износ инструмента при зубодолблении [Текст] / В. Кенинг, К. Бузакис //Экспресс-информация, режущие инструменты. – М.: ВИНТИ, 1978. – С.1–12.

26. Кирсанов, Г.Н. Проектирование инструментов [Текст] / Г.Н. Кирсанов. – М.:Мосстанкин, 1978. – 69с.

27. Кичкин, Б.К. Особенности стружкообразования при резании инструментом с цилиндрической передней поверхностью [Текст] / Б.К. Кичкин, А.С. Тарапанов // Исследование в области инструментального производства и обработки металлов резанием. – Тула: ТПИ, 1982. – С.18-22.
28. Кован, В.М. Справочное пособие: Расчет припусков на обработку в машиностроении [Текст] / В.М. Кован. М.: Машгиз, 1953. – 320 с.
29. Колев, К.С. Выбор оптимальных режимов резания с учетом заданной точности обработки [Текст] / К.С. Колев, Л.М. Горчаков // Труды Сев.-Кавк. горнометаллургического института. – Вып. 27. – Орджоникидзе: 1970. – С. 49-53.
30. Колев, К.С. Определение усилий резания и подач при зубонарезании с учетом заданной точности обработки [Текст] / К.С. Колев // Вестник машиностроения. – 1966. – №5. – С. 60–64.
31. Колев, К.С. Точность обработки и режимы резания. 3-е изд., перераб. и допол. / К.С. Колев, Л.М. Горчаков – М.: Машиностроение, 1976. – 145 с.
32. Колесников, В.Г. Исследование силы резания при зубодолблении, точности и чистоты поверхности профиля зубьев стальных колес, взрезанных долбьями: автореф. дис. канд. техн. наук. – Волгоград, 1969. – 20с.
33. Кропотов, Г.А. Исследование процесса зубодолбления колес из жаропрочных и титановых сплавов: автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1965. – 20с.
34. Кропотов, Г.А. Усилия резания и температура при зубодолблении колес из жаропрочных сплавов [Текст] / Г.А. Кропотов // Станки и инструмент. – 1965. – №5. – С.24-27.
35. Курдов, Б.А. Расшифровка цилиндрических прямозубых колес, нарезанных долбьями [Текст] / Б.А. Курдов // Известия вузов. Машиностроение. – 1965. – №8. – С.16-22.
36. Лашнев, С.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ [Текст] / С.И. Лашнев, М.И. Юликов – М.: Машиностроение, 1980. – 208с.

37. Лашнев, С. И. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами. [Текст] / С.И. Лашнев, А.Н. Борисов, С.Г. Емельянов. //: Монография. -Курск: Курск, гос. техн. ун-т, 1997. – 391 с.
38. Лашнев, С.И. Геометрическая модель формирования поверхностей режущими инструментами [Текст] / С.И. Лашнев, А.Н. Борисов // СТИН. – 1995. – №4. – С. 22 - 26.
39. Лашнев, С.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ. [Текст] / С.И. Лашнев, М.И. Юликов. – М.: Машиностроение, 1980. – 208 с.
40. Левин, И.А. Повышение стойкости зуборезных долбяков за счет корректировки профиля кулака радиальной подачи [Текст] / И.А. Левин // Кн. усовершенствование зубообрабатывающего инструмента. – М.: НИИМАШ. – 1969. – С.471-474.
41. Матюшин, В.М. Зубодолбление [Текст] / В.М. Матюшин – М.: Машгиз, 1953. – 185 с.
42. Матюшин, В.М. Применение зуборезных долбяков [Текст] / В.М. Матюшин // Вестник машиностроения. – 1953. – № 8. – С.12-18.
43. Медведицков, С.Н., Харламова Г.С., Чурбаков В.Ф. Об особенностях процесса стружкообразования при работе многокромочного инструмента [Текст] / С.Н. Медведицков, Г.С. Харламова, В.Ф. Чурбаков //Труды Волгоградского политехнического института. Технология машиностроения: Волгоград. – 1971. – С.257–245.
44. Металлорежущие инструменты [Текст] / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
45. Овсянникова, И.В. Управление процессом формирования зубьев червячных и спиройдных колес на основе анализа виртуальных моделей [Текст]/ И.В. Овсянникова, И.Н. Сухарский, А.С. Тарапанов – М.: Спектр, 2013. – 183 с.
46. Овумян, Г.Г. Справочник зубореза [Текст] / Г.Г. Овумян, Я.И. Адам. – М.: Машиностроение, 1983. – 223с.
47. Овумян, Г.Г. Повышение производительности и качества чистового

зубонарезания [Текст] / Г.Г. Овумян, Е.В. Езерский, С.А. Хухрий. – М.: Машиностроение, 1979. – 223с.

48. Палей, М.И. Технология производства металлорежущих инструментов [Текст] / М.И. Палей. – М.: Машиностроение, 1982. – 256 с.

49. Петрухин, С.С. Основы проектирования режущей части металлорежущих инструментов. Кинематическая теория [Текст] / С.С. Петрухин – М., Машиз., 1960. – 153 с.

50. Петрухин, С.С., Евдокимов В.А. Определение площади срезаемого слоя и сил резания при зубодолблении [Текст] / С.С. Петрухин, В.А. Евдокимов // Станки и инструмент. – 1971. – №2. – С.27-28.

51. Петрухин, С.С. Износ зуборезных долбяков, работающих при различных схемах резания [Текст] / С.С. Петрухин, В.А. Евдокимов, А.С. Тарапанов // Труды преподавателей и слушателей Тульского городского университета научно-технических знаний. – Тула, ТЛИ. – 1974. – Вып. 26. – С.79-86.

52. Полохин, О.В. Алгоритм управления параметрами качества зубчатых колес [Текст] / О.В. Полохин, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения – Технология – 2011. – Орел: ОрелГТУ, 2001. – с. 129-131.

53. Полохин, О.В., Определение динамических характеристик процесса нарезания зубьев инструментами червячного типа [Текст] / О.В. Полохин, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов // Известия ОрелГТУ. Машиностроение и приборостроение. – Орел: ОрелГТУ, 2000. – №4. – С.156-160.

54. Полохин, О.В. Исследование и проектирование процессов зубонарезания инструментами червячного типа [Текст] / О.В. Полохин, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов – М.: Машиностроение – 1, 2006, 141 с.

55. Полохин, О.В. Разработка и анализ математического отображения кинематической схемы резания зубьев инструментами червячного типа [Текст] / О.В. Полохин, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов // Справочник. Инженерный журнал, 2000. – №8. – С.11-14.

56. Юликов, М.И. Проектирование и производство режущего инструмента [Текст] / М.И. Юликов, Б.И. Горбунов, Н.В. Колесов. – М.: Машиностроение, 1987. – 296с.
57. Производство зубчатых колес: Справочник [Текст] / С. Н. Калашников, А. С. Калашников, Г. И. Коган и др.; под общ. ред. Б. А. Тайца. 3-е изд., перераб. и допол. – М.: Машиностроение, 1990. – 464с.
58. Режущий инструмент. Курсовое и дипломное проектирование: учебное пособие [Текст] / под ред. Е.Э. Фельдштейна – Мн.: ДизайнПРО, 1997–384с.
59. Резание металлов и режущие инструменты: учебное пособие для вузов / В.Г. Солоненко, А.А. Рыжкин. – М.:Высш.шк., 2007. – 414с.
60. Развитие науки о резании металлов [Текст] / Коллектив авторов. – М.: Машиностроение, 1967. – 415 с.
61. Родин, П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием [Текст] / П.Р. Родин – Киев: Вища школа, 1977. – 192 с.
62. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин [Текст] / Э.В. Рыжов, Г.А. Суслов, В.П. Федоров – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
63. Сахаров, Г.Н. Исследование стойкости долбяков, изготовленных из различных материалов и различными техпроцессами [Текст] / Г.Н. Сахаров, Б.Е. Седов //Усовершенствование зубообрабатывающего инструмента. – М.: НИИМАШ. – 1969. – С. 458-467.
64. Сахаров, Г.Н. Обкаточные инструменты [Текст] / Г.Н. Сахаров. – М.: Машиностроение, 1983. – 230с.
65. Семенченко, Д.И. Вопросы повышения точности червячных зуборезных фрез [Текст] / Д.И. Семенченко, А.Н. Шевченко. – М.: ВНИИ, 1968. – 97с.
66. Сидоренко, А.К. Червячные фрезы: Опыт НКМЗ [Текст] / А.К. Сидоренко. – М.: Машиностроение, 1980. – 83с.

67. Сидоренко, Л.С. Расчет параметров слоя, срезаемого кромками червячной фрезы [Текст] / Л.С. Сидоренко // Станки и инструмент. – 1992. – №9. – С. 24-26.
68. Силин, С.С. Метод подобия при резании материалов [Текст] / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
69. Соколовский, А. П. Научные основы технологии машиностроения [Текст] / А. П. Соколовский. М-Л.: Машгиз, 1955. – 515 с.
70. Стаханов, Н.Г. Методическая записка по кинематическому исследованию элементов режущей части прямозубых долбяков [Текст] / Н.Г. Стаханов – Тула: Тульский механический институт, 1960. – 48с.
71. Справочник инструментальщика [Текст] / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987. – 846с.
72. Справочник технолога-машиностроителя [Текст] в 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова [и др.]. – 5-е изд., испр. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 912 с.
73. Справочник технолога-машиностроителя [Текст] в 2 т. т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова [и др.]. – 5-е изд., испр. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 944 с.
74. Степанов, Ю.С. Применение средств машинной графики при решении задач технологического и конструкторского проектирования: учебное пособие [Текст] / Ю.С. Степанов, А.В. Коськин, М.И Рабинович – М.: Машиностроение, 1995 – 145с.
75. Сулов, А.Г. Инженерия поверхности деталей [Текст] / А.Г. Сулов – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
76. Сулов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя [Текст] / А. Г. Сулов – М.: Машиностроение, 1987. — 208 с.
77. Сулов, А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин, технологической оснастки и

инструментов [Текст] / А. Г. Суслов // Справочник. Инженерный журнал. – 1998.– № 9. – С. 25-28.

78. Схиртладзе, А.Г., Технология обработки зубчатых зацеплений в машиностроении: учебное пособие [Текст] / А.Г. Схиртладзе, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов – М.: Машиностроение, 1999. – 216с.

79. Тайц, Б.А. Точность и контроль зубчатых колес [Текст] / Б.А. Тайц – М.: Машиностроение, 1972. – 368с.

80. Тарапанов, А.С. Анализ и управление процессами обработки резанием [Текст] / А.С. Тарапанов // Известия ОрелГТУ. Машиностроение и приборостроение. Орел: ОрелГТУ. – 2000. – С.145-156.

81. Тарапанов, А.С. Разработка метода комплексного анализа процессов и управления лезвийной обработкой конструкционных материалов: дис. д-ра. тех. наук.: 05.03.01 / Тарапанов Александр Сергеевич. – Орел, 2002. – 320 с.

82. Тарапанов, А.С. Управление процессом зубодолбления [Текст] / А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов – М.: Машиностроение, 1999.– 128 с.

83. Тарапанов, А.С. Анализ и управление процессами обработки резанием [Текст] / А.С. Тарапанов // Известия ОрелГТУ. Машиностроение и приборостроение. Орел: ОрелГТУ. – 2000. – № 4. – С. 145-156.

84. Тарапанов, А.С. Исследование процесса резания зубчатых колес комплектными долбьяками: автореферат дисс. канд. тех. наук./ А.С. Тарапанов – Тула, 1976., – с.21.

85. Тарапанов, А.С., Харламов Г.А. Технологическое обеспечение точности многофакторных процессов металлообработки [Текст] / А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов // Тезисы докладов научно-технической конференции, Орел: Орел ГПИ, 1994.

86. Уваров, В.Г. Исследование процесса обработки зубчатых колес твердосплавными долбьяками: автореф. дис. канд. техн. наук. / В.Г. Уваров – Воронеж, 1972. – с.20.

87. Харламов, Г.А. Оптимизация отдельных параметров эксплуатации зуборезных долбяков: авторф. дис. канд. техн. наук. / Г.А. Харламов – Тула,



1976.– с.20.

88. Харламов, Г.А. Теория проектирования процессов лезвийной обработки. [Текст]/ Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов – М: Машиностроение, 2003. – 252с.

89. Цвис, Ю.В. Профилирование затылованных инструментов [Текст] / Ю.В. Цвис – М.: Машгиз, 1961. – 156 с.

90. Четвериков, С.М. Металлорежущие инструменты [Текст] / С.М. Четвериков – М.: Высшая школа, 1965. – 732 с.

91. Шишков, В.А. Образование поверхностей резанием по методу обкатки [Текст] / В.А. Шишков – М.: Машгиз, 1951. – 152 с.

92. Юликов, М.И. Автоматизация проектирования режущего инструмента [Текст] / М.И. Юликов. – М.: ВЗМИ, 1982. – 96с.

93. Юликов, М.И. Метод профилирования режущего инструмента, предназначенный для расчета на ЭВМ. [Текст] / М.И. Юликов, Н.В. Колесов // Науч. труды ВЗМИ т. – М.:ВЗМИ, 1975. – 155 с.

94. Юликов, М.И. Проектирование и производство режущего инструмента [Текст]. М.И. Юликов, Б.И. Горбунов, Н.В. Колесов. – М.: Машиностроение, 1987. – 296 с.

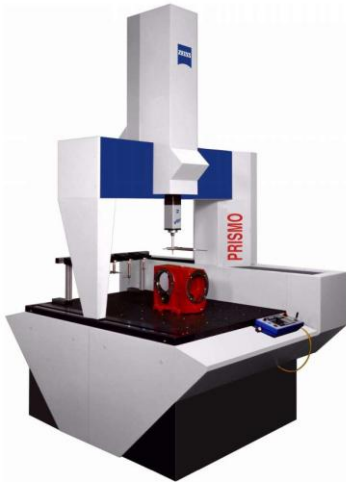
95. Юликов, М.И. Расчет долбяков фасонных профилей [Текст] / М.И. Юликов. – М. изд. ВНИИ ЦБТИ станкостроения. 1951, – 114с.

96. Dr.Hermann J. Stadtfeld CONIFLEX Plus Straight Bevel Gear Manufacturing [Text] / J. Dr.Hermann // «GEARSolutin», Aug. 2010. – 40-54 p.

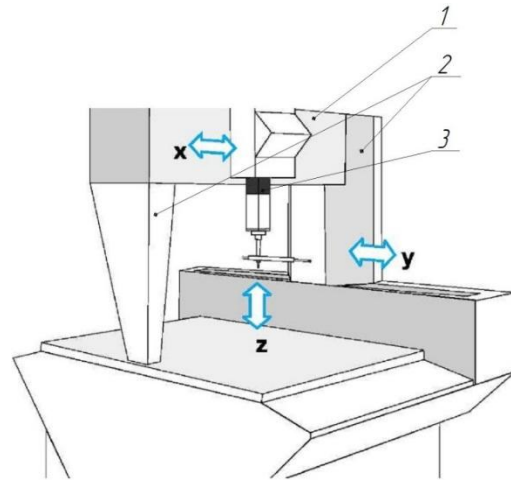
97. Dr. Carsten Hunecke The Road Leads Straight to Hypoflex [Text] / Dr. Carsten Hunecke // «GEARTECHNOLOGY», March/April 2010. – 54-57 p.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение А



*a*



*б*

ST-ATAC

VAST

RDS



*в*

**Рисунок П.А.1 – Контрольно-измерительная машина PRIZMO 7: а - общий вид КИМ; б – возможные направления перемещения и устройство КИМ: 1-траверса, 2-опора, 3-пиноль; в - щуповые системы.**

**Таблица П.Б.1 – Радиальное биение зубчатого венца  
конического колеса ( $m_s=6\text{мм}$ ,  $z=16$ ,  $\varphi=45^\circ$ )**

№	Интервалы размеров, мм	Средние размеры интервала (мм)	Абсолютная частота размеров		
			Резец ГОСТ 5392-80	Параллельная схема резания	Распределенная схема резания
1	0,015-0,025	0,02			
2	0,025-0,035	0,03		1	2
3	0,035-0,045	0,04		4	11
4	0,045-0,055	0,05		16	
5	0,055-0,065	0,06		20	18
6	0,065-0,075	0,07	1	20	21
7	0,075-0,085	0,08	9	18	21
8	0,085-0,095	0,09	15	12	8
9	0,095-0,105	0,1		6	
10	0,105-0,115	0,11	18	3	6
11	0,115-0,125	0,12	19		
12	0,125-0,135	0,13	18		
13	0,135-0,145	0,14	16		
14	0,145-0,155	0,15	4		
Среднее значение размера			0,116	0,070	0,061

Таблица П.Б.2 – Радиальное биение зубчатого венца конического колеса

(m<sub>s</sub>=6мм, z=16, φ=45°)

№	Интервалы размеров, мм	Средние размеры интервала (мм)	Абсолютная частота размеров	
			Резец ГОСТ 5392-80	Резец закрытого типа с параллельной схемой резания
1	0,045-0,055	0,05		1
2	0,055-0,065	0,06		4
3	0,065-0,075	0,07	1	11
4	0,075-0,085	0,08	9	19
5	0,085-0,095	0,09	15	17
6	0,095-0,105	0,1		17
7	0,105-0,115	0,11	18	14
8	0,115-0,125	0,12	19	9
9	0,125-0,135	0,13	18	4
10	0,135-0,145	0,14	16	3
11	0,145-0,155	0,15	4	1
Среднее значение размера, мм			0,116	0,095

Таблица П.Б.3 – Пятно контакта конической шестерни

 $(m_s=6\text{мм}, z=16, \varphi=45^\circ)$ 

№	Интервалы размеров, мкм	Средние размеры интервала (%)	Абсолютная частота размеров			
			Обычный долбяк		Долбяк с параллельной схемой резания	
			Высота пятна контакта	Длина пятна контакта	Высота пятна контакта	Длина пятна контакта
1	32,5-37,5	35	2	5		
2	37,5-42,5	40	5	9		
3	42,5-47,5	45	8	13		
4	47,5-52,5	50	11	17	4	7
5	52,5-57,5	55	14		8	10
6	57,5-62,5	60	16	18	12	15
7	62,5-67,5	65	17	15	15	17
8	67,5-72,5	70	12	13		
9	72,5-77,5	75	10	10	17	18
10	77,5-82,5	80	5		18	19
11	82,5-87,5	85			15	
12	87,5-92,5	90			11	12
13	92,5-97,5	95				2
Среднее значение размера, %			60,0	56,9	73,2	70,5

**Таблица П.Б.4 – Отклонение шага зацепления ( $m_s=6\text{мм}$ ,  $z=16$ ,  $\varphi=45^\circ$ )**

№	Интервалы размеров, мм	Средние размеры интервала (мм)	Абсолютная частота размеров	
			Резец ГОСТ 5392-80	Резец закрытого типа с параллельной схемой резания
1	-(37,5-32,5)	-0,035		
2	-(32,5-27,5)	-0,030		
3	-(27,5-22,5)	-0,025		
4	-(22,5-17,5)	-0,020		
5	-(17,5-12,5)	-0,015		4
6	-(12,5-7,5)	-0,010	4	12
7	-(7,5-2,5)	-0,005	9	
8	-2,5-2,5	0,0		16
9	2,5-7,5	0,005		17
10	7,5-12,5	0,010	18	17
11	12,5-17,5	0,015	19	14
12	17,5-22,5	0,020	20	8
13	22,5-27,5	0,025	15	7
14	27,5-32,5	0,030	11	4
15	32,5-37,5	0,035	4	1
Среднее значение размера, мм			0,0162	0,0077

Таблица П.Б.5 – Отклонение шага зацепления ( $m_s=6\text{мм}$ ,  $z=16$ ,  $\varphi=45^\circ$ )

№	Интервалы размеров, мкм	Средние размеры интервала (мм)	Абсолютная частота размеров		
			Резец ГОСТ 5392-80	Параллельная схема резания	Распределенная схема резания
1	-(37,5-32,5)	-0,035			
2	-(32,5-27,5)	-0,030			
3	-(27,5-22,5)	-0,025		1	
4	-(22,5-17,5)	-0,020		4	
5	-(17,5-12,5)	-0,015			2
6	-(12,5-7,5)	-0,010	4	16	5
7	-(7,5-2,5)	-0,005	9		11
8	-2,5-2,5	0,0		19	17
9	2,5-7,5	0,005		19	21
10	7,5-12,5	0,010	18	17	20
11	12,5-17,5	0,015	19	13	13
12	17,5-22,5	0,020	20	9	9
13	22,5-27,5	0,025	15	2	2
14	27,5-32,5	0,030	11		
15	32,5-37,5	0,035	4		
Среднее значение размера			0,0162	0,0042	0,0059

Оцениваем существенность различия между средними значениями показателей точности с помощью критерия Стьюдента:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1 - 1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2 - 1}}},$$

где  $\bar{x}_1$ ,  $\bar{x}_2$  – среднее значение партий;

$\sigma_1^2$ ,  $\sigma_2^2$  – дисперсия;

$n_1, n_2$  – число испытаний в каждой партии.

Проведя вычисления, получили критерий Стьюдента.

Для радиального биения:

- резцы открытого типа с параллельной схемой резания и резцы ГОСТ 5392-80  $t=5,37$ ;
- резцы открытого типа с распределенной схемой резания и резцы ГОСТ 5392-80  $t=6,14$ ;
- резцы закрытого типа с параллельной схемой резания и резцы ГОСТ 5392-80  $t=7,2$ .

Для пятна контакта:

- высота пятна контакта  $t=2,55$ ;
- длина пятна контакта  $t=2,4$ .

Для отклонения шага зацепления:

- резцы открытого типа с параллельной схемой резания и резцы ГОСТ 5392-80  $t=9,9$ ;
- резцы открытого типа с распределенной схемой резания и резцы ГОСТ 5392-80  $t=9,45$ ;
- резцы закрытого типа с параллельной схемой резания и резцы ГОСТ 5392-80  $t=6,86$ .

При числе степеней свободы  $f=n_1+n_2-2=198$  и вероятности 0,95  $t_0=1,966$ . Так как вычисленное  $t>t_0$ , следовательно, различие средних значений показателей точности зубчатого венца существенно.



## Приложение В

Таблица П.В.1 – Параметр шероховатости Ra боковой поверхности зубьев

№	Интервалы размеров, мм	Средние размеры интервала (мм)	Абсолютная частота размеров		
			Резец ГОСТ 5392-80	Параллельная схема резания	Распределенная схема резания
1	1,125-1,375	1,25	0	2	1
2	1,375-1,625	1,5	0	6	2
3	1,625-1,875	1,75	6	14	10
4	1,875-2,125	2,0	8	12	14
5	2,125-2,375	2,25	14	4	7
6	2,375-2,625	2,5	8	2	4
7	2,625-2,875	2,75	4	0	2
Среднее значение размера			2,225	1,850	2,025

Оцениваем существенность различия между средними значениями показателей точности с помощью критерия Стьюдента.

Проведя вычисления, получили критерий Стьюдента для параметра шероховатости боковой поверхности зубьев Ra.

- резцы открытого типа с параллельной схемой резания и резцы ГОСТ 5392-80  
 $t=3,83$ ;

- резцы открытого типа с распределенной схемой резания и резцы ГОСТ 5392-80  
 $t=2,14$ .

При числе степеней свободы  $f=n_1+n_2-2=78$  и вероятности 0,95  $t_0=1,99$ . Так как вычисленное  $t>t_0$ , следовательно, различие средних значений показателей точности зубчатого венца существенно.

## Приложение Г

Утверждаю:

Генеральный директор

ООО «Орелстроймаш»

 Медников А.И.

« 17 » января 2013г.

**АКТ**

об использовании результатов научно-исследовательской работы по исследованию обработки прямозубых конических колес

В условиях ООО «Орелстроймаш» проведены производственные испытания режимов зубострогания, предложенных в результате научно-исследовательской работы Канатникова Н.В., Харламова Г.А., выполненной на кафедре «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственного комплекса».

В ходе испытаний установлено, что предлагаемые режимы обработки прямозубых конических колес: «Колесо» (черт. ПЦО-1,8.01.08.002), «Шестерня» (черт. ПЦО-1,8.01.08.001) специальными зубострогальными резцами с дифференцированными схемами резания позволяют повысить производительность процесса обработки в 2,5 раза за счет сокращения числа проходов и увеличения окружной подачи. Износ инструмента снизился в 1,8 раза, шероховатость боковой поверхности нарезаемого зуба и степень точности обрабатываемого профиля сохраняются на прежнем уровне.

Ожидаемый годовой экономический эффект 207 962 руб.

Предложенные режимы зубострогания приняты для внедрения в производство.

Директор по производству  Борзенков В.А.

Мастер  Замуруев В.К.